

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

ІЧÔÈÄÉ-ÅÉÇÈÆÊÙÌËË

ÀÔÉÌÇÏ

À ÈÄÞ ÁØ °ÁÓÞ ËÓÁÞ Þ ØÙ ÈÞØ È 1995 Á. L É ; Ì ÞÑ ; ÈŠ 6 Àá°iø °á Áiø

КИЇВ

À Þ Ø 2 , ¶ 5 – 6 , 1 9 9 6

KYIV

ЗМІСТ

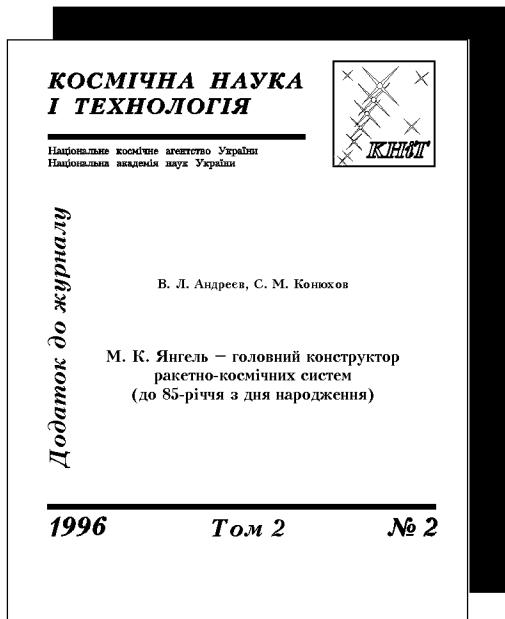
- Закон України «ПРО КОСМІЧНУ ДІЯЛЬНІСТЬ»
Бєглий О. В. Закон України «Про космічну діяльність»
і витоки національного космічного права
- Лебедев Д. В., Ткаченко А. И., Штепа Ю. Н. Магнитная система управления угловым движением микроспутника
- Волохов С. А., Кильдышев А. В. Измерительные контуры и селектирующие функции для определения тессеральных мультиполей интегральным преобразованием магнитных сигналов
- Карачун В. В. Об одномерных механических колебаниях тела под действием акустического излучения
- Карачун В. В. О перемещении деформируемого тела в акустической среде
- Стрижало В. А., Скрипник Ю. Д. Методика испытаний конструкционных материалов на циклическую прочность в условиях околоземного космического пространства
- Леонов М. А. Бортовий прискорювач електронів на накопичувачах-смінностях: основні стійківності та оцінки

CONTENTS

- 3 The Ukrainian law “ON SPACE ACTIVITIES”
13 *Beglyi O. V.* The Ukrainian law “On Space Activities” and sources of the national space law
17 *Lebedev D. V., Tkachenko A. I., and Shtepa Yu. N.* Magnetic system for controlling the angular motion of a micro-satellite
26 *Volokhov S. A. and Kil'dishev A. V.* Measuring loops and selective functions for tesserall multipole determination by integral transforms of magnetic signatures
31 *Karachun V. V.* On the univariate mechanical oscillations of a body under the influence of acoustic emission
34 *Karachun V. V.* On the motion of a strained body in an acoustic medium
38 *Stryzhalo V. A. and Skrypnik Yu. D.* Technique for testing construction materials for the cyclic strength under the outer space conditions
46 *Leonov M. A.* The on-board electron accelerator with a capacitance storage: main correlations and estimations

- Курекін А. А., Лукін В. В., Зеленський А. А. Применение методов векторной медианной фильтрации при обработке многоканальных радиолокационных данных дистанционного зондирования*
- Горбенко І. Д., Стасев Ю. В. Безопасность информации в космических системах связи и управления*
- Стасев Ю. В., Пастухов Н. В. Алгоритм синтеза и свойства ортогональных систем сигналов*
- Куликов С. П. Алгоритм синтеза радионавигационной системы наблюдения космического базирования для однократного обзора поверхности Земли*
- Шкуратов Ю. Г., Кайдаш В. Г., Опанасенко Н. В., Станкевич Д. Г., Евсюков Н. Н., Парусимов В. Г. Возможность прогнозирования состава лунной поверхности по данным оптических измерений*
- Федоренко А. К., Івченко В. М. Інфрачервоні молекулярні емісії в лімбових спостереженнях верхньої атмосфери Землі (огляд)*
- Івченко М. В., Бленці Я. Генерація іонно-циклотронних хвиль в подіях перенесення потоку*
- Федоровський А. Д., Сиренко Л. А., Звенигородський Э. Л., Іванова І. Ю., Суханов К. Ю., Якимчук В. Г. Оцінка екологічного состояния водоемов с использованием космической информации*
- НАШІ АВТОРИ**
- КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ**
- 53 Kurekin A. A., Lukin V. V., and Zelenskii A. A. Application of vector median filtering methods to multichannel remote sensing radar data processing**
- 64 Gorbenko I. D. and Stasev Yu. V. Information security in space communication and control systems**
- 69 Stasev Yu. V. and Pastukhov N. V. Algorithm for the synthesis of orthogonal systems of signals and their properties**
- 74 Kulikov S. P. Algorithm for the synthesis of a space-based radio-navigational observation system for a single survey of the Earth surface**
- 78 Shkuratov Yu. G., Kaidash V. G., Opanasenko N. V., Stankevich D. G., Evsyukov N. N., and Parusimov V. G. A Possibility of prognosticating the lunar surface composition prediction from optical measurement data**
- 89 Fedorenko A. K. and Ivchenko V. M. Infrared molecular emission in limb sounding investigation of the upper Earth atmosphere: a review**
- 97 Ivchenko M. V. and Blecki J. Generation of ion-cyclotron waves in flux transfer events**
- 103 Fedorovskii A. D., Sirenko L. A., Zvenigorodskii E. L., Ivanova I. Yu., Sukhanov K. Yu., and Yakimchuk V. G. Assessing the ecological state of water bodies with the use of information from space apparatuses**
- 107 OUR AUTHORS**
- 112 NOTES**

