НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ + ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ Том 21 1(92) + 2015

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ ★ ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. ★ ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК ★ КИЇВ

3MICT

Динаміка та управління космічними апаратами

Кунцевич В. М., Палагин А. В., Губарев В. Ф., Бабий Н. А., Волосов В. В., Лисовый А. Н., Мельничук С. В., Опанасенко В. Н., Шевченко В. Н. Разработка робастных методов прецизионного управления ориентацией малых космических аппаратов и их реализации на проблемно ориентированных процессорах

Аврамов К. В., Чернобрывко М. В., Батутина Т. Я., Дегтяренко П. Г., Тонконоженко А. М. Динамическая неустойчивость обтекателей ракет

Шульженко М. Г., Зайцев Б. П., Гонтаровський П. П., Протасова Т. В., Батутіна Т. Я., Шеремет І. В. Оцінка динамічної реакції вузлів системи розділення космічного апарата та носія при імпульсних навантаженнях

Маслова А. И., Мищенко А. В., Пироженко А. В., Храмов Д. А. Исследования закономерностей динамики электродинамической космической тросовой системы для определения возможности создания высокоэффективного устройства пассивного увода космического мусора с низких околоземных орбит

Дистанційне зондування Землі

Попов М. О., Подорван В. М., Альперт С. І. Метод класифікування гіперспектральних космічних зображень з використанням комбінаційного правила Демпстера

```
© НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ, 2015
© ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ, 2015
```

CONTENTS

Spacecraft dynamics and control

- 3 Kuntsevich V. M., Palagin O. V., Gubarev V. F., Babii N. A., Volosov V. V., Lisovyi O. M., Melnychuk S. V., Opanasenko V. M., Shevchenko V. M. Development of robust methods of precision attitude control of small spacecrafts and their implementation at the problem-oriented processors
- 10 Avramov K. V., Chernobryvko M. V., Batutina T. Ya., Degtyarenko P. G., Tonkonozhenko A. M. Dynamic instability of rockets fairings
- 15 Shulzhenko M. G., Zajtsev B. P., Gontarovskyi P. P., Protasova T. V., Batutina T. Ya., Sheremet I. V. The estimate of dynamic response of spacecraft and launcher fragmentation system components under impulsive loading
- **20** *Maslova A. I., Mischenko A. V., Pirozhenko A. V., Khramov D. A.* Research of dynamic regularities of electrodynamic space tethered system as a possible highly efficient passive deorbit systems for space debris at the low Earth orbits

Remote sensing of the Earth

25 *Popov M. O., Podorvan V. M., Alpert S. I.* A method for hyperspectral satelite image classification using dempster's combination rule

Фізика навколоземного космічного простору

Козак П. М., Козак Л. В. Метод фотометрії слабких метеорів та штучних супутників Землі із спостережень з телевізійними системами суперізокон

Черемних О. К., Гримальський В. В., Івантишин О. Л., Івченко В. М., Козак Л. В., Кошовий В. В., Мезенцев В. П., Мельник М. Е., Ногач Р. Т., Рапопорт Ю. Г., Селіванов Ю. О., Жук І. Т. Експериментальні та теоретичні дослідження штучної акустичної модифікації атмосфери та іоносфери

динамічних процесів в іоносфері, що супроводжують вплив акустичного випромінювання на приземну атмосферу

Бару Н. А., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М. Эффект расщепления модовой структуры ионосферного альвеновского резонатора

Черемних О. К., Федоренко А. К., Крючков Є. І., Черемних С. О., Беспалова А. В. Експериментальні та теоретичні дослідження резонансних явищ в магнітосферно-іоносферній плазмі

Космічна геодинаміка та геоінформатика

Чолій В. Я. До питання про точність моделей гравітаційного поля Землі

Лисаченко В. Н., Пазнухов А. В., Коленов Д. Ю., Колосков А. А. Многопозиционная диагностика среднеширотной ионосферы по данным региональной сети приемников ГНСС

Хроніка

Наші автори

Physics of the near-earth space

- Kozak P. M., Kozak L. V. Method for photometry of low light 38 level meteors and Earth artificial satellites from observations of super-isocon TV systems
- Cheremnykh O. K., Grimalsky V. V., Ivantyshyn O. L., Ivchen-48 ko V. M., Kozak L. V., Koshovy V. V., Mezentsev V. P., Melnik M. O., Nogach R. T., Rapoport Yu. G., Selivanov Yu. A., Zhuk I. T. Experimental and theoretical research of artificial acoustic modification of the atmosphere and ionosphere
- Гармаш К. П., Чорногор Л. Ф. Результати спостережень 54 Garmash K. P., Chernogor L. F. The results of observations of dynamic processes in the ionosphere that accompany the effect of acoustic radiation on the atmospheric boundary layer
 - Baru N. A., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M. The splitting 58 effect of the mode structure of the ionospheric Alfven resonator
 - Cheremnykh O. K., Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Che-64 remnykh S. O., Bespalova A. V. Experimental and theorethical investigations of resonance phenomena in the magnetospheric-ionospheric plasma

Space geodynamics and geoinformatics

- 70 Choliv V. Ya. On the precision estimates of Earth gravitation field models
- Занимонский Е.М., Литвиненко Л.Н., Ямпольский Ю.М., 77 Zanimonskiy Ye. M., Lytvynenko L. M., Yampolski Yu. M., Lisachenko V. N., Paznukhov A. V., Kolenov D. Yu., Koloskov A. A. The multiposition diagnostics of midlatitude ionosphere using the data of regional network of GNSS receivers
 - 84 News
 - 87 Our authors

Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних та технічних наук

Відповідальний секретар редакції

О.В. КЛИМЕНКО

Адреса редакції: 01030, Київ-30, вул. Володимирська, 54, тел./факс (044) 526-47-63, ел. пошта: reda@mao.kiev.ua

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

Підписано до друку 27.04.15. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс. Ум. друк. арк. 9,45. Обл.-вид. арк. 9,92. Тираж 95 прим. Зам. № 4208.

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України, 01004, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

УДК 629.7.705

В. М. Кунцевич¹, А. В. Палагин², В. Ф. Губарев¹, Н. А. Бабий¹, В. В. Волосов¹, А. Н. Лисовый², С. В. Мельничук¹, В. Н. Опанасенко², В. Н. Шевченко¹

¹Институт космических исследований Национальной академии наук Украины

и Государственного космического агентства Украины, Киев

²Институт кибернетики им. В. М. Глушкова Национальной академии наук Украины, Киев

РАЗРАБОТКА РОБАСТНЫХ МЕТОДОВ ПРЕЦИЗИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ИХ РЕАЛИЗАЦИИ НА ПРОБЛЕМНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОРАХ

Работа посвящена адаптации робастных методов эллипсоидального оценивания состояния динамических систем к решению задач управления ориентацией малых космических аппаратов. Создана программно-аппаратная реализация указанных методов на проблемно ориентированных процессорах в элементном базисе ПЛИС. Ее эффективность проиллюстрирована на примере моделирования системы управления ориентацией малого космического аппарата, в которой в качестве измерительного устройства используется трехосный магнитометр.

Ключевые слова: малый космический аппарат, управление ориентацией, метод эллипсоидов, проблемно ориентированный процессор.

В проблемах исследования космического пространства, и прежде всего в ДЗЗ и исследованиях физических процессов в ближнем космосе, все большая роль отводится малым космическим аппаратам (МКА). Миниатюризация научных приборов и служебной аппаратуры для непосредственного управления МКА, прогресс в области вычислительной техники способствовали тому, что современные МКА способны решать многие функциональные задачи, для которых ранее создавались большие КА (БКА). Производственный же цикл и себестоимость МКА существенно меньше, чем у БКА. Более того, группировки из нескольких МКА (используются термины «формации», «кластеры», «стаи» и др.) с целенаправленно изменяемой их конфигурацией позволяют решать новый класс задач

С. В. МЕЛЬНИЧУК, В. Н. ОПАНАСЕНКО,

получения синхронных измерений научной аппаратуры в заранее заданных разнесенных точках или областях пространства. Преимущества и мотивации к более широкому использованию МКА и их группировок достаточно подробно освящены во многих работах [8, 12, 13].

Функциональная полнота задач, которые способны решать создаваемые современные и перспективные МКА (будь то одиночные МКА или их формации) во многом определяются точностью их систем навигации и управления ориентацией. Создание этих систем, отвечающих все более ужесточающимся требованием, не представляется возможным без использования последних достижений теории управления и более конкретно теории управления динамическими системами (ДС) в условиях неопределенности. Под неопределенностью тут понимается неоднозначность в информации о структуре и параметрах математических моделей ДС, их текущего вектора состояния, о свойствах неконт-

[©] В. М. КУНЦЕВИЧ, А. В. ПАЛАГИН, В. Ф. ГУБАРЕВ,

Н. А. БАБИЙ, В. В. ВОЛОСОВ, А. Н. ЛИСОВЫЙ,

В. Н. ШЕВЧЕНКО, 2015

ролируемых помех измерения и действующих внешних возмущений. Для решения задач управления в условиях неопределенности исторически первыми стали использоваться методы, основанные на вероятностной интерпретации неопределенности. К этим методам относятся широко известные алгоритмы фильтра Калмана, которые получили широкое распространение в навигации и управлении изделиями аэрокосмической техники и других подвижных объектов. Их широкое распространение объясняется тем, что кроме фильтрации помех они позволяют по доступным неполным измерениям вектора состояния ДС получать его полные текущие оценки. Однако к недостаткам таких методов относится большой объем априорной информации о вероятностных свойствах неопределенности, известных на этапах разработки систем управления недостаточно точно.

Необходимость решения задач управления объектами из сферы высоких технологий привела к отказу от использования только вероятностных моделей неопределенности. Начиная с конца 1960-х гг., в теории управления появились и стали интенсивно развиваться методы, основанные на теоретико-множественной или гарантированной интерпретации неопределенности. При этом свойства неопределенных величин полностью характеризуются множествами их возможных реализаций. Они более естественно задаются лишь гарантированными интервалами (как это широко распространено в машиностроении и измерительной технике) или компактными множествами своих возможных значений. В методах оценивания и управления на основе гарантированного подхода используется существенно меньше априорной информации о свойствах неопределенности, чем при вероятностном подходе. В качестве множественных оценок свойств неопределенности наряду с интервальными оценками широко применяются их определенные обобщения — выпуклые многогранники или многомерные эллипсоиды в соответствующих пространствах. В Институте космических исследований НАН и ГКА Украины разработаны робастные методы эллипсоидального оценивания состояния ДС, сохраняющие свою работоспособность при определенных отличиях свойств неопределенности от ее априорных оценок, используемых в соответствующих алгоритмах. Эффективность использования таких методов подтверждена их использованием в алгоритмах управления реальными объектами, включая системы управления космическими аппаратами (KA).

Важное значение при создании систем управления МКА имеет эффективность реализации соответствующих алгоритмов оценивания и управление на современных средствах вычислительной техники. Перспективным представляется использование проблемно-ориентированных процессоров (ПОПр), основанных на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), или Programmable Logic Devices (PLD). ПЛИС находят все большее широкое применение в мире, в частности в Украине в Институте кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины они используются при создании проблемно ориентированных средств для высокопроизводительной обработки данных, цифровой обработки сигналов, поддержки телекоммуникаций и других.

В отличие от традиционных средств компьютерной техники с программной интерпретацией алгоритмов, проблемно-ориентированные средства на основе кристаллов ПЛИС реализуют полностью аппаратную или смешанную — программно-аппаратную интерпретацию. Их структура не является фиксированной и изменяется в зависимости от выполняемой задачи (алгоритма). Повышение производительности таких устройств обеспечивается как за счет указанной реализации алгоритмов, так и за счет высокой степени параллелизма при выполнении задачи.

Кристаллы ПЛИС фирмы «Ксилинкс» успешно использованы в системах перемещения по планете марсоходов «Спирит» и «Оппортунити».

Создание проблемно ориентированных средств на основе кристаллов ПЛИС для систем управления современными МКА обеспечит эффективную реализацию ряда алгоритмов, в частности алгоритмов управления ориентацией.

К другим важным достоинствам ПЛИС следует отнести:

• универсальность, т. е. возможность создания практически любого цифрового устройства в кристалле при наличии персонального компьютера и соответствующих инструментальных средств;

• возможность модификации проектов на любых стадиях разработки и в процессе эксплуатации. Технология IRL (Internet Reconfigurable Logic) предусматривает возможность дистанционной реконфигурации через интернет структур устройств, которые включены в эту сеть и реализованы на базе ПЛИС типа FPGA;

• высокое быстродействие, малая потребляемая мощность и высокая надежность, которые обеспечиваются технологией изготовления кристаллов;

• низкая в сравнении с заказанными и полузаказными СБИС стоимость реализации проектов за счет массового производства кристаллов с регулярной структурой и небольшим временными затратами на разработку проектов и их верификацию.

Работа посвящена исследованию эффективности интеграции вышеупомянутых робастных методов гарантированного оценивания и проблемно ориентированных вычислительных средств на основе кристаллов ПЛИС в бортовом аппаратно программном комплексе управлении ориентацией орбитального МКА.

Математическая модель управляемого углового движения малого космического аппарата при неполном измерении его вектора состояния. Введем в рассмотрение правые ортогональные системы координат — орбитальную систему координат (OCK) $Ox_0y_0z_0$ и связанную систему координат (ССК) Охуг с началом в центре масс МКА. Для определенности направим ось O_{V_0} по текущему радиусу-вектору точки О с положительным направлением во внешнюю часть орбиты, ось Ox_0 направим в сторону движения МКА. Направления осей ССК выбираются с учетом соображений симметрии МКА. Для простоты изложения рассматривается случай круговой орбиты. Предполагается, что в канале измерения используются три одноосных магнитометра, оси чувствительности которых совпадают с осями ССК. Уравнения управляемого углового движения МКА (ориентации ССК относительно ОСК) и

$$2\Lambda = B(\Lambda)[\omega - S(\Lambda)\omega_*],$$

$$\Lambda^{T} = (\lambda_0, \lambda^{T}), \qquad (1)$$

$$\lambda^{T} = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3),$$

$$J\dot{\omega} = -\breve{\omega}J\omega + m_u + m_d,$$

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^{T}, \qquad (2)$$

$$y_k = S(\Lambda_k)b_k + \xi_k, \qquad (3)$$

$$\|\xi_k\| \le c, k = 0, 1, \dots, y_k \in \mathbb{R}^3,$$

где **Л** — вектор, составленный из компонентов нормированного кватерниона (параметров Родрига — Гамильтона) [2], и для упрощения записи далее также называемый кватернионом,

$$B(\Lambda) = \begin{pmatrix} -\lambda^{\mathrm{T}} \\ \lambda_0 I_3 + \breve{\lambda} \end{pmatrix},$$

$$\breve{z} = -\breve{z}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} \times \mathbf{b} \to c = \breve{a}b,$$

$$\det \breve{z} = 0, \operatorname{rank} \breve{z} = 2 \ \forall \|\lambda\| \neq 0.$$

При этом из уравнения (1) несложно убедиться, что $\|\Lambda(t)\| = \|\Lambda(t_0)\| = 1$. Под символом $S(\Lambda)$ понимается (3×3)-ортонормированная матрица $S(\Lambda) = I_3 - 2\lambda_0 \ddot{\lambda} + 2\breve{\lambda}\breve{\lambda}$, $S(\Lambda) = S(-\Lambda)$, $S^{\mathrm{T}}(\Lambda) =$ = $S^{-1}(\Lambda)$. При этом $Z = S(\Lambda)Z_0$, где Z_0 и Z векторы, составленные из проекций произвольного вектора **z** на оси ОСК и ССК; ω – вектор, составленный из проекций абсолютной угловой скорости МКА на оси ССК, ω_* — угловая скорость орбитального вращения <u>MCK</u>, заданная в OCK, $\omega_* = (0, 0, \omega_{3*})^T$, $\omega_{3*} = -\sqrt{\mu/R^3}$, где $\mu =$ $= 398600.4 \text{ км}^3/c^2$ — гравитационная постоянная Земли, R — радиус орбиты МКА; m_{μ} и m_{d} — управляющий и возмущающий моменты; J — матрица представления в ССК тензора инерции МКА $J = J^{T} > 0$. Предполагается, что измерения осуществляются в дискретные моменты времени $t_{k+1} = t_k + T$, где T — интервал дискретности изменения управляющего момента. Вектор $y_k = y(t_k)$ составлен из проекций вектора индукции магнитного поля Земли (МПЗ) на оси ССК, искаженных неконтролируемой помехой измерений ξ_k заданной интенсивности. Вектор $b_k = b(i, u_k)$ составлен из проекций вектора индукции МПЗ согласно его заданной математической модели и полагается известным. Здесь i — наклонение орбиты, u(t) — текущий аргумент широты МКА, т. е. угол между линией узлов (линия пересечения плоскости орбиты с плоскостью экватора) и радиусом-вектором МКА. Для круговой орбиты $u(t) = u(t_0) - \omega_{3*}(t - t_0)$. В качестве математической модели МПЗ исключительно в целях упрощения изложения принималась модель вида «прямой диполь» [7].

Из уравнений (1) и (2) непосредственно следует, что вектором состояния математической модели МКА является вектор $x \in \mathbb{R}^7$, $x^{T} = (\Lambda^{T}, \omega^{T})$.

Общая постановка задачи управления ориентацией МКА и этапы ее решения. Под управлением ориентацией тут понимается такое целенаправленное изменение управляющего момента, чтобы при произвольном начальном состоянии Λ_0, ω_0 выполнялись условия

$$\lim_{t\to\infty} \left\| \Lambda(t) - \Lambda_f \right\| = 0, \ \lim_{t\to\infty} \left\| \omega(t) - \omega_f \right\| = 0,$$

где $\omega_f = S(\Lambda_f)\omega_*$ и Λ_f — заданный кватернион, определяющий требуемую ориентацию ССК относительно ОСК. Выполнение приведенных условий можно интерпретировать как переход системы (1), (2) из начального вектора состояния Λ_0, ω_0 в состояние Λ_f, ω_f и его стабилизацию. Такой вид изменения управляющего момента получен в [4] с использованием обобщения прямого метода Ляпунова в виде функции вектора состояния или иначе закона управления $m_{\mu} = F(\Lambda, \omega, \Lambda_{f}, \omega_{f}, J, p)$, где p — вектор параметров алгоритма управления. Без потери общности при выполнении компьютерного моделирования далее будем полагать $\Lambda_{f} = (\pm 1, 0, 0, 0)$, что соответствует совмещению осей ССК с осями ОСК [2].

В приведенном законе управления используется неизвестный текущий вектор состояния x. Известны только результаты измерения $y_k = y(t_k)$, зависящие от компонента Λ_k вектора состояния. Поэтому, используя известные методы оценивания полного вектора состояния ДС по результатам измерений, получим его текущие оценки $\hat{x}_k = \hat{x}(t_k)$. При этом вместо при-

веденного выше непрерывного закона управления будем использовать дискретный закон $m_{uk} = F(\widehat{\Lambda}_k, \widehat{\omega}_k, \Lambda_f, \omega_f, J, p).$ Обоснованием такой замены является тот факт, что интервал дискретности управления в современных системах достаточно мал T = 0.05...0.1 с. Для получения указанных оценок воспользуемся вышеупомянутым робастным методом эллипсоидов [5]. Не загромождая изложение деталями техники метода эллипсоидов, укажем только, что как и при применении фильтра Калмана, для оценивания вектора состояния нелинейных ДС начиная с его использования в лунном проекте «Аполло» [18], выполняется линеаризация правых частей уравнений (1) — (3) в текущей точке оценивания *x*_{*ν*}. В результате получается линейная система

$$\dot{x} = A_k x + Bm_{uk}, \quad \overline{y}_k = h_k^{\mathrm{T}} x + \xi_k , \qquad (4)$$

где $\overline{y}_k = y_k + \phi_k$, A_k и h_k , ϕ_k — известные при $t = t_k$ матрица и векторы, элементы которых являются функциями вектора-оценки \widehat{x}_k . Для полученной линейной системы (4) с использованием результатов измерений y_k и формул вида

$$\widehat{x}_{k+1} = \Psi(\widehat{x}_k, H_k, y_k, l),$$
$$H_{k+1} = \Psi(x_k, H_k, y_k, l)$$

из работы [5], где H_k — симметрическая положительно определенная 7×7-матрица $H_k = H_k^T >$ > 0 $\forall k = 0, 1, ...$ и l — вектор параметров системы и алгоритма оценивания строятся эллипсоиды $E[\hat{x}_k, H_k] = \{x \in \mathbb{R}^7 : (x - \hat{x}_k)^T H_k^{-1} (x - \hat{x}_k) \le 1\}$. Центры эллипсоидов $\hat{x}_k^T = (\hat{\Lambda}_k^T, \hat{\omega}_k^T)$ принимаются за оценку неизвестного истинного вектора состояния и используются в алгоритмах дискретного управления $m_{uk} = F(\hat{\Lambda}_k, \hat{\omega}_k, \Lambda_f, \omega_f, J, p)$.

На рисунке представлены результаты компьютерного моделирования установления заданного режима ориентации $\Lambda_f = (1, 0, 0, 0)^T$ выполненного с использованием описанных алгоритмов оценивания и управления на персональном компьютере в среде Mathlab. Рисунок показывает установление заданной ориентации $\lambda_0 \rightarrow 1$, $\lambda_i \rightarrow 0, i = 1, 2, 3$.

Аппаратная реализация расчета нового эллипсоида. Для описанных выше алгоритмов оценивания и управления разработано аппаратное ядро ПОПр, которое функционирует на частотах 50...60 МГц в кристаллах ПЛИС семейства Virtex4 и 90...100 МГц в кристаллах Virtex7 [9, 10]. Для вычисления алгоритма необходимо 100 тактов (общее время выполнения алгоритма около 2 мкс, что не превышает интервала дискретности в современных системах управления T = 0.05...0.1 с). Ядро ПОПр дает возможность оптимизировать аппаратные/временные характеристики и масштабировать устройство для обработки матриц больших порядков [11, 14 — 17]. Погрешность результатов является следствием использования 32-битовых вычислений. В случае использования обработки данных с 64-битной арифметикой, погрешности между аппаратной и программной моделями не будет.

Тестирование. Тестирования разработанного ядра ПОПр выполняется путем сравнения и анализа результатов, полученных после тестирования программной С-модели и тестирования разработанных ядер ПОПр в системе моделирования ModelSim.

В программной модели используются форматы с плавающей точкой (ФПТ) float (32 bit), double (64 bit). Поскольку обнаружено значительное влияние на накопление погрешности в результате вычисления и интерпретации входных данных в формате Single (32 bit) то ядро ПОПр реализовано в двух вариантах: с поддержкой 32битной арифметики и 64-битной арифметики.

Результаты тестирования. Результаты, полученные программной моделью, используя формат Double (64 bit), совпали с результатами аппаратной реализацией ПОПр. Результаты, полученные программной моделью, используя формат Double (64 bit), можно использовать для анализа точности вычислений 32-битной аппаратной реализации ПОПр. Погрешность в ПОПр с поддержкой 32-битного формата ФПТ имеет две составляющие: погрешность интерпретации числа из формата Double в формат Single и накопленную в процессе вычисления на 32-битном ядре ФПТ вместо 64-битного. Можно сделать вывод, что интерпретация числа из формата Double в формат Single вносит довольно существенную погрешность в конечный результат.

Незначительное отличие результатов полученных на программной модели и аппаратном ядре



ПОПр с поддержкой ФПТ 64 бит может быть обусловлено различной последовательностью выполнения операций. В случае использования одинаковой последовательности выполнения операций результаты должны полностью совпадать.

выводы

Результаты компьютерного моделирования установления заданного режима ориентации выполненного с использованием описанных алгоритмов оценивания и управления на персональном компьютере в среде Mathlab иллюстрируют работоспособность предложенных робастных алгоритмов эллипсоидального оценивания и управления для рассмотренной общепринятой математической модели углового движения МКА и его типового канала измерения.

Разработано экспериментальное ядро современного проблемно ориентированного процессора в элементном базисе ПЛИС для аппаратной реализации робастных алгоритмов оценивания и управления ДС, которые соответствуют современным тенденциям применения и развития прецизионных систем управления MKA.

Выбор формата 32 бита или 64 бита для обработки данных следует делать в зависимости от требований к погрешности вычислений. В случае использования 64-битной арифметики время выполнения алгоритма увеличится примерно в два раза, также увеличится характеристика аппаратных ресурсов для ядра ПОПр. При необходимости уменьшения времени выполнения алгоритма архитектура ПОПр может быть расширена за счет добавления дополнительных математических функций. Так как задача хорошо распараллеливается, то время выполнения может быть сокращено до 10 раз (при максимальном распараллеливании), при этом аппаратные характеристики будут существенно увеличены.

В частном случае конечную архитектуру ядра ПОПр следует выбирать, вводя ограничения на одну или несколько характеристик, таких как: аппаратные, время выполнения, желаемая погрешность. Также следует учитывать протокол интерфейса ввода/вывода.

Преимущество перед известными аналогами состоит в применении принципов реконфигурируемости, что позволит обеспечить аппаратную реализацию произвольных алгоритмов для современных и перспективных прецизионных систем управления МКА для решения важнейших задач экономики, науки, обороны и безопасности Украины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012— 2016 гг.

- 1. Абалакин В. К., Аксенов Е. П., Гребеников Е. А. и др. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. — М.: Наука, 1976. — 864 с.
- 2. *Бранец В. Н., Шмыглевский И. П.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. — М.: Наука, 1976. — 320 с.
- Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел. М.: Мир, 1990. — 292 с.
- 4. Волосов В. В., Тютюнник Л. И. Синтез законов управления ориентацией космического аппарата с использованием кватернионов // Космічна наука та технологія. 1999. 5, № 4. С. 61—69.
- Волосов В. В., Тютюнник Л. И. Робастные алгоритмы эллипсоидального оценивания состояния непрерывных и дискретных нестационарных динамических систем с неконтролируемыми возмущениями и помехами в каналах измерения // Кибернет. и вычисл. техн. — 2002. — Вып. 135. — С. 3—8.
- 6. Волосов В. В., Хлебников М. В., Шевченко В. Н. Алгоритм прецизионного управления ориентацией космического аппарата при действии неконтролируемого возмущения // Проблемы управления и информатики. 2011. № 2. С. 114—121.

- Коваленко А. П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1975. — 248 с.
- Макриденко Л. А., Волков С. Н., Ходненко В. П., Золотой С. А. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов // Вопр. электромеханики. — 2010. — 114. — С. 15—26.
- 9. Опанасенко В. Н., Лисовый А. Н. Бортовые проблемно-ориентированные процессоры для аппаратной реализации алгоритмов управления космическими аппаратами // Проблеми інформатизації та управління: Зб. наук. праць НАУ. — 2014. — Вип. 3 (47). — С. 70—74.
- 10. Опанасенко В. Н., Лисовый А. Н., Шевченко В. М. Методы и алгоритмы робастного управления МКА и их реализация на базе ПЛИС // Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT-2014): 36. тез VII Міжнар. науково-технічної конф., Київ, 17—19 квітня 2014 р. Київ: НАУ, 2014. С. 164.
- 11. Палагин А. В., Опанасенко В. Н., Крывый С. Л. Метод синтеза структур для преобразований циклического кода на базе FPGA // Электронное моделирование. — 2014. — **36**, № 2. — С. 27—48.
- Севастьянов Н. Н., Бранец В. Н., Панченко В. А. и др. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли // Тр. Моск. физ-техн. ин-та. — 2009. — 1, № 3.
- 13. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В. и др. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информ.-управ. системы. — 2013. — № 1(62). — С. 16—26.
- Kondratenko Y. P., Gordienko E. Implementation of the neural networks for adaptive control system on FPGA // Prooceeding of 23rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. - 2012.-23, N 1. - P. 389-392.
- 15. *Opanasenko V. N., Kryvyi S. L.* Прямая задача синтеза адаптивных логических сетей // Int. J. Inform. Technol. and Knowledge. 2014. **8**, N 1. P. 3–12.
- Palagin A. V., Opanasenko V. N. Design and application of the PLD-based reconfigurable devices // Des. Digit. Syst. and Devices. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — 79. — P. 59—91.
- Palagin A., Opanasenko V., Krivoi S. The structure of FPGA-based cyclic-code converters // Opt. Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2013. – 22, N 4. – P. 207–216.
- Schmidt S. F. The Kalman filter: its recognition and development for aerospace applications // J. Guidance and Control. - 1981. - 4, N 1. - P. 4-7.

Стаття надійшла до редакції 17.12.2014

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

В. М. Кунцевич¹, О. В. Палагін², В. Ф. Губарев¹, Н. А. Бабій¹, В. В. Волосов¹, О. М. Лісовий², С. В. Мельничук¹, В. М. Опанасенко², В. М. Шевченко¹

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Київ

² Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова Національної академії наук України, Київ

РОЗРОБКА РОБАСТНИХ МЕТОДІВ ПРЕЦИЗІЙНОГО УПРАВЛІННЯ ОРІЄНТАЦІЄЮ МАЛИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ТА ЇХНЬОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ НА ПРОБЛЕМНО ОРІЄНТОВАНИХ ПРОЦЕСОРАХ

Робота присвячена адаптації робастних методів еліпсоїдального оцінювання стану динамічних систем до вирішення завдань управління орієнтацією малих космічних апаратів. Створено програмно-апаратну реалізацію зазначених методів на проблемно орієнтованих процесорах в елементному базисі на програмованих логічних інтегральних схемах ПЛІС. Її ефективність проілюстровано на прикладі моделювання системи керування орієнтацією малого космічного апарата, де як вимірювальний пристрій використовується тривісний магнітометр.

Ключові слова: малий космічний апарат, управління орієнтацією, метод еліпсоїдів, проблемно орієнтований процесор.

V. M. Kuntsevich¹, O. V. Palagin², V. F. Gubarev¹, N. A. Babii¹, V. V. Volosov¹, O. M. Lisovyi², S. V. Melnychuk¹, V. M. Opanasenko², V. M. Shevchenko¹
¹Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv
²V. M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv
DEVELOPMENT OF ROBUST METHODS OF PRECISION ATTITUDE CONTROL

OF PRECISION AT ITTUDE CONTROL OF SMALL SPACECRAFTS AND THEIR IMPLEMENTATION AT THE PROBLEM-ORIENTED PROCESSORS

The work is devoted to the adaptation of robust ellipsoidal state estimation methods for dynamic systems to the changes of attitude control of small spacecrafts. Software and hardware implementation of these methods at the problem-oriented processors in FPGAs element basis is established. Its effectiveness is illustrated by the example of the attitude control system of small spacecraft, when a three-axis magnetometer is using as a measuring device.

Key words: small spacecraft, attitude control, ellipsoid method, problem oriented processor.

УДК 539.3; 624.074

К. В. Аврамов¹, М. В. Чернобрывко¹, Т. Я. Батутина², П. Г. Дегтяренко², А. М. Тонконоженко²

¹ Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков ² Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск

ДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ

Рассматриваются аэроупругие колебания обтекателей ракет-носителей, которые являются параболическими или коническими оболочками. Такие оболочки усиливаются изнутри стрингерами и шпангоутами. Исследуется динамическая неустойчивость таких конструкций в сверхзвуковом газовом потоке, который описывается поршневой теорией.

Ключевые слова: колебания обтекателя, коническая оболочка со шпангоутами, сверхзвуковой газовый поток, пространственная форма потери устойчивости.

введение

Рассматриваются обтекатели ракет-носителей, которые защищают полезный груз при выводе его на орбиту. В процессе полета ракеты обтекатели взаимодействуют со сверхзвуковым газовым потоком. Эти конструкции моделируются тонкими оболочками, которые могут быть параболической или конической формы. Они сочленяются с цилиндрической оболочкой. Внутри такие конструкции часто усиливаются стрингерами и шпангоутами.

Свободные колебания и динамическая неустойчивость параболических обтекателей ракетносителей рассматривается в работах [6, 7, 11]. Оребрению тонкостенных конструкций посвящены статьи [3, 4].

Ниже коротко представлены результаты исследований динамической неустойчивости конических оребренных шпангоутами обтекателей ракет-носителей в сверхзвуковом газовом потоке.

Из экспериментальных исследований следует, что при скоростях полета ракеты немного больше одного Маха наблюдаются интенсивные автоколебания обтекателей. В отдельных случаях такие колебания могут привести к разрушению конструкции или к поломкам полезного груза.

постановка задачи и методы исследования

Обтекатель ракеты-носителя моделируется тонкой оболочкой. Поэтому сдвиги и инерция вращения не учитывается. Напряжения и деформации в оболочке предполагаются малыми, поэтому они удовлетворяют закону Гука. Предполагается, что напряженно-деформированное состояние оболочки описывается гипотезами Киргофа — Лява. Коническая оболочка высотой *H* и радиусом основания *R* является изотропной и тонкой (рис. 1). Оболочка имеет постоянную толщину *h*. Предполагается, что в основании оболочка жестко защемлена.

Образующая конической оболочки имеет с осью z угол α . Изнутри оболочка усиливается N кольцами, которые располагаются параллельно основанию оболочки на одинаковом расстоянии друг относительно друга. Предполагается, что все кольца изготовлены из одинакового материала и имеют одинаковые поперечные сечения. Кольца изгибаются в своей плоскости и в перпендикулярном направлении. Более того, они

[©] К. В. АВРАМОВ, М. В. ЧЕРНОБРЫВКО, Т. Я. БАТУТИНА, П. Г. ДЕГТЯРЕНКО, А. М. ТОНКОНОЖЕНКО, 2015

испытывают кручение и растяжение-сжатие. При колебаниях обшивки кольца совершают изгибно-изгибно-крутильно-продольные колебания [8].

Свяжем с оболочкой криволинейную систему координат (s,ϕ,ξ) (рис. 1). Коэффициенты Лямэ принимают следующие значения: $A_1 = 1$, $A_2 = s \cdot \sin \alpha$. Радиусы кривизн координатных линий *s* и ϕ таковы: $R_s = +\infty$, $R_{\phi} = s \cdot tg\alpha$. Шпангоуты крепятся в точках со следующими значениями координат образующей:

 $s_i^* = j H / [(N+1)\cos\alpha], \ j = \overline{1, N}.$

Проекции перемещений точек оболочки на направления s, ϕ и ξ обозначим $u(s,\phi,t)$, $v(s,\phi,t)$ и $w(s,\phi,t)$ соответственно.

Колебания оболочки опишем системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно обобщенных координат. Для вывода этих уравнений воспользуемся методом заданных форм [2], который использует уравнения Лагранжа.