ВИЙШЛИ З ДРУКУ



ПОСТАНОВА ВЕРХОВНОЇ РАДИ УКРАЇНИ



Про порядок введення в дію Закону України «Про космічну діяльність»

Верховна Рада України постановляє:

1. Ввести в дію Закон України «Про космічну діяльність» з дня його опублікування.

2. Кабінету Міністрів України у тримісячний термін:

подати на розгляд Верховної Ради України пропозиції про приведення законодавчих актів України у відповідність з цим Законом;

привести рішення Уряду України у відповідність з Законом України «Про космічну діяльність»;

забезпечити перегляд і скасування міністерствами і відомствами України їх нормативних актів, що не відповідають цьому Закону.

3. Кабінету Міністрів України у першому півріччі 1997 року подати на затвердження Верховної Ради України проект Загальнодержавної (Національної) космічної програми України.

Голова Верховної Ради України

O. MOROZ

м. Київ

15 листопада 1996 року

№ 503/96-ВР

Закон України

ПРО КОСМІЧНУ ДІЯЛЬНІСТЬ

Цей Закон визначає загальні правові засади здійснення космічної діяльності в Україні та під юрисдикцією України поза її межами.

Положення цього Закону поширюються на всі види діяльності, пов'язаної з дослідженням і використанням космічного простору.

Розділ I. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Стаття 1. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНІВ І ПОНЯТЬ

У цьому Законі наведені нижче терміни та поняття вживаються у такому значенні:

космічна діяльність — наукові космічні дослідження, створення та застосування космічної техніки, використання космічного простору;

об'єкти космічної діяльності (космічна техніка) — матеріальні предмети штучного походження, що проектуються, виготовляються та експлуатуються як у космічному просторі (космічний сегмент, космічна інфраструктура), так і на поверхні Землі (наземний сегмент, наземна інфраструктура) з метою дослідження та використання космічного простору;

суб'єкти космічної діяльності — підприємства, установи та організації, в тому числі міжнародні та іноземні, які здійснюють космічну діяльність;

космічні технології та послуги — результати наукових розробок, методи, засоби та послуги, необхідні для здійснення космічної діяльності та для отримання і використання результатів цієї діяльності;

інцидент — пов'язана з космічною діяльністю подія, що призвела до створення загрози життю та здоров'ю людей, а також до пошкодження або знищення майна громадян, підприємств, установ та організацій чи заподіяння шкоди довкіллю;

надзвичайна подія — пов'язана з космічною діяльністю подія, що призвела до загибелі людей або заподіяння їм тяжких тілесних ушкоджень, а також до знищення майна громадян, підприємств, установ та організацій чи заподіяння значної шкоди довкіллю;

правила космічної діяльності — спеціальні правила, технічні норми, стандарти, що регламентують космічну діяльність та її безпеку;

персонал об'єктів космічної діяльності — працівники підприємств, установ та організацій, які беруть участь у виготовленні, випробуванні, експлуатації об'єктів космічної діяльності та ліквідації наслідків інцидентів і надзвичайних подій, а також фахівці підприємств, установ, організацій та особовий склад військових частин, залучені до виконання цієї роботи;

сертифікат відповідності — документ, який посвідчує відповідність об'єкта космічної діяльності вимогам експлуатаційної придатності космічної техніки, регламентованим нормативними документами, чинними в Україні.

Стаття 2. ЗАКОНОДАВСТВО ПРО КОСМІЧНУ ДІЯЛЬНІСТЬ В УКРАЇНІ

Відносини у сфері космічної діяльності регулюються цим Законом та іншими актами законодавства України, що приймаються відповідно до нього.

Стаття 3. МЕТА КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Космічна діяльність має на меті:

- сприяння соціально-економічному та науковому прогресу держави, зростанню добробуту громадян;
- участь у розв'язанні загальних проблем людства;
- розвиток космічної науки і техніки, космічних послуг