Потенциальная энергия конструкции представляется в виде суммы потенциальной энергии конической оболочки Π_1 и потенциальных энергий всех шпангоутов $\Pi_2^{(j)}$:

$$\Pi = \Pi_1 + \sum_{j=1}^N \Pi_2^{(j)} \,.$$

Потенциальная энергия конической обшивки принимает вид

$$\Pi_{1} = D_{1} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{L} \left[(E_{1} + E_{2})^{2} - \kappa \left(E_{1}E_{2} - \frac{\Omega_{1}^{2}}{4} \right) \right] \cdot sds \, d\phi + + D_{2} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{L} \left[(K_{1} + K_{2})^{2} - \kappa (K_{1}K_{2} - \Omega_{2}^{2}) \right] \cdot sds \, d\phi + + D_{3} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{L} \left\{ E_{1}K_{1} + E_{2}K_{2} + \nu (E_{1}K_{2} + E_{2}K_{1}) + + (1 - \nu)\Omega_{1}\Omega_{2} \right\} ds \, d\phi.$$
(1)

Здесь

$$D_{1} = \frac{Eh \cdot \sin \alpha}{2(1 - v^{2})}, \quad D_{2} = \frac{Eh^{3} \sin \alpha}{24(1 - v^{2})},$$
$$D_{3} = \frac{Eh^{3} \cos \alpha}{12(1 - v^{2})}, \quad \kappa = 2(1 - v),$$

Е — модуль Юнга, **v** — коэффициент Пуассона,

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

$$E_{1} = \frac{\partial u}{\partial s}, \quad K_{1} = -\frac{\partial^{2} w}{\partial s},$$

$$E_{2} = \frac{1}{stg\alpha} \left(\frac{\partial v}{\partial \phi} + utg\alpha + w \right),$$

$$K_{2} = \left(\frac{1}{s^{2}tg^{2}\alpha} \left[\frac{\partial v}{\partial \phi} - \frac{\partial^{2} w}{\partial \phi^{2}} \right] - \frac{\partial w}{s\partial s} \right),$$

$$\Omega_{1} = \frac{\partial v}{\partial s} - \frac{v}{s} + \frac{\partial u}{\partial \phi} \cdot \frac{1}{stg\alpha}.$$

Свяжем со шпангоутом локальную систему координат $(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j, \tilde{z}_j)$; ось \tilde{y}_j располагается вдоль продольной координаты шпангоута; ось \tilde{z}_j направлена вдоль образующей конической оболочки; ось \tilde{x}_j располагается так, что $(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j, \tilde{z}_j)$ образуют правую тройку векторов. Изгиб шпангоута в двух плоскостях описывается перемещениями $u_j(\tilde{y}_j, t)$ и $w_j(\tilde{y}_j, t)$. Растяжениесжатие шпангоута описывается перемещениями $v_j(\tilde{y}_j, t)$, а кручение моделируется функцией угла поворота $\phi_j(\tilde{y}_j, t)$. Потенциальную энергию *j*-го шпангоута представим в следующем виде:

$$\Pi_{2}^{(j)} = \frac{1}{2} \oint \left(E_{j} F_{j} \left(\frac{\partial v_{j}}{\partial \tilde{y}_{j}} - \frac{w_{j}}{R_{j}} \right)^{2} + E_{j} J_{Z_{j}} \left(\frac{\partial^{2} u_{j}}{\partial \tilde{y}_{j}^{2}} + \frac{\varphi_{j}}{R_{j}} \right)^{2} + E_{j} J_{X_{j}} \left(\frac{\partial^{2} w_{j}}{\partial \tilde{y}_{j}^{2}} + \frac{w_{j}}{R_{j}^{2}} \right)^{2} + G_{j} J_{j} \left(\frac{\partial u_{j}}{R_{j} \partial \tilde{y}_{j}} - \frac{\partial \varphi_{j}}{\partial \tilde{y}_{j}} \right)^{2} \right) d\tilde{y}_{j}, \qquad (2)$$

где E_j, G_j — модуль Юнга и модуль сдвига *j*-го шпангоута, F_i — площадь поперечного сечения



Рис. 1. Срединная поверхность конической оболочки со шпангоутами

шпангоута, J_{Z_j}, J_{X_j}, J_j — моменты инерции поперечных сечений шпангоута, R_j — радиус кривизны срединной линии *j*-го шпангоута.

Одна из сторон шпангоута жестко связана с внутренней поверхностью оболочки. Эта связь выражается соотношениями между обобщенными перемещениями оболочки и шпангоутов, которые представлены в работе [3]. Эти соотношения позволяют представить потенциальную энергию шпангоута через перемещения оболочки. Поэтому потенциальную энергию всей конструкции удается выразить через компоненты перемещений оболочки.

Кинетическая энергия конструкции состоит из кинетической энергии оболочки T_1 и кинетических энергий всех шпангоутов $T_2^{(j)}$: $T = T_1 + \sum_{j=1}^{N} T_2^{(j)},$

где

$$T_1 = \frac{\rho h}{2} \int_{0}^{2\pi} \int_{0^+}^{L} s[\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2] \sin \alpha \, ds \, d\phi \, ,$$

ρ — плотность материала оболочки.

Оболочка снаружи обтекается газовым потоком. На значительном удалении от оболочки поток движется в положительном направлении оси z со сверхзвуковой скоростью V_f . В непосредственной близости от оболочки наблюдаются возмущения в параметрах потока. Используя соотношения поршневой теории [5, 7], виртуальную работу аэродинамического давления δA , действующего на поверхность оболочки, представим так:

$$\frac{\sqrt{M^2 - 1}}{V_f \rho_f} \delta A = -\int_0^{2\pi} \int_{0^+}^{L} \left(V_f \frac{\partial w}{\partial s} + \frac{M^2 - 2}{M^2 - 1} \cdot \dot{w} \right) \cdot s \sin \alpha \cdot \delta w ds \, d\phi \,, \tag{3}$$

где *М* — число Маха, ρ_f — плотность газа.

Динамику оболочки опишем моделью с конечным числом степеней свободы. Для вывода этой модели воспользуемся методом заданных форм. Компоненты перемещений оболочки разложим в ряд по собственным формам колебаний $U_n(s,\phi)$, $V_n(s,\phi)$, $W_n(s,\phi)$ так:

$$u(s,\phi,t) = \sum_{n=1}^{N_u} q_n^{(u)}(t) U_n(s,\phi);$$

$$v(s,\phi,t) = \sum_{n=1}^{N_v} q_n^{(v)}(t) V_n(s,\phi);$$
(4)
$$v(s,\phi,t) = \sum_{n=1}^{N_w} q_n^{(w)}(t) W_n(s,\phi),$$

где

$$q^{(u)} = [q_1^{(u)}, \dots, q_{N_u}^{(u)}],$$

$$q^{(v)} = [q_1^{(v)}, \dots, q_{N_v}^{(v)}],$$

$$q^{(w)} = [q_1^{(w)}, \dots, q_{N_w}^{(w)}]$$

— векторы обобщенных координат. Разложения для перемещений (4) вводятся в кинетическую и потенциальную энергии конструкции и производятся необходимые интегрирования. В результате кинетическая и потенциальная энергии представляются в виде квадратичных форм относительно обобщенных координат и обобщенных скоростей. Тогда уравнения Лагранжа системы можно представить в виде

$$\begin{split} M_{11}\ddot{q}^{(u)} + K_{11}q^{(u)} + K_{12}q^{(v)} + K_{13}q^{(w)} &= 0, \\ M_{22}\ddot{q}^{(v)} + K_{21}q^{(u)} + K_{22}q^{(v)} + K_{23}q^{(w)} &= 0, \\ M_{33}\ddot{q}^{(w)} + K_{31}q^{(u)} + K_{32}q^{(v)} + K_{33}q^{(w)} + \\ &+ K^{(w)}q^{(w)} + C^{(w)}\dot{q}^{(w)} &= 0, \end{split}$$

где M_{ii} — матрицы масс, которые являются диагональными, K_{il} — матрицы жесткости, $C^{(w)}$ матрица аэродинамического демпфирования, $K^{(w)}$ — матрица аэродинамической жесткости.

Для анализа динамической неустойчивости конструкции рассчитывались характеристические показатели [1, 9]. Они находились при различных значениях чисел Маха. Определялся диапазон чисел Маха, где наблюдается динамическая неустойчивость.

Особое внимание в работе уделялось исследованию формы оболочки при потере ею динамической устойчивости в сверхзвуковом газовом потоке. Для этого был разработан подход, описанный в работе [7]. С помощью этого подхода численно исследовалась форма потери устойчивости конструкции.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим четыре варианта конструкции. Все конструкции состоят из конической оболочки высотой H = 5.24 м, радиусом R = 1.95 м и тол-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

щиной h = 2 мм с механическими характеристиками материала: E = 72 ГПа, $\rho = 2770$ кг/м³, $\nu = 0.3$. Первая конструкция представляет собой коническую оболочку без шпангоутов. Вторая, третья и четвертая конструкции содержат три, пять и семь шпангоутов соответственно. Площадь поперечных сечений шпангоутов $F_j =$ = 570 мм². Расстояния между шпангоутами выбирались равными между собой и краями оболочки. Механические характеристики материала ребер не отличались от характеристик оболочки.

Проводились исследования собственных частот колебаний конструкций с различным числом шпангоутов методом Релея — Ритца. Полученные результаты сравнивались с данными программного комплекса ANSYS. Максимальная относительная погрешность не превышала 3 %.

На рис. 2 показаны графики собственных частот колебаний конструкций в зависимости от их номера n.

В результате численного анализа было установлено, что все четыре конструкции имеют одинаковый диапазон динамической неустойчивости для значений $M : 1.01 \le M \le 1.414$. При M > 1.414 состояние равновесия конструкции устойчиво.

Численно определялась частота начала автоколебаний Ω_1 с помощью подхода, предложенного в работе [7]. Фактически находится частота, с которой колеблется конструкция при потере устойчивости. В таблице представлены результаты расчетов для моделей оболочек с 9, 12, 15, 18 и 21 степенями свободы. Как видно, для четырех рассматриваемых конструкций сходимость полученных результатов наблюдается при 15 степенях свободы.

Исследовались формы оболочки при начале автоколебаний конструкции в сверхзвуковом га-

				1.
$N_{_{w}}$	Без ребер	3 ребра	5 ребер	7 ребер
9	63.180	65.623	57.841	58.256
12	57.113	58.938	60.113	60.147
15	56.657	60.007	60.532	60.734
18	56.392	60.319	61.096	61.045

Значения критических частот автоколебаний Ω₁, Гц



Рис. 3. Форма потери динамической устойчивости конической оболочки с семью ребрами

зовом потоке. В качестве примера на рис. 3 представлена форма потери динамической устойчивости конической оболочки с семью ребрами.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Исследуется динамическая неустойчивость параболических и конических обтекателей ракетносителей. Анализируются конструкции без усилений и конструкции со шпангоутами. Исследуются области динамической неустойчивости конструкций.

В дальнейшем нами будут исследоваться нелинейные колебания обтекателей ракет-носителей. В области динамической неустойчивости



Рис. 2. Графики собственных частот колебаний конструкций: 1 — оболочка без ребер; 2, 3, 4 — оболочки с тремя, пятью, семью ребрами соответственно

амплитуды колебаний конструкции на начальных интервалах времени растут. При амплитудах колебаний порядка толщины оболочки конструкция ведет себя геометрически нелинейно [10, 12]. Вследствие геометрической нелинейности амплитуды колебаний конструкции ограничиваются, и в системе возникает предельный цикл (автоколебания). Такие движения будут предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012—2016 гг.

- 1. *Аврамов К. В.* К аэроупругому взаимодействию пластин с трехмерным, безвихревым, идеальным газовым потоком // Доп. НАН України. 2013. № 9. С. 57—63.
- Аврамов К. В., Михлин Ю. В. Нелинейная динамика упругих систем. — М. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. — 704 с.
- Аврамов К. В., Морачковский О. К., Тонконоженко А. М. и др. Полуаналитический метод конечных элементов для расчета напряженно-деформируемого состояния цилиндрических оболочек с продольными ребрами // Пробл. машиностр. — 2014. — 17. — С. 34—43.
- 4. Аврамов К. В., Морачковский О. К., Тонконоженко А. М., Кожарин В. Ю. Численный анализ разрушающих нагрузок оребренных баков ракетоносителей // Авиац.-космич. техн. и технол. — 2014. — № 5(112). — С. 40—47.
- 5. Бочкарев С. А., Матвеенко В. П. Панельный флаттер вращающихся круговых оболочек, обтекаемых сверхзвуковым потоком // Вычисл. мех. сплош. сред. — 2008. — № 3. — С. 25—33.
- 6. Чернобрывко М. В., Аврамов К. В. Собственные колебания параболических оболочек // Мат. методы и физ.-мех. поля. — 2014. — 4. — Р. 18—20.
- Чернобрывко М. В., Аврамов К. В., Батутина Т. Я. и др. Динамическая неустойчивость обтекателей ракетоносителей в полете // Пробл. машиностр. — 2014. — 17. — С. 9—16.
- Avramov K. V., Pierre C., Shyriaieva N. Flexural-flexural-torsional nonlinear vibrations of pre-twisted rotating beams with asymmetric cross-sections // J. Vibrat. and Contr. – 2007. – 13. – P. 329–364.
- 9. Avramov K. V., Strel'nikova E. A., Pierre C. Resonant many-mode periodic and chaotic self-sustained aeroelas-

tic vibrations of cantilever plates with geometrical nonlinearities in incompressible flow // Nonlin. Dyn. -2012. -**70**. - P. 1335-1354.

- Breslavsky I. D., Strel'nikova E. A., Avramov K. V. Dynamics of Shallow Shells with Geometrical Nonlinearity Interacting with Fluid // Comput. and Struct. – 2011. – 89. – P. 496–506.
- Chernobryvko M. V., Avramov K. V., Romanenko V. N., et al. Free linear vibrations of parabolic shells // Meccanica. - 2014. - 49. - P. 14-21.
- Kochurov R., Avramov K. V. On effect of initial imperfections on parametric vibrations of cylindrical shells with geometrical non-linearity // Int. J. Solids and Struct. 2012. 49. P. 537–545.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2014

К. В. Аврамов¹, М. В. Чернобривко¹, Т. Я. Батутина²,

П. Г. Дегтяренко², А. М. Тонконоженко²

¹ Інститут проблем машинобудування

ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків

² Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

ДИНАМІЧНА НЕСТІЙКІСТЬ ОБТІЧНИКІВ РАКЕТ

Розглядаються аеропружні коливання обтічників ракетносіїв, які є параболічними або конічними оболонками. Такі оболонки посилюються зсередини стрингерами і шпангоутами. Досліджується динамічна нестійкість таких конструкцій в надзвуковому газовому потоці, який описується поршневою теорією.

Ключові слова: коливання обтічника, конічна оболонка зі шпангоутами, надзвуковий газовий потік, просторова форма втрати стійкості.

K. V. Avramov¹, M. V. Chernobryvko¹, T. Ya. Batutina², P. G. Degtyarenko², A. M. Tonkonozhenko²

- ¹A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv
- ²Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk

DYNAMIC INSTABILITY OF ROCKETS FAIRINGS

Aeroelastic vibrations of rockets fairing, which are parabolic or conic shells, are considered. These shells are faded-in by stringers and rings. The dynamic instability of such structures in supersonic gas stream is analyzed.

Key words: vibrations of rocket deflector, ring-stiffened conical shells, supersonic gas stream, shell space mode.

УДК 629.764:539.3

М. Г. Шульженко¹, Б. П. Зайцев¹, П. П. Гонтаровський¹, Т. В. Протасова¹, Т. Я. Батутіна², І. В. Шеремет² ¹ Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків ² Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

ОЦІНКА ДИНАМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ ВУЗЛІВ СИСТЕМИ РОЗДІЛЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТА ТА НОСІЯ ПРИ ІМПУЛЬСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Описуються методики розрахунків перехідних вібраційних процесів в елементах вузлів розділення космічних систем. Перша методика заснована на використанні тривимірних моделей та прямому чисельному інтегруванні кінцево-різницевих рівнянь без суттєвих обмежень на конструктивні особливості. Друга методика базується на поєднанні методу скінченних елементів з представленням розв'язку в окружному напрямку рядами Фур'є та орієнтована на клас конструкцій у вигляді тіл обертання. Наводяться результати розрахунку динамічної реакції вузла конструкції на імпульсну дію, які отримано за описаними методиками та з використанням стандартного комплексу. Розрахунково оцінюється вплив пружноінерційних характеристик елементів вимірювальної апаратури на характеристики динамічних процесів розглянутої конструкції.

Ключові слова: конструкція, імпульсне навантаження, перехідний процес, тривимірна модель, метод скінченних елементів.

ВСТУП

Експлуатація аерокосмічних конструкцій може супроводжуватись короткоімпульсними силовими навантаженнями (50 — 200 мкс), спричиненими спрацюванням систем розділення або дією аеродинамічної хвилі. Навантаження при цьому локалізуються або поширюються по поверхні конструкції та збуджують хвильові процеси, що з часом переходять у вільні коливання. При чисельному моделюванні коливань таких систем [1, 2] доцільним є тривимірне представлення навіть тонкостінних конструкцій з необхідною їхньою дискретизацією за просторовими координатами та процесів за часом.

При розділенні ракети-носія і космічного апарата внаслідок спрацювання піропристроїв виникають динамічні перевантаження. При цьому в частинах конструкції розвиваються значні прискорення, що впливає на надійність роботи обладнання. Питання зниження їхнього перевантаження можна вирішувати експериментально на основі витратних досліджень моделей чи натурних об'єктів. Використання розрахункових методик оцінки перехідних процесів може суттєво знизити витрати при розв'язанні цієї задачі.

Вузли розділення мають конструкції різного типу: простіші, але достатньо поширені, у вигляді тіл обертання та складніші, з довільною формою та неоднорідними включеннями різного виду демпфуючих елементів.

ОПИС МЕТОДИК

Для розрахунків вузлів та елементів космічних апаратів розроблено відносно спрощені та більш складні розрахункові моделі та створено відповідне програмне забезпечення на основі:

• класичного методу скінченних елементів за тривимірною моделлю [3, 5], якою передбачено загальний тип конструкції вузла розділення з введенням різнорідних анізотропних елементів,

[©] М. Г. ШУЛЬЖЕНКО, Б. П. ЗАЙЦЕВ, П. П. ГОНТАРОВСЬКИЙ, Т. В. ПРОТАСОВА, Т. Я. БАТУТІНА, І. В. ШЕРЕМЕТ, 2015



Рис. 1. Модель адаптера ракети-носія

які виконують функцію додаткового демпфування. При моделюванні механічних нестаціонарних процесів допускається однобічний контакт елементів, що враховується спеціальними моделями розрізів та алгоритмом розв'язання динамічної контактної задачі. Внаслідок універсальності швидкодія цього програмного забезпечення є невисокою, але область застосування його є ширшою;

• напіваналітичного методу скінченних елементів у циліндричній системі координат для конструктивних вузлів типу тіл обертання з розкладанням невідомих у ряди Фур'є по окружній координаті [4]. Це суттєво зменшує витрати на розрахунки за рахунок розділення системи рівнянь методу скінченних елементів на низку систем меншої розмірності для окремих гармонік, що дозволяє оперативно виконувати проектні дослідження в умовах конструкторського бюро. Обсяг обчислень скорочується за наявності однієї чи декількох меридіональних площин симетрії.

Переміщення на скінченному елементі задаються у вигляді

$$u_{v}(\xi, \eta, \theta, t) = u_{vik}(t) \cdot \varphi_{i}(\xi, \eta) \cdot \varphi_{k}(\theta),$$

$$u_{\theta}(\xi, \eta, \theta, t) = u_{\theta i k}(t) \cdot \varphi_{i}(\xi, \eta) \cdot \overline{\varphi}_{k}(\theta), \qquad (1)$$

$$(v = r, z; i = 1, 2, 3, 4; k = 0, ..., n)$$

де u_{vik} , $u_{\theta ik}$ — амплітудні значення розподілу переміщень у вузлах скінченних елементів, $\phi_i(\xi, \eta)$ — координатні функції скінченного елемента, $\phi_k(\theta)$, $\overline{\phi}_k(\theta)$ — координатні функції в окружному напрямку, що мають вигляд

$$\phi_0(\theta) = \overline{\phi}_0(\theta) = 1,$$

$$\phi_k(\theta) = \cos(0.5(k+1)\theta), \ \overline{\phi}_k(\theta) = \cos(0.5k\theta)$$

(при k = 1, 3, 5, ...) (2)

$$φ_k(θ) = sin(0.5kθ), φ_k(θ) = sin(0.5(k+1)θ)$$
(при k = 2, 4, 6, ...)

Рівняння динамічного стану конструкції у матричній формі подаються у вигляді

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = F,$$
(3)

де u — вектор вузлових переміщень, [C] — матриця демпфування, F — вектор вузлових сил від зовнішнього навантаження, [K], [M] — матриці жорсткості й мас тіла.

В обох методиках система матричних диференціальних рівнянь деформування конструкції інтегрується за часом неявним скінченно-різницевим θ-методом Вільсона або методом Ньюмарка.

Програмне забезпечення має розвинутий графічний інтерфейс для аналізу напружено-деформованого стану конструкції в окремі моменти часу чи зміни його за часом у вигляді графіків переміщень, швидкостей та прискорень в окремих вибраних точках конструкції.

ОЦІНКА ДИНАМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ ВУЗЛА КОНСТРУКЦІЇ

Виконано верифікацію алгоритмічного та програмного забезпечення шляхом зіставлення розрахункових даних, отриманих за розробленими методиками та комплексом ANSYS, на прикладі адаптера ракети-носія (рис. 1) вузла розділення.

Результати розрахунків адаптера від імпульсних зосереджених навантажень внаслідок спрацювання піропристроїв під час другої фази розділення за різними методами представлено на рис. 2. Тривалість імпульсу, що прийнята рівною 100 мкс, та його величина визначаються з експериментальних даних (представлені КБ «Південне»).

Наведене засвідчує, що розрахункові дані подібні, мають місце деякі відмінності, але за максимальними значеннями, зокрема прискореннями, є близькими, а створене методикопрограмне забезпечення задовольняє вимоги по відповідності цих результатів.

 u_z , CM

На базі створеного програмного забезпечення проведено розрахункові дослідження збіжності розв'язань та впливу параметрів навантаження і конструкції на кінематичні характеристики адаптера ракети-носія.

Досліджено вплив та точність результатів геометричної та часової дискретизації і кількості складових у розкладах Фур'є. З підвищенням



6.0 3.7 1.4 -0.9-3.2-5.5-7.8а *v*_z, 10²см/с 5.4 2.6 0.2 -2.9-5.7-8.5-11.2б *w*_z, 10⁷см/с² 1.9 1.2 0.4 2 -0.3-1.0-1.7-2.40 0.2 0.6 0.4 0.8 t, мс в

Рис. 3. Кінематичні параметри в контрольній точці (a — переміщення, δ — швидкості, e — прискорення): 1 — без врахування ЕВА, 2 — з урахуванням ЕВА

тривалості імпульсу навантаження у межах 50— 400 мкс при сталій його величині максимальні значення кінематичних параметрів адаптера ракети-носія значно зменшуються.

При відпрацюванні технологій розділення конструкцій в КБ «Південне» виконуються екс-

Рис. 2. Кінематичні параметри в контрольній точці за різними методиками (*a* — переміщення, *б* — швидкості, *в* — прискорення): *1* — напіваналітичний МСЕ, *2* — класичний МСЕ, *3* — ANSYS

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

периментальні дослідження для знімання інформації про перевантаження під дією короткоімпульсних навантажень. При цьому елементи (давачі) встановленої вимірювальної апаратури (EBA), що приєднується до досліджуваної конструкції, фактично стають її частиною, змінюючи масові й жорсткості характеристики. Однак основним фактором спотворення є зняття інформації з деякої площадки, по якій відбувається контакт давача та конструкції, а не в умовній точці постановки давача. Фактично при цьому відбувається усереднення вимірюваної характеристики.

У зв'язку з цим для розглянутої конструкції виконано числові дослідження з визначення впливу приєднаних ЕВА на розрахункові характеристики вузла космічного агрегату. При моделюванні приєднання ЕВА враховано додаткову масу, розподілену по площадці контакту ЕВА з конструкцією (затемнена зона на рис. 1. Оскільки давач є відносно жорстким елементом, то його кріплення призводить до збільшення жорсткості частини конструкції, що відноситься до площадки контакту. Цю особливість враховано збільшеними характеристиками матеріалу шару скінчених елементів поблизу площадки кріплення ЕВА.

На рис. 3 приведено розраховані значення переміщення u_z , швидкості v_z та прискорення w_z в напрямку дії імпульсних сил.

Отримані результати свідчать про значний вплив ЕВА на параметри досліджуваної конструкції, що вимірюються під ними. При цьому коливальні процеси в точці вимірювань якісно подібні, але значно відрізняються за рівнем екстремальних значень, причому найбільша відмінність спостерігається для прискорень.

висновки

Створено методико-програмне забезпечення для дослідження перехідних процесів у тривимірних просторових конструкціях довільної форми та у вигляді тіл обертання. Проведено розрахунки динамічної реакції вузла конструкції на імпульсну дію. Зіставлення результатів, отриманих за розробленими методиками та з використанням стандартного скінченно-елементного комплексу Ansys, засвідчує про їхню відповідність. Для розрахунків вузлів у вигляді осесиметричних тіл використання спрощеної методики на основі напіваналітичного методу скінченних елементів дозволяє зменшити обчислювальні витрати на декілька порядків у порівнянні з методикою для тіл довільної конфігурації.

Чисельно встановлено значний вплив приєднаних до конструкції елементів вимірювальної апаратури (давачів) на характеристики, що визначаються. Цей факт слід враховувати при зіставленні розрахункових та експериментальних даних.

Створені методики дозволяють виконувати дослідження при доводці конструкції системи розділення та значно скоротити витрати при виборі прийнятного варіанта конструкції.

- 1. *Трякин В. П., Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Матюхин Ю. И.* Оценка резонансных режимов колебаний космического аппарата // Космічна наука і технологія. 2003. **9**, № 4. С. 40—44.
- 2. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П. Реакция оболочечных элементов космических аппаратов на импульсное воздействие // Авиац.-космич. техн. и технол. — 2013. — № 9(106). — С. 53—58.
- Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Зайцев Б. Ф. Задачи термопрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований): Монографія. — Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. — 370 с.
- 4. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Протасова Т. В. Методика расчета переходных процессов в трехмерных осесимметричных конструкциях при импульсном нагружении // Авиац.-космич. техн. и технол. 2014. № 8 (115). С. 148—151.
- 5. Шульженко Н. Г., Зайцев Б. Ф., Асаенок А. В. Численное моделирование динамической реакции конструкций на импульсное воздействие // Авиац.-космич. техн. и технол. 2014. № 9 (116). С. 6—11.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2014

Н. Г. Шульженко¹, Б. Ф. Зайцев¹, П. П. Гонтаровский¹, Т. В. Протасова¹, Т. Я. Батутина², И. В. Шеремет²

¹ Институт проблем машиностроения

им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков

² Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ УЗЛОВ СИСТЕМЫ РАЗДЕЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И НОСИТЕЛЯ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ

Описываются методики расчета переходных вибрационных процессов в элементах узлов разделения космических систем. Первая методика основана на использовании трехмерных моделей и прямом численном интегрировании конечно-разностных уравнений без существенных ограничений на конструктивные особенности. Другая методика основывается на сочетании метода конечных элементов с представлением решения в окружном направлении рядами Фурье и ориентирована на класс конструкций в виде тел вращения. Приводятся результаты расчета динамической реакции конструкции узла на импульсное действие, полученные по описанным методикам и с использованием стандартного комплекса. Расчетно оценивается влияние упругоинерционных характеристик элементов измерительной аппаратуры на характеристики динамических процессов рассматриваемой конструкции.

Ключевые слова: конструкция, импульсное нагружение, переходной процесс, трехмерная модель, метод конечных элементов.

M. G. Shulzhenko¹, B. P. Zajtsev¹, P. P. Gontarovskyi¹, T. V. Protasova¹, T. Y. Batutina², I. V. Sheremet²

¹A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

²Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk

THE ESTIMATE OF DYNAMIC RESPONSE OF SPACECRAFT AND LAUNCHER FRAGMENTATION SYSTEM COMPONENTS UNDER IMPULSIVE LOADING

The calculation methods for transient vibrating process in components of spacecrafts fragmentation are described. The first method is based on the 3D model and direct numerical integration of finite difference equations without design constraints. The second method is based on the combination of the finite element method, where solution in circumferential direction is obtained as a form of finite Fourier series. It is oriented on constructions in the form of rotating bodies. The results of estimate of dynamic response of construction components under impulse loading, which is obtained by these methods and by the standard system, are presented. The impact of elastically inertial characteristics of measuring equipment elements on dynamic process parameters of these elements is estimated.

Key words: construction, impulse loading, transient process, three-dimensional model, finite element method.

УДК 629.78

А. И. Маслова, А. В. Мищенко, А. В. Пироженко, Д. А. Храмов

Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО УСТРОЙСТВА ПАССИВНОГО УВОДА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ

Кратко излагаются основные результаты работ по исследованиям динамики электродинамических космических тросовых систем. Приведены результаты исследований динамики развертывания тросовой системы и резонансной неустойчивости колебаний системы относительно центра масс под действием амперовых и аэродинамических моментов, а также результаты оценок времени увода космических объектов с низких околоземных орбит с помощью электродинамических тросовых систем.

Ключевые слова: электродинамическая космическая тросовая система, развертывание, резонансные колебания.

Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы увода космических объектов с низких околоземных орбит является использование электродинамических космических тросовых систем (ЭДКТС). К настоящему времени это является общепринятым мнением, поскольку использование ЭДКТС предоставляет уникальные возможности создания экономически эффективной пассивной системы увода [2, 4, 5, 7].

Интенсивные исследования задач функционирования ЭДКТС на низких околоземных орбитах длятся уже более двух десятков лет. Применительно к решению проблемы увода космического мусора основное внимание в исследованиях уделяется гравитационно стабилизированной ЭДКТС. К настоящему времени в этих исследованиях получено большое количество содержательных результатов [2—4, 6, 7]. Вместе с тем результаты исследования динамики ЭДКТС показывают неустойчивость ее радиального положения, связанную с резонансами колебаний системы относительно центра масс под действием амперовых и аэродинамических моментов. Эта неустойчивость существенно затрудняет реализацию проекта создания эффективной системы увода на основе радиальной ЭДКТС и требует дополнительных исследований.

На основе анализа модели взаимодействия ЭДКТС с магнитосферой и ионосферой Земли был сделан вывод [1], что развитие направления ЭДКТС в первую очередь связано с получением достоверных экспериментальных данных функционирования системы в натурных условиях. В ИТМ НАНУ и ГКАУ был предложен проект малой экспериментальной ЭДКТС для проведения натурных экспериментов. Этот проект победил в

[©] А. И. МАСЛОВА, А. В. МИЩЕНКО, А. В. ПИРОЖЕНКО, Д. А. ХРАМОВ, 2015

конкурсе работ Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012—2016 гг.

Основное содержание работ по проекту, предполагалось, будет связано с исследованием динамики и с подготовкой орбитальных экспериментовдля малой ЭДКТС. Вместе с тем в соответствии с планом совместных научно-исследовательских работ ГП «КБ «Южное» и научными учреждениями НАН Украины в проекте рассматриваются вопросы возможности использования ЭДКТС для увода верхних ступеней ракет космического назначения разработки ГП «КБ «Южное».

В статье приводятся краткое описание результатов работ по договору № II-16-13-2 «Исследования особенностей и механизмов управления орбитальным движением космических аппаратов в токопроводящей среде» (Этап 2 — «Динамика взаимодействия намагниченного КА и электродинамической тросовой системы с токопроводящей средой»), выполняемому в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012—2016 гг.

ДИНАМИКА РАЗВЕРТЫВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрена динамика ЭДКТС при различных способах развертывания: при медленном выталкивании тросового соединения; при разматывании троса с безынерционной катушки; при разматывании троса с барабана с постоянной скоростью. Для способа, когда трос выдвигается из тела с постоянной скоростью, доработана математическая модель с учетом весомости троса. Трос моделируется с помощью материальных точек, соединенных упруго-диссипативными связями. Это позволило существенно упростить уравнения движения системы, по сравнению с ранее рассмотренной моделью, где эти связи предполагались нерастяжимыми.

Усовершенствована компьютерная библиотека моделирования и визуализации динамики ЭДКТС. В библиотеку добавлены модули, отвечающие за обработку столкновений между телами системы, ряд классов, моделирующих связи (в частности, неудерживающие) и методов чис-



Рис. 1. Развертывание и последующее движение тросовой системы при скорости выпуска троса 1 м/с

ленного интегрирования. Проведенное тестирование показало работоспособность разработанных модулей.

Моделирование медленного развертывания троса (скорость развертывания не превышает 1 м/с) показало стабильность процесса развертывания, и что масса троса не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на характер развертывания. На рис. 1 показано изменение во времени проекции троса *l*_a на орбитальную плоскость.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДИНАМИКИ РАДИАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ СИСТЕМЫ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Одним из важнейших вопросов создания радиальной ЭДКТС является вопрос о мере неустойчивости относительного движения системы под действием резонансных явлений. Резонансная неустойчивость радиальной космической тросовой системы (КТС) является следствием того, что частота ее колебаний перпендикулярно к плоскости орбиты близка к удвоенной орбитальной частоте. Это свойство КТС является принципиальным (характерным) свойством сильно протяженных в одном измерении структур: осевой момент инерции несравнимо меньше остальных главных центральных моментов инерции системы. При воздействии на систему моментов, частота которых близка к удвоенной орбитальной частоте (или кратной ей), в системе может иметь место линейный и/или параметрические резонансы.

Для анализа механизмов возникновения резонансов в движении ЭДКТС, обусловленных моментами амперовых сил, был проведен анализ изменения этих сил при орбитальном движении. Показано, что резонансные воздействия обусловлены изменением концентрации заряженных частиц и изменением напряженности магнитной индукции Земли при орбитальном движении. Построены модели изменения концентрации заряженных частиц и напряженности магнитного поля при движении ЭДКТС. Показано наличие существенной составляющей изменения концентрации по удвоенной частоте орбитального движения.

На рис. 2 показана зависимость спектральной плотности ρ изменения концентрации заряженных частиц от безразмерной «частоты» w/w_0 , где w_0 — частота орбитального вращения, при орбитальном движении ЭДКТС по круговой орбите высотой 650 км с наклонением 60°. Результаты расчетов концентрации, изображенные на рис. 2, проводились согласно Международной справочной модели ионосферы IRI-2007.

Для исследований резонансных режимов движения под действием амперовых моментов



Рис. 2. Зависимость спектральной плотности р изменения концентрации заряженных частиц от изменения *w*/*w*₀



Рис. 3. Изменения во времени углов ориентации

ЭДКТС представлялась в виде гантели, состоящей из двух сферических тел, соединенных невесомой и нерастяжимой связью. На линеаризованных уравнениях движения этой модели были показаны механизмы возникновения резонансов в колебаниях системы перпендикулярно к плоскости орбиты и их связь с колебаниями в плоскости орбиты.

Проведенные моделирования и расчеты резонансных режимов движения позволяют сделать предварительный вывод, что резонансные колебания развиваются достаточно медленно, и ЭДКТС во многих случаях может выполнить свою миссию до наступления колебаний с большой амплитудой. Здесь речь идет как о выполнении задачи натурных экспериментальных исследований малой ЭДКТС, так и о задаче увода тяжелых объектов с низких околоземных орбит ЭДКТС протяженностью в 10 км.

На рис. З показаны результаты расчета изменения углов ориентации ЭДКТС: угла отклонения θ от местной вертикали в плоскости орбиты и угла отклонения ϕ перпендикулярно к плоскости орбиты. Расчеты проводились при длине троса L = 5 км, высоте орбиты 650 км и наклонении 60°. Изменения показаны в безразмерном «времени» t/T, где T — период орбитального движения.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ РАДИАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

При орбитальном движении ЭДКТС изменения плотности атмосферы, как и изменения концентрации заряженных частиц, содержат составляющую с удвоенной орбитальной частотой и кратные ей гармоники. В силу этого в движении радиальной ЭДКТС возможны резонансные движения из-за действия аэродинамического момента.

В рамках рассмотрения движения ЭДКТС как движение гантели получена математическая модель ее динамики относительно центра масс под действием переменного аэродинамического момента. Относительная простота аэродинамических сил в сравнении с амперовыми позволила провести аналитические преобразования уравнений малых колебаний к виду, пригодному для их аналитического исследования.

Для выделенного класса рассматриваемых малых КТС определены диапазоны изменения параметров модели. Показана низкая динамическая жесткость системы к поперечным колебаниям аэродинамического момента при частоте, близкой к удвоенной частоте орбитального движения. Построены аналитические оценки линейного роста амплитуды колебаний КТС перпендикулярно к плоскости орбиты при линейном резонансе. Показано, что в колебаниях вдоль плоскости орбиты резонансы невозможны.

Создан пакет расчетных программ и проведено численное исследование динамики КТС.





ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

Предварительные выводы совпадают с выводами при анализе действия амперовых моментов: резонансные колебания развиваются достаточно медленно, и ЭДКТС во многих случаях может выполнить свою миссию до наступления колебаний с большой амплитудой.

На рис. 4 показан рост амплитуды колебаний, перпендикулярных к плоскости орбиты угла φ , за n = 500 витков по орбите для длины троса 1 км. Как видно, рост амплитуды весьма незначителен.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДЕСЯТИКИЛОМЕТРОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УВОДА ОБЪЕКТОВ

Для оценки времени выполнения миссии по уводу тяжелых объектов с помощью ЭДКТС была создана простая модель, позволяющая быстро получить эти оценки. В этой модели, в частности, предполагалось, что ЭДКТС представляет собой жесткую гантель постоянной длины; ЭДКТС всегда расположена строго вдоль местной вертикали; электрическое сопротивление среды пренебрежимо мало по сравнению с омическим сопротивлением троса; орбита центра масс всегда близка к круговой.

На основе полученной модели были построены предварительные оценки времени увода верхних ступеней украинских ракет-носителей для ЭДКТС с тросом длиной 10 км, диаметром 2 мм, массой 15 кг. Эти оценки подтверждают пригодность ЭДКТС для выполнения задач увода таких объектов, а также предварительно подтверждают, что резонансные колебания во многих случаях не успевают разрушить работу системы за время выполнения миссии.

- 1. Мищенко А. В., Пироженко А. В. Анализ модели взаимодействия электродинамических тросовых систем с магнитосферой и ионосферой земли // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 4. — С. 3—11.
- Ahedo E., Sanmartin J. R. Analysis of bare-tether systems for deorbiting low-Earth-orbit satellites // J. Spacecraft and Rockets. - 2002. - 39, N 2. - P. 198-205.
- Alpatov A. P., Beletsky V. V., Dranovskii V. I., et al. Dynamics of tethered space systems. — Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010. — 223 p.
- 4. *Bombardelli C., Zanutto D., Lorenzini E.* Deorbiting performance of bare electrodynamic tethers in inclined orbits //

J. Guid., Contr. Dynam. – 2013. – **36**, N 5. – P. 1550– 1556.

- 5. *Hoyt R. P., Barnes I. M., Voronka N. R., Slostad J. T.* The Terminator Tape[™]: A cost-effective de-orbit module for end-of-life disposal of LEO satellites // Space 2009 Conference, Sept 2009. 2009. AIAA Paper 2009-6733. P. 1–9.
- Levin E. M. Dynamic analysis of space tether missions. San Diego: Amer. Astronautical Soc., 2007. — 453 p.
- Sanmartin J. R., Lorenzini E. C., Martinez-Sanchez M. Electrodynamic tether applications and constraints // J. Spacecraft and Rockets. - 2010. - 47, N 3. - P. 442-456.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2014

А. І. Маслова, О. В. Мищенко,

О. В. Пироженко, Д. О. Храмов

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ КОСМІЧНОЇ ТРОСОВОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ПРИСТРОЮ ПАСИВНОГО ВІДВЕДЕННЯ КОСМІЧНОГО СМІТТЯ З НИЗЬКИХ НАВКОЛОЗЕМНИХ ОРБІТ

Коротко викладено основні результати робіт з дослідження динаміки електродинамічних космічних тросових систем. Наведено результати досліджень динаміки розгортання тросової системи та резонансної нестійкості коливань системи відносно центра мас під дією амперових і аеродинамічних моментів, а також результати оцінок часу виведення космічних об'єктів з низьких навколоземних орбіт з допомогою електродинамічних тросових систем.

Ключові слова: електродинамічна космічна тросова система, розгортання, резонансні коливання.

A. I. Maslova, A. V. Mischenko,

A. V. Pirozhenko, D. A. Khramov

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipropetrovsk

RESEARCH OF DYNAMIC REGULARITIES OF ELECTRODYNAMIC SPACE TETHERED SYSTEM AS A POSSIBLE HIGHLY EFFICIENT PASSIVE DEORBIT SYSTEMS FOR SPACE DEBRIS AT THE LOW EARTH ORBITS

The article summarizes the main results of studies on the dynamics of electrodynamics space tethered systems. The results of studies of the deployment dynamics of the tethered systems and resonant oscillation instability about center of mass under the action of Ampere and aerodynamic moments, as well as the assessment of deorbit time of space objects using electrodynamics tethered systems, are reported.

Key words: electrodynamic space tether system, deployment, resonant oscillation.

УДК 528.06

М. О. Попов, В. М. Подорван, С. І. Альперт

Державна установа «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

МЕТОД КЛАСИФІКУВАННЯ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМБІНАЦІЙНОГО ПРАВИЛА ДЕМПСТЕРА

Розглянуто новий метод класифікування гіперспектральних космічних зображень, який використовує теорію свідчень Демпстера — Шейфера. Метод відрізняється від відомих розв'язків однойменних задач введенням процедури оцінювання класифікаційної цінності спектральних каналів за допомогою спеціальної емпіричної функції і особливим способом розбиття спектрального ознакового простору, що у сукупності дозволяє застосовувати лише найбільш інформативні спектральні канали і суттєво скоротити розмірність ознакового простору при одночасному підвищенні точності класифікації. Описується програмна реалізація пропонованого методу і наводяться результати оцінювання точності класифікації, яка досягається в реальних умовах.

Ключові слова: гіперспектральне космічне зображення, класифікація зображень, теорія свідчень Демпстера — Шейфера, функція інформативності.

вступ

Серед видових матеріалів, які одержуються шляхом знімання Землі з борту космічного (повітряного) літального апарата, гіперспектральні зображення є найбільш змістовними і вміщують в себе надзвичайно великий обсяг інформації про об'єкти зйомки та спостереження [3, 12]. Ця інформація дозволяє виявляти та розпізнавати (класифікувати) об'єкти на знімках, оцінювати їхній стан, фіксувати зміни, що відбуваються на місцевості, робити прогнозні оцінки і т. д. [2, 6, 18].

Розв'язання подібних актуальних і важливих практичних завдань вимагає залучення великої кількості різних логіко-обчислювальних процедур, при цьому найбільш складною процедурою серед них є класифікування об'єктів на гіперспектральному зображенні [17], оскільки, по-перше, розмірність ознакового простору при цьому є дуже великою (загальна кількість

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

спектральних каналів обчислюється десяткамисотнями) і, по-друге, спектральні ознаки не відрізняються сталістю (величина зареєстрованого спектрального відгуку залежить від умов освітлення об'єкта, складу та прозорості атмосфери і т. д.). Через це більшість відомих алгоритмів, які використовуються при класифікуванні багатоспектральних космічних зображень (ГКЗ), неефективні у випадку гіперспектральних зображень. Тому в останні роки розробляються алгоритми, які орієнтуються переважно на класифікування саме гіперспектральних зображень [8, 13, 25], проте їхня точність поки залишається недостатньою, особливо в умовах, коли вхідна інформація, необхідна для проведення класифікування, надходить від різних джерел і має елементи невизначеності та/або неповноти.

У подібних умовах корисним може бути підхід, оснований на використанні теорії Демпстера — Шейфера (ТДШ) [22]. Математичний апарат ТДШ дозволяє будувати інтервальні оцінки

[©] М. О. ПОПОВ, В. М. ПОДОРВАН, С. І. АЛЬПЕРТ, 2015

достовірності гіпотез в умовах відсутності частини вхідних даних, пропонує просте правило для комбінування даних від різних джерел, може у складних ситуаціях класифікування надавати багатоальтернативний розв'язок задачі (у вигляді сполучення кількох гіпотез), а також має деякі інші переваги перед традиційним теоретикоймовірнісним підходом [11, 23]. Означені властивості ТДШ, зокрема спосіб об'єднання даних за комбінаційним правилом Демпстера, покладені в основу розробленого авторами методу класифікування гіперспектральних зображень.

Необхідно зазначити, що математичний апарат теорії свідчень вже успішно застосовувався рядом дослідників, у тому числі авторами, при аналізі та класифікуванні об'єктів на зображеннях [9, 16, 19-21]. Запропонований в даній роботі метод класифікування відрізняється від відомих розв'язків однойменних задач введенням процедури оцінювання класифікаційної цінності спектральних каналів за допомогою спеціальної емпіричної функції і особливим способом розбиття спектрального ознакового простору, що у сукупності дозволяє застосовувати при класифікації лише найбільш інформативні спектральні канали і, таким чином, суттєво скоротити розмірність ознакового простору при одночасному підвищенні точності класифікування.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Отже, нехай ми маємо ГКЗ у складі К зональних зображень S_{ν} , яке можна записати у вигляді

$$GSI = \{S_k |_{k=1,2,\dots,K}\} = \{\pi_n, \mathbf{u}_n |_{n=1,2,\dots,N_{\pi}}\}, \qquad (1)$$

де $S_k - k$ -те зональне зображення; K — загальна кількість зональних зображень (спектральних каналів, або зон); $\pi_n - n$ -й піксел з повним (векторним) сигналом $\mathbf{u}_n = (u_{1n}, u_{2n}, ..., u_{kn}, ..., u_{kn});$ u_{kn} — величина сигналу піксела π_n у k-му спектральному каналі (зоні); N_{π} — загальна кількість пікселів у кадрі ГКЗ.

В запису (1) передбачається, що зональні зображення з сусідніми номерами, наприклад S_k та S_{k+1} , належать відповідним суміжним спектральним зонам $\Delta \lambda_k = \lambda_{k2} - \lambda_{k1}$ і $\Delta \lambda_{k-1} = \lambda_{k3} - \lambda_{k2}$.

Відомо також, що на зображенні представлено (одним або більшим числом пікселів) об'єкти різних класів, тобто кожен об'єкт (піксел π_n) даного зображення належить до одного з L заданих класів. Припускається, що досліднику доступна апріорна інформація у вигляді виборок об'єктів — репрезентів класів, що розглядаються.

Мета роботи — розробити простий і ефективний метод класифікування ГКЗ для вказаних умов та обмежень.

Оскільки при розробці методу ми орієнтуємось на можливості математичного апарату ТДШ, то наведемо необхідні положення цієї теорії.

ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ СВІДЧЕНЬ ДЕМПСТЕРА — ШЕЙФЕРА

Теорія свідчень є узагальненням теорії ймовірностей, її математичний апарат дозволяє коректно працювати не тільки з окремими подіями (синглтонами) або гіпотезами, але й зі сполученнями подій, причому кожне таке сполучення розглядається за методологією ТДШ як окрема нерозкладна подія (гіпотеза) А. У ТДШ ключовим поняттям є поняття маси, яке є узагальненням класичного поняття ймовірності.

Сукупність вихідних (базових) гіпотез відносно стану об'єкта та всі можливі їхні сполучення утворюють множину Ω , яка називається у ТДШ основою аналізу. Вважається, що всі гіпотези з множини Ω (і базові, і їхні сполучення) є взаємно незалежними та у сукупності повністю характеризують об'єкт. Якщо число базових гіпотез дорівнює Q, то загальна кількість підмножин у множині Ω складає величину 2^{ϱ} (сюди входять пуста множина \emptyset).

Кожному елементу множини Ω за певними правилами надається відповідна маса m, причому область значень маси лежить в інтервалі від нуля до одиниці. Формально це записується таким чином: $m: 2^{Q} \rightarrow [0, 1]$, при цьому вважається, що:

маса пустої множини дорівнює нулю: $m(\emptyset) = 0$, сума усіх мас для кожної підмножини $A \subseteq \Omega$ дорівнює одиниці: $\sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1$.

На змістовному рівні масу *m* можна розглядати як міру довіри до пов'язаної з нею гіпотези, тому m(A) ще називають базовою ймовірністю, а будь-яку підмножину *A*, для якої m(A) > 0, називають фокальною групою. Гіпотези, або свідчення можуть одночасно формуватися кількома різними джерелами. Для випадку, коли ці джерела взаємно незалежні, в ТДШ розроблено просте правило об'єднання свідчень. Припустимо, ми маємо множину основу аналізу Ω з числом свідчень Q, а також маємо P незалежних джерел ID_p ($1 \le p \le P$) цих свідчень. При цьому p-те джерело дає свою оцінку ймовірності свідчення A_p у вигляді відповідної маси $m_p(A_n)$ або оцінку ймовірності сполучення свідчень X у вигляді $m_p(X)$. Тоді об'єднання свідчень здійснюється за допомогою правила Демпстера [11]:

$$m_{D}(X) = \frac{1}{1 - C} \sum_{\substack{X_{1} \cap \dots \cap X_{R} = X \\ \forall (X \neq \emptyset) \in 2^{Q}}} \prod_{1 \le p \le P} m_{p}(X_{r}), \qquad (2)$$

$$C = \sum_{\substack{X_1 \cap \dots \cap X_n = \emptyset \\ \forall (X \neq \emptyset) \in 2^0}} \prod_{1 \le p \le P} m_p(X_r) , \qquad (3)$$

де C — коефіцієнт конфліктності, який вказує, наскільки протилежними між собою є джерела (точніше, їхні свідчення). Область значень коефіцієнта C лежить в інтервалі [0;1], при цьому нульове значення свідчить про відсутність протиріч в оцінках джерел, а що сильніші ці протиріччя, то ближчою до одиниці стає величина C.

Ще слід враховувати, що в розрахунках за правилом Демпстера (2) приймається, що $m_p(\emptyset) = 0$.

ОРГАНІЗАЦІЯ І ЗМІСТ МЕТОДУ КЛАСИФІКУВАННЯ

Організація класифікування. Оскільки, як було зазначено при постановці задачі, досліднику доступна інформація про репрезенти об'єктів з числа класів, що розглядаються, то доцільно використовувати спосіб класифікування з навчанням. Схема організації такого класифікування (рис. 1) передбачає:

1) формування бази знань (БЗ);

2) здійснення класифікування ГКЗ;

3) оцінювання точності класифікування;

4) перевірка на задоволення встановлених (заданих) вимог.

Формування навчальної вибірки провадиться шляхом аналізу кадру ГКЗ експертом-дослідником, в результаті якого на зображенні виділяються області з пікселів різних класів (підвибірки). Комплексний аналіз сигналів пікселів навчаль-



ної вибірки дозволяє створити БЗ, інформація з якої надалі використовується при класифікуванні ГКЗ. Створення БЗ потребує виконання низки робіт, зміст яких буде розглянуто нижче.

Процес власне класифікування ГКЗ здійснюється в автоматичному режимі. За результатами класифікування при наявності референсних (завіркових) даних будується матриця помилок, на основі елементів якої обчислюються оцінки досягнутої точності. Якщо ці оцінки задовольняють задані вимоги, процедура класифікування вважається завершеною. В іншому випадку здійснюються додаткові заходи, які можуть сприяти підвищенню точності класифікування (збільшення навчальної вибірки, уточнення описів класів і т. д.)

Створення бази знань. Процес створення БЗ (рис. 2) включає такі роботи:

1) відбір зональних зображень;

2) виділення навчальної вибірки;

3) фільтрація навчальної вибірки;

4) розбиття ознакового простору;

5) внутрішньоінтервальні оцінки для класів;

6) визначення класифікаційної цінності спектральних каналів.

Розглянемо особливості виконання кожного вказаного виду робіт.

Відбір зональних зображень. Практично завжди ГКЗ є інформаційно надлишковими [8, 10]. Знизити надлишок даних, що містяться у ГКЗ, можна відсіканням зональних зображень з високим рівнем шумів та усуненням частини зональних



Рис. 2. Схема процесу створення бази знань

зображень зі значною взаємною кореляцією. Зазначимо, що останній шлях важливий також у світлі наведених вище вимог до взаємної незалежності джерел даних, що комбінуються за правилом Демпстера.

Нами використовується процедура відбору зональних зображень $\{S_k\}$, метою якої є отримання деякого їхнього списку довжиною K^* , який є суттєво меншим за початкову кількість K у вхідному гіперспектральному зображенні ($k = 1, 2, ..., K^*$; $K^* << K$), але при цьому набір зображень, що залишились у списку, зберігає інформацію, яка необхідна для розв'язання задачі класифікування.

Процедура відбору зональних зображень $\{S_k\}$ складається з таких кроків.

Крок 1. Зі складу ГКЗ виключаються зональні зображення, які є сильно зашумленими і мають малі середні градієнти (останнє характерно для рівномірно засвітлених полів). Після візуального контролю і відбраковування експертом формується скорочений список зональних зображень, з якими виконуються подальші кроки.

Крок 2. Задаються порогове значення коефіцієнта взаємної кореляції r_{\max} між сусідніми зональними зображеннями та (попередньо) мінімальне число каналів K_{\min} , яких у сукупності ще достатньо для успішного розв'язання задачі класифікування. Обидва названих числа встановлюються експертом з урахуванням інформації про характер району зйомки.

Крок 3. Зональні зображення об'єднуються у двійки $(S_1 ext{ i } S_2)$, $(S_3 ext{ i } S_4)$,..., $(S_k ext{ i } S_{k+1})$ і т. д., і для кожної двійки розраховується відповідний коефіцієнт взаємної кореляції r_{12} , r_{34} ,..., $r_{k,k+1}$ і т. д.

Крок 4. Провадиться послідовне порівняння розрахованих коефіцієнтів взаємної кореляції із заданим пороговим значенням r_{max} . У випадку, якщо значення коефіцієнта, наприклад $r_{k,k+1}$, не перевищує порогового значення r_{max} ($r_{k,k+1} \le r_{max}$), у створюваний список заносяться обидва зональні зображення; у протилежному випадку до списку заноситься зональне зображення, яке має вищу інформативність (у найпростішому випадку може бути оцінена величиною середнього квадратичного відхилення піксельних сигналів). За результатами порівнянь формується проріджений список зональних зображень довжиною K^* .

Крок 5. Довжина K^* сформованого на попередньому кроці списку зіставляється з числом K_{\min} , яке попередньо задається експертом. В за-

лежності від результату зіставлення можливі такі варіанти:

а) якщо $K^* < K_{\min}$, то задача відбору вважається невиконаною, і слід повертатися до кроку 2 із внесенням відповідних коректив у значення r_{\max} та/або K_{\min} ;

б) за умови $K^* > 2K_{\min}$ повертаємося до кроку 3, при цьому сформований на кроці 4 список зональних зображень розглядається як вихідний;

в) якщо $K^* \leq 2K_{\min}$, то сформований на кроці 4 список зональних зображень розглядається як остаточний для подальшого класифікування, тобто задача відбору зональних зображень вважається успішно виконаною.

Алгоритмічну реалізацію розглянутої процедури відбору зональних зображень у псевдокоді приведено нижче.

N: number of images S. r_{max} : threshold K_{min} : minimum number of spectral bands i = i + 2: step size For i = 1 to N S is a vector of images S_i Sort S begin write ("Для зонального зображення S_i рахуємо: a_i , cov_i, δ,"); readln $(a_i, \operatorname{cov}_i, \delta_i);$ write ("Для зонального зображення S_{i+1} рахуємо: a_{i+1} , cov_{i+1}, δ_{i+1} "); readln $(a_{i+1}, cov_{i+1}, \delta_{i+1})$; write ("Для зональних зображень S_i та S_{i+1} рахуємо: $r_{i,i+1}$ "); readln ($r_{i,i+1}$); if $r_{i,i+1} \le r_{\max}$ then we choose images S_i and S_{i+1} else begin if $\delta_i > \delta_{i+1}$ then we choose image S_i ; else: we choose image S_{i+1} write ("we get a new number of spectral bands, K^* "); end. begin if $K^* < K_{\min}$ then we correct r_{\max} and/or K_{\min} else begin if $K^* > 2K_{min}$ then write ("Для списку зональних зображень довжини K^* рахуємо: $r_{i,i+1}$ ") else: we use these K* spectral images for following classification

Виділення навчальної вибірки. Навчальна вибірка, необхідна при класифікуванні з навчанням, складається з пікселів різних класів і виділяється на зображенні експертом на основі його знань та уявлень, а також певних довідкових матеріалів. Для представлення кожного окремого класу у навчальній вибірці експерт виділяє на зображенні компактно розташовану групу пікселів, і ця група розглядається далі як підвибірка — репрезент відповідного класу.

При виділенні навчальної вибірки необхідно враховувати, що вона повинна задовольняти низку вимог [14], серед яких найбільш суттєвими є репрезентативність, достатність та чистота.

Вимога репрезентативності припускає, що в навчальній виборці є обов'язковою наявність, у приблизно рівних відсотках, представників усіх класів, що розглядаються. Тобто, кожен з L класів має бути представлений у навчальній виборці своєю підвибіркою TS_1 (l = 1, 2,..., L). У сукупності всі підвибірки класів утворюють навчальну вибірку

$$TS = TS_1 \cup \dots \cup TS_l \cup \dots \cup TS_L . \tag{4}$$

Позначимо її об'єм через N_{TS} . Вимога достатності визначає той мінімальний об'єм навчальної вибірки, який ще забезпечує статистичну коректність оцінок точності класифікування. Якщо N_{TS}^{\min} — статистично коректний мінімальний об'єм, то при формуванні навчальної вибірки (4) має бути забезпечена умова

$$N_{TS} \ge N_{TS}^{\min} \,. \tag{5}$$

Є різні способи розрахунку величини N_{TS}^{\min} , але найбільш поширеною є біноміальна модель [7], за якою мінімально необхідний об'єм навчальної вибірки розраховується за формулою

$$N_{TS}^{\min} = \frac{Z_{\alpha}^2 P_0 (1 - P_0)}{b^2}, \qquad (6)$$

де P_0 — оцінка ймовірності правильного класифікування; Z_{α} — стандартна оцінка для прийнятого значення α ймовірності двосторонньої помилки 1-го роду; b — припустима похибка.

Величина P_0 визначається використовуваним алгоритмом класифікування. Рекомендації щодо вибору величин помилки α і допустимої похибки *b* наведено у роботах [4, 14]. При об-

end end.



Рис. 3. Схема фільтрації навчальної вибірки з метою підвищення її чистоти

раній величині помилки α стандартна оцінка Z_{α} знаходиться табличним шляхом [4].

Фільтрація навчальної вибірки. Вимога чистоти вибірки пов'язана з тим, що дуже рідко вдається виділити підвибірки, кожна з яких містить об'єкти тільки одного відповідного класу. Реально у навчальній вибірці бувають присутні «збійні» та «змішані» піксели, піксели з великим рівнем шумів, а також інші, які не є адекватними репрезентами заявлених класів. Наявність подібних пікселів у навчальній вибірці негативно впливає на точність класифікування, тому доцільно усунення їх зі складу вибірки. Для цього застосовується спеціальна процедура фільтрації, у процесі якої кожна підвибірка ТЅ, (l = 1, 2, ..., L) перевіряється на предмет, чи всі піксели, що складають компактну групу, належать відповідному класу [5, 15]. Таку контрольну перевірку здійснюють за допомогою одного з алгоритмів класифікування [24]. Якщо встановлюється, що деякий піксел з підвибірки ТS, фактично не належить до класу *l*, він усувається з цієї підвибірки.

Ми використали процедуру фільтрації, представлену схемою на рис. 3, при цьому для контролю фактичної приналежності пікселів застосовується алгоритм класифікування з використанням ТДШ, який буде описано далі.

Фільтрація навчальної вибірки з метою підвищення її чистоти здійснюється у такій послідовності.

Крок 1. На вхід алгоритму класифікування подається навчальна вибірка *TS*.

Крок 2. Вводяться дві проміжні вибірки TS^1 і TS^2 , такі, що $TS^1 = TS$, $TS^2 = \emptyset$.

Крок 3. За допомогою обраного алгоритму класифікування визначається класова приналежність усіх пікселів часової вибірки TS^1 , і у випадку їхньої відповідності заявленим класам їхні властивості (належність до відповідного класу і координати) вносяться у часову вибірку TS^2 .

Крок 4. Перевіряється відповідність пікселів, що належать вибіркам TS^1 і TS^2 .

Крок 5. У випадку позитивного результату ($TS^1 = TS^2$) задача фільтрації вважається завершеною, приймається рішення для навчальної вибірки у вигляді $TS = TS^1$ і вихід з процедури.

Крок 6. Виконується процедура розбиття ознакового простору і внутрішньоінтервальної оцінки у відповідності з одержаними у п. 3 класами і параметрами вибірки *TS*¹.

Крок 7. Здійснюється заміщення $TS^1 = TS^2$, обнуляється TS^2 і здійснюється перехід до виконання п. 3.

Піксели, що не пройшли такої перевірки, виключаються зі складу навчальної вибірки *TS*, і в результаті отримується чистіша вибірка. Далі з використанням цієї вибірки виконується корекція описів класів.

Розбиття ознакового простору. Розбиття ознакового простору здійснюється з метою представити кожен клас деякою областю у просторі спектральних ознак розмірністю за числом задіяних для класифікування зональних зображень. Області формуються на основі значень сигналів пікселів навчальної вибірки, при цьому припускається, що числове значення ознаки класу у кожному спектральному каналі (зональному зображенні) розташовується у деякому інтервалі, положення і межі якого визначаються величинами сигналів пікселів класу в цьому каналі (зоні). Загальна кількість інтервалів в каналі визначається числом класів L; інтервали межують один з іншим, але не перетинаються.

Для будь-якого з розглянутих класів положення інтервалу на осі спектральних значень задається середнім значенням сигналів пікселів даного класу у спектральному каналі (наприклад, у *k*-му спектральному каналі (зоні) для класів *l* та *l* + 1 це будуть відповідно величини $\overline{u}_{k,l}$ та $\overline{u}_{k,l+1}$ рис. 4), а положення граничної точки $A_{l,l+1}$, що розділяє ці два класи з близькими значеннями сигналів, визначається зі співвідношення

$$\frac{a_l}{a_{l+1}} = \frac{\sigma_{k,l}}{\sigma_{k,l+1}},$$

де $\sigma_{k,l}$ і $\sigma_{k,l+1}$ — середні квадратичні відхилення сигналів пікселів відповідних класів у k-му спектральному каналі.

Аналогічно формуються границі і закриті інтервальні описи для всіх інших класів, за винятком двох — класу з мінімальним середнім значенням й класу з максимальним середнім значенням сигналів пікселів у даному спектральному каналі. Для першого з названих класів не





Рис. 4. До визначення положення границі, що розділяє класи на спектральній осі

встановлюється нижня (ліва на рис. 4) гранична точка на спектральній осі, а для другого — верхня (права на рис. 4) гранична точка, тобто ці два інтервали є відкритими з одного боку.

Означення: інтервал у k-му спектральному каналі, положення якого визначається величиною $\overline{u}_{k,l}$, будемо називати власним інтервалом класу l.

Внутрішньоінтервальні оцінки для класів. Вирішальне правило, на основі якого провадиться класифікування, використовує оцінки ймовірності приналежності об'єкта до класу (до класів). Ці оцінки обчислюються для всіх інтервалів кожного зі спектральних каналів за даними навчальної вибірки таким чином. Для кожного інтервалу підраховуються дві величини — базова ймовірність власних піксельних об'єктів (складають одну фокальну групу) та сумарна базова ймовірність об'єктів інших класів (всі ці об'єкти разом складають другу фокальну групу). Нехай, наприклад, у деякому ј-му інтервалі нараховується у цілому M_i пікселів, з них M_1 — це піксели класу, для якого даний інтервал — власний, і *M*₂ — загальне число пікселів інших класів. Тоді оцінка базової ймовірності піксельних об'єктів у власному інтервалі вказаного класу розраховується як

$$m^{(c)} = \frac{M_1}{M_i} ,$$

а сумарна базова ймовірність піксельних об'єктів інших класів у цьому ж інтервалі дорівнює

$$m^{(\rm HC)} = \frac{M_2}{M_i} \, .$$

Очевидно, що у кожному інтервалі $m^{(c)} + m^{(HC)} = 1$.

Визначення класифікаційної цінності спектральних каналів. Досить складно провести розбиття ознакового простору таким чином, щоб у власних інтервалах перебували виключно піксели відповідного класу. Значно частіше у більшості інтервалів одночасно наявні піксели з кількох класів навчальної вибірки, що, безумовно, негативно впливає на класифікаційну здатність спектрального каналу та точність класифікації у цілому.

Визначати класифікаційну цінність кожного окремого спектрального каналу пропонується за допомогою емпіричної функції [2]:

$$F = 1 - \frac{1}{L(L-1)} \cdot \sum_{m=1}^{L} \frac{\sum_{j=1}^{L} \left(\sum_{\substack{k=1\\k \neq m}}^{L} \delta_{kj} \right)}{\sum_{j=1}^{L} \delta_{mj}},$$
 (7)

де δ_{kj} — показник зв'язку класу ($\delta_{kj} = 1$, якщо об'єкт класу *k* пов'язаний з інтервалом *j*, і $\delta_{kj} = 0$ — в інших випадках).

Інтервальні показники зв'язку об'єктів навчальної вибірки є важливою частиною створюваної БЗ.

Область значень функції *F* лежить у діапазоні від 0 до 1. При цьому нуль відповідає випадку, коли об'єкти всіх класів зосереджені всередині одного інтервалу, а одиниця — у випадку, коли об'єкти кожного із класів виявляються розподіленими чітко за відповідними власними інтервалами. В останньому випадку класифікаційна цінність спектрального каналу максимальна, тоді як у першому випадку такий спектральний канал ніякої цінності як класифікатор не має.

За результатами розрахунків за допомогою формули (7) можна проранжувати зональні зображення за їхньою класифікаційною цінністю та відібрати найбільш суттєві.

На цьому створення БЗ завершується, систему підготовлено до класифікування.

Алгоритм класифікування. Класифікування ГКЗ здійснюється попіксельно, тому достатнью розглянути процедуру класифікування одного піксела. Припустимо, після виконання процедури відбору зональних зображень піксельний об'єкт π_n характеризується векторним сигналом $\mathbf{u}_n = (u_{1n}, u_{2n}, ..., u_{kn}, ..., u_{k*n})$.

Потрібно, ґрунтуючись на цьому сигналі, визначити, до яких з *L* класів даний піксел найбільш ймовірно належить.

Алгоритмічна процедура класифікування включає наступні кроки.

Крок 1. У кожному спектральному каналі визначається інтервал, з яким пов'язаний відповідний сигнал u_{kn} піксела π_n ($k = 1, 2, ..., K^*$).

Крок 2. Встановлюються імена усіх класів об'єктів, що лежать у кожному такому інтервалі, після чого з БЗ отримуються значення базової ймовірності власних об'єктів інтервалу та сумарної базової ймовірності об'єктів інших класів всередині інтервалу.

Крок 3. Розраховуються за допомогою правила Демпстера комбіноване значення мас для результуючих фокальних груп (у вигляді окремих класів або підмножин класів).

Крок 4. З використанням правила максимальної правдоподібності приймається рішення про найбільш ймовірний клас (класи) даного піксельного об'єкта.

Така процедура послідовно застосовується до всіх пікселів ГКЗ. По закінченні класифікування усього кадру при наявності референсних (завіркових) даних будується матриця помилок, і на основі її елементів розраховуються показники точності проведеного класифікування, які далі перевіряються на відповідність встановленим вимогам.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТОДУ І РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Для запропонованого методу класифікування ГКЗ на основі ТДШ було розроблено програмне забезпечення DST у середовищі пакету Visual Basic 6.0. Архітектура програми DST передбачає багатовіконний MDI-інтерфейс; за його батьківське вікно служить головний модуль програми, який здійснює загальне керування і забезпечує доступ до чотирьох розрахункових, двох допоміжних і двох інформаційних модулів (рис. 5). Кожен розрахунковий модуль підтримує відповідні процедури, необхідні для реалізації розробленого методу. На допоміжні модулі покладено функції підготовки вихідного розрахункового зображення (його конвертування у внутрішній формат програми та відбір розрахункових спектральних каналів). Інформаційні модулі забезпечують виведення і збереження остаточних результатів класифікування.



Рис. 5. Архітектура програми DST. Суцільною жирною рамкою позначено головний модуль, суцільною тонкою рамкою — розрахункові, пунктирною рамкою — допоміжні, подвійною рамкою — інформаційні модулі

На вхід програми DST надходять сигнали пікселів у представленні, яке має сприйматися системою оброблення зображень ENVI. Кінцевим результатом виконання програми DST є класифікація ГКЗ, матриця помилок і розраховані величини різних показників точності класифікації.

Процес виконання роботи відбувається в інтерактивному режимі, поетапно.

Етап 1. Підготовка вихідних даних і відбір зональних зображень (розрахункових спектральних каналів).

Етап 2. Створення робочого проекту.

Етап 3. Класифікування та оцінювання точності.

Стисло наведемо особливості програмного забезпечення означених етапів.

Етап 1. Підготовка даних і процедура відбору зональних зображень реалізовані в середовищі програми DST у вигляді двох допоміжних модулів — підготовки вихідних даних і оптимізації числа спектральних каналів. Наявність модуля підготовки вихідних даних пояснюється тим, що у різних бортових сенсорах типи представлення сигналів зображень можуть відрізнятися. Модуль оптимізації числа спектральних каналів надає можливість зниження ступеня надмірності вихідного ГКЗ за рахунок скорочення числа зональних зображень зі значною взаємною кореляцією. Інтерфейс модуля (рис. 6) дозволяє початкове проведення візуального відбору непридатних спектральних зображень, визначення порогового значення коефіцієнта кореляції і мінімального числа необхідних спектральних каналів, а також — запуск процедури їхнього подальшого відбору як в автоматичному, так і в інтерактивному режимах.

Етап 2. Під робочим проектом розуміється сукупність набору вихідних даних у вигляді списку розрахункових спектральних каналів (із зазначенням їхнього розташування на диску), властивостей пікселів навчальних вибірок (із зазначенням їхньої приналежності до виділених класів і координат на зображенні), а також — БЗ. Створення останньої забезпечується мінімальним набором вихідних даних і виконується із застосуванням вказаних вище алгоритмів розбиття простору ознак, внутрішньоінтервальної оцінки



Рис. 6. Інтерфейс модуля оптимізації числа спектральних каналів. У лівій нижній частині модуля показано параметри оптимізації відбору: значення коефіцієнта максимальної кореляції і мінімальне число відібраних каналів

Исходные данные		Bxog: 2-A war			Выход: З-й шаг	
•		•				
оличество пи	сселов, прина	длежащих к	выделенным кла	ссам	Возврат на	
Класс>>	Klass-1	Klass-2	Klass-3	Klass-	1-A war	
Hasano	231	255	26.21	350	2-й war	
War 1	225	251	2557	341	Sex mar	
War 2	225	250	265	341		
And the owner of the owner owne	0.00	050				
llar 3	225	250	255	341		
Шаг 3 Лисок каналог	223 в н фон графи	200	1	341	Корректировка	
Шаг 3 Список каналоо ОСМСходные D: Мсходные D: Мсходные D: Мсходные	225 в и фон графи 2 данные\Кіем 2 данные\Кіем 2 данные\Кіем 2 данные\Кіем		и Из файла	341	Корректировка На один war	
Шаг 3 Список каналоо 2 D. М.сходные D: М.сходные D: М.сходные D: М.Сходные D: М.Сходные D: М.Сходные	225 в и фон графи данные\Кіем данные\Кіем данные\Кіем данные\Кіем данные\Кіем	AList-	у Из файла Канал из спи	341 •	На один шаг	

Рис. 7. Інтерфейс модуля фільтрації навчальної вибірки

для класів та розрахунку класифікаційної цінності спектральних каналів.

Більшість операцій по створенню робочого проекту виконуються у відповідному розрахунковому блоці модуля створення і редагування проекту. Можливості цього модуля дозволяють здійснювати:

 створення та редагування списку розрахункових каналів вихідного зображення, включаючи його імпорт і експорт у середовище системи ENVI; 2) створення та редагування списку виділених класів, включаючи їхній імпорт і експорт у середовище системи ENVI;

3) оконтурювання границь навчальних вибірок, що представляють виділені класи у вигляді частин зображення довільних форм, обраних графічними інструментами модуля;

4) виконання процедур розбиття простору ознак, формування внутрішньоінтервальних оцінок для виділених класів та розрахунку класифікаційної цінності обраних спектральних каналів на основі даних, що визначаються пп. 1-3 з їхнім внесенням (як БЗ) до складу робочого проекту;

5) збереження робочого проекту у вигляді текстового файлу *.prj.

Модуль фільтрації навчальної вибірки (рис. 7) служить для підвищення чистоти вихідної навчальної вибірки, визначеної в режимі роботи з модулем створення і редагування проекту. У модулі використовується алгоритм, наведений у п. «Фільтрація навчальної вибірки».

Функціональні можливості даного модуля передбачають:

 виведення результатів фільтрації на кожному кроці виконання розрахункового алгоритму в графічному або табличному вигляді;

 — збереження результатів фільтрації після кожного кроку виконання розрахункового алгоритму;

 — роботу в інтерактивному і автоматичному режимах, здійснення постійного контролю результатів фільтрації з видачею відповідних інформаційних та рекомендаційних повідомлень.

Модуль визначення класифікаційної цінності спектральних каналів забезпечує обчислення за виразом (7) значень функції F для кожного каналу і ранжування каналів за цими значеннями.

Етап 3. Програмна реалізація етапу провадиться у модулі класифікування і зводиться до остаточного визначення установочних параметрів у вирішальному правилі, на якому базується процедура класифікування, а саме:

 визначення остаточного списку розрахункових спектральних каналів;

 визначення просторових границь у межах зображення ділянок, які підлягають класифікуванню; вибір форми відображення результатів попіксельного класифікування і автоматичне завантаження в інформаційний модуль «Результати класифікування»;

 вибір референсних даних для побудови матриці помилок та їхнє автоматичне завантаження в інформаційний модуль «Матриця помилок і показники точності класифікації»;

запуск процедури класифікування.

Програмне забезпечення DST було використано в експериментальному дослідженні з метою оцінити точність запропонованого методу класифікування. Оцінювання здійснювалось на основі гіперспектрального зображення EO1H1810252013112110KF, отриманого 22.04. 2013 р. апаратурою «Нурегіоп» супутникової системи EO-1. Знята сцена (рис. 8, *a*) — це смуга території у межах Києво-Святошинського і Макарівського районів Київської області.

Після конвертації ГКЗ програмною системою ENVI у внутрішній формат представлення даних і створення опису цього формату отримано єдиний розрахунковий файл (формату *.bsq), в якому всі канали знімка були представлені у вигляді послідовності окремих зображень. Відбір розрахункових зональних зображень здійснювався з використанням допоміжного модуля оптимізації числа спектральних каналів. Після 4-кратного попарно-лінійного проріджування (за алгоритмом у п. «Відбір зональних зображень») було одержано список з 20 розрахункових спектральних каналів, для яких порогові коефіцієнти кореляції між суміжними діапазонами не перевищували 0.8.

У межах знятої ділянки території домінують п'ять основних класів площинних об'єктів, а саме: листяний ліс (1); сади (2); необроблені землі (3); луки (4) і поля (5). У межах зображення експертом за допомогою розрахункового модуля створення і редагування проекту виділялися навчальні вибірки з пікселів цих класів.

Мінімально припустимий обсяг навчальної вибірки розраховувався за допомогою формули (6). Було обрано, що $P_0 = 0.8$, $\alpha = 0.05$, $b = \pm 0.05$. При обраній величині помилки α стандартна оцінка складає $Z_{\alpha} = 1.96$ [4]. В результаті підстановки цих величин у формулу (6) маємо, що



Рис. 8: *а* — знімок «Hyperion»; *б* — класифікаційна карта (розподіл класів)

 $N_{TS}^{\min} = 246$ пікселів. Враховуючи, що процедура фільтрації зменшує навчальну вибірку, а також для надійності в дослідженні було виділено вихідну навчальну вибірку у складі $N_{TS} = 404$ пікселів. Після фільтрації її чисельність зменшилась до 372 пікселів, тобто вимога (5) була виконана.

Для оцінювання точності класифікування використовувались контрольні тестові ділянки, які не перетиналась з ділянками навчальної вибірки. Вибір контрольних тестових ділянок здійснювався методом кластерного семплування (Claster Sampling), розмір однієї ділянки не перевищував 20—25 пікселів. Загальний обсяг контрольних тестових ділянок склав 506 пікселів різних класів.

Класифікування контрольних тестових ділянок здійснювалось за допомогою пропонованого методу, а також ще двох інших алгоритмічних методів — Support Vector Machine [24] (програмно реалізований в системі ENVI) і алгоритму класифікування об'єктів за їхніми спектрально-топологічними характеристиками, запропонованого в роботі [10]. Порівняльний аналіз одержаних оцінок точності класифікації продемонстрував перевагу описаного в роботі методу перед відомими методами. Так, метод на основі ТДШ дав точність 0.81, метод Support Vector Machine — 0.76, алгоритм класифікування об'єктів за їхніми спектрально-топологічними характеристиками — 0.73.

Результат класифікування повного кадру ГКЗ за допомогою програми DST наведено на рис. 8, б. Класи у легенді пронумеровані у відповідності з їхньою номенклатурою, описаною у тексті.

ВИСНОВКИ

Описано новий метод класифікування гіперспектральних космічних зображень на основі теорії свідчень Демпстера — Шейфера. Метод відрізняється від раніше відомих введенням процедури оцінювання класифікаційної цінності спектральних каналів за допомогою спеціальної емпіричної функції і особливим способом розбиття спектрального ознакового простору.

Надано схему організації класифікування, детально описано етапи створення БЗ як інформаційної основи для проведення класифікування, розроблено алгоритм класифікування з використанням комбінаційного правила Демпстера, стисло описано розроблене програмне забезпечення.

Проведене експериментальне дослідження з використанням реального гіперспектрального зображення і одержані оцінки досягнутої точності класифікування свідчать про перспективність запропонованого методу.

Подальші дослідження пов'язуються із впровадженням розробленого методу класифікування для вирішення актуальних природоресурсних задач.

- 1. *Альперт С. І.* Оцінка якості класифікації аерокосмічних зображень на основі матриці помилок та коефіцієнтів точності // Мат. машини і сист. — 2014. — № 1. — С. 101—107.
- 2. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. — К.: Наук. думка, 2006. — 360 с.
- Бурштинська Х. В., Станкевич С. А. Аерокосмічні знімальні системи. — Львів: Львів. політехніка, 2013. — 316 с.
- 4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
- 5. Дюличева Ю. Ю. О задачах фильтрации обучающих данных // Штучний інтелект. 2006. № 2. С. 65—71.
- Козодеров В. В., Кондранин Т. В., Казанцев О. Ю. и др. Обработка и интерпретация данных гиперспектральных аэрокосмических измерений для дистанционной диагностики природно-техногенных объектов // Исслед. Земли из космоса. — 2009. — № 2. — С. 36—54.
- 7. Попов М. А. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях // Пробл. упр. и информ. — 2007. — № 1. — С. 97—103.
- 8. Попов М. О., Станкевич С. А., Молдован В. Д. Гіперспектральна аерокосмічна інформація у виявленні та спостереженні об'єктів // Наука і оборона. — 2006. — № 3. — С. 25—35.
- 9. Попов М. О., Топольницький М. В. Классификация объектов на многоспектральных гиперспектральных аэрокосмических изображениях на основе теории свидетельств Демпстера Шейфера // Мат. машини і сист. 2014. № 1. С. 58—69.
- 10. *Станкевич С. А.* Алгоритм статистичної класифікації об'єктів дистанційного спостереження за їх спектрально-топологічними характеристиками // Наук. вісник Нац. гірничого ун-ту. 2006. № 7. С. 38—40.
- Beynon M. J., Curry B., Morgan P. The Dempster Shafer theory of evidence: an alternative approach to multicriteria decision modeling // Omega. 2000. 28, N 1. P. 37—50.
- Bongasser M., Hungate W. S., Watkins R. Hyperspectral remote sensing: Principles and applications. — Boca Raton: CRC Press, 2008. — 119 p.
- Chang C.-I. Hyperspectral data processing: Algorithm design and analysis. — Hoboken, N J: John Willey and Sons, 2013. — 1164 p.
- Congalton G., Green K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. 2nd Ed. — Boca Raton: CRC Press, 2009. — 183 p.
- 15. *Dash M., Liu H.* Feature selection for classification // Intel. Data An. 1997. **1**. P. 131–156.
- Gong P. Integrated analysis of spatial data from multiple sources: Using evidential reasoning and artificial neural network techniques for geological mapping // Photogramm. Eng. and Remote Sens. – 1996. – 62, N 5. – P. 513–523.
- Hyperspectral data exploitation: Theory and applications / Ed. by Ch.-I Chang. — John Willey and Sons, 2007. — 430 p.
- Imaging spectrometry: Basic principles and prospective applications / Ed. by F. D. van der Meer, S. M. de Jong. – Dodrecht: Kluwer, 2001. – 404 p.
- Lein J. K. Applying evidential reasoning methods to agricultural land cover classification // Int. J. Remote Sens. – 2003. – 24, N 21. – P. 4161–4180.
- Mertikas P., Zervakis M. E. Exemplifying the theory of evidence in remote sensing image classification // Int. J. Remote Sens. - 2001. - 22, N 6. - P. 1081-1095.
- Popov M. A., Topolnitskiy M. V. A Dempster Shafer evidence theory-based approach to object classification on multispectral/hyperspectral images // Proceedings of the 10th Int. Conf. IEEE on Digital Technologies (DT'2014). – Žilina, 2014. – P. 296–300.
- Shafer G. A Mathematical theory of evidence. Princeton: Princeton Univ. Press, 1976. – 297 p.
- Taroun A., Yang J. B. Dempster-Shafer theory of evidence: Potential usage for decision making and risk analysis in construction project management // The Built & Hum. Environ. Rev. - 2011. - 4, N 1. - P. 155-166.
- Tso B. Classification methods for remotely sensed data. London: Tailor and Francis, 2001. – 332 p.
- 25. Varshey P. K., Arora M. K. Advanced image processing techniques for remotely sensed hyperspectral data. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 322 p.

Стаття надійшла до редакції 06.10.2014

М. О. Попов, В. М. Подорван, С. И. Альперт

Государственное учреждение «Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук Национальной академии наук Украины», Киев

МЕТОД КЛАССИФИКАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНАЦИОННОГО ПРАВИЛА ДЕМПСТЕРА

Рассмотрен новый метод классификации гиперспектральных космических изображений, который использует теорию свидетельств Демпстера — Шейфера. Метод отличается от известных решений одноименных задач введением процедуры оценки классификационной ценности спектральных каналов с помощью специальной эмпирической функции и особым подходом к разбиению спектрального признакового пространства, что в совокупности позволяет задействовать только наиболее информативные спектральные каналы и, таким образом, существенно сократить размерность признакового пространства при одновременном повышении точности классификации. Описывается программная реализация предлагаемого метода и приводятся результаты оценки точности классификации, которая достигается в реальных условиях.

Ключевые слова: гиперспектральное космическое изображение, классификация изображений, теория свидетельств Демпстера — Шейфера, функция информативности.

M. O. Popov, V. M. Podorvan, S. I. Alpert

State institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth Institute of Geological Science National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv

A METHOD FOR HYPERSPECTRAL SATELITE IMAGE CLASSIFICATION USING DEMPSTER'S COMBINATION RULE

This paper proposes the new method for hyperspectral satellite image classification using the Dempster-Shafer evidence theory. The method differs from the known solutions by introducing a procedure of assessing classification value of the spectral bands by a special empirical function and by specific approach to partition of the spectral feature space. Such an approach allows to use only the most informative spectral bands that significantly reduces the dimension of the feature space while improving classification accuracy. The software for the proposed method and the results of evaluation of the classification accuracy, which is really achieved, are presented.

Key words: hyperspectral satellite image, image classification, Dempster-Shafer's Evidence Theory, informativity function.

УДК 523.68, 520.82

П. М. Козак¹, Л. В. Козак²

¹ Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ ² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

МЕТОД ФОТОМЕТРІЇ СЛАБКИХ МЕТЕОРІВ ТА ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ ІЗ СПОСТЕРЕЖЕНЬ З ТЕЛЕВІЗІЙНИМИ СИСТЕМАМИ СУПЕРІЗОКОН

Пропонується універсальний напівемпіричний метод фотометрії слабких метеорів та штучних супутників Землі. Метод розроблявся для фотометричних вимірювань і редукцій зображень, отриманих телевізійними спостережними системами типу суперізокон, відомих своєю нелінійністю відгуку на вхідний сигнал, та післясвітінням динамічних зображень у телевізійному кадрі. Напівемпіричний підхід проявився у тому, що фотометричні залежності телевізійної системи для рухомих та стаціонарних точкових об'єктів досліджувалися шляхом фотографування зоряного неба камерою, яка оберталася з різними кутовими швидкостями, включаючи нульову. На основі отриманих результатів побудовано калібрувальну криву та розраховано криву блиску для слабкого метеора 4—7^т. Запропонована методика універсальна, і її можна використати для фотометричної обробки точкових рухомих світних об'єктів, отриманих будь-якою теле- чи відеосистемою.

Ключові слова: метеори, телевізійні спостереження метеорів, фотометрія метеорів.

вступ

Фотометрія метеорів за результатами фотографічних спостережень була розроблена в середині 20-го сторіччя. Найбільш детально метод фотометричних редукцій для фотографічних метеорів, отриманих за допомогою нерухомих камер, був описаний в роботах [1] та [5]. В основу фотометричних вимірювань було покладено той факт, що зображення метеора на фотоплівці (чи штучного супутника Землі) та зір мали однакову форму. Зображення метеорів (супутників) витягувалось у лінію через свій власний рух, а зірок — через добове обертання неба (експозиція 30—60 хв). Таким чином, фотометричні вимірювання за допомогою мікроденситометра відбувалися ідентично. За вимірюваннями зоряних зображень будувалася калібрувальна крива, і далі, за вимірюваннями з тими ж характеристиками мікроденситометра, визначалася деяка ефективна зоряна величина метеора. Ефективна зоряна величина метеора відрізнялася від реальної, оскільки вона була отримана за зоряними зображеннями, час експозиції яких відрізнявся від метеорних, причому на декілька порядків. Для корекції ефективної зоряної величини метеора до реальної було запропоновано формулу [5], яка пов'язувала зоряні величини зір і метеора через швидкості руху їхніх зображень по фотографічній плівці. Аналогічна процедура була використана в редукціях спостережень з Прерійної Метеорної Мережі [17].

У подальших роботах [1] у формулу був добавлений коефіцієнт Шварцшильда, оскільки було досліджено, що закон взаємозаміщення не виконується через велику різницю тривалості експо-

[©] П. М. КОЗАК, Л. В. КОЗАК, 2015

зиції зображень метеора і зір порівняння. Коефіцієнт був різний для різних типів фотографічних плівок, що ускладнювало використання згаданої формули. Тому на практиці для фотометрії метеорів використовувалася установка «штучний метеор», яка створювала на плівці зображення точкових об'єктів, які рухалися з тими ж кутовими швидкостями, що і метеори та супутники [1, 19]. Очевидно, що результати такого експерименту можна було використовувати лише для даного типу плівки і параметрів об'єктива.

Фотометрія метеорів або супутників за телевізійними спостереженнями принципово відрізняється від фотографічної. З одного боку телевізійна розгортка дозволяє розглядати динамічний об'єкт в його розвиткові, оскільки час розгортки одного кадру завжди (або майже завжди) менший від часу життя метеора, і тим більше — часу наявності супутника в кадрі, що мало б спрощувати фотометричну обробку. З іншого боку, метеор залишає на кадрі пряму лінію, аналогічну до фотографічного зображення (штрих), але по довжині обмежену часом розгортки, тоді як зірки порівняння залишаються точковими об'єктами. Очевидно, що схема фотометричних вимірів має суттєво відрізнятися від фотографічної.

При фотометричних вимірюваннях метеорів та супутників, отриманих за допомогою сучасних відеокамер з ПЗЗ-приймачем та підсилювачем яскравості, найчастіше використовується метод сумування пікселів, запропонований у роботі [9], та пізніше використаний у роботах [7, 18]. В даному методі використовується той факт, що зображення метеора в кожному кадрі має форму штриха певної довжини та інтенсивності. Сумуючи інтенсивність над фоном у пікселях, що належать штриховому зображению метеора, та порівнюючи його з сумами інтенсивностей у пікселях зображень зір, можна отримати зоряну величину метеора. Слід застерегти, що такий метод буде давати коректний результат лише при лінійному відгуку сигналу відеосистеми на вхідний світловий потік. Тому для застосування такого підходу слід проводити дослідження спостережної системи на лінійність, що можна зробити через тест по зорях з обертанням камери [11, 13, 14].

При використанні для спостережень високочутливих камер типу ортикон (суперортикон) або ізокон (суперізокон) використання такого підходу неможливе, оскільки, крім явного нелінійного відгуку електронного сигналу на оптичний, дані системи мають суттєву інерційність накопичення та зчитування сигналу з мішені електронної передавальної трубки. Не дивлячись на те, що такі системи є досить застарілими та мають ряд недоліків, їм поки що немає рівних у чутливості, тому вони досі використовуються для спостережень метеорів [8, 12, 15]. В даній роботі пропонується напівемпіричний метод фотометрії метеорів, супутників та інших точкових динамічних об'єктів, зареєстрованих з допомогою телевізійних камер суперізокон. Оскільки методика є однаковою для всіх точкових динамічних об'єктів, подальший розгляд методу буде демонструватись на прикладі обробки метеорів.

ТЕОРІЯ ФОТОМЕТРІЇ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ МЕТЕОРІВ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Освітленість, що створюється слабким метеором протягом часу t його польоту вздовж траєкторії L в атмосфері на відстані *R* від спостерігача, можна представити в загальному функцією $E_1(L, t)$, де E_1 (Дж · c⁻¹м⁻²м⁻¹) — енергія випромінювання за одиницю часу через одиницю площі з одиниці довжини траєкторії, (або Дж·с⁻¹м⁻²град⁻¹ — з кутової одиниці траєкторії, якщо траєкторія не може бути розрахована і *R* невідоме, наприклад при односторонніх спостереженнях). Очевидно, що метеор в такому випадку розглядається як одновимірно-протяжний об'єкт, в якому випромінювання у будь-який момент часу t відбувається як з метеорної коми протягом його руху, так і з його іонізованого атмосферного сліду. Для більшості слабких метеорів, що спостерігаються телевізійною системою, світіння атмосферного метеорного сліду є дуже слабким та швидко затухає, тому метеор можна розглядати як світний точковий рухомий об'єкт. В цьому випадку має місце функціональна залежність L = L(t), і криву блиску метеора можна представити функцією $E_0(t)$ або $E_0(L)$, де E_0 (Дж · c⁻¹м⁻²) — освітленість. Зазвичай крива блиску метеора будується як функція висоти. У випадку дифузної або



Рис. 1. Демонстрація інерційності телевізійної системи з передавальною трубкою суперізокон: a — залишковий електронний слід метеора в TB-кадрі; δ — схематичне зображення повільного накопичення заряду та його затухання для двох гіпотетичних зір S_1 , S_2 та метеорів M_1 , M_2 ; e — залишки стаціонарного зображення зірок, коли світло в дане місце уже не падає — зміщення камери (зображення телевізійних кадрів інверсне)

хмароподібної структури метеора [6, 16, 20, 21], зареєстрованої за допомогою спостережної системи з високою роздільною здатністю, можна ввести до розгляду поверхневу освітленість (поверхневу зоряну величину) як функцію азимуту *A* та зенітної відстані Z_R метеора: $E_2(A, Z_R, t)$, де E_2 вимірюється в Дж·с⁻¹м⁻²град⁻² (аналогічна фотометрія проводиться і для інших просторово протяжних об'єктів, наприклад ком та хвостів комет, галактик тощо). Очевидно, що величини E_0 , E_1 та E_2 зв'язані між собою одинарним та подвійним інтегруванням по просторових змінних.

Спостережні системи, оснащені передавальними трубками типу суперізокон, дуже інерційні в накопиченні та зчитуванні сигналу, і тому мають довге післясвічення (іноді десятки кадрів, в залежності від інтенсивності вхідного сигналу). Метеор в кадрі залишає хвіст у зображенні, який може існувати більше десяти кадрів. На рис. 1, а приведено телевізійне зображення метеора в десятому кадрі після його виникнення. Зміщення даного метеора від кадру до кадру складає близько однієї десятої від його видимого в кадрі зображення, причому початок зображення все ще залишається видимий і у приведеному десятому кадрі. Очевидно, що відділити справжнє атмосферне післясвічення при його наявності від електронного практично неможливо. Причин електронного післясвічення лежить у конструкції самої передавальної трубки. Зчитування заряду за допомогою електронного променя є статистичним процесом, і заряд з мішені ТВ-трубки за один кадр не зчитується повністю. Це призводить до поступового зростання заряду на мішені у місцях проекції оптичних сигналів до певного часу, допоки процес не стабілізується — рис. 1, б, зона «А». Далі інтенсивність стаціонарного зображення не змінюється — зона «В». Якщо раптом оптичне зображення зникає, електронне зображення після цього зникає поступово — зона «С». У правильності таких тверджень можна переконатися, змістивши камеру вбік під час спостережень — рис. 1, в. Зображення зір почнуть залишати з собою електронні «хвости», а у положенні стаціонарного зображення, де вже немає джерела світла, продовжує певний час залишатися точкове зображення (найбільш помітні залишки на рис. 1 справа, виділені колами).

Очевидно, що всі описані вище причини унеможливлюють використання будь-якої іншої моделі метеорних вимірювань, окрім моделі метеора як рухомого точкового світного об'єкта, а вимірюватися має величина E_0 . Оскільки телевізійна система типу суперізокон орієнтована на спостереження гранично слабких метеорів, які залишають дуже слабке і коротке атмосферне післясвічення, то таке обмеження не є критичним.

В даній роботі ми не будемо розглядати усі фотометричні редукції, такі як перехід від власної фотометричної системи до каталожної, корекція зоряної величини за атмосферне поглинання, приведення зоряної величини до абсолютної, корекція фотометричних вимірів по полі зору та ін. З одного боку, такі редукції є класичними, з іншого — для системи суперізокон вони частково описані в роботі [11]. Сконцентруємо увагу на коректності фотометричних вимірюваних характеристик, які б не залежали від описаних вище складнощів.

ІДЕЯ НАПІВЕМПІРИЧНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ФОТОМЕТРІЇ МЕТЕОРІВ

Як стає зрозумілим з описаного вище, провести коректну фотометричну обробку метеора, отриманого ТВ-системою типу ізокон дуже складно. Враховуючи динамічність налаштувань ТВ-системи (одна і та ж зірка може давати різний відгук в залежності від налаштування коефіцієнта підсилення та точності електромагнітного фокусування) стає очевидним, що порівнювати фотометричні виміри метеора можна лише з зорями порівняння, які наявні у тій же серії кадрів, що і метеор. Однак є дві великі проблеми: одна вибір вимірюваного параметра для зображень зір та метеора, а інша — порівняння цих значень. Для стаціонарних зір оптимальним є виміри їхніх фотометричних об'ємів

$$V_* = \sum_{x,y \in *} I(x,y)$$

(суми інтенсивності над фоном у пікселях, що належать зображению), та подальша побудова калібрувальної кривої як функції $\log V_{*} = f(m_{*})$. Логарифм взятий з тих міркувань, що зоряна величина є логарифмом освітленості, а фотометричний об'єм зорі прямо пропорційний освітленості $V_* \propto E_*$, тому $\log V_* \propto m_*$, і така залежність повинна бути прямою лінією. Однак для метеорів виміряти аналогічну величину неможливо, оскільки через інерційність неможливо відділити зображення, отримане в даному кадрі, від попереднього «хвоста». Можна було б просумувати кадри з зображенням метеора, як пропонувалося в роботі [11], а потім виділити частину метеорного просумованого зображення, що відповідає за довжиною часові одного кадру. Приблизно така схема пропонувалася в роботі [10]. Однак така схема може бути застосована для камер з лінійним відгуком на вхідний сигнал. Для камер суперізокон характерний нелінійний відгук. Як було показано в роботі [2], $V_* \propto E_*^{0.75}$, тобто функція нелінійна, звідки випливає, що один і той же об'єкт буде створювати різний інтегральний відгук за час кадру, в залежності від того, чи є він стаціонарним, чи рухається (що більша швидкість руху зображення об'єкта, то меншу інтенсивність у кадрі І він створюватиме). Насамкінець, як видно з рис. 1, б, інтенсивності зображення зір лежать у стаціонарній зоні «В», тоді як метеор через швидке зміщення функції розподілу точки (ФРТ) залишається в зоні «А», і дає суттєво менший відгук. Тому навіть якби можна було геометрично відділити та виміряти сигнал від метеора, отриманий протягом одного кадру, порівнювати його з сигналом від зір неможливо. Як показано на рис. 1, δ , метеори M_1 , M_2 з різними кутовими швидкостями ($\upsilon_{M1} > \upsilon_{M2}$), але з тією ж освітленістю (зоряною величиною), що й зоря S_2 , будуть викликати менший відгук на мішені, ніж у стаціонарному стані.

Отже, слід вимірювати деякий параметр, який був би пропорційний вхідному потоку енергії від об'єкта, з одного боку, і був би однаково вимірюваний для рухомих та стаціонарних зображень. Найпростішим таким параметром [2] є інтенсивність зображення над фоном в одному пікселі з найбільшим значенням I(x, y) (для стаціонарного зображення — у центрі зорі $I_0 = I(0,0)$). Однак через флуктуації виміри цього параметра будуть мало точними. Крім того, інтенсивність у максимумі зображення об'єкта найбільш чутлива до перенасичення, тобто її збільшення практично зупиняється після деякого граничного значення *I*_{тах}. При цифровій обробці кадрів з діапазоном інтенсивності $I \in 0...255$ (8 біт/пкл) зростання Iпрактично зупиняється при наближенні до верхньої межі. Значно кращим видається вибір площі S поперечного фотометричного перерізу над фоном, проведеного через точку максимальної інтенсивності рухомого зображення в даному кадрі. Похибка вимірів S буде у \sqrt{N} менша, ніж для одиночних пікселів, де *N* — кількість сумованих пікселів, крім того, при досягненні верхньої межі І_{тах} площа продовжує зростати за рахунок



Рис. 2. Тест «штучний метеор»: *a* — стаціонарний кадр (Велика Ведмедиця), *б* — та ж область неба, отримана з рухомою камерою, *в* — кадр одночасно з метеором та штучним супутником Землі, *г* — кадр з реальним метеором

розширення поперечного розміру зображення. При такому підході калібрувальну криву можна будувати як функцію $S_* = S_*(m_*)$. Однак, вимірявши аналогічне значення для метеора S_M , заходити з ним у таку калібрувальну криву не можна через різні експозиції рухомого метеора і зір порівняння, оскільки площа фотометричного перерізу залежить, крім зоряної величини m_M , від швидкості руху зображення ФРТ по кадру: $S_M = S_M(m_M, v_M)$. Виходом з такої ситуації є «зупинка» зображення метеора, тобто визначення його фотометричного відліку $S_M(m_M, 0)$, коли зображення було б нерухомим. Для встановлення виду функції $S_M = S_M(m_M, v_M)$ можна скористатися тестом з рухомою камерою при зйомці зоряного неба [11, 13, 14], оскільки зорі також є точковими об'єктами, відповідними до нашої моделі метеора. Підбираючи широкий діапазон інтенсивності зір та відповідний до метеорного набір швидкостей руху зображень зір по кадру (він визначається різними кутовими швидкостями обертання камери), отримаємо деяку залежність $S_* = S_*(m_*, v_*)$, включаючи варіант $v_* = 0$.



Рис. 3. Залежність площі фотометричного поперечного перерізу від швидкості руху зображення по кадру (пкл/кадр) для першої групи зір (*a*) та апроксимація відносної площі фотометричного перерізу для всіх неперенасичених зір з обох вибірок (б)

На рис. 2 приведено зображення стаціонарного та рухомого поля зору з зорями, та кадри з реальним метеором та штучним супутником Землі.

Для встановлення залежності площі фотометричного перерізу рухомого зображення зірки від швидкості руху зображення по кадру отримано графіки для груп зір з сузір'їв Великої Ведмедиці (перша група) та Орла (друга група). В першій групі оброблено дані для 21 зорі, набір швидкостей: 0, 2.00, 2.41, 2.84, 3.11, 4.78, 4.86, 6.81, 8.07, 9.04, 21.45 пкл/кадр, що при кутовому розмірі пікселя 4' та розгортці 25 кадрів за секунду відповідає значенням 0, 3.33, 4.02, 4.73, 5.18, 7.97, 8.10, 11.35, 13.45, 15.07, 35.75 град/с. Друга група налічувала 11 зірок та набір швидкостей 0, 1.50, 5.05, 5.10, 6.96, 28.29 пкл/кадр, або 0, 2.49, 8.42, 8.50, 11.61, 80.48 град/с. Обмежений набір значень швидкостей обумовлений складністю постановки експерименту з рухомою телевізійною камерою, яка працює 25 повних кадрів за секунду (для опрацювання використовувалися лише півполя кадру) — будь-яка мала зміна швидкості призводить до практично миттєвої зміни фотометричного профілю зображення.

Однак даний набір достатньо задовільно відображає діапазон кутових швидкостей метеорів. Графік залежності $S_* = S_*(m_*, v_*)$ для першої групи зір приведений на рис. 3, а. Видно, що вся підвибірка розпадається на два типи залежності — для дуже яскравих зір, зображення яких є перенасиченими, та для середніх і слабких зір (переважна більшість). Для другої групи зір графік має аналогічний вигляд. Якщо вид залежності для середніх та слабких зір легко пояснюється, то для перенасичених зображень хід функції виглядає дивним. Імовірно, той факт, що відгук майже не залежить від швидкості руху яскравих зображень, можна пояснити нелінійною залежністю $V_* \propto E_*^{0.75}$. Фотометричні об'єми V_* (і відповідно S_* та I_*) яскравих зір при зменшенні освітленості пікселя мало змінюються до певної швидкості руху зображення, залишаючись в області малих градієнтів відповідної функції. Однак незрозуміло, чому відбувається зменшення $S_* = S_*(m_*, 0)$. Можливо, причиною тому є вторинні електрони, які не досягають сітки мішені телевізійної трубки та підтримують контраст зображення, одночасно зменшуючи його видимий поперечний розмір. Як було видно з рис. 1, в, найбільш інтенсивне зображення, і відповідно найбільша кількість вторинних електронів спостерігаються у стаціонарному зображенні.

Як видно з рис. 3, *a*, перенасичені зображення зір (і метеора) не можуть бути адекватно використані для коректної фотометрії. Однак зображення, які лежать в неперенасиченій ділянці динамічного діапазону інтенсивності, дозволяють провести коректну фотометрію відносно слабких метеорів, причому видно, що вид функціональної залежності не залежить суттєво від зоряної величини. На рис. 3, б приведено залежність відносних значень $S_{*}(m_{*})/S_{*}(m_{*},0)$ від швидкості руху точкового зображення υ_* по кадру. Як видно, дана функціональна залежність є однаковою для об'єктів всіх зоряних величин (в даному діапазоні), тому може бути описана єдиною функцією. Для спрощення перерахунку S(m, v) до S(m, 0) можна підібрати апроксимаційну функцію, яка мала б, очевидно, відповідати двом умовам: S(m, v) / S(m, 0) = 1 при v = 0, та $S(m, v) / S(m, 0) \rightarrow 0$ при $v \rightarrow \infty$. Найпростішим випадком такої функції є експонента

$$S_*(m, v) / S_*(m, 0) = \exp(-C_* v_*),$$
 (1)

де $C_* \approx 0.33$ (див. рис. 3, δ , пунктирна крива). Дане значення коефіцієнту, імовірно, не є оптимальним через відсутність у тесті значень швидкості для діапазону 10—20 пкл/кадр, і тому погано описує значення функції для найбільших значень швидкості. У першому наближенні цим графіком можна скористатися для фотометрії відносно повільних метеорів, однак найкраще значення для всього діапазону швидкостей дає степенева функція

$$S_*(m,v) / S_*(m,0) = C_B v^{-C_A}$$
, (2)

де $C_A \approx 0.51$, $C_B \approx 0.49$ (рис. 3, δ , суцільна крива). При цьому слід пам'ятати, що при апроксимації цією функцією $S(m, \upsilon) / S(m, 0) = 1$ при $\upsilon \approx 0.25$ пкл/кадр, а не при $\upsilon = 0$, тобто приведення швидкості іде саме до цього значення. При цьому, очевидно, ми автоматично вважаємо, що $S(m, 0) \approx S(m, 0.25)$, а на практиці це означає, що при $\upsilon < 0.25$ пкл/кадр користуватися цією формулою не можна.

При такому підході єдиною проблемою, що залишається, є той факт, що величина *S* вимірюється для нерухомих зір з поганою точністю, що пов'язано, напевно, з певною асиметрією зображень зір у парних та непарних полях телевізійного кадру. Калібрувальна крива буде побудована з великими похибками. Значно точніше для них вимірюється значення фотометричного об'єму V_* . Крім того, саме ця величина безпосередньо пов'язана з освітленістю від об'єкта E_0 . Зважаючи на те, що обидві величини пов'язані між собою, та пропорційні освітленості від об'єкта, спадає на думку проводити для побудови калібрувальної кривої виміри для зір саме величини V_* . А для переведення скоригованих метеорних величин $S_M(m_M, 0)$ до $V_M(m_M)$ використати емпіричну залежність між ними, встановленої знову ж таки за рухомими та стаціонарними зображеннями зір. Найпростішим варіантом для переводу S(m, 0) у V(m) є використання факту, що просторові зображення зір добре апроксимуються гауссіаною

$$I(x,y) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right),$$

де $I_0 = I(0,0)$. Використовуючи цей факт, можна записати, що $V / S = \sqrt{2\pi\sigma}$, і через цю формулу визначати V через S, якщо використовується аналітична апроксимація контурів зображень. Якщо ж виміри відбуваються спрощено, можна зв'язок між V та S встановити через максимальну інтенсивність зорі над фоном I_0 , яка вимірюється елементарно для кожного зображення зорі $V / S^2 = 1 / I_0$.

Однак, як показують вимірювання, залежність V_* / S_* в загальному не є постійною величиною для зір різної зоряної величини, тобто σ змінюється, що знову ж таки пов'язане з конструктивними особливостями ТВ-системи. Тим не менш, як випливає з експериментальних вимірювань V_* та S_* для стаціонарних зір, залежність V_* / S_* від S_* для всього діапазону інтенсивності гарно апроксимується лінійним поліномом

$$V_* / S_* = P_A S_* + P_B, \qquad (3)$$

де $P_A \approx 0.0033$, $P_B \approx 2.50$ для нашої системи, і через який на практиці і можна розраховувати V через S. Для середніх та слабких об'єктів $V/S \approx 3...4$, для перенасичених $V/S \approx 5...6$ і, можливо, більше.

ОБГОВОРЕННЯ ТА ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ Напівемпіричного методу фотометрії

Коли залежність величини поперечного фотометричного перерізу S(v) від швидкості руху



Рис. 4. Калібрувальна крива, побудована за нерухомими фотометричними об'ємами зір порівняння під час спостережень 19 вересня 2013 р. (*a*). Крива блиску спорадичного метеора, зареєстрованого 19 вересня 2003 р. в UT = $20^{h}42^{m}31^{s}$ (б)

зображення по кадру и для даної спостережної системи встановлена виразом (1) чи (2), процес фотометрії метеора виглядає на практиці таким чином. Спрощений варіант полягає в тому, що спочатку для стаціонарних зір порівняння у кадрі, де є метеор (в усередненому кадрі) вимірюються їхні значення $S_*(m_*,0)$, та з каталогу беруться їхні зоряні величини *m*_{*}, за якими будується калібрувальна крива $m_* = m_*(S_*, 0)$. Далі для метеора в кожному кадрі вимірюється значення швидкості зображення метеора по кадру υ_M , та $S_M(m_M, \upsilon_M)$, а далі за формулою (1) або (2) роблять метеор «нерухомим», тобто обчислюють $S_{M}(m_{M}, 0)$. Потім з цим значенням $S_{M}(m_{M},0)$ входять в калібрувальну криву та отримують зоряну величину метеора m_{M} .

Більш точний підхід полягає в наступному. Для побудови калібрувальної кривої в усередненому кадрі вимірюються більш точні значення $V_*(m_*)$ для зір порівняння, за якими будується калібрувальна крива $m_* = m_*(\lg V_*)$. Далі виміри поперечних фотометричних профілів $S_M(m_M, v_M)$ метеора в кожному кадрі з попередньо виміряними значеннями v_M перетворюємо за формулою (1) або (2) на $S_M(m_M, 0)$. Потім, скориставшись формулою (3), через $S_M(m_M, 0)$ отримаємо «фотометричний об'єм нерухомого метеора» $V_M(m_M)$, з яким входимо в калібрувальну криву та обчислюємо m_M .

Для прикладу розглянемо метеор, який було зареєстровано 19 вересня 2003 р. в $UT = 20^{h}42^{m}31^{s}$. Для спостережень використовувався той же об'єктив «Юпітер-3» (F = 50 мм, F/1.5), що і для тестів. Швидкість руху його зображення складала $\upsilon \approx 5.14 \pm 1.75$ пкл/кадр ($\upsilon \approx 8.57 \pm 2.92$ град/с). Було використано калібрувальну криву, приведену на рис. 4 (зліва). Як видно, калібрувальну криву неможливо апроксимувати на всьому динамічному діапазоні прямою, однак непогано підходить квадратичний поліном $m \approx -2.07(\lg V)^2 + 9.20(\lg V) - 3.37$.

ВИСНОВКИ

Описану вище методику фотометрії розроблено в першу чергу для ТВ-систем з трубкою типу ізокон (суперізокон), але через свою універсальність вона може бути використана для будь-якої спостережної відео- чи телевізійної системи. Очевидним недоліком такого напівемпіричного методу є обмежена кількість точок, що відповідає кількості кадрів з метеором, а відтак і точність проведення кривої блиску. Для штучних супутників Землі ситуація значно краща через їхню суттєво меншу кутову швидкість.

Для спостережних систем з лінійним відгуком на вхідний сигнал можна аналогічно обробляти зображення метеора або супутника в одному просумованому кадрі, де фотометричний переріз робити через кожен піксель вздовж траєкторії, але порівнювати такі виміри також слід з сумарними кадрами з рухомими зображеннями зір. Правда, при цьому слід пам'ятати, що фотометричний профіль в кожному пікселі не відповідає строго миттєвому значенню зоряної величини світного об'єкта через великий розмір ФРТ для точкових об'єктів.

Ще однією проблемою, яку слід вирішити у майбутньому для системи суперізокон, є яскраві зображення, які мають інший вигляд залежності фотометричних профілів рухомих та стаціонарних об'єктів. В даному прикладі розглянуто досить слабкі метеори діапазону 7—5^{*m*} (гранично видимі надслабкі метеори для нашої ТВ-системи мають блиск у максимумі 7^{*m*}). Однак для метеорів потоків Леоніди або Персеїди більшість зображень метеорів буде сильно перенасиченою, тому фотометричні дослідження ТВ-системи суперізокон в області яскравих зображень слід продовжити.

- 1. *Иваников В. И.* О методах фотографической фотометрии метеоров // Бюл. Сталинабадской астрон. обсерватории. 1957. № 21. С. 3—46.
- Козак П. Н. О внутренней точности цифровой фотометрии метеоров по телевизионным наблюдениям // Кинематика и физика небес. тел. — 1998. — 14, № 6. — С. 553—563.
- 3. *Козак П. Н.* Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров // Кинематика и физика небес. тел. 2002. **18**, № 5. С. 471— 480.
- 4. *Козак П. Н.* Векторный метод определения параметров траектории и элементов гелиоцентрической орбиты метеора для телевизионных наблюдений // Кинематика и физика небес. тел. 2003. **19**, № 1. С. 62—76.
- Сытинская Н. Н. Опыт фотографической фотометрии метеоров // Астрон. журн. — 1935. — 12, вып. 2. — С. 174—199.
- Campbell-Brown M. D., Borovicka J., Brown P., Stokan E. Modelling of meteoroids at high resolution // Abs. Meteoroids. – 2013. – Poznan, Poland, 2013. – P. 23.

- 7. *Fleming D. E. B., Hawkes R. L., Jones J.* Light curves of faint television meteors // Meteoroids and their parent bodies / Eds J. Stohl, I. P. Williams. Astronomical Institute of the Slovak Academy of Science, 1993. P. 261–264.
- Hajdukova M., Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., et al. Perseid meteor stream 1991–1993 from TV observations in Kiev // Earth, Moon and Planets. – 1995. – 68. – P. 297–301.
- Hawkes R. L., Mason K. I., Fleming D. E. B., Stultz C. T. Analysis procedures for two station television meteors // Proceedings International Meteor Conference 1992 / Eds D. Ocenas, P. Zimnikoval. — Antwerpen: IMO Publication, 1993. — P. 28—43.
- Hawkes R. L., Bussey J. E., MacPhee S. L., et al. Technics for high resolution meteor light curve investigations // Proceedings of the Meteoroids 2001 Conference, Kiruna, Sweden, 6–10 August. – ESA-SP 495 / Ed. Barbara Warmbein. – Kiruna, 2001. – P. 281–286.
- Kozak P. "Falling Star": Software for Processing of Double-Station TV Meteor Observations // Earth, Moon, and Planets. – 2008. – 102, N 1–4. – P. 277–283.
- Kozak P. "Falling star": Software for processing of double-station TV meteor observations // Adv. Meteoroid and Meteor Sci. / Eds J. M. Trigo-Rodrigues, F. J. M. Rietmeijer, J. Llorka, D. Janches. Springer, 2008. P. 277–283.
- Kozak P., Rozhilo O., Kruchynenko V., et al. Results of processing of Leonids-2002 meteor storm TV observations in Kyiv // Advs Space Res. — 2007. — 39, N 4. — P. 619— 623.
- Kozak P. M., Rozhilo A. A., Taranukha Y. G. Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors // Proceedings of the Meteoroids 2001 conference, Kiruna, Sweden, 6–10 August / Ed. Barbara Warmbein. 2001. ESA-SP 495. P. 337–342.
- Kozak P., Rozhilo O., Taranukha Y. Identification of Radiants of Low-Light-Level Meteors from Double Station TV Observations During Autumn Equinox of 2001 and 2003 // Abs. IAU XXVIII General Assembly, Beijing, China. – 2012. – P. 5963.
- LeBlanc A. G., Murray I. S., Hawkes R. L., et al. Evidence for transverse spread in Leonid meteors // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2000. – 313. – P. L9–L13.
- McCrosky R. E., Posen A. Special data-reduction procedures for Prairie networks meteor photographs // SAO Special Report. – 1968. – 273. – P. 1–88.
- Murray I. S., Beech M., Taylor M. J., et al. Comparison of 1998 and 1999 Leonid Light Curve Morphology and Meteoroid Structure // Earth, Moon, and Planets. – 1998. – 82–83. – P. 351–367.
- 19. *Pearce G. S.* Simulated meteors observation tests // The astronomer. 1970. 7. P. 56-58.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

- Spurny P., Betlem H., Jobse K., et al. New type of radiation of bright Leonid meteors above 130 km // MAP. Sci. – 2000. – 35. – P. 1109–1115.
- Taylor M. J., Gardner L., Murray I., Jenniskens P. Jetlike structures and wake in Mg I (518 nm) images of 1999 Leonid storm meteors // Earth, Moon, and Planets. – 2000. – 82–83. – P. 379–389.

Стаття надійшла до редакції 10.10.14

П. Н. Козак, Л. В. Козак

- ¹ Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев
- ² Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

МЕТОД ФОТОМЕТРИИ СЛАБЫХ МЕТЕОРОВ И ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ С ТЕЛЕВИЗИОННЫМИ СИСТЕМАМИ СУПЕРИЗОКОН

Предлагается универсальный полуэмпирический метод фотометрии слабых метеоров и искусственных спутников Земли. Метод разрабатывался для фотометрических измерений и редукции изображений, полученных телевизионными наблюдательными системами типа суперизокон, известных своей нелинейностью отклика на входной сигнал и послесвечением динамических изображений в телевизионном кадре. Полуэмпирический подход проявился в том, что фотометрические зависимости телевизионной системы для движущихся и стационарных точечных объектов исследовались путем фотографирования звездного неба камерой, которая вращалась с разными угловыми скоростями, включая нулевую. На основе полученных результатов построена калибровочная кривая и рассчитана кривая блеска для слабого метеора 4—7^{*m*}. Предложенная методика универсальная, и ее можно использовать для фотометрической обработки точечных движущихся светящихся объектов, полученных любой теле- или видеосистемой.

Ключевые слова: метеоры, телевизионные наблюдения метеоров, фотометрия метеоров.

P. M. Kozak, L. V. Kozak

 ¹Astronomical Observatory of the Taras Shevchenko National University of Kyiv
²Taras Shevchenko National University of Kyiv

METHOD FOR PHOTOMETRY OF LOW LIGHT LEVEL METEORS AND EARTH ARTIFICIAL SATELLITES FROM OBSERVATIONS OF SUPER-ISOCON TV SYSTEMS

A universal semi-empirical method for photometry of low light level meteors and earth artificial satellites is proposed. The method was developed for photometrical measurements and reductions of images obtained with the help of TV systems of super-isocon type known by its non-linear response onto input signal and long afterimage in TV frames from dynamical objects. Semi-empirical approach has appeared in that the photometrical dependencies of TV system for moving and stationary objects were investigated with the test of photographing of star sky with the camera which was rotating with different angular velocity including stationary state. Basing on obtained results the calibration curve was plotted, and the light curve of a meteor from range of 4–7 magnitude was calculated. The proposed method is universal and can be used for photometrical processing of moving irradiated point objects obtained with any TV or video system.

Key words: meteors, TV observations of meteors, meteor photometry.

УДК 551.510.536; 551.510.535

О. К. Черемних¹, В. В. Гримальський², О. Л. Івантишин³, В. Н. Івченко⁴, Л. В. Козак⁴, В. В. Кошовий³, В. П. Мезенцев⁵, М. Е. Мельник⁵, Р. Т. Ногач⁵, Ю. Г. Рапопорт^{4, 1}, Ю. О. Селіванов¹, І. Т. Жук¹

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України

і Державного космічного агентства України, Київ

² Національний інститут астрофізики, оптики і електроніки, Мехіко

³ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, Львів

⁴Київський національний університет імені Тараса Шевченка

⁵Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України

і Державного космічного агентства України, Львів

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШТУЧНОЇ АКУСТИЧНОЇ МОДИФІКАЦІЇ АТМОСФЕРИ ТА ІОНОСФЕРИ

В 2013—2014 рр. в Україні було проведено два комплексних наземно-космічних експерименти з вивчення ефектів акустичного збурення іоносфери. Аналіз отриманих даних разом з експериментальними даними попередніх років дав нові знання про вплив низькочастотного звуку (в тому числі інфразвуку) на верхню атмосферу та іоносферу і відкрив перспективні напрямки подальших досліджень. В орбітальному сегменті космічні використовувались апарати DEMETER та «Чибіс-М», а в наземному — наземний низькочастотний акустичний випромінювач ННАВ (ЛЦ ІКД НАНУ та ДКАУ), радіотелескоп УРАН-З ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України (Львів). При аналізі виявлено періодичні та аперіодичні варіації статистичних характеристик даних і їхню кореляцію з приходом штучних акустичних збурень. Вперше розроблені фізико-математична модель та числовий алгоритм для моделювання поширення випромінювання ННАВ на шляху від поверхні Землі до іоносфери з урахуванням реальних параметрів середовища. Запропоновано вдосконалену схему проведення подальших наземно-космічних акустичних експериментів.

Ключові слова: динамічні процеси, іоносфера, дія акустичного випромінювання, системний спектральний аналіз, радіофізичні методи.

вступ

Понад півстолітні дослідження акустичного впливу на іоносферу від наземних джерел (хімічні та ядерні вибухи, старти ракет-носіїв, землетруси) дали змогу виділити їхні основні ефекти. За результатами потужних вибухів, наприклад в експериментах МАССА [1] у 1982 р., було встановлено такі ефекти акустичної дії на іоносферу: 1. Просторово розподілена та довготривала активність акустико-гравітаційних і МГД-хвиль в іоносфері, ініційована імпульсним акустичним збуренням, що спостерігалась протягом приблизно 1 год на відстанях 250—1000 км від джерела.

2. Солітоноподібні збурення, ініційовані акустичним імпульсом в іоносфері, що вимірювались як короткотривалі (менше 0.1 с) магнітні імпульси на висотах F-області іоносфери.

3. Довготривала пляма плазмової турбулентності в іоносфері, ініційована акустичним збуренням, спостерігалась як область низькочастотної (50—5000 Гц) електростатичної турбулентності.

[©] О. К. ЧЕРЕМНИХ, В. В. ГРИМАЛЬСЬКИЙ, О. Л. ІВАНТИШИН,

В. Н. ІВЧЕНКО, Л. В. КОЗАК, В. В. КОШОВИЙ,

В. П. МЕЗЕНЦЕВ, М. Е. МЕЛЬНИК, Р. Т. НОГАЧ,

Ю. Г. РАПОПОРТ, Ю. О. СЕЛІВАНОВ, І. Т. ЖУК, 2015

4. Нелінійна трансформація акустичного імпульсу в електромагнітні збурення в іоносфері.

5. Вихрова довготривала іоносферна структура, ініційована акустичним імпульсом, локалізована поблизу епіцентрів вибухів в інтервалі висот 150—500 км та з горизонтальним розміром в кілька сотень кілометрів.

Ці ефекти викликали інтерес і до інших наземних та приземних джерел звуку, що розвивався в напрямках: 1) вивчення іоносферних провісників землетрусів, вивержень вулканів, тайфунів; 2) вивчення шкідливого впливу на іоносферу запусків ракет-носіїв, польотів міжконтинентальних авіалайнерів; 3) вивчення можливостей дослідження іоносфери шляхом цілеспрямованого (програмованого) акустичного впливу на неї за аналогією з відомими системами HAARP (США) та «Сура» (РФ).

Спільним знаменником у всіх вказаних проблемах є проблема енергетичної достатності впливу. Питання про достатність потужності акустичного джерела для появи іоносферного відгуку є також і питанням про умови «акустичної прозорості» атмосфери. Іншим важливим питанням є характер іоносферного відгуку та можливість його виділення на фоні звичайного іоносферного шуму. Дослідження авторів даної роботи лежать саме в цьому колі проблем.

В 2013—2014 pp. в Україні було проведено два комплексних наземно-космічних експерименти з вивчення ефектів акустичного збурення іоносфери. Автори експериментів (і даної публікації) використали в орбітальному сегменті космічні апарати DEMETER та «Чибіс-М», а в наземному — наземний низькочастотний акустичний випромінювач ННАВ (ЛЦ ІКД НАНУ та ДКАУ) та радіотелескоп УРАН-З (ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів). Для виконання аналізу також було зібрано та систематизовано унікальні дані наземно-космічних експериментів минулих років щодо збурення іоносфери за допомогою ННАВ. За даними супутника DEMETER виявлено ефект збільшення прозорості іоносфери для електромагнітних хвиль ДНЧ-діапазону під дією акустичного випромінювача. Встановлено наявність ефекту приблизно в 70 % випадків. Аналогічний ефект виявлено за допомогою вимірювань галактичного тла радіотелескопом УРАН-3. В даних вимірювань супутника «Чибіс-М» (12.11.2014 р., висота орбіти 340 км) знайдено дві події (аномальні хвильові збурення *z*-компонента магнітного поля), що за часом появи можуть бути ідентифіковані як реакція на акустичний імпульс. На основі аналізу даних було розроблено нову фізико-математичну модель та числовий алгоритм для моделювання особливостей розповсюдження випромінювання акустичного генератора на шляху до іоносфери. Критичне вивчення проведених експериментів дало змогу розробити проект нового комплексного експерименту, з тим, щоб його результати лягли в основу досліджень з програмованого акустичного впливу на іоносферу та моделювання впливів природних стихійних явищ з метою їхнього передбачення.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Проведено підбір, систематизацію і подання даних щодо низькочастотних акустичних експериментів в атмосфері та іоносфері, зокрема за участю КА DEMETER і «Чибіс-М» та радіотелескопа УРАН-3. На основі зібраних та систематизованих в ЛЦ ІКД даних наземно-космічних експериментів з акустичного впливу на іоносферу створено першу чергу інформаційно-аналітичної системи КОДІОНА (КОмплексні Дослідження ІОНосферної Акустики) Каталог файлів даних містить дані експериментів за період з 2005 по 2013 рік, файли опису структури подання (формату) даних, файли траєкторної інформації (для експериментів за участю космічних засобів) — всього 495 файлів загальним обсягом більш ніж 15 Гбайт. Другий каталог — наборів даних за сеансами вимірювань — містить інформацію про кількість даних, отриманих в сеансі, їхнє розміщення в загальному файлі даних, час та, якщо потрібно, координати, що відповідають початку та завершенню сеансу, графічні файли QuickLook для даних та картографічні файли для просторової конфігурації під час сеансу (для низки наборів даних). Сукупність цих даних дозволяє провести аналіз впливу форми, тривалості штучних акустичних збурень на стан іоносфери при різних параметрах метеорологічної обстановки і стану сонячної активності (рентгенівські сонячні спалахи).

Зроблено аналіз статистичних методів і підходів, які можна використати для аналізу збурень параметрів при акустичних експериментах в іоносфері для визначення типу динамічних процесів (ламінарний чи турбулентний процес та тип турбулентного процесу). Для подальшого аналізу динамічних процесів було відібрано три незалежні підходи: аналіз функції густини ймовірностей флуктуацій вимірюваних параметрів, аналіз ексцесу та аналіз структурних функцій високих порядків.

Розроблено аналітичну модель та алгоритм чисельного моделювання динамічних процесів в атмосфері, пов'язаних з акустичними експериментами. Розвинуті теоретична модель та алгоритм включають, відповідно, чисто гідродинамічний підхід до ЗХ/АГХ в нелінійній стратифікованій неізотермічній та дисипативній атмосфері та спектрально-різницевий чисельний алгоритм. Розглядається наземне джерело хвиль заданої форми, що якісно відповідає апертурі наземного генератора звуку, і враховуються відповідні початково-граничні умови, що відповідають наявності двох «несучих» частот 625 Гц та 600 Гц, що випромінюються акустичним генератором. Розглядаються швидкості середовища порядку 300 м/с на рівні Землі Z ~ 300 м/с. Враховується також наявність низькочастотної модуляції. Вперше побудована тристадійна гідродинамічна модель проникнення з нижньої атмосфери в іоносферу «звукові хвилі (ЗХ) з несучою частотою» — «ЗХ з різницевою частотою» — «атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ) з модуляційною частотою». Аналітичний підхід призволить до рівнянь типу Хохлова — Заболоцької для стратифікованого неізотермічного середовища. Алгоритм для моделювання заснований на спектральнорізницевому чисельному методі.

Отримані результати аналізу та інтерпретації експериментальних даних на основі порівняння з ними теоретичних результатів. Вперше отримані результати попередніх розрахунків за тристадійною гідродинамічною моделлю проникнення з нижньої атмосфери в іоносферу «звукові хвилі (ЗХ) з несучою частотою» — «ЗХ з різницевою частотою» — «атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ) з модуляційною частотою». При вхідних швидкостях порядку 300 м/с в атмосферу проникають АГХ зі швидкостями порядку декількох метрів за секунду. Стадії 1, 2 та 3 проникнення ЗХ/АГХ від наземного звукового генератора в іоносферу відбуваються в областях висот 0—0.1 км. 0.1—10 км та від 10 км до іоносферних висот відповідно. Спостерігалися ефекти «електромагнітного просвітлення» (підвищення інтенсивності відповідних хвиль) іоносфери в ДНЧ- (кГц) діапазоні в результаті впливу звукового генератора при проходженні електромагнітних хвиль ДНЧдіапазону «знизу вгору», при чому використовувалися як випромінювачі (наземні) навігаційні станції РСДН-20 («Альфа») з частотами 11, 13 і 15 кГц, а прийом вівся бортовою апаратурою супутника DEMETER. Ефект «просвітлення» спостерігався також при проходженні електромагнітних хвиль ДНЧ/вістлерного діапазону «згори вниз», при чому використовувалися наземні ДНЧ-приймачі. «Просвітлення іоносфери» в результаті дії звукового генератора спостерігалося також для електромагнітних хвиль МГц-діапазону від космічних джерел (галактичні радіоемісії), що приймалися за допомогою радіотелескопа УРАН-3. Гіпотетично можливими ефектами, що пояснюють вплив на іоносферу, що спричиняє звуковий генератор є: 1) трансформація УНЧ АГХ у плазмові хвилі (можливо, в *E*-шарі); 2) «лінзування» (або зміна ефектів затухання/розсіяння) для радіохвиль в кГц- (вістлерному) ДНЧ-діапазоні та зміна ефектів затухання/розсіяння в МГц-діапазоні. Оцінки дають, що типові розміри «області дії» акустичного генератора в іоносфері відповідають декільком довжинам хвиль вістлерного (ДНЧ) діапазону, що відповідає можливості утворення відповідної лінзи для електромагнітних хвиль. Основні результати, викладені в даному параграфі, опубліковані в роботах [7, 15—18].

ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПРОДОВЖЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ НА 2015 р. І ДАЛІ

Унікальність експерименту. 1. З точки зору фізики дії на іоносферу, це єдиний в світі, на даний час, активний експеримент зі штучного акустичного впливу на іоносферу.

2. З точки зору енергетики — потужність близка до мінімально можливої/порогової величини [11, 14], при якій ще можна зареєструвати дію на іоносферу. Це є важливим і саме по собі. Потужність менша, ніж для всіх інших відомих випадків, коли, як відомо, реалізувалися ефекти фізичних зв'язків нижньої атмосфери з літосферою, в тому числі пов'язані з землетрусами, циклонами, стартами ракет та ін. Це дозволяє реєструвати «тригерні ефекти» виділення енергії в системі «літосфера — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЛАІМ)». Це виділення значної енергії може відбувається за рахунок відносно слабкої дії від «зовнішнього джерела», в даному випадку звукових хвиль (ЗХ)/атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) від звукового генератора.

3. Вплив на іоносферу від звукового генератора може призводити до оптичного ефекту згідно з даними [2, 3], а саме — до «зеленої» оптичної емісії кисню (551.7 нм) на висотах Е-області іоносфери (110-120 км). Але це відповідає «оптичній енергії» порядку 1 еВ, або підвищенню електронної температури до 11000 К. Згідно з нашими оцінками, це з великою імовірністю означає наявність певних «тригерних ефектів». Такий експеримент, виходячи з сучасних оптичних засобів, може бути зараз проведений навіть ефективніше, ніж в роботах [2, 3]. Якщо результати [2, 3] будуть підтверджені, це буде означати не тільки підтвердження штучного акустичного впливу на іоносферу, а й вкаже на підтвердження наявності тригерних ефектів. Це дуже важливо і для фізики сейсмоіоносферної взаємодії та космічної погоди.

Фундаментальне значення експерименту. 1. В даному експерименті створено «ідеальні» умови для знаходження так званих «тригерних ефектів» віоносфері [5, 6, 8, 13, 19]. При цьому можуть бути виявлені та досліджені нові комбіновані типи нестійкостей в системі ЛАІМ, наприклад, типу «гідродинамічні-фотохімічні-теплові-струмовіплазмові». При цьому принципово важливим є дослідження ролі аерозолів [2, 39, 10].

2. Даному експерименту характерні сильна нелінійність та турбулентність в нижній атмосфері та відносно слабкий атмосферно-гравітаційнохвилевий сигнал в іоносфері, що дає можливість експериментально вивчити «мезомасштабні» з точки зору перетворень енергії явища, де є і «сильні» і «слабкі» впливи в одному експерименті.

Значення для сейсмоіоносферних досліджень та космічної погоди. Ці експерименти дають можливість вивчити механізми сейсмоіоносферні взаємодії, космічну погоду, а саме природу універсальної інфразвукової взаємодії та акустичноелектромагнітного зв'язку в системі ЛАІМ [2, 6, 8, 13]. Сюди включається збудження інфразвуку природними та штучними джерелами в нижній атмосфері/літосфері, від полярних сяйв, блискавок, механічну складову МГД-збурень, що проникають в систему ЛАІМ/МІАЛ від сонячного вітру, вплив АГХ на шуманівський та альвенівський резонатори і т. д.

Метод когерентно-некогерентного акустичного впливу на іоносферу. Попередні теоретичні оцінки показують, що група некогерентних імпульсів від штучного наземного акустичного джерела може проникати з нижньої атмосфери до іоносфери значно ефективніше, ніж один когерентний сигнал з сумарною інтенсивністю. Це відкриває шлях для реалізації нового методу цілеспрямованого когерентно-некогерентного акустичного впливу на іоносферу «знизу».

висновок

На основі викладених вище результатів досліджень перелічимо роботи, що плануються на майбутнє.

1. Проведення додаткових числових розрахунків за розвиненими моделями для інтерпретації експериментальних даних та планування подальших експериментів. Подальший розвиток теоретичної моделі для моделювання прямих іоносферних ефектів від генератору звуку. Подальший розвиток теоретичної моделі для моделювання впливу на іоносферу когерентно-некогерентних сигналів з метою: а) дослідження фізичного механізму дії генератора звуку на іоносферу, б) розуміння механізмів сейсмоіоносферного зв'язку, в) розробки алгоритмів цілеспрямованої акустичної дії на іоносферу.

2. Попередня робота для вияснення технічної можливості проведення експериментів з вимірювань спектру акустичних збурень в області ви-

сот та радіусів порядку декількох кілометрів від акустичного генератора. Це буде дуже корисним як для розуміння фізики впливу акустичного генератора на іоносферу, так і для розуміння механізмів сейсмоіоносферного зв'язку та планування наступних експериментів.

3. Обробка даних експериментів із супутником DEMETER з виявлення збурень іоносфери під впливом атмосферних акустичних збурень в умовах різної сонячної активності. Розгляд експериментальних даних з точки зору причин, що призводили до відсутності ефектів у іоносфері від генератору звуку або можливості «хибного спрацювання» у відсутності ефекту від звукового генератора.

4. Проведення спільних експериментів з радіотелескопом УРАН-3 з виявлення збурень іоносфери від впливом акустичних хвиль в атмосфері в умовах різної сонячної активності. Включення дослідження акусто-оптичного та аерозольного ефектів у атмосфері та іоносфері з метою підтвердження наявності «тригерних» ефектів акустичного атмосферно-іоносферного зв'язку.

5. Аналіз даних моніторингу атмосферного інфразвуку для виявлення його взаємозв'язку з сейсмічними явищами з наміром показати, що інфразвук є їхнім передвісником.

6. Проведення проектних робіт, виготовлення і монтажних робіт для можливості плавного перестроювання частоти випромінювання стаціонарного акустичного випромінювача. Проведення робіт з підтримки дієздатності мобільного акустичного випромінювача потужністю 550 кВт.

7. Комплексне та цілеспрямоване наземносупутникове дослідження штучного акустичного впливу на атмосферу та іоносферу за допомогою широкого класу радіофізичних та оптичних методів та інструментів, зокрема дослідження аерозольних ефектів.

- 1. *Гохберг М. Б., Шалимов С. Л.* Литосферно-ионосферное взаимодействие и его моделирование // Российский журн. наук о Земле. 2010. **2**. С. 95—108.
- 2. *Негода А. А., Сорока С. А.* Акустический канал космического влияния на биосферу Земли // Космічна наука і технологія. 2001. 7, № 5/6. С. 85—93.

- Aramyan A. R., Galechyan G. A., Harutyunyan G. G., et al. Modeling of interaction of acoustic waves with iono-sphere // IEEE Transactions on Plasma Sci. 2008. 36, N 1. P. 305–309.
- Arrowsmith S. J., Johnson J. B., Drob D. P., Hedlin M. A. H. The seismoacoustic wavefield: a new paradigm in studying geophysical phenomena // Revs Geophys. – 2010. – 48, RG4003. – P. 8755–1209. – (Paper N 2010RG000335).
- 5. *Atmospheric* and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. M. Hayakawa. To-kyo: TERRAPUB, 1998. P. 777—787.
- 6. *Bespalov P. A., Savina O. N.* Possibility of magnetospheric VLF response to atmospheric infrasonic waves // Earth Planets Space. 2012. **64**. P. 451--458,
- Cheremnykh O. K., Klimov S. I., Koshoviy V. V., et al. Ground-space experiment on artificial acoustic modification of the ionosphere. The first results // Space Sci. and Technol. – 2014. – 20, N 6.
- Hecht J. H. Instability layers and airglow imaging // Rev. Geophys. – 2004. – 42, RG1001.–12 p.
- Hedlin M. A. H., Walker K., Drob D. P., de Groot-Hedlin C. D. Infrasound: connecting the solid Earth, oceans, and atmosphere // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. – 2012. – 40. – P. 327–54.
- Jing Liu, Jianping Huang, Xuemin Zhang. Ionospheric perturbations in plasma parameters before global strong earthquakes // Advs Space Res. – 2014. – 53. – P. 776– 787.
- Krasnov V. M., Kuleshov Yu. V. Variation of infrasonic signal spectrum during wave propagation from Earth's surface to ionospheric altitudes // Acoustic. Phys. 2014. 60. – P. 19–28.
- Laštovička J., Baše J., Hruška F., et al. Simultaneous infrasonic, seismic, magnetic and ionospheric observationsin an earthquake epicentre // J. Atmos. and Solar-Terrestr. Phys. – 2010. – 72. – P. 1231–1240.
- Meister C.-V., Mayer B., Dziendziel P., et al. On the acoustic model of lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling before earthquakes // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. 11. P. 1011–1017.
- Rapoport V. O., Bespalov P. A., Mityakov N. A., et al. Feasibility study of ionospheric perturbations triggered by monochromatic infrasonic waves emitted with a groundbased experiment // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. – 2004. – 66. – P. 1011–1017.
- Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Grimalsky V. V., et al. Ionosphere as a sensitive indicator of powerful processes in the lower atmosphere/lithosphere, artificial acoustic influence and space weather // EMSEV 2014 International conference on electromagnetic phenomena associated with seismic and volcanic activities. Konstancin Jeziorna, Poland, 2014. – P. 133–135.
- 16. *Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Selivanov Yu. A., et al.* The coupling phenomena in LAIM/MIAL system and active influence of the sound generator on the atmosphere

and ionosphere // 14-та Укр. конф. з космічних досліджень (8—12 вересня 2014 р., Ужгород): Абстракт. — Київ, 2014. — 1 с.

- Rapoport Yu., Selivanov Yu., Ivchenko V., et al. Exitation of planetary electromagnetic waves in the inhomogeneous ionosphere // Ann. Geophys. – 2014. – 32. – P. 1–15.
- Rapoport Yu., Selivanov Yu., Ivchenko V., et al. The new models of electromagnetic and hydromagnetic wave processes in the ionosphere. Possible applications to coupling phenomena in LAIM/MIAL system // Astron. and Space Phys. (Annual Internat. Conf., Kyiv, Ukraine, May 27 – 30, 2014): Book of Abstrs. – 2014 – 1 p.
- Seismo electromagnetics: lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling / Eds Ma. Hayakawa, O. A. Molchanov. – Tokyo, TERRUPUB, 2002. – P. 363–370.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2014

- О. К. Черемных¹, В. В. Гримальский², О. Л. Ивантишин³,
- В. Н. Ивченко⁴, Л. В. Козак⁴, В. В. Кошовый³,
- В. П. Мезенцев⁵, М. Е. Мельник⁵, Р. Т. Ногач⁵,
- Ю. Г. Рапопорт^{4,1}, Ю. О. Селиванов¹, И. Т. Жук¹
- ¹Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев
- ² Национальный институт астрофизики, оптики и электроники, Мехико
- ³ Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко Национальной академии наук Украины, Львов
- ⁴ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
- ⁵ Львовский центр Института космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Львов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ

В 2013—2014 гг. в Украине были проведены два комплексных наземно-космических эксперимента по изучению эффектов акустического возмущения ионосферы. Анализ полученных данных совместно с экспериментальными данными предыдущих лет дал новые знания о влиянии низкочастотного звука (в том числе инфразвука) на верхнюю атмосферу и ионосферу и открыл перспективные направления дальнейших исследований. Авторы публикации использовали в орбитальном сегменте космические аппараты DEMETER и «Чибис-М», а в наземном — наземный низкочастотный акустический излучатель ННАИ (ЛЦ ИКД НАНУ и ГКАУ), радиотелескоп УРАН-3 ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины (Львов). При анализе обнаружены периодические и апериодические вариации статистических характеристик данных и их корреляция с приходом искусственных акустических возмущений. Впервые разработаны физико-математическая модель и численный алгоритм для моделирования распространения излучения ННАИ на пути от поверхности Земли до ионосферы с учетом реальных параметров среды. Предложена усовершенствованная схема проведения дальнейших наземно-космических акустических экспериментов.

Ключевые слова: динамические процессы, ионосфера, действие акустического излучения, системный спектральный анализ, радиофизические методы.

- O. K. Cheremnykh¹, V. V. Grimalsky², O. L. Ivantyshyn³, V. M. Ivchenko⁴, L. V. Kozak⁴, V. V. Koshovy³, V. P. Mezentsev⁵, M. O. Melnik⁵, R. T. Nogach⁵, Yu. G. Rapoport^{4,1}, Yu. A. Selivanov¹, I. T. Zhuk¹
- ¹Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv
- ²National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics, Mexico
- ³Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Science of Ukraine, Lviv
- ⁴Taras Shevchenko National University of Kyiv
- ⁵Lviv Centre of Institute for Space Research

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH OF ARTIFICIAL ACOUSTIC MODIFICATION OF THE ATMOSPHERE AND IONOSPHERE

Two complex ground-space experiments to study effects of acoustic perturbations on the ionosphere were conducted in Ukraine in 2013–2014. The analysis of the obtained data together with experimental data of previous years gave a new knowledge on the influence of a low-frequency sound (including an infrasound) on the upper atmosphere and ionosphere and opened the perspective fields of further researches. We used in these experiments the DEMETER and «Chibis-M» satellites in an orbital segment, and a ground-based low-frequency acoustic emitter LFAE (Lviv Center of Space Research Institute of NASU and SSAU) and the URAN-3 radio telescope (Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, Lviv) in the ground segment. Analysis of the obtained data allows us to conclude that there are periodic and aperiodic variations in their statistical characteristics as well as correllation between the manifestation of the effect and the arrival of an acoustic wave to the ionosphere. At first the physical and mathematical models and novel numerical algorithm were developed for modeling of LFAE's radiation propagation from the ground to the ionosphere, which take into account real parameters of the environment. The advanced scheme of further combined ground-space acoustic experiments is offered.

Key words: dynamic processes, ionosphere, acoustic radiation action, system spectral analysis, radiophysical techniques.

УДК 551.510.536; 551.510.535

К. П. Гармаш, Л. Ф. Чорногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ІОНОСФЕРІ, ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬ ВПЛИВ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПРИЗЕМНУ АТМОСФЕРУ

В 2006 р. проведено дослідження впливу акустичного випромінювання на атмосферно-іоносферну систему. Розроблено нові підходи до системного спектрального та статистичного аналізу експериментальних даних. Виявлено періодичні й аперіодичні варіації статистичних характеристик даних дистанційного зондування, які могли бути пов'язані зі штучними акустичними збуреннями. Для оцінки ефективності впливу акустичного випромінювання, його залежності від режиму роботи акустичного випромінювача й умов спостереження потрібні додаткові систематичні та комплексні дослідження із залученням якомога більшого числа супутникових і наземних методів дослідження.

Ключові слова: динамічні процеси, іоносфера, дія акустичного випромінювання, системний спектральний аналіз, радіофізичні методи.

вступ

Авторами роботи розроблено основи системного спектрального аналізу, який базується на лінійних і нелінійних інтегральних перетвореннях, і проведено обґрунтування оптимального часового розрізнення даних радіофізичного зондування про процеси в іоносфері під час проведення низькочастотних акустичних експериментів в атмосфері й іоносфері [2]. Розроблено сучасні методики статистичної обробки та фізичної інтерпретації експериментальних даних радіофізичного зондування D-, Е- та F-областей іоносфери методами часткових відбиттів, допплерівського зондування на похилих і вертикальних трасах, вертикального зондування іонозондом, варіацій магнітометричних сигналів і сигналів, які реєструються на супутниках. Проаналізовано дані вимірювань, одержані на Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна в серії експериментів із штучним акустичним впливом протягом кампанії в травні 2006 року.

Метою досліджень було виявлення реакції іоносфери на потужний штучний квазіперіодичний вплив акустичного випромінювання та супутніх процесів [1, 3—33].

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Для дії на навколоземне середовище використовувався пересувний комплекс апаратури ЛЦ ІКД НАНУ-ДКАУ, що був встановлений поблизу м. Харків. Потужність акустичного випромінювання складала 100 кВт. Випромінюваний сигнал на частоті 195 Гц був промодульований по амплітуді коливанням з частотою 25 Гц. Тривалості імпульсів впливу та пауз дорівнювали 1 хв (загалом 5 хв). Експеримент було проведено у травні 2006 р. (загалом 20 сеансів).

Для діагностики збурень в іоносфері були використані радари часткових відбиттів і доппле-

[©] К. П. ГАРМАШ, Л. Ф. ЧОРНОГОР, 2015

рівського зондування, розташовані в Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (на відстані близько 10 км від джерела акустичного збурення). Було досліджено часові варіації інтенсивностей звичайної та незвичайної складових частково відбитого сигналу І_{ах}. Плавне збільшення $I_{o,x}$ тривалістю $\Delta T_s \approx 90$ хв мало місце 11 травня через $\Delta t_{c} \approx 13$ хв після вмикання збурюючої установки. Максимум збільшення Іах приблизно у п'ять разів було спостережено через $\Delta t_m \approx 43$ хв. Плавні наростання $I_{o.x}$ були зареєстровані також 15 травня. Після першого вмикання установки акустичного випромінювання в 11:00 відбулось збільшення $I_{o,x}$ з $\Delta t_s \approx 18$ хв, $\Delta t_m \approx 45$ хв і $\Delta T_s \approx 100$ хв. Інтенсивність сигналів у максимумі у чотири рази перевищила її фонове значення. Різкі сплески І_{ох} звичайно мали тривалість $\Delta T_a \approx 2...3$ хв. Вони спостерігались 10 травня з часом запізнювання $\Delta t_{a1} \approx 12$ хв ($I_{o,x}$ зросли у тричотири рази) та $\Delta t_{a2} \approx 55$ хв (зміна $I_{o,x}$ у 10 — 15 разів), а також 11 травня з $\Delta t_a \approx 80$ хв (I_{ax} зросла у 8 — 10 разів). Такі ж сплески інтенсивності мали місце 15 травня після першого вмикання через $\Delta t_{a1} \approx 55$ хв (збільшення $I_{o,x}$ у чотири рази) та $\Delta t_{a2} \approx 90$ хв (у два-три рази), а також після наступних вмикань через $\Delta t_a \approx 92$ хв.

Виконано аналіз варіації допплерівських спектрів (ДС), що супроводжують вмикання акустичного випромінювання чотири і три рази в денний та нічний час відповідно. Зміни характеру варіацій ДС мали місце у п'яти та семи випадках на частотах $f_1 = 2.7$ та $f_2 = 4.04$ МГц відповідно. На частоті f_1 ефект в нічний час у двох сеансах не було зареєстровано. Час запізнювання варіацій ДС $\Delta t_{1,2}$ для частот $\Delta T_{1,2}$ цих варіацій дорівнювали 40 ± 4 та 52 ± 13 хв.

Для порівняння виконано спостереження за збуреннями в іоносфері, які викликалися дією низки природних і штучних джерел енерговиділення [1—33]. Знайдено їхні спільні та відмінні прояви у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера [2, 8, 9, 26].

Таким чином, у нижній іоносфері спостерігались як плавні (тривалістю $\Delta T = 1.5...2$ год), так і різкі ($\Delta T = 2...3$ хв) збільшення інтенсивності сигналів і завад після початку впливу акустич-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

ного випромінювання. Час запізнювання цих збільшень змінювався від 13 до 92 хв. Відразу після початку акустичного впливу або з запізнюванням 1...3 хв реєструвались хвильові збурення з періодами $T \approx 3...7$ хв. В одному з чотирьох випадків мало місце приглушення хвильових збурень із $T \approx 6...8$ хв, а в двох випадках — підсилення коливань з $T \approx 20...30$ хв і $T \approx 50$ хв. Після акустичного впливу в середній іоносфері з часом запізнювання близько 50 хв спостерігались зміни характеру варіацій ДС сигналів, відбитих від E- и F-областей іоносфери, тривалістю близько 40...50 хв.

підсумки

Були проведені попередні спостереження радіофізичними радарними методами динамічних процесів в іоносфері, що супроводжували вплив акустичного випромінювання на приземну атмосферу. Отримано попередні результати, що свідчать про вплив акустичного випромінювання на атмосферно-іоносферну систему. Короткочасний акустичний вплив на атмосферу в ряді експериментів призводив до підсилення природних акустичних збурень на тривалий час (декілька годин). На жаль, повної повторюваності ефектів не було. Для достовірної оцінки ефективності впливу, його залежності від режиму роботи акустичного випромінювача й умов спостереження потрібні додаткові систематичні та комплексні дослідження з залученням якомога більшого числа супутникових і наземних методів дослідження.

- 1. Емельянов Л. Я., Живолуп Т. Г., Сорока С. А. и др. Диагностика ионосферы после наземных акустических возмущений с использованием методов некогерентного рассеяния и вертикального зондирования // Ukrainian conference on space research: Abstracts (Uzhhorod, Ukraine. 8—12 September 2014). — Kyiv, 2014. — P. 15.
- Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы: Монография. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2010. — 576 с.
- Милованов Ю. Б., Черногор Л. Ф. Численное моделирование эффектов пролета Челябинского космического тела. // Ukrainian conference on space research: Abstracts (Uzhhorod, Ukraine. 8—12 September 2014). — Kyiv, 2014. — Р. 36.

- Пушин В. Ф., Черногор Л. Ф. Спектральный анализ биений опорного сигнала и отраженного от ионосферы ВЧ сигнала 13–14 ноября 2012 г. // Радиофиз. и радиоастрон. — 2014. — 19, № 2. — С. 160—169.
- Черногор Л. Φ. Крупномасштабные эффекты в геокосмосе, вызванные воздействием мощного радиоизлучения // Ukrainian conference on space research: Abstracts (Uzhhorod, Ukraine. 8–12 September 2014). – Kyiv, 2014. – Р. 31.
- 6. *Черногор Л. Ф.* Тайфун Хайян: самый сильный метеорологический удар по планете. Часть 1 // Наука и техн. — 2014. — № 4 (95). — С. 2—9.
- 7. *Черногор Л. Ф.* Тайфун Хайян: самый сильный метеорологический удар по планете. Часть 2 // Наука и техн. — 2014. — № 5 (96). — С. 10—14.
- 8. *Черногор Л. Ф.* Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2014. 544 с.
- Черногор Л. Ф. Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2013. — 480 с.
- 10. *Черногор Л.* Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. **54**, № 5. С. 658—669.
- 11. *Черногор Л. Ф., Барабаш В. В.* Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет Челябинского тела // Кинематика и физика небес. тел. — 2014. — **30**, № 3. — С. 27—42.
- Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. Физика геокосмических бурь: Монография. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. — 408 с.
- Черногор Л. Ф., Иванов В. А., Кацко С. В. Влияние геокосмических бурь на ионосферные каналы радиолокации, навигации и связи // Радиолокация, навигация, свіязь: Сб. докл.. XX Междунар. научно-техн. конф. (Россия, Воронеж, 15 — 17 апреля 2014 г.). — Воронеж, 2014. — С. 343—355.
- 14. Черногор Л. Ф., Иванов В. А., Кацко С. В. Искажения параметров ионосферного радиоканала в период геокосмических бурь // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: Матер. VI Всерос. науч. конф. (Муром, 27 — 29 мая 2014 г.). — Муром, 2014. — С. 64—69.
- 15. *Черногор Л. Ф., Кацко С. В.* Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн в течение геокосмических бурь // Вестник Поволжского гос. технолог. ун-та. 2013. **3**, № 19. С. 5—17.
- 16. Черногор Л. Ф., Розуменко В. Т. Результаты исследования физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях // Космічні дослідження в Україні 2012 2014: Звіт. Київ: Інститут космічних

досліджень НАН України та ДКА України, 2014. — С. 13—20.

- 17. *Черногор Л. Ф., Фролов В. Л.* Вариации уровня и спектра геомагнитных пульсаций, сопровождавшие воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура» // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. 57, № 5. С. 378—399.
- 18. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. Инфразвуковые колебания в ионосфере при воздействии на нее мощным радиоизлучением стенда «Сура» // Распространение радиоволн: Тр. XXIV Всерос. науч. конф. (Россия, Иркутск, 29 июня 25 июля 2014 г.). Иркутск, 2014. Т. 3. С. 99—103.
- Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. Особенности распространения генерируемых мощным радиоизлучением АГВ с частотами, близкими к собственным частотам атмосферы // Распространение радиоволн: Тр. XXIV Всерос. науч. конф. (Россия, Иркутск, 29 июня — 25 июля 2014 г.). — Иркутск, 2014. — Т. 3. — С. 95—98.
- Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом околоземной плазмы радиоизлучением стенда «Сура» // Распространение радиоволн: Тр. XXIV Всерос. науч. конф. Россия, Иркутск, 29 июня — 25 июля 2014 г.). — Иркутск, 2014. — Т. 3. — С. 104—107.
- Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Апериодические крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере: результаты ионозондовых наблюдений // Изв. вузов. Радиофизика. — 2014. — 57, № 2. — С. 110—128.
- 22. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Крупномасштабные апериодические возмущения в нижней ионосфере, вызванные воздействием мощным радиоизлучением: наблюдения на сети ионозондов // Распространение радиоволн: Тр. XXIV Всерос. науч. конф. (Россия, Иркутск, 29 июня — 25 июля 2014 г.). — Иркутск, 2014. — Т. 3. — С. 91—94.
- 23. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Гармаш К. П. и др. Вариации спектральных характеристик геомагнитных пульсаций, сопровождавшие воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением // Распространение радиоволн: Тр. XXIV Всерос. науч. конф. (Россия, Иркутск, 29 июня 25 июля 2014 г.). Иркутск, 2014. Т. 3. С. 87—90.
- Chernogor L. F. Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – 54, N. 5. – P. 613–624.
- Chernogor L. F., Barabash V. V. Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2014. – 30, N. 3. – P. 126–136.

- 26. Chernogor L. F., Blaunstein N. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-Earth environment. — Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2013 — 542 p.
- Chernogor L. F., Frolov V. L. Geomagnetic Pulsation Amplitude and Spectrum Variations Accompanying the Ionospheric Heating by High-Power Radio waves from the Sura Facility // Radiophys. and Quant. Electron. – 2014. – (57, N 5. – P. 340–359.
- Chernogor L. F., Frolov V. L. Features of the propagation of the AGWs generated by HF high-power transmissions at frequencies around the natural frequencies of the atmosphere // Problems of Geocosmos: Book of Abstrs of 10-th Internat. Conf. (Russia, St. Petersburg, Petrodvorets, October 6–10, 2014). — St. Petersburg, 2014. — P. 138.
- Chernogor L. F., Frolov V. L. Infrasound ionospheric oscillation during the Sura heater HF transmissions impact on the ionosphere // Problems of Geocosmos: Book of Abstrs of 10-th Internat. Conf. (Russia, St. Petersburg, Petrodvorets, October 6–10, 2014). St. Petersburg, 2014. P. 139.
- 30. Chernogor L. F., Frolov V. L. Travelling ionospheric disturbances generated by the periodic heating of the near-Earth plasma by the Sura heater HF transmissions // Problems of Geocosmos: Book of Abstrs of 10-th Internat. Conf. (Russia, St. Petersburg, Petrodvorets, October 6 10, 2014). St. Petersburg, 2014. P. 139.
- 31. Chernogor L. F., Frolov V. L., Barabash V. V. Large-scale aperiodic disturbances in the D- and E-regions of ionosphere due to the impact of HF high-power radio transmission: data from a network of ionosondes // Problems of Geocosmos: Book of Abstrs of 10-th Internat. Conf. (Russia, St. Petersburg, Petrodvorets, October 6 – 10, 2014). – St. Petersburg, 2014. – P. 140.
- 32. Chernogor L. F., Frolov V. L., Garmash K. P., et al. Variations in the spectra and the level of geomagnetic pulsations associated with an impact of high-power radio transmissions on the ionosphere // Problems of Geocosmos: Book of Abstrs of 10-th Internat. Conf. (Russia, St. Petersburg, Petrodvorets, October 6 10, 2014). St. Petersburg, 2014. P. 141.
- Chernogor L., Rozumenko V. Study of physical effects in the geospace environment under quiet and disturbed conditions // Space Research in Ukraine 2012 – 2014. – Kyiv: Space Research Institute, 2014. – P. 13–20.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2014

К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРИЗЕМНУЮ АТМОСФЕРУ

В 2006 г. проведено исследование влияния акустического излучения на атмосферно-ионосферную систему. Разработаны новые подходы к системному спектральному и статистическому анализу экспериментальных данных. Обнаружены периодические и апериодические вариации статистических характеристик данных дистанционного зондирования, которые могут быть связаны с искусственными акустическими возмущениями. Для оценки эффективности воздействия акустического излучения, его зависимости от режима работы акустического излучателя и условий наблюдения нужны дополнительные систематические и комплексные исследования с привлечением как можно большего числа спутниковых и наземных методов исследования.

Ключевые слова: динамические процессы, ионосфера, действие акустического излучения, системный спектральный анализ, радиофизические методы.

K. P. Garmash, L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University

THE RESULTS OF OBSERVATIONS OF DYNAMIC PROCESSES IN THE IONOSPHERE THAT ACCOMPANY THE EFFECT OF ACOUSTIC RADIATION ON THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

The effect of acoustic radiation on the atmosphere-ionosphere system was investigated in 2006. New approaches to the system spectral and statistical analysis of the experimental data are developed. The periodic and aperiodic variations of the statistical characteristics of remote sensing data, which may be associated with artificial acoustic disturbances, are found. For further estimation of the efficiency of acoustic influence and its dependence on an operating mode of an acoustic generator and conditions of observations, the additional systematic and comprehensive studies involving the largest possible number of space-born and ground-based methods are necessary.

Key words: dynamic processes, ionosphere, acoustic radiation action, system spectral analysis, radiophysical techniques.

УДК 550.388.2 + 537.876.23

Н. А. Бару, А. В. Колосков, Ю. М. Ямпольский

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

ЭФФЕКТ РАСЩЕПЛЕНИЯ МОДОВОЙ СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА

Анализируются данные непрерывных наблюдений ионосферного альвеновского резонанса, выполненных с 2010 по 2013 гг. на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» и на Саянской солнечной обсерватории (п. Монды, Россия). Изучено поведение тонкой спектральной структуры резонансов и обнаружен ранее неизвестный эффект расщепления нескольких низших резонансных мод. Исследованы суточные и сезонные закономерности «наблюдаемости» данного эффекта, а также его зависимость от фазы 11-летнего цикла солнечной активности. Проанализированы морфологические особенности поведения частоты расщепления и определены его основные фазы: развитие, стационарный участок и релаксация. Предложены возможные механизмы возникновения эффекта расщепления.

Ключевые слова: ионосферный альвеновский резонатор, эффект расщепления, магнитогидродинамические волны, магнитное поле.

введение

Одной из волноведущих природных структур, формирующих электромагнитный климат геокосмоса в УНЧ-СНЧ-диапазоне, является ионосферный альвеновский резонатор (ИАР). Ионосферный альвеновский резонатор — это резонансная система для альвеновской моды магнитогидродинамических (МГД) волн, локализованная в F-области ионосферы. На нижней границе резонатора (высоты Е-области) МГДволны трансформируются в электромагнитные, которые формируют резонансные структуры спектра (РСС), детектируемые наземными магнитометрами [3, 8]. В последнее время в литературе также появились свидетельства приема МГД-составляющих ИАР "in situ" с борта космического аппарата [6]. Данные наблюдений [1, 3, 5, 7, 8] показывают, что характеристики резонансов испытывают значительные сезонные и суточные вариации, основные закономерности которых состоят в следующем: 1) РСС фиксируется в основном в ночной период; 2) наибольшая вероятность регистрации приходится на локальную зиму, тогда как локальным летом происходит ее резкий спад; 3) устойчивые резонансы чаще наблюдаются в магнитоспокойных условиях. Поведение ИАР определяется как свойствами его основного источника — мировой грозовой активности, — так и изменениями в околоземной плазме. Это позволяет использовать ИАР для изучения грозовых разрядов и ионосферной диагностики [2]. Кроме того, характеристики резонанса изменяются вследствие регулярных и спорадических гелио- и геофизических факторов: мощных возмущений магнитного поля (бури и суббури), высыпаний высокоэнергичных частиц из радиационных поясов Земли, рентгеновских солнечных вспышек и затмений, суточных и сезонных вариаций освещенности на высотах ионообразования.

[©] Н. А. БАРУ, А. В. КОЛОСКОВ, Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ, 2015

Таким образом, мониторинг ИАР может быть эффективным способом слежения за состоянием космической погоды. Поскольку резонансы носят глобальный характер, интерес представляют синхронные измерения, осуществляемые в пунктах с большим разнесением в пространстве. Радиоастрономический институт НАН Украины (РИ НАНУ) впервые инициировал многопозиционный непрерывный мониторинг ИАР на Украинской антарктической станций «Академик Вернадский» (УАС), в Арктике (о. Свалбард, Норвегия), Европе (низкочастотная обсерватория РИ НАНУ, Украина) и Азии (Восточные Саяны, Россия). В данной работе представлены результаты анализа данных многолетних синхронных наблюдений ИАР, проведенных в Антарктике и Азии. Ниже описан новый эффект расщепления низших резонансных мод ИАР, дальнейшее исследование которого может представлять специальный интерес для имеющихся и планируемых ионосферномагнитосферных космических миссий.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА, МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В работе проанализированы данные непрерывных наблюдений сигналов ИАР, выполненных в 2010—2013 гг. на УАС (65°15' ю. ш., 64°16' з. д.) и магнитной станции Саянской солнечной обсерватории (ССО) ИСЗФ СО РАН (51°16' с. ш., 100°55' в. д.). Отметим, что несмотря на разницу географических координат, структура геомагнитного поля над обеими приемными позициями имеют сходную геометрию в силу близости значений параметра Мак-Илвейна, УАС — 2.6, ССО — 2.1. Регистрация сигналов ИАР осуществлялась с помощью индукционных магнитометров, изготовленных Львовским центром Института космических исследований НАНУ-ГКАУ, которые измеряли горизонтальные компоненты геомагнитного поля в направлениях географических меридиана (х) и параллели (у). На УАС функционирует магнитометр Lemi-112А (диапазон частот 0.001...80 Гц), на ССО — Lemi-30 (частоты 0.001...40 Гц). В РИ НАНУ был разработан пакет прикладных программ унифицированной спектральной, поляризационной и статистической обработки данных многопозиционных из-

мерений. В обоих пунктах для каждого 10-мин интервала рассчитывались средние энергетические $S_{xx}(f)$, $S_{yy}(f)$ и взаимные $S_{xy}(f)$ спектры со спектральным разрешением 0.1 Гц. Эти данные использовались для вычисления частотных зависимостей поляризационных параметров сигналов (r(f) — коэффициент эллиптичности, $\Psi(f)$ позиционный угол эллипса поляризации, I₁(f) интенсивность поляризованной компоненты излучения, P(f) — степень поляризации) по методике, изложенной в работе [4]. Далее оператором определялся факт наличия РСС (резонанс считался зарегистрированным, если можно выделить два или более спектральных максимума) и оценивались их собственные частоты. В качестве информационного параметра также рассчитывалась средняя разность частот ΔF между модами ИАР. Оценка ионосферной обстановки выполнялась с помощью станций вертикального зондирования — ионозонда IPS-42, расположенного на УАС, и DPS-4, размещенного в двухстах километрах от ССО в г. Иркутске. Как было показано в работе авторов [2], наиболее важным для ИАР ионосферным параметром являлось текущее локальное значение критической частоты $f_0 F_2$ слоя F_2 .

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДОВОЙ СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА

Наши измерения показали, что в большом количестве случаев низшие моды ИАР расщепляются на величину ΔF_{snl} (рис. 1). Наиболее контрастно



Рис. 1. Расщепление линий ионосферного альвеновского резонатора в коэффициенте эллиптичности *r*. Данные ССО для 10 декабря 2010 г.

эффект расшепления выделяется в частотновременных зависимостях для коэффициента эллиптичности r(f, t). В качестве примера на рис.1 приведена суточная зависимость r(f, t), построенная по данным ССО для 10 декабря 2010 г. Как видно из этой иллюстрации, начиная с 12 UT (19 *LT* — локального времени) моды ИАР расшепляются на два сателлита, расстояние между которыми плавно растет до 0.8—1 Гц в 20 UT (3 LT). К 24 *UT* (7 *LT*) величина ΔF_{sol} уменьшается. Эффект четко прослеживается для трех первых мод ИАР, причем с увеличением номера резонансного мода ИАР момент возникновения расшепления незначительно сдвигается в ночные часы. Оба сателлита и нерасщепленные участки линий ИАР имеют практически круговую поляризацию с направлением вращения против часовой стрелки (коэффициент эллиптичности близок к –1). Анализ данных показал, что другие поляризационные и спектральные характеристик ИАР на расщепленных участках суточной зависимости, также являются идентичными и не могут быть использованы для селекции сателлитов. Такое поведение является типичным для всех 104 событий расщепления, зарегистрированных на ССО и УАС за четыре года.

Результаты анализа суточных закономерностей в поведении расщепления на СОО и УАС представлены на рис. 2. Сезонный ход вероятности регистрации расщепления и зависимость от 11-летнего цикла солнечной активности продемонстрированы на рис. 3. Из рис. 2 видно, что расщепление в обоих пунктах регистрируется только локальной ночью. Время наблюдения для большинства событий соответствует интервалу максимальной вероятности регистрации ИАР, который на ССО длится с 18 до 6 LT, а на УАС с 18 до 9 LT. Разные длительности периода наблюдаемости связаны с большей продолжительностью ночи на УАС.

Рис. 3, *а* демонстрирует, что в обоих пунктах расщепление уверенно регистрируется только во время локальной зимы, а во все остальные сезоны года отсутствует. На рис. 3, *б* показано распределение числа случаев расщепления в обоих пунктах для четырех лет наблюдений совместно со средним за год числом Вольфа *W*, которое харак-

теризует солнечную активность в 11-летнем цикле. Отчетливо видно, что число зарегистрированных событий находится в обратной зависимости от солнечной активности. Выполненный анализ показывает, что суточные, сезонные и межгодовые зависимости «наблюдаемости» расщепления полностью соответствуют аналогичным кривым вероятности регистрации ИАР, однако для расщепления они выражены более четко.

Отметим, что вследствие сложности регистрации этого эффекта в освещенное время суток, когда отдельные моды ИАР практически сливаются, нельзя однозначно утверждать, что расщепление днем отсутствует. Отсутствие расщепления в другие сезоны года — весной, летом и осенью — является достоверным наблюдательным фактом, принципиальным для физической интерпретации такого поведения ИАР в глобальном масштабе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Ранее в работе [5] нами была подтверждена обратная зависимость f_0F_2 и частотной разницы между соседними резонансными модами — ΔF , а также разработана методика оценки критической частоты слоя F_2 по измеряемой в эксперименте величине ΔF . В настоящей статье проанализировано, сохраняется ли эта закономерность для величины расщепления ΔF_{spl} и как ведет себя соотношение величин $\Delta F_{spl}/\Delta F$. С этой целью исследовано поведение усредненных зависимостей $\Delta F(t)$, $\Delta F_{spl}(t)$, $f_0F_2(t)$ (рис. 4, *a*) и соотношение $\Delta F_{spl}(t)/\Delta F(t)$ (рис 4, *b*) для всех случаев, когда расщепление наблюдалось в течение 10 ч и более.

Как видно из рис. 4, *а* формы кривых для средней разности частот между модами ИАР $\Delta F(t)$ и величины расщепления $\Delta F_{spl}(t)$ различаются. $\Delta F_{spl}(t)$ характеризуется меньшим вечерним возрастанием, наличием практически стационарного ночного участка и значительным уменьшением в утренние часы. Рис. 4, *б* демонстрирует, что величина расщепления $\Delta F_{spl}(t)$, нормированная на межмодовый частотный сдвиг $\Delta F(t)$, состоит из трех характерных участков, которые хорошо аппроксимируются линейными функциями. Это участок развития расщепления 1 (16...20 LT, когда относительная величина расщепления линей-



Рис. 2. Распределение числа *N* случаев появления (серые столбики) и исчезновения (черные столбики) расшепления (шкала слева) и кривая вероятности регистрации ионосферного альвеновского резонатора (шкала справа) в зависимости от местного времени на ССО (*a*) и УАС (*б*)



Рис. 3. а — среднемесячное число событий расщепления на УАС и ССО; *б* — общее число событий расщепления регистрируемых на ССО и УАС (столбики, шкала слева) в зависимости от среднегодового числа Вольфа *W* (линия, шкала справа).

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1



Рис. 4. Сглаженные 3-ч окном и усредненные (по всем случаям расщепления длительностью 10 ч и более) зависимости для: $\Delta F(t)$, $\Delta F_{spl}(t)$, $f_0F_2(t)$ (фрагмент *a*) и сглаженная 3-ч окном зависимость $\Delta F_{spl}(t)/\Delta F(t)$ — черная кривая (фрагмент δ). Прямыми отрезками показаны аппроксимации относительной величины расщепления на участках: 1 — развития, 2 — стационарного расщепления, 3 — релаксации

но растет), стационарный участок 2 (20...02 *LT*, когда относительная величина расщепления не изменяется) и участок релаксации 3 (02...05 *LT*, когда относительная величина расщепления линейно уменьшается). Отметим, что на стационарном участке $\Delta F_{spl}(t)/\Delta F(t)$ с учетом доверительных интервалов не превышает значение 0.5 (не достигает половины межмодовой частотной разности, изображенной на рис. 4, δ пунктирной линией). Можно констатировать, что моды не «перепутываются» и не взаимодействуют между собой.

В настоящий момент авторы работают над физическим моделированием обнаруженного эффекта расщепления. Можно предложить несколько гипотез о механизме возникновения эффекта. Первая из них — это предположение о том, что расщепление связано с появлением двух эффективных отражающих границ в нижней ионосферной или верхней магнитосферной частях резонатора. Другой возможностью является появление резонансных условий для магнитозвуковых колебаний, распространяющихся в той же полости с отличающимися волновыми нормалями. Можно также предположить, что расщепление может формироваться одновременно для двух граничных условий «электрической» и «магнитной» стенок, вблизи пучности и узла стоячей альвеновской волны. Такой механизм объясняет стабильность величины расщепления относительно номера резонансной моды. Наконец, в качестве еще одной гипотезы следует рассмотреть возможность просачивания резонансных колебаний из магнитосопряженной области, обладающей другими условиями освещенности, отличающимися значениями критических частот и, как следствие, резонансными частотами. Предполагается, что на следующем этапе исследований, кроме наземных регистраций в пространственно разнесенных пунктах, будут привлечены бортовые спутниковые измерения, планируемые в проектах «Ионосат-Микро» (ГКАУ) и «Резонанс» (РФКА).

Работа выполнена в 2014 г. в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям в соответствии с НИР «Исследование электромагнитных резонансных процессов в геокосмосе с синхронным использованием высоко- и низкоорбитальных спутниковых группировок» (№ госрегистрации 0114U002817).

Авторы благодарны Р. А. Рахматулину за предоставленные магнитометрические данные, полученные на ССО (ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск), а также НАНЦ Украины за обеспечение многолетнего УНЧ-ННЧ-мониторинга на УАС «Академик Вернадский».

- Бару Н. А., Колосков А. В., Рахматулин Р. А. Многопозиционные наблюдения сигналов ионосферного альвеновского резонанса // Первая укр. конф. ЭМЕС: Сб. тез. докл. — Харьков, 2012. — С. 133—135.
- 2. Бару Н. А., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М., Пашинин А. Ю. Методика оценки критической частоты слоя F2 по разности собственных частот ионосферных альвеновских резонансов // Радиофизика и радиоастрономия. 2014. **19**, № 2. С. 151—159.
- 3. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. Экспериментальные исследования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Изв. вузов. Радиофизика. —1989. — **32**, № 6. — С. 663—672.
- Колосков А. В., Безродный В. Г., Буданов О. В. и др. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности // Радиофизика и радиоастрономия. — 2005. — 10, № 1. — С. 11—29.
- Колосков А. В., Синицын В. Г., Герасимова Н. Н., Ямпольский Ю. М. Околоземные резонаторы СНЧ-волн как индикаторы космической погоды // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 5. — С. 49—64.
- Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V., et al. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. – 2014. – 117. – P. 81–87.
- Molchanov O. A., Schekotov A. Yu., Fedorov E., Hayakawa M. Ionospheric Alfven resonance at middle latitudes: results of observations at Kamchatka // Phys. and Chem., Parts A/B/C. – 2004. – 29, N 4-9. – P. 649–655.
- Yahnin A. G., Semenova N. V., Ostapenko A. A., et al. Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0.1–4 Hz at L = 5.2 // Ann. Geophys. 2003. 21, N 3. P. 779–786.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2014

М. О. Бару, О. В. Колосков, Ю. М. Ямпольський

Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

ЕФЕКТ РОЗЩЕПЛЕННЯ МОДОВОЇ СТРУКТУРИ ІОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНІВСЬКОГО РЕЗОНАТОРА

Аналізуються дані неперервних спостережень іоносферного альвенівського резонансу, виконаних з 2010 по 2013 рр. на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» і на Саянській сонячній обсерваторії (с. Монди, Росія). Вивчено поведінку тонкої спектральної структури резонансів і виявлено раніше невідомий ефект розщеплення декількох нижчих резонансних мод. Досліджено добові та сезонні закономірності «спостережуваності» даного ефекту, а також його залежність від фази 11-річного циклу сонячної активності. Проаналізовано морфологічні особливості поведінки частот розщеплення та визначено його основні фази: розвиток, стаціонарну ділянку та релаксацію. Запропоновано можливі механізми виникнення ефекту розщеплення.

Ключові слова: іоносферний альвенівський резонатор, ефект розщеплення, магнітогідродинамічні хвилі, магнітне поле.

N. A. Baru, A. V. Koloskov, Yu. M. Yampolski

Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

THE SPLITTING EFFECT OF THE MODE STRUCTURE OF THE IONOSPHERIC ALFVEN RESONATOR

We analyze the data of continues observations of ionospheric Alfven resonance (IAR) which were carried out since 2010 until 2013 at the Ukrainian Antarctic Station "Academic Vernadskiy" and at the Sayan Solar Observatory (Mondy, Russia). The behavior of IAR fine spectral structure is studied and previously unknown effect of the splitting of several lowest resonance modes is found. Diurnal and seasonal regularities of the observability of this effect as well as its dependence on the phase of the eleven-year cycle of solar activity are investigated. The morphological features of the frequency splitting behavior are analyzed and its main phases as development, stationary section and relaxation are identified. Possible mechanisms of the occurrence of splitting effect are suggested.

Key words: ionospheric Alfven resonator, splitting effect, magnetohydrodynamic waves, magnetic field.

УДК 550.388, 551.520.32

О. К. Черемних, А. К. Федоренко, Є. І. Крючков, С. О. Черемних, А. В. Беспалова

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Київ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ В МАГНІТОСФЕРНО-ІОНОСФЕРНІЙ ПЛАЗМІ

Представлено основні результати експериментальних та теоретичних досліджень резонансних явищ в магнітосферноіоносферній плазмі. А саме: розроблено теоретичні моделі резонансних хвильових УНЧ-явищ в магнітосфері; на основі супутникових вимірювань досліджено глобальні коливання нейтральної верхньої атмосфери та іоносфери; за супутниковими даними виявлено ефекти магнітосферно-іоносферної взасмодії.

Ключові слова: іоносфера, магнітосфера, резонансні явища, хвильові процеси.

вступ

Робота спрямована на дослідження резонансних механізмів магнітосферно-іоносферної взаємодії за допомогою ультранизькочастотних (УНЧ) хвиль, в тому числі на вивчення джерел, механізмів генерації та просторово-часової структури збурень в магнітосферно-іоносферній плазмі. Актуальність цих досліджень пов'язана з їхнім фундаментальним науковим значенням і підготовкою міжнародних супутникових експериментів «Іоносат» та «Резонанс».

Впродовж десятків років магнітосфера та іоносфера досліджувалися як окремі підсистеми навколоземного космічного простору. Теоретичні дослідження останніх років, а також численні дані супутникових вимірювань показали, що фізику цих підсистем неможливо остаточно зрозуміти без врахування взаємодії в глобальній системі Сонце — сонячний вітер — магнітосфера — іоносфера. Ключовими механізмами, що забезпечують взаємодію окремих ланок цієї системи, є резонансні хвильові процеси УНЧ- діапазону — найбільш масштабні за часовими, просторовими і енергетичними характеристиками процеси в навколоземній космічній плазмі.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ В МАГНІТОСФЕРІ

Магнітосфера Землі є гігантським природним резонатором для магнітогідродинамічних (МГД) коливань, які можна розглядати як комбінацію дрібніших МГД-резонаторів і хвилеводів різних типів. Коливання в цих резонаторах реєструються як на поверхні Землі, так і в навколоземному космічному просторі у вигляді ультранизькочастотних хвиль з періодами від декількох секунд до десятків хвилин [10]. УНЧ-коливання визначають загальну стійкість космічної плазми і контролюють колективні процеси в ній.

Серед низькочастотних МГД-коливань найбільш часто спостерігаються хвилі, що являють собою коливання силових ліній магнітного поля. Вивчення структури азимутально-дрібномасштабних УНЧ-хвиль досі здійснювалося в рамках магнітної гідродинаміки. Було встановлено, що різні гілки МГД-коливань є зчепленими одна з одною [8, 11]. Для азимутально-великомасштаб-

 $[\]ensuremath{\mathbb{C}}$ О. К. ЧЕРЕМНИХ, А. К. ФЕДОРЕНКО, Є. І. КРЮЧКОВ,

С. О. ЧЕРЕМНИХ, А. В. БЕСПАЛОВА, 2015

них коливань важливу роль відіграє зчеплення альвенівських хвиль з швидким магнітним звуком, для азимутально-дрібномасштабних коливань в плазмі скінченного тиску — зчеплення альвенівської і повільної магнітозвукових гілок, викликане кривиною магнітних силових ліній. Було показано, що за певних умов в плазмі скінченого тиску може розвинутися балонна нестійкість, яка зазвичай вважається тригером магнітосферних суббур [9, 12].

За напрямком теоретичне моделювання резонансних явищ в магнітосфері Землі розглянуто задачу про поширення азимутально-дрібномасштабних УНЧ-мод в одновимірно-неоднорідній плазмі зі змінною кривиною силових ліній магнітного поля [6]. Розглянуто циліндричну модель плазмового середовища, в якому силові лінії магнітного поля вважаються концентричними колами, а всі рівноважні параметри змінюються тільки впоперек магнітних оболонок (рис. 1). Незважаючи на відносну простоту цієї моделі, вона якісно враховує такі базові риси магнітосфери, як кривину силових ліній і радіальну неоднорідність плазми і магнітного поля. Визначено області поширення та поперечну структуру стійких альвенівських і каспових мод, а також нестійких балонних мод. Для прикладу на рис. 2 наведено залежність квадрата радіальної складової хвильового вектора від квадрата частоти для УНЧ-збурень, яка визначає область поширення альвенівських і каспових хвиль. Тут ω_A — альвенівська частота, ω_T — каспова частота, ω_+ — частоти відсічки [2]. Ці частоти виражаються через рівноважні параметри плазми і магнітного поля, залежать від радіальної координати і мають конкретний фізичний зміст. Області $\omega^2 < 0$ і $k_r^2 > 0$ описують нестійкі балонні моди. Поблизу альвенівської і каспової частот реалізуються резонанси. Можливість довгоживучих балонних і каспових мод випливає з рис. 2. Отримані результати якісно описують поведінку УНЧ-мод з неперервним спектром у магнітосфері Землі і можуть бути використані для інтерпретації даних вимірювань з космічних апаратів [7] та мережі радарів SuperDARN.

Отримані результати узагальнено для розгляду генерації резонансних УНЧ-мод в магнітосфері



Рис. 2. Залежність квадрата радіальної складової хвильового вектора від квадрата частоти. Заштриховано області поширення хвиль



Рис. 3. Дипольна геометрія геомагнітного поля

Землі в дипольному магнітному полі (рис. 3) у локальному наближенні. Це поле точніше описує геомагнітне поле до 6-7 радіусів Землі і не залежить від тороїдального кута. З врахуванням цих обставин отримано та проаналізовано дисперсійне рівняння для неоднорідної тривимірної плазми з магнітними поверхнями, яке виявилося подібним до дисперсійного рівняння для циліндричного випадку. Окремо розглянуто стійкий та нестійкий режими генерації збурень, а також умови реалізації резонансів.

Теоретично досліджено дискретні власні альвенівські моди у магнітосфері Землі. Саме ці моди, зазвичай, спостерігаються на космічних апаратах на відстані 3-4 радіусів Землі. Для знаходження спектру вказаних мод вихідну систему рівнянь було зведено до рівняння Шредінгера з потенціальною ямою типу Пешеля — Теллера. Дискретні моди цієї ями відповідають спектру дискретних альвенівських мод. Отримано, що умова існування цих мод визначається кривиною силових ліній магнітного поля і градієнтом тиску плазми. Такі моди можуть ефективно «розгойдуватися» високоенергетичними частинками у магнітосфері Землі.

СУПУТНИКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ УНЧ-ПРОЦЕСІВ В ІОНОСФЕРІ

За даними вимірювань на супутнику «Dynamic Explorer 2» над полярними областями було виявлено глобальні коливання нейтральної верхньої атмосфери та іоносфери Землі в УНЧ-діапазоні [3, 13]. Встановлено, що за фізичною природою ці збурення являють собою акустико-гравітаційні хвилі (АГХ), які характеризуються рядом специфічних властивостей [1, 4]: 1) в інтервалі висот 250—400 км хвилі спостерігаються систематично над полярними шапками в обох півкулях; 2) періоди АГХ близькі до періоду Брента — Вяйсяля на висотах спостережень (10—11 хв); 3) пе-



Рис. 4. Локалізація полярних хвильових збурень за даними вимірювань супутника «Dynamic Explorer 2»: *a* — північна півкуля, *б* — південна півкуля



Рис. 5. Хвильові УНЧ-збурення у північній полярній області на витку 329 супутника «Dynamic Explorer 2»: a — відносні варіації концентрації нейтральних молекул $\delta n(N_2) / n(N_2)$ і температури $\delta T_n / T_n$ (протифазний характер коливань є характерним для АГХ); δ — відносні варіації температури іонів $300 \cdot \delta T_i / T_i$ і зональна складова магнітного поля δB_z (нТл); e, e — відносні варіації концентрації нейтральних частинок $1000 \cdot \delta N / N$, меридіональна складова магнітного поля δB_z (нТл), меридіональна складова швидкості іонів δV_{ix} (м/с)

реважають горизонтальні масштаби хвиль 500— 600 км; 4) амплітуди АГХ над полярними шапками на порядок перевищують амплітуди хвиль цього типу в середніх широтах. Великі амплітуди полярних АГХ та вузький спектральний діапазон просторових і часових масштабів, скоріше за все, вказують на резонансний механізм їхньої генерації [5]. На основі статистичного аналізу супутникових даних встановлено глобальні закономірності розподілу та напрямки поширення АГХ на іоносферних висотах і проведено порівняльний аналіз цих збурень в полярних областях обох півкуль (рис. 4). Просторова локалізація цугів полярних АГХ демонструє виражений зв'язок з авроральним овалом — просторовою областю, де відбувається основна магнітосферно-іоносферна взаємодія. На нашу думку, саме ці полярні глобальні коливання полярної термосфери на частоті Брента—Вяйсяля є важливими агентами магнітосферно-іоносферного зв'язку.

Виявлено безпосередні експериментальні свідчення такого зв'язку на іоносферному рівні у вигляді збігу масштабів полярних АГХ- та УНЧколивань магнітосферного походження. Приклад таких узгоджених хвильових збурень показано на рис. 5. Як видно, коливання МГД-типу відбуваються в тому ж діапазоні, що і коливання нейтральної атмосфери. Це наводить на думку, що спостережувані хвилі є «зчепленими» та пов'язані спільним механізмом генерації. Ця проблема потребує подальших теоретичних і експериментальних досліджень.

висновки

Досліджено розповсюдження УНЧ-хвиль з неперервним спектром у магнітосферній плазмі. Встановлено умови поширення цих хвиль через фізичні параметри магнітного поля і плазми. Визначено умови генерації резонансних збурень, а також нестійких балонних збурень і довживучих каспових мод.

Аналіз даних супутникових спостережень полярних АГХ на іоносферних висотах вказує на їхню важливу роль в енергообміні між магнітосферою та верхньою атмосферою. Отримано експериментальні свідчення зв'язку альвенівських магнітосферних хвиль та АГХ в полярній іоносфері. На сьогодні механізм цього зв'язку потребує уточнення.

Надалі передбачається дослідити особливості збудження магнітосферних МГД-коливань різного походження за наявності резонаторів і хвилеводів, локалізованих в окремих областях магнітосфери та іоносфери в рамках різних моделей. Ці дослідження можуть дати істотний внесок в розвиток теорії магнітосферно-іоносферної взаємодії та фізики навколоземного космосу в цілому. Подальше продовження робіт в цьому напрямку є важливим для уточнення наукових програм та режимів вимірювань в космічних експериментах «Іоносат» та «Резонанс», які в 2015 році виходять на стадію запуску.

- 1. Беспалова А. В., Федоренко А. К. Супутникові дослідження іоносферних проявів поширення акустикогравітаційних хвиль // Радиофизика и радиоастрономия — 2014. — **19**, № 3 — С. 206—216.
- 2. Загородний А. Г., Черемных О. К. Введение в физику плазмы. Киев: Наук. думка, 2014. 697 с.
- 3. Федоренко А. К. Крючков Е. И. Распределение среднемасштабных АГВ в полярных регионах по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэрономия. — 2011. — 51, № 1. — С. 527—539.
- 4. *Федоренко А. К., Крючков Е. И.* Наблюдаемые особенности акустико-гравитационных волн в гетеросфере // Геомагнетизм и аэрономия 2014. **54**, № 1. С. 116—123.
- 5. *Черемных О. К.* Резонансная мода в термосфере Земли // Космічна наука і технологія. — 2011. — **17**, № 6. — С. 74—76.
- 6. *Черемных О. К., Климушкин Д. Ю., Костарев Д. В.* О структуре азимутально-мелкомасштабных УНЧ-колебаний горячей космической плазмы в кривом магнитном поле. Моды с непрерывным спектром // Кинематика и физика небес. тел. — 2014. — **30**, № 5. — С. 3—21.
- 7. Черемных О. К., Ямпольский Ю. М., Агапитов А. В. и др. Исследования МГД-колебаний внутренней магнитосферы Земли в космическом проекте «Резонанс» // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 2. — С. 5—42.
- Agapitov O. V., Cheremnykh O. K. Natural oscillations of the Earth magnetosphere associated with solar wind sudden impulses // Ukr. Phys. J. – 2008. – 53. – P. 506– 510.
- Burdo O. S., Cheremnykh O. K., Verkhoglyadova O. P. Study of ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth // Izv. Akad. Nauk. Fiz. - 2000. - 6, N 9. -P. 1986-1900.
- Cheng C. Z., Chang T. C., Lin C. A., Tsoi W. N. Magnetohydrodynamic theory offield line resonanses in the magnetosphere // J. Geophys. Res. – 1993. – 98A, N 7. – P. 11339–11347.
- 11. Cheremnykh O. K. Transversally small-scale perturbations in arbitrary plasma configurations with magnetic surfaces // Plasma Phys. and Contr. Fusion. -2010. -52, N 9. -095006.
- Cheremnykh O. K., Parnovski A. S. Flute and ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth: stability and influence of the ionospheric conductivity // Space Science: New Research / Ed. N. S. Maravell. – New York: Nova Sci. Publ., 2006 – P. 97–139.
- Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., et al. Gravity waves near 300 km over the polar caps // J. Geophys. Res. – 1995. – 100. – P. 23993–24002.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2014

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

О. К. Черемных, А. К. Федоренко,

Е. И. Крючков, С. О. Черемных, А. В. Беспалова

Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МАГНИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Представлены основные результаты экспериментальных и теоретических исследований резонансных явлений в магнитосферно-ионосферной плазме. А именно: разработаны теоретические модели резонансных УНЧ волновых явлений в магнитосфере; на основе спутниковых измерений исследованы глобальные колебания нейтральной верхней атмосферы и ионосферы; по спутниковым данным выявлены эффекты магнитосферноионосферного взаимодействия.

Ключевые слова: ионосфера, магнитосфера, резонансные явления, волновые процессы.

O. K. Cheremnykh, A. K. Fedorenko,

E. I. Kryuchkov, S. O. Cheremnykh, A. V. Bespalova

Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

EXPERIMENTAL AND THEORETHICAL INVESTIGATIONS OF RESONANCE PHENOMENA IN THE MAGNETOSPHERIC-IONOSPHERIC PLASMA

The main results of experimental and theoretical studies of resonance phenomenon in the magnetospheric-ionospheric plasma are presented. Among them, a theoretical model of resonance ULF wave phenomena in the magnetosphere is developed; the global oscillations of the neutral upper atmosphere and ionosphere is investigated basing on satellite measurements; the effects of the magnetosphere-ionosphere interaction is detected from the satellite data.

Key words: ionosphere, magnetosphere, resonance phenomena, wave processes.

УДК 521.96

В. Я. Чолій

Київський національний університет імені Тараса Шевченка Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

ДО ПИТАННЯ ПРО ТОЧНІСТЬ МОДЕЛЕЙ ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Аналізується точність у випадковому відношенні моделей геопотенціалу, накопичених зусиллями світового товариства та рекомендованих до використання у геодинамічних програмах. Проведено аналіз точності моделей EIGEN з метою визначення залежності впливу складу спостережень, зібраних космічними місіями, на точність моделей.

Ключові слова: гравітаційне поле, геодинамічні моделі, оцінювання точності.

ВСТУП

Розвиток програмного забезпечення для опрацювання спостережень штучних супутників Землі, такого як Juliette/KG++ [8], ставить задачу високоефективного обчислення сил, що діють на супутник. Найсильніше збурює рух супутника неточкове притягання Землею (його прийнято називати геопотенціалом). Саме тому моделям геопотенціалу приділяється найбільше уваги у стандартах IERS [15, 19].

Моделі геопотенціалу створюються різними організаціями на основі обробки даних альтиметрії, гравіметрії та локації супутників. Станом на середину 2014 р. на спеціально для цього призначеному ресурсі [http://icgem.gfzpotsdam.de/icgem/] зібрано майже півтори сотні таких моделей.

Моделі геопотенціалу можна класифікувати за авторством. Звичайно, це не повна і не дуже строга класифікація, однак вона підтверджує лінії авторства. Отже, можна виділити лінії: GEM (Goddard Earth Models), GRIM (European Colaboration), OSU (Ohio State University), JGM Ситуація суттєво змінилася після 2000 року після запуску супутників CHAMP (CHAllenging Multi-satellite Payload), GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) і GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer). У табл. 1 наведено коротку інформацію про ці супутники на основі даних з сайта ILRS [http://ilrs.gsfc.nasa. gov/missions/]. Усі ці супутники мають практично колові орбіти. Головним призначенням двох останніх супутників був якраз моніторинг гравітаційного поля Землі. CHAMP — багатофункціональний геодезичний супутник.

Зібрані цими супутниками дані привели до суттєвого зростання кількості моделей. Нові послідовності, зокрема EIGEN, GGM, ITG, TUM, AIUB та деякі інші, не обходяться без даних космічних місій і вдало поєднують альтиметрію, гравіметрію, локацію та спостереження, виконані супутниками.

⁽Joint Gravity Model), EGM (Earth Gravity Model). Деякі з цих моделей станом на сьогодні втратили свої позиції в космічній геодинаміці, однак в історичному плані такі моделі, як GRIM3 [22], GEMT2 [18], JGM3 [31], EGM96 [17] відіграли і продовжують відігравати суттєву роль при розв'язанні геодинамічних задач.

[©] В. Я. ЧОЛІЙ, 2015

У роботі проведено аналіз точності у випадковому відношенні моделей геопотенціалу шляхом їхнього взаємного порівняння.

Метод аналізу грунтується на використанні перетворення Гельмерта до еквіпотенційних поверхонь, побудованих в рамках різних моделей. Такий підхід детально аналізувався автором у роботах [4, 7]. Він був успішно використаний для аналізу точності моделей атмосфери [3] та головних планетних і місячних ефемерид [5, 33]. Еквіпотенційні поверхні будуються з кроком 1° по широті та довготі. Сходження меридіанів до полюса приймається до уваги.

Отримані таким способом еквіпотенційні поверхні переводяться у систему середнього поля за допомогою повного перетворення Гельмерта (12 коефіцієнтів). Далі оцінюються залишкові (випадкові) похибки шляхом розв'язання кореляційних рівнянь.

Зупинимось тут лише на методиці їхнього розв'язування (формули (6) та (7) з роботи [5]). Систему кореляційних рівнянь отримують на основі аналізу дисперсій різниць d_{ij}^2 та сум s_{ij}^2 випадкових похибок двох різних моделей, *i*-ї та *j*-ї. Тоді

$$\begin{cases} s_{ij}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2 + 2\rho_{ij}\sigma_i\sigma_j, \\ d_{ij}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2\rho_{ij}\sigma_i\sigma_j, \end{cases}$$

де ρ_{ij} — невідомі в загальному випадку кореляції випадкових похибок, σ_i^2 — їхні дисперсії.

Знайти величини кореляцій можна так:

$$\rho_{ij} = \frac{s_{ij}^2 - d_{ij}^2}{4\sigma_i \sigma_j}.$$

Формули для знаходження дисперсій залежать від кількості використаних моделей. Формули для трьох моделей наведено у роботі [2], для чотирьох — у роботі [5]. Автору вдалося отримати вирази для довільної кількості моделей *n* у такій формі:

Таблиця 1. Супутники для вивчення гравітаційного поля

$$k(n)\sigma_i^2 = (n-2)S_{(i)} - D_{(i)},$$

де $S_{(i)}$ — сума усіх величин d_* та s_* , які містять індекс i, $D_{(i)}$ — сума усіх величин d_* та s_* , які не містять індексу i, k(n) — деяка функція, значення якої для декількох перших значень $n \ge 2$ такі: 4, 12, 24, 40, 60.

Індукція по n дозволяє записати співвідношення для k(n):

$$k(n) = k(n-1) \cdot \frac{n-1}{n-3}, k(3) = 4, n > 2.$$

Оскільки три — це найменша можлива кількість моделей для порівняння, функція має сенс лише для n > 2.

Порівнюються еквіпотенційні поверхні, отримані у моделях без урахування гармонік порядку нуль (точкове притягання), порядку один (в теорії дорівнюють нулеві, в реальності вказують на нецентральність поля) та гармоніки $J_2 = C_{20}$. Таким чином, основну увагу сконцентровано на малих за амплітудою та високочастотних гармоніках.

Обчислення проводились стовбчиковим методом за алгоритмом з роботи [1], який показав кращі швидкісні характеристики, ніж інший відомий алгоритм [9]:

$$V = \frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{N} \sum_{m=0}^{n} T_{n}^{m} (\widehat{C}_{nm} \cos m\lambda + \widehat{S}_{nm} \sin m\lambda),$$

де T_n^m — перенормовані функції Лежандра, $\hat{C}_{nm}, \hat{S}_{nm}$ — перенормовані коефіцієнти Стокса згідно з роботою [1]:

$$\left. \begin{array}{c} \widehat{C}_{nm} \\ \widehat{S}_{nm} \end{array} \right\} = \frac{1}{2^m n!} \sqrt{2(2n+1)(n+m)!(n-m)!} \left\{ \begin{array}{c} \overline{C}_{nm}, \\ \overline{S}_{nm}, \end{array} \right.$$

$$\Gamma_n^m = \left(\frac{R}{r}\right)^n \widehat{P}_n^m(\cos\theta), \widehat{P}_n^m(\cos\theta) = \frac{n!2^m}{(n+m)!} P_n^m(\cos\theta).$$

Назва	Початок	Кінець	<i>h</i> , км	Нахил, град	Спонсор
CHAMP	15/07/2000	20/09/2010	474	87.27	GFZ
GRACE	17/03/2002		485	89.0	NASA
GOCE	17/03/2009	11/11/2013	295	96.7	ESA

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

Номер моделі	Назва	Порядок	γM_{\oplus} , м $^3/c^2$	R_{\oplus} , м	Літературне джерело
1	GRIM3	36	398600.5000	6378140.00	[22]
2	GEMT2	50	398600.4360	6378137.00	[18]
3	JGM3	70	398600.4415	6378136.60	[31]
4	EGM96	360	398600.4415	6378136.30	[17]
5	EIGEN5C	360	398600.4415	6378136.46	[13]
6	GGM03C	360	398600.4415	6378136.30	[32]

Таблиця 2. Параметри моделей геопотенціалу групи А

Таблиця З. Параметри моделей геопотенціалу групи В

Номер моделі	Назва	Порядок	<i>R</i> _⊕ , м	Тип	Літературне джерело
1	JGM3	70	6378136.60	GA	[31]
2	EGM96	360	6378136.30	GA	[17]
3	AIUB-Champ03s	100	6378137.00	С	[21]
4	AIUB-Grace03s	160	6378137.00	R	[16]
5	ITG-Grace-2010s	180	6378136.60	R	http://www.igg.uni-bon. de/ampg/
6	EGM2008	2190	6378136.60	RGA	[20]
7	EIGEN-GL04c	360	6378136.46	RLGA	[12]
8	EIGEN-51C	359	6378136.46	RCGA	[6]
9	GOCO02S	250	6378136.30	ORCL	[14]
10	GoConsGcf2Dir2R2	240	6378136.46	0	[6]

Таблиця 4. Параметри моделей геопотенціалу групи С

Номер моделі	Назва	Порядок	R_{\oplus} , м	Тип	Літературне джерело
1	EIGEN-1S	119	6378136.46		[23]
2	EIGEN-1	119	6378136.46	С	[24]
3	EIGEN-2	140	6378136.46	С	[28]
4	EIGEN-Champ03sp	140	6378136.46	С	[25]
5	EIGEN-Grace01s	120	6378136.30	R	[27]
6	EIGEN-Grace02s	150	6378136.46	R	[27]
7	EIGEN-Champ03s	140	6378136.46	С	[26]
8	EIGEN-GC01c	360	6378136.46	CRGA	[29]
9	EIGEN-GC03c	360	6378136.46	CRGA	[11]
10	EIGEN-GL04c	360	6378136.46	RLGA	[12]
11	EIGEN-GL04s1	150	6378136.46	RL	[12]
12	EIGEN-5C	360	6378136.46	RLGA	[13]
13	EIGEN-5S	150	6378136.46	RL	[13]
14	EIGEN-Champ05s	150	6378136.46	С	[10]
15	EIGEN-51C	359	6378136.46	RCGA	[6]
Приємною та надзвичайно корисною особливістю методу є рекурентні співвідношення для T_n^m :

$$T_n^m = \frac{R}{r} \bigg(\cos \theta T_{n-1}^m - \frac{\sin \theta}{4} (T_{n-1}^{m+1} - 4T_{n-1}^{m+1}) \bigg),$$
$$T_0^0 = 1, \ T_n^{-1} = -\frac{T_n^1}{4}.$$

Цей алгоритм використовується як основний у програмному пакеті Juliette/KG++.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Ми виконали порівняння трьох головних груп моделей. По-перше, це моделі, що використовувалися в геодинамічних програмах, у першу чергу Juliette/KG++ (див. табл. 2). Всі моделі цієї групи комбіновані. По-друге, це група моделей, порівняння яких було виконано раніше іншим методом в роботі [30] (див. табл. 3). По-третє, це моделі лінії EIGEN (див. табл. 4). Моделей цієї групи більше двадцяти, що дозволило провести також аналіз залежності оцінок точності від списку супутників, за спостереженнями яких побудовано ту чи іншу модель. У таблицях тип моделі кодується символами: A - альтиметрія, G - гравітаційні вимірювання, <math>C - CHAMP, R - GRACE, O - GOCE, L - Lageos.

Усі моделі групи В та С використовують значення геоцентричної гравітаційної сталої $\gamma M_{\oplus} =$ = 398600.4415 · 10¹⁴ м³/c².

<i>h</i> , тис. км	Номер моделі групи А									
	1	2	3	4	5	6				
0.0	990.395	492.349	268.141	270.098	270.007	269.974				
0.5	427.848	110.161	88.401	88.403	88.519	88.427				
1.0	251.319	55.499	51.159	51.119	51.217	51.125				
1.5	166.283	34.985	33.686	33.639	33.740	33.656				
2.0	118.160	24.418	23.864	23.818	23.907	23.833				
3.0	67.789	13.882	13.633	13.598	13.659	13.604				
4.0	43.078	8.819	8.638	8.614	8.655	8.614				
5.0	29.166	5.977	5.836	5.820	5.848	5.818				
7.5	13.061	2.680	2.605	2.598	2.610	2.596				
10.0	6.838	1.402	1.362	1.358	1.364	1.357				

Таблиця 5. Значення похибки о (×105) для шести моделей групи А

Таблиця 6. Значення похибки о (×10⁵) для десяти моделей групи В

<i>h</i> , тис. км	Номер моделі групи В									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.0	156.832	93.904	26.511	25.048	25.061	24.983	25.073	25.053	25.058	25.164
0.5	13.189	7.577	2.012	1.957	1.968	1.963	1.963	1.959	1.968	2.034
1.0	3.377	2.433	0.601	0.544	0.568	0.556	0.557	0.548	0.567	0.665
1.5	1.326	1.226	0.302	0.243	0.275	0.259	0.261	0.248	0.275	0.368
2.0	0.672	0.744	0.193	0.136	0.172	0.153	0.156	0.142	0.171	0.246
3.0	0.275	0.361	0.106	0.059	0.093	0.076	0.079	0.066	0.093	0.136
4.0	0.154	0.212	0.069	0.033	0.061	0.045	0.049	0.038	0.061	0.085
5.0	0.101	0.138	0.048	0.020	0.043	0.030	0.034	0.025	0.043	0.057
7.5	0.046	0.060	0.023	0.009	0.021	0.013	0.016	0.011	0.021	0.026
10.0	0.026	0.032	0.013	0.004	0.012	0.007	0.010	0.006	0.012	0.014

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

Результати порівняння моделей наведено в табл. 5—7. У цих таблицях приводиться значення похибки σ в одиницях тис. км/доба², що відповідає звичайній системі одиниць геодинамічних програм і дозволяє привести результати незалежно від значення радіуса Землі, різного в різних моделях.

Для переходу до одиниць м/c² вказані значення слід помножити на $10^6 / (86400^2 \cdot R_{\oplus}) \approx 2.1 \cdot 10^{-5}$.

Результат, що з очевидністю випливає з аналізу табл. 5, полягає в тому, що модель GRIM3 має точність, що в 3—5 разів нижча, ніж точність інших моделей цієї групи. Це непогана ілюстрація

<i>h</i> , тис. км	Номер моделі групи С									
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0.0	225.130	278.886	154.543	86.534	53.934	53.798	61.632	53.786		
0.5	6.561	7.949	2.872	1.491	1.226	1.162	1.390	1.164		
1.0	1.368	1.634	0.857	0.420	0.412	0.318	0.402	0.322		
1.5	0.705	1.008	0.541	0.249	0.278	0.206	0.239	0.208		
2.0	0.455	0.718	0.389	0.172	0.205	0.150	0.167	0.151		
3.0	0.241	0.412	0.232	0.100	0.123	0.091	0.099	0.090		
4.0	0.149	0.259	0.151	0.066	0.080	0.060	0.066	0.059		
5.0	0.099	0.173	0.104	0.046	0.055	0.042	0.047	0.040		
7.5	0.044	0.075	0.047	0.022	0.025	0.020	0.023	0.018		
10.0	0.023	0.038	0.025	0.012	0.013	0.011	0.013	0.010		
12.5	0.013	0.021	0.014	0.007	0.008	0.006	0.008	0.006		
15.0	0.008	0.013	0.009	0.005	0.005	0.004	0.005	0.003		
17.5	0.005	0.008	0.006	0.003	0.003	0.003	0.004	0.002		
20.0	0.003	0.005	0.004	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002		

Таблиця 7. Значення похибки о (×10⁵) для 15 моделей групи С

<i>h</i> , тис. км	Номер моделі групи С									
	9	10	11	12	13	14	15			
0.0	53.776	53.762	53.761	53.750	53.750	56.320	53.752			
0.5	1.153	1.151	1.151	1.150	1.150	1.247	1.169			
1.0	0.303	0.296	0.296	0.296	0.296	0.419	0.341			
1.5	0.194	0.186	0.186	0.186	0.186	0.295	0.230			
2.0	0.141	0.133	0.133	0.133	0.133	0.224	0.173			
3.0	0.084	0.078	0.078	0.079	0.079	0.140	0.109			
4.0	0.055	0.050	0.050	0.051	0.051	0.094	0.074			
5.0	0.038	0.034	0.034	0.035	0.035	0.065	0.053			
7.5	0.017	0.015	0.015	0.016	0.016	0.030	0.026			
10.0	0.009	0.007	0.007	0.010	0.009	0.016	0.015			
12.5	0.005	0.004	0.004	0.005	0.005	0.010	0.009			
15.0	0.003	0.002	0.003	0.004	0.004	0.006	0.006			
17.5	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004			
20.0	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004			



Рис. 1. Залежність точності моделей групи С від висоти



Рис. 2. Лінії рівної точності моделей групи С

прогресу, досягнутого за 30 років з часу виходу GRIM3. За вказаний час точність моделей на поверхні Землі зросла втричі.

Наявність грубої моделі в порівнянні приводить до зміщення результату, тому дві найточніші і найуживаніші моделі JGM3, EGM96 були введені в групу В. Тут результати дещо інші, однак у будь-якому разі моделі, побудовані на основі лише супутникових даних (3—9) показують вищу точність на всьому інтервалі висот. Цей результат загалом узгоджується з коментарями, наведеними в роботі [30], однак пряме порівняння не видається можливим, оскільки у роботі [30] точність моделі геопотенціалу виводиться з аналізу величин коефіцієнтів моделі емпіричного прискорення, які змінюються при заміні моделі геопотенціалу.

Результати порівняння моделей групи С приведено в табл. 7 і на рис. 1, 2. На рис. 1 приведено графіки залежності Ідо від номера моделі та висоти h. Суцільні лінії зверху вниз відповідають висотам 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20 тис. км. На рис. 2 наведено лінії рівних логарифмів похибки в залежності від номера моделі та висоти. Ці два рисунки показують надзвичайно цікаву рису моделей EIGEN: моделі, при побудові яких використано спостереження супутників Lageos (це моделі 10, 11, 12) виявляються найточнішими на великих висотах, хоча поблизу поверхні чи на висотах LEO усі найновіші моделі (8 і далі), що використовують кілька супутників, загалом мають однакову точність. Можливо, настав час для запуску геодинамічного супутника, що працюватиме на проміжних висотах 2.5—3.0 тис. км.

- 1. *Беликов М. В., Тайбаторов К. А.* Эффективный алгоритм вычисления гравитационного потенциала Земли и его первых производных для решения спутниковых задач // Кинематика и физика небес. тел. —1990. 6, № 2. С. 24—32.
- 2. *Болотін С. Л., Литвин С. О.* Порівняння об'єднаних каталогів RSC(GAOUA)05C03 та RSC(Pul)06C02 з реалізацією ICRF // Кинематика и физика небес. тел. 2010. **26**, № 1. С. 31—38.
- 3. *Жаборовський В. П.* Кількісний аналіз придатних для розрахунку гальмування ШСЗ моделей атмосферної густини // Кинематика и физика небес. тел. 2014. **30**, № 5. С. 65—72.
- 4. *Чолій В. Я.* Теоретичне обгрунтування розширеного перетворення Гельмерта // Бюл.Укр. центру визначення параметрів обертання Землі. 2013. **8**. С. 87—90.
- 5. *Чолій В. Я.* До питання про точність фундаментальних планетних ефемерид // Кинематика и физика небес. тел. 2014. **30**, № 6. С. 66—70.
- Bruinsma S. L., Marty J. C., Balmino G., et al. GOCE gravity field recovery by means of the direct numerical method // ESA Living Planet Symposium 2010, Bergen, June 27 – July 2. – Bergen, Norway, 2010.
- Choliy V. Ya. On the extension of Helmert transform // Advs Astron. and Space Phys. – 2014. – 4. – P. 15–19.

- Choliy V., Zhaborovsky V. KyivGeodynamics++: software for processing satellite laser ranging data // Advs Astron. and Space Phys. – 2011. – 1. – P. 96–98.
- Cunningham L. On the computation of the spherical harmonic terms needed during the numerical integration of the orbital motion of an artificial satellites // Cel. Mech. Dyn. Astron. 1970. 2. P. 207–216.
- Flechtner F., Dahle C., Neumayer K., et al. The release 04 CHAMP and GRACE EIGEN gravity field models // System Earth via geodetic-geophysical space techniques / Eds F. Flechtner, T. Gruber, A. Guntner, et al. – Springer, 2010. – P. 41–58. – doi: 978-3-642-10228-8.
- Foerste C., Flechtner F., Schmidt R., et al. A New high resolution global gravity field model derived from combination of GRACE and CHAMP mission and altimetry/ gravimetry surface gravity data // European Geosciences Union General Assembly: Book of abstracts. — 2005. — EGU 05-A-04561.
- Foerste C., Flechtner F., Schmidt R., et al. A mean global gravity field model from the combination of satellite mission and altimetry/gravimetry surface gravity data // Geophys. Res. Abstracts. – 2006. – 8. – 03462. – (Poster, EGU GA 2006, Vienna, Austria, 02–07 April 2006).
- Foerste Ch., Flechtner F., Schmidt R., et al. EIGEN-GL05C – A new global combined high-resolution GRACE-based gravity field model of the GFZ-GRGS cooperation // Geophys. Res. Abstracts. – 2008. – 10. – EGU2008-A-03426.
- Goiginger H., Hock E., Rieser D., et al. The combined satellite-only global gravity field model GOCO02S // European Geosciences Union General Assembly: Book of abstracts. – 2011. – EGU 2011-10571.
- *IERS* Conventions (2010) / Eds G. Petit, B. Luzum. Paris: Observatoire de Paris, 2010. – IERS TN 36. – 160 p.
- 16. Jaggi A., Meyer U., Beutler G., et al. Status of gravity field model computed from GRACE field recovery using the celestial mechanics approach // Geodesy for Planet Earth / Eds S. Venyon, M. Pacino. — Berlin: Springer. — 2012. — 136. — P. 161—170.
- Lemoine F. G., Kenyon S. C., Factor J. K., et al. The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96 // NASA Technical Paper NASA/ TP1998206861. — Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA, 1998.
- Marsh J. G., Lerch F. J., Putney B. H., et al. The GEM-T2 Gravitational Model // J. Geophys. Res. – 1990. – 95, N B13. – P. 22043–22071.
- McCarthy D., Petit G. (eds.) IERS Conventions (2003) // IERS TN 32. — Paris: Observatoire de Paris, 2004. — 127 p.
- 20. Pavlis N., Holmes S., Kenyon S., Factor J. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008 // European

Geosciences Union General Assembly: Book of abstracts. – 2008. – EGU 2008-A-01891.

- Prange L. Global gravity field determination using the GPS measurements made onboard the low Earth orbiting satellite CHAMP // Geod.-geophys. Arb. Schweiz. – 2011. – 81. – 232 p.
- Reigber Ch., Balmino G., Moynot B., Mueller H. The GRIM3 Earth Gravity Field Model // Manuscripta Geodaetica. – 1983.–8.–P. 93–138.
- Reigber Ch., Balmino G., Schwintzer P., et al. A high quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and Accelerometry (EIGEN-1S) // Geophys. Res. Letter. 2002. 29. doi: 10.1029/2002GL015064.
- Reigber Ch., Balmino G., Schwintzer P., et al. Global gravity field recovery using solely GPS tracking and accelerometer data from CHAMP // Space Sci. Revs. – 2003. – 29. – P. 55–66.
- Reigber Ch., Jochmann H., Wunsch J., et al. Earth gravity field and seasonal variability from CHAMP // Earth observation with CHAMP Results from three years in orbit / Eds C. Reigber, H. Luhr, P. Schwintzer, J. Wickert. Berlin: Springer, 2004. P. 25–30.
- Reigber Ch., Jochmann H., Wunsch J., et al. Earth gravity field and seasonal variability from CHAMP // Earth observation with CHAMP Results from three years in orbit / Eds C. Reigber, H. Luhr, P. Schwintzer, J. Wickert. Berlin: Springer, 2004. P. 25–30.
- Reigber Ch., Schmidt R., Flechtner F., et al. An Earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S // J. Geodyn. 2005. 39. P. 1-10.
- Reigber Ch., Schwintzer P., Neumayer K., et al. The CHAMP-only Earth Gravity Field Model EIGEN-2 // Advs Space Res. - 2003. - 31, N 8. - P. 1883-1888. doi: 10.1016/S0273-1177(03)00162-5.
- 29. *Reigber Ch., Schwintzer P., Stubenvoll R., et al.* A High resolution global gravity field model combining CHAMP and GRACE satellite mission and surface data: EIGEN-CG01C. GeoForschungsZentrum Potsdam, 2006. Scientific technical report STR06/07.
- Sosnica K. Determination of precise satellite orbits and geodetic parameters using satellite laser ranging: Dissertation. – AIUB, 2014. – 253 p.
- Tapley B. D., Watkins M., Ries J., et al. The joint gravity model 3 // J. Geophys. Res. – 1996. – 101. – P. 28029– 28049.
- Tapley B. D., Ries J., Bettadpur S., et al. The GGM03 mean earth gravity model from GRACE // Eos Trans. AGU 88(52), Fall Meet. Suppl. – 2007. – Abstract G42A-03.
- Tkachuk V. V., Choliy V. Ya. On the comparison of fundamental numerical ephemerides // Advs Astron. and Space Phys. – 2013. – 3. – P. 141–144.

Стаття надійшла до редакції 18.12.14

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

В. Я. Чолий

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Анализируется точность в случайном отношении моделей геопотенциала, накопленных усилиями мирового сообщества и рекомендованных к использованию в геодинамических программах. Проведен анализ точности моделей EIGEN с целью определения зависимости влияния состава наблюдений, собранных космическими миссиями, на точность моделей.

Ключевые слова: гравитационное поле, геодинамические модели, оценивание точности.

V. Ya. Choliy

Taras Shevchenko National University of Kyiv Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

ON THE PRECISION ESTIMATES OF EARTH GRAVITATION FIELD MODELS

In the article the results of the precision analysis of the geopotential models, collected by the scientific community and recommended for geodynamic programs is presented. EI-GEN model line is analysed too with the purpose to understand how the data from new space missions influences the models precision.

Key words: gravitation field, geodynamic models, precision estimates.

Е. М. Занимонский, Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольский, В. Н. Лисаченко, А. В. Пазнухов, Д. Ю. Коленов, А. А. Колосков

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

МНОГОПОЗИЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ПРИЕМНИКОВ ГНСС

Обоснована возможность построения региональных карт полного электронного содержания в ионосфере с пространственным разрешением 50—100 километров по данным сетей базовых станций глобальной навигационной спутниковой системы. Разработанная методика позволила обнаружить стационарные неоднородности в среднеширотной ионосфере, с пространственным масштабом около трехсот километров и временем жизни около двух часов.

Ключевые слова: ионосферные неоднородности, карты, ГНСС.

введение

В ходе выполнения НИР «Лира» в РИ НАН Украины в соответствии с пунктом Технического задания «Региональная многопозиционная ГНСС-диагностика возмущений ПЭС» были исследованы и реализованы возможности восстановления вариаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы с высоким пространственно-временным разрешением. В качестве исходных данных использованы базовые ГНСС-станции, расположенные на территории Украины и Польши.

Известно, что методы многопозиционного радиопросвечивания с использованием глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) позволяют эффективно изучать и моделировать ионосферные процессы, благодаря развитию сетей двухчастотных приемников, предназначенных в первую очередь для решения геодезических задач [6, 7, 10]. По данным мировой сети перманентных станций восстанавливаются глобальные карты ПЭС ионосферы, которые широко используются в научных и прикладных исследованиях и являются наглядным примером эффективного международного сотрудничества. Эти карты дают возможность визуализировать динамические процессы в околоземной плазме в планетарном масштабе, воссоздать крупномасштабные возмущения и проанализировать регулярные суточные и сезонные изменения. Однако, их невысокое пространственно-временное разрешение [5] не позволяет изучать относительно быстрые локальные особенности поведения ионосферы в конкретном регионе земного шара, интересующем потребителей и исследователей.

К региональным процессам, масштабы которых меньше или порядка тысячи километров, относится, например, тропосферно-ионосферное взаимодействие. Локализация ионосферных возмущений связана с характерными размерами приповерхностных источников энерговыделения, таких как мощные погодные фронты, ураганы, циклоны, землетрясения, извержения вулканов и др. Обычно такие возмущения называются среднемасштабными ионосферными

[©] Е. М. ЗАНИМОНСКИЙ, Л. Н. ЛИТВИНЕНКО,

Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ, В. Н. ЛИСАЧЕНКО,

А. В. ПАЗНУХОВ, Д. Ю. КОЛЕНОВ, А. А. КОЛОСКОВ, 2015

неоднородностями, в категорию которых попадают и атмосферные гравитационные волны, являющиеся основным транспортным агентом между нейтральной нижней атмосферой и верхними ионизированными слоями.

Исследования пространственной структуры среднемасштабных неоднородностей ионосферы могут быть проведены с помощью радиотомографии с характерным горизонтальным разрешением в несколько десятков километров за время наблюдения около часа [1, 5, 14]. Томография дает обширную информацию, однако верификация полученных данных весьма затруднительна в связи с фрагментарностью таких наблюдений и сложностью обработки. Попытки сопоставить результаты томографии с распределением электронного содержания, рассчитанным, например, по яркости ночного свечения в ионосфере [1] нельзя считать убедительными. Сами авторы работы [1], как и большинство других исследователей, обращаются для апробации результатов восстановления ионосферных возмущений к глобальным картам распределения ПЭС [7, 11, 15].

Целью данного исследования являлась разработка методики мониторинга среднемасштабных ионосферных образований и волновых процессов по данным достаточно плотной региональной сети приемников ГНСС.

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ КАРТ ПЭС И РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В настоящее время в странах Центральной и Северной Европы, в США и Японии, в Австралии созданы региональные и национальные сети приемных пунктов ГНСС с характерными расстояниями между ними около 50 — 70 километров. В Украине наряду с перманентными станциями международных сетей имеется несколько локальных сетей базовых станций, данные которых также могут быть использованы для многопозиционного зондирования неоднородной структуры ионосферы. В Харьковской области кластер станций NGC NET [2], состоящий из 10 приемных пунктов, дополняется станцией КНАR международной сети IGS, постоянно действующей станцией на НЧО РИ НАНУ в с. Мартовая, аналогичная станция апробирована на РАО им. С. Я. Брауде РИ НАНУ (пос. Граково) и должна быть введена в постоянную эксплуатацию в 2015 г.

Преимущества применения для ионосферного мониторинга данных нескольких одновременно действующих приемников региональной сети ГНСС можно сформулировать следующим образом. Априорно ожидается, что вариации ионосферных параметров, полученные с нескольких станций, расположенных на расстояниях порядка десятков километров друг от друга, имеют высокую корреляцию. Использование синхронных данных большого числа станций позволяет исключить проблемы, возникающие из-за неизбежных технических перерывов в работе отдельных приемников. Стандарт флуктуаций ПЭС в каждом пункте наблюдений может являться характеристикой возмущенности ионосферы в региональном масштабе. Для проверки правильности восстановления локальных распределений ПЭС они сглаживаются во времени и сопоставляются с данными глобальных ионосферных карт, которые считаются «эталонными». Такая проверка оказывается весьма продуктивной особенно в регионах со сравнительно большой плотностью перманентных станций [11, 15].

Традиционно при построении карт ПЭС используется модель ионосферы в виде тонкого фазового экрана. Электронное содержание, вычисляемое по данным приемников ГНСС, относится к лучу зрения «спутник — приемник», который характеризуется углом места и азимутом. Для отображения ПЭС в виде географической карты текущие значения проецируются на сферическую поверхность, моделирующую ионосферу в виде тонкого слоя [3, 6, 7, 10, 11, 15]. Неоднозначность выбора радиуса такой сферической оболочки является источником неопределенности координат подионосферных точек, относительное положение которых для разных спутников и пунктов наблюдений, изменяется в зависимости от выбранной высоты слоя. Это приводит к тому, что вид локальной карты, построенной по нескольким наблюдаемым спут-



Рис. 1. Локальные карты (толстые изолинии) вариаций ПЭС, по данным отдельных спутников GPS, полученным на станциях под Харьковом на фоне фрагмента глобальной карты ПЭС (тонкие изолинии). Символами обозначены подионосферные точки на луче зрения «спутник — приемник»

никам, существенно зависит от выбора высоты ионосферного слоя [4].

Совершенно иная ситуация реализуется при использовании в традиционном алгоритме восстановления ПЭС данных каждого спутника по отдельности [4]. Взаимное расположение подыоносферных точек сохраняется при варьировании высоты слоя, изменяется только положение центра картины и ее масштаб. Пространственные структуры, которые воспроизводятся в односпутниковой схеме, имеют практически одинаковый вид в диапазоне высот от 100 до 450 км, со сдвигом, зависящим от угла возвышения спутника над горизонтом, а вариации скорости перемещения неоднородностей в гипотезе «замороженного переноса» не превышают 20 %.

В ходе выполнения работы проводились исследования статистических характеристик ионосферных вариаций по региональным картам ПЭС, которые строились на основе данных кластера станций, расположенных вблизи Харькова по методике, описанной в работе [15]. Пример такой карты показан на рис. 1. Первичные данные с двухчастотных приемников ГНСС использовались для получения наклонной величины ПЭС в каждом направлении «спутник — приемник» для каждой эпохи наблюдений (однократного измерения кодовых псевдодальностей и фаз несущих сигналов). После пересчета ПЭС к вертикальному направлению и определения координат подыоносферных точек строилась фоновая карта по данным всех наблюдаемых спутников на всех станциях кластера, аппроксимированная поверхностью второго порядка по широте и долготе. Форма изолиний этой фоновой карты в масштабе данного рисунка практически не отличается от формы соответствующих изолиний фрагмента глобальной карты. Из-за наличия в каждом приемнике неизвестных задержек сигналов на двух частотах абсолютные значения ПЭС, получаемые в результате вычислений, имеют переменную систематическую погрешность, устраняемую введением поправки, величина которой равна разности средних значений фонового электронного содержания рассчитанного и взятого из глобальной карты. Затем по данным отдельных спутников восстанавливались локальные карты отклонений ПЭС от региональной карты в кластерах подыоносферных точек (рис. 1).

Локальные карты могут быть использованы для оценки статистических характеристик вариаций ПЭС, но информативность полученных характеристик невелика. Оказывается, сложно разделить пространственные и временные вариации из-за перемещения подыоносферных точек со скоростями сопоставимыми со скоростью движения ионосферных неоднородностей [3].

Существенного прогресса при исследовании среднемасштабных процессов в ионосфере можно добиться, используя данные многочисленных мультисистемных (GPS+ГЛОНАСС+GALILEO) приемников ГНСС региональных и национальных сетей, подобно тому, как это описано в работах [7, 11], при определенной доработке модели ионосферы.

Погрешности карт в модели тонкого слоя появляются не только из-за неоднозначности выбора высоты слоя, но и из-за использования упрощенной проектирующей функции — математического выражения для пересчета наклонного полного электронного содержания вдоль луча зрения «спутник — приемник» в вертикальное ПЭС [13]. Нами предложено отказаться от



Рис. 2. Карты остатков ПЭС после удаления полиномиальных трендов по широте и долготе для шести эпох 9 ноября 2013 г. В центральной части «водопадом» показаны сечения карт вдоль 52-й параллели через каждые 5 мин

модели тонкого слоя и оценивать ПЭС только в вертикальном направлении, используя данные спутников, находящихся вблизи зенита. В этом случае полное электронное содержание измеряется непосредственно над приемниками, а пространственное разрешение определяется расстоянием между ними. Существенным недостатком предлагаемой схемы получения данных для построения региональной карты ПЭС является то, что навигационные спутники над среднеширотными стациями вблизи зенита находятся только несколько часов в сутки, а для высокоширотных станций схема не работает вовсе. Отказ от модели тонкого слоя позволяет ввести интервал пространственного разрешения 50-100 км, который сопоставим с характерной толщиной ионосферного слоя [9].

Для примера рассмотрим несколько карт вариаций ПЭС, построенных по данным центральноевропейских перманентных станций ГНСС и польской национальной сети ASG-EUPOS [8], любезно предоставленным коллегами из Варминьско-Мазурского университета в ходе выполнения совместных работ [4, 12]. Интересный случай вариаций ПЭС обнаружился при обработке данных двух спутников GPS, SV08 и SV09, которые последовательно были в зените, благодаря чему удалось построить карты для почти двухчасового интервала наблюдений. На рис. 2 показаны карты вариаций ПЭС для шести эпох вечером 9 ноября 2013 г. На картах видны чередующиеся локальные максимумы и минимумы ПЭС в целом образующие квазипериодическую структуру. В центральной части рис. 2 в режиме «водопада» показаны сечения карт вдоль 52-й параллели через каждые 5 мин. Вполне отчетливо прослеживаются вариации ПЭС с периодом около трехсот километров, живущие свыше двух часов и практически не перемещающиеся в пространстве.

Подобная картина наблюдается и в другие дни в разное время суток. В перспективе пред-

полагается построение физических ионосферных моделей формирования таких неоднородных структур. На данном этапе исследований основное внимание было уделено разработке самой методики восстановления региональных карт вариаций ПЭС с высоким пространственно – временным разрешением и усовершенствованию программных средств для автоматизации обработки больших массивов исходных данных, а также оценкам методических погрешностей, неизбежно возникающих в связи с упрощенным моделированием ионосферы.

выводы

Таким образом, в ходе выполнения НИР «Лира» в 2014 г. предложена и апробирована возможность построения карт ПЭС ионосферы с пространственным разрешением 50—100 километров по данным региональных сетей базовых станций ГНСС. Применение разработанной методики позволило обнаружить наличие долгоживущих неоднородностей в среднеширотной ионосфере, с пространственным масштабом около трехсот километров и временем жизни от одного до трех часов. В перспективе описанная методика может быть применена для сопоставления с данными бортовых спутниковых ионосферных наблюдений среднемасштабных плазменных неоднородностей.

Восстановление региональных карт ПЭС может быть также полезно для коррекции радиоастрономических наблюдений в декаметровом диапазоне волн проводимых в Радиоастрономическом институте НАН Украины на радиотелескопах УТР-2, ГУРТ и системы УРАН, а также создаваемых в Европе телескопов LOFAR [4].

Работа выполнена в 2014 г. в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям в соответствии с Техническим заданием НИР «Многопозиционные ионосферные исследования для подспутникового сопровождения национальных и международных космических проектов», шифр «Лира-2», № Госрегистрации 0114U002822.

Авторы благодарят руководство и сотрудников Навигационно-геодезического Центра в Харькове за предоставление ГНСС данных сети NGC NET.

- Андреева Е. С., Калашникова С. А., Куницын В. Е., Нестеров И. А. Исследование высокоширотной ионосферы по данным УФ-спектрометрии, глобальным ионосферным картам GIM и высокоорбитальной радиотомографии // Соврем. пробл. дистан. зонд. Земли из космоса. — 2013. — 10, № 1. — С. 103—111.
- 2. Балан А. Ю., Горб А. И., Ефременко П. Е., Нестерович А. Г. Преимущества использования сети GPS-базовых станций в Харьковской области. — Интернет ресурс http://www.pryroda.gov.ua/ua/index.php?newsid=1233
- 3. *Галушко В. Г., Сопин А. А., Ямпольский Ю. М.* Суточные вариации параметров ионосферных неоднородностей по данным измерений ПЭС над Антарктическим полуостровом // Радиофиз. и радиоастрон. 2012. 17, № 3. С. 218—233.
- 4. Занимонский Е. М., Горб А. И., Лисаченко В. Н. и др. Возможности и проблемы использования локальных ионосферных карт по данным ГНСС // 5-й Междунар. радиоэлектронный форум МРФ-2014: Сб. науч. тр. — Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2014. — Т. 1. — С. 199—201.
- Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С., Нестеров И. А. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы // Успехи физ. наук. — 2010. — 180, № 5. — С. 548—553.
- 6. *Янків-Вітковська Л. М.* Методика визначення параметрів іоносфери у мережі супутникових станцій західної України // Космічна наука і технологія. 2013. **19**, № 6. С. 47—52.
- Bergeot N., Chevalier J-M., Bruyninx C., et al. Near realtime ionospheric monitoring over Europe at the Royal Observatory of Belgium using GNSS data // J. Space Weather Space Clim. – 2014. – 4. – A31.
- 8. *Bosy J., Oruba A., Graszka W., et al.* ASG-EUPOS densification of EUREF permanent network on the territory of Poland // Repts Geod. 2008. 2, N 85. P. 105–112.
- Fox M. W., Mendillo M., Klobuchar J. A. Ionospheric equivalent slab thickness and its modeling applications // Radio Sci. – 1991. – 26. – P. 429–438,
- Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 // J. Geodesy. – 2009. – 83. – P. 263–275. – doi 10.1007/s00190-008-0266-1.
- Krypiak-Gregorzcyk A., Wielgosz P., Gosciewski D., Paziewski J. Validation of approximation techniques for local TEC mapping // Acta Geodyn. Geomater. – 2013. – 10, N 3 (171). – P. 275–283,
- Krypiak-Gregorzcyk A., Zanimonskiy Y. M., Sopin A. A., et al. Accuracy analysis of local TEC maps derived using limited number of GNSS stations // EUREF 2014 Symp.: Abstracts book. — Vilnius, Lithuania, 2014. — P. 23.
- 13. *Smith D. A., Araujo-Pradere E. A., Minter C., Fuller-Rowell T.* A comprehensive evaluation of the errors inherent in the use of a two-dimensional shell for modeling the

ionosphere // Radio Sci. - 2008. - **43**. - RS6008. - doi:10.1029/2007RS003769.

- Stoll C., Schluter S., Heise S., et al. A GPS based threedimensional ionospheric imaging tool: Process and assessment // Adv. Space Res. – 2006. – 38, N 11. – P. 2313–2317.
- Wielgosz P., Kashani I., Grejner-Brzezinska D., et al. Regional ionosphere modeling using smoothed pseudoranges // 5th Internat. Antarctic Geodesy Symp. (AGS'03), Lviv, Ukraine, 15–17 Sept. 2003. – Cambridge, 2005. – SCAR Report N 23. – P. 37–41.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2014

Є. М. Занімонський, Л. М. Литвиненко,

Ю. М. Ямпольський, В. М. Лісаченко, О. В. Пазнухов, Д. Ю. Колєнов, А. О. Колосков

Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

БАГАТОПОЗИЦІЙНА ДІАГНОСТИКА СЕРЕДНЬОШИРОТНОЇ ІОНОСФЕРИ ЗА ДАНИМИ РЕГІОНАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ПРИЙМАЧІВ ГНСС

Обгрунтовано можливість побудови регіональних карт ПЕВ іоносфери з просторовим розділенням 50—100 кі-

лометрів за даними мережі базових станцій ГНСС. Методика, яка була розроблена, дала можливість виявити наявність стаціонарних неоднорідностей в середньоширотній іоносфері, з просторовим масштабом близько трьохсот кілометрів та часом життя близько двох годин.

Ключові слова: іоносферні неоднорідності, карти, ГНСС.

Ye. M. Zanimonskiy, L. M. Lytvynenko, Yu. M. Yampolski, V. N. Lisachenko, A. V. Paznukhov, D. Yu. Kolenov, A. A. Koloskov

Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

THE MULTIPOSITION DIAGNOSTICS OF MIDLATITUDE IONOSPHERE USING THE DATA OF REGIONAL NETWORK OF GNSS RECEIVERS

The possibility of constructing regional maps of the ionosphere TEC with a spatial resolution of 50–100 kilometers according to the GNSS network base stations is justified. The developed technique allowed detecting the presence of stationary irregularities in the mid-latitude ionosphere, with a spatial scale of about three hundred kilometers and time of existence about two hours.

Key words: ionospheric irregularities, maps, GNSS.

ПРЕЗИДІЯ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

ПОСТАНОВА

25.02.2015

м. Київ

Про 20-ліття від часу випуску журналу «Космічна наука і технологія»

Випуск загальноакадемічного науково-практичного журналу «Космічна наука і технологія», покликаного висвітлювати проблеми космічної науки, техніки та технологій, розпочато з 1995 р. на виконання рішення Президії НАН України (постанова Президії НАН України від 28.12.1994 № 307 «Про започаткування журналу «Космічна наука і технологія»). Журнал, який став гідним продовжувачем попередніх спеціалізованих видань, заснованих Національною академією наук України, таких як «Космические исследования на Украине» (1973—1984), «Космическая наука и техника» (1986— 1992), сприяє популяризації знань про космос.

Видання охоплює такі розділи космічної науки, техніки та технології, як ракетно-космічні комплекси і апарати наукового призначення, дослідження Землі з космосу, системи керування космічними носіями та апаратами, космічна фізика, астрономія, біологія, космічні конструкції та матеріали, космічний зв'язок та інформаційні системи, а також історичні, правові та організаційні аспекти дослідження космосу.

Журнал «Космічна наука і технологія» включено до Переліку фахових видань, у яких публікуються основні результати дисертаційних робіт з технічних та фізико-математичних наук.

За роки свого двадцятирічного існування журнал «Космічна наука і технологія», видання якого здійснює Національна академія наук України разом з Державним космічним агентством (ДКА) України, набув широкого визнання в Україні і за кордоном, сприяв налагодженню співпраці установ цих організацій та широкому інформуванню громадськості щодо здобутків та проблем космічної галузі України та світу.

За весь час видано 20 томів журналу — близько 90 випусків, серед них 13 тематичних номерів та 18 додатків, в яких опубліковано понад 1500 наукових статей, третина з яких підготовлена за участі зарубіжних авторів.

Президія НАН України постановляє:

1. Схвалити роботу редакційної колегії журналу «Космічна наука і технологія», редакції та Видавничого дому «Академперіодика» НАН України.

2. Продовжити разом з ДКА України видання загальноакадемічного журналу «Космічна наука і технологія».

3. Затвердити новий склад редакційної колегії журналу «Космічна наука і технологія» (додається).

4. Вважати за доцільне запровадити англомовну версію журналу «Космічна наука і технологія» та забезпечити більш широке його представлення у наукометричних міжнародних базах даних.

5. Контроль за виконанням цієї постанови покласти на Науково-видавничу раду НАН України.

Президент Національної академії наук України академік НАН України

В. о. головного вченого секретаря Національної академії наук України член-кореспондент НАН України Б. Є. ПАТОН

В. Л. БОГДАНОВ

СКЛАД редакційної колегії журналу «Космічна наука і технологія»

ПАТОН Борис Євгенович, доктор технічних наук, академік НАН України, президент НАН України (головний редактор);

УРУСЬКИЙ Олег Семенович, доктор технічних наук, голова Державного космічного агентства України (заступник головного редактора);

ЯЦКІВ Ярослав Степанович, доктор фізико-математичних наук, академік НАН України, директор Головної астрономічної обсерваторії НАН України (заступник головного редактора, науковий редактор);

ВАВИЛОВА Ірина Борисівна, кандидат фізико-математичних наук, завідувач лабораторії Головної астрономічної обсерваторії НАН України (відповідальний секретар);

A3IMOB Олександр Тельманович, доктор геологічних наук, провідний науковий співробітник Наукового Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України;

АНАТИЧУК Лук'ян Іванович, доктор фізико-математичних наук, академік НАН України, директор Інституту термоелектрики НАН України та МОН України;

ВЕРХОВЦЕВ Валентин Геннадійович, доктор геологічних наук, завідувач відділу Інституту геохімії навколишнього середовища НАН України;

ГОРБУЛІН Володимир Павлович, доктор технічних наук, академік НАН України, директор Інституту стратегічних досліджень;

ДАНИК Юрій Григорович, доктор технічних наук, начальник Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова МО України;

ДЕГТЯРЕВ Олександр Вікторович, доктор технічних наук, академік НАН України, генеральний конструктор — генеральний директор Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»;

ДУДНИК Олексій Володимирович, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту НАН України; ЗГУРОВСЬКИЙ Михайло Захарович, доктор технічних наук, академік НАН України, ректор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»;

ІВАСИШИН Орест Михайлович, доктор фізико-математичних наук, академік НАН України, директор Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України;

IBЧЕНКО Василь Миколайович, доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

КОРДЮМ Єлизавета Львівна, доктор біологічних наук, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України;

КОРЕПАНОВ Валерій Євгенович, доктор технічних наук, заступник директора Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України;

КУНЦЕВИЧ Всеволод Михайлович, доктор технічних наук, академік НАН України, почесний директор Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України;

ЛИХОЛІТ Микола Іванович, доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, директор — головний конструктор казенного підприємства спеціального приладобудування «Арсенал» ДКА України;

ЛОБАНОВ Леонід Михайлович, доктор технічних наук, академік НАН України, заступник директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України;

ЛЯЛЬКО Вадим Іванович, доктор геолого-мінералогічних наук, академік НАН України, директор Наукового Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України;

МАКАРОВ Олександр Леонідович, доктор технічних наук, заступник генерального конструктора Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»;

МАЛИШЕВА Наталія Рафаїлівна, доктор юридичних наук, заступник директора Міжнародного центру космічного права Інституту держави і права ім. В.М. Корецького НАН України;

ПИЛИПЕНКО Олег Вікторович, доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, директор Інституту технічної механіки НАН України та ДКА України;

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч, доктор геологічних наук, завідувач лабораторії Наукового Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України;

СЕМЕНОВ Лев Петрович, кандидат технічних наук, начальник управління Державного космічного агентства України;

ФЕДОРОВ Олег Павлович, доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, директор Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України;

ХАРЧЕНКО Володимир Петрович, доктор технічних наук, проректор Національного авіаційного університету;

ЯМПОЛЬСЬКИЙ Юрій Моїсійович, доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу Радіоастрономічного інституту НАН України.

АВРАМОВ Костянтин Віталійович — провідний науковий співробітник відділу нестаціонарних механічних процесів Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — технічна механіка, ракетно-космічна техніка.

АЛЬПЕРТ Софія Іоганівна — аспірантка та інженер Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України НАН України.

Напрям науки — класифікація багатоспектральних зображень, обробка та оцінювання якості інтерпретації багатоспектральних аерокосмічних зображень.

БАБІЙ Надія Анатоліївна — провідний інженер Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, аспірантка.

Напрям науки — керування динамічними системами.

БАРУ Микола Олександрович — аспірант Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — фізика атмосфери та навколоземного космічного простору, геофізика.

БАТУТІНА Тетяна Яківна — начальник сектору вібраційних, ударних, акустичних навантажень та динамічних характеристик у відділі навантажень та міцності Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля». Автор ряду винаходів.

Напрям науки — розробка та випробування космічних апаратів і ракет-носіїв.

БЕСПАЛОВА Анна Вадимівна — аспірант відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України.

Напрям науки — фізика верхньої атмосфери та іоносфери.

ВОЛОСОВ Віктор Вікторович — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрям науки — керування динамічними системами.

ГАРМАШ Костянтин Петрович — старший науковий співробітник кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — космічна радіофізика, дистанційне радіозондування, радіотехнічні системи зондування.

ГОНТАРОВСЬКИЙ Павло Петрович — старший науковий співробітник Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, кандидат технічних наук. Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки.

Напрям науки — термоміцність та ресурс машин і конструкцій.

ГРИМАЛЬСЬКИЙ Володимир Всеволодович — науковий співробітник Національного інституту астрофізики, оптики і електроніки (Мексика), кандидат фізикоматематичних наук.

Напрям науки — хвильова електроніка, нелінійні хвилі.

ГУБАРЕВ В'ячеслав Федорович — завідувач відділу Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, член-кореспондент НАН України, професор.

Напрям науки — керування динамічними системами.

ДЕГТЯРЕНКО Павло Глібович — начальник конструкторського бюро з системного проектування ракет і ракетних комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрям науки — ракетно-космічна техніка.

ЖУК Ігор Теодорович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — астрофізика.

ЗАЙЦЕВ Борис Пилипович — провідний науковий співробітник Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — механіка деформівного твердого тіла.

ЗАНІМОНСЬКИЙ Євген Михайлович — науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — глобальні навігаційні супутникові системи.

ІВАНТИШИН Олег Любомирович — завідувач лабораторії радіоастрономічних досліджень відділу фізичних методів розпізнавання слабоконтрастних об'єктів у неоднорідних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — методи і засоби радіоастрономічних досліджень іоносфери.

ІВЧЕНКО Василь Миколайович — завідувач кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору.

КОЗАК Людмила Володимирівна — доцент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика навколоземного космічного простору.

КОЗАК Павло Миколайович — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика метеорних явищ.

КОЛЄНОВ Дмитро Юрійович — студент Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна.

Напрям науки — радіофізика геокосмосу.

КОЛОСКОВ Андрій Олександрович — студент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Напрям науки — програмування.

КОЛОСКОВ Олександр Валерійович — старший науковий співробітник Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика атмосфери та навколоземного космічного простору.

КОШОВИЙ Володимир Вікторович — завідувач відділу фізичних методів розпізнавання слабоконтрастних об'єктів у неоднорідних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, кандидат технічних наук. Напрям науки — методи аналізу та обробки даних вимірювань у складних середовищах.

КРЮЧКОВ Євген Іванович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — фізика атмосфери, космічне приладобудування.

КУНЦЕВИЧ Всеволод Михайлович — головний науковий співробітник, почесний директор Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, академік НАН України, професор.

Напрям науки — керування динамічними системами.

ЛИСАЧЕНКО Володимир Миколайович — провідний інженер-радіофізик Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — радіоастрономія.

ЛИТВИНЕНКО Леонід Миколайович — директор Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, академік Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіоастрономія.

ЛІСОВИЙ Олександр Миколайович — науковий співробітник Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — теорія та створення універсальних і спеціалізованих комп'ютерних засобів і систем.

МАСЛОВА Анна Іванівна — науковий співробітник відділу системного аналізу та проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — динаміка космічних систем та їхня взаємодія з розрідженим середовищем, динаміка твердого тіла, теорія коливань.

МЕЗЕНЦЕВ Валентин Петрович — науковий співробітник Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — методи обробки даних космічних експериментів.

МЕЛЬНИК Микола Омелянович — завідувач відділу Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — засоби і методи космічних досліджень

МЕЛЬНИЧУК Сергій Вікторович — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Націо-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 1

нальної академії наук України і Державного космічного агентства України, аспірант.

Напрям науки — керування динамічними системами.

МІЩЕНКО Олександра Василівна — молодший науковий співробітник відділу системного аналізу та проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України.

Напрям науки — динаміка космічних систем та їх взаємодія з іоносферною плазмою, динаміка твердого тіла, теорія коливань.

НОГАЧ Роман Тадейович — молодший науковий співробітник Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — електромагнітні ефекти при акустичних впливах на іоносферу.

ОПАНАСЕНКО Володимир Миколайович — провідний науковий співробітник Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — теорія та створення універсальних і спеціалізованих комп'ютерних засобів і систем.

ПАЗНУХОВ Олексій Володимирович — провідний інженер-радіофізик Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України.

Напрям науки — радіофізика геокосмосу.

ПАЛАГІН Олександр Васильович — заступник директора з наукової роботи Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова Національної академії наук України, академік НАН України, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — теорія та створення універсальних і спеціалізованих комп'ютерних засобів і систем.

ПИРОЖЕНКО Олександр Володимирович — провідний науковий співробітник відділу системного аналізу та проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — динаміка космічних систем, теоретична механіка, теорія коливань, стійкість руху, регулярна та хаотична динаміка, нелінійна механіка.

ПОДОРВАН Віктор Миколайович — науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — обробка матеріалів Д33 та багатоспектральних аерокосмічних зображень.

ПОПОВ Михайло Олексійович — заступник директора з наукової роботи Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України.

Напрям науки — дистанційне зондування Землі.

ПРОТАСОВА Тетяна Володимирівна — молодший науковий співробітник Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — термоміцність машин і конструкцій.

РАПОПОРТ Юрій Григорович — старший науковий співробітник фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — хвильові явища в космічній плазмі та наноструктурованих метаматеріалах.

СЕЛІВАНОВ Юрій Олександрович — старший науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — теоретична фізика, обчислювальна фізика.

ТОНКОНОЖЕНКО Анатолій Мстиславович — координатор науково-технічних робіт Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрям науки — ракетно-космічна техніка.

ФЕДОРЕНКО Алла Костянтинівна — старший науковий співробітник відділу «Космічної плазми» Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика верхньої атмосфери та іоносфери.

ХРАМОВ Дмитро Олександрович — старший науковий співробітник відділу системного аналізу та проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічні тросові системи, стабілізація кутового руху.

ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинович — завідувач відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук, професор

Напрям науки — фізика ближнього космосу, фізика плазми.

ЧЕРЕМНИХ Сергій Олегович — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України.

Напрям науки — фізика ближнього космосу.

ЧЕРНОБРИВКО Марина Вікторівна — старший науковий співробітник відділу нестаціонарних механічних процесів Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — технічна механіка, ракетно-космічна техніка.

ЧОЛІЙ Василь Ярославович — доцент кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — астрометрія, геодинаміка.

ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки (1989 г.), двічі лауреат Премії Ради Міністрів СРСР.

Напрям науки — космічна радіофізика, космічна фізика, космічна екологія та космічна погода.

ШЕВЧЕНКО Володимир Миколайович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — керування динамічними системами.

ШЕРЕМЕТ Ірина Вікторівна — начальник групи у відділі міцності та навантажень Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрям науки — аналіз ударних навантажень, що діють на конструкції космічних апаратів при спрацюванні піротехнічних засобів розділення ракет-носіїв.

ШУЛЬЖЕНКО Микола Григорович — завідувач відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор. Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки.

Напрям науки — коливання, термоміцність та ресурс машин і конструкцій.

ЯМПОЛЬСЬКИЙ Юрій Моїсійович — завідувач відділу радіофізики геокосмосу Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — радіофізика, геофізика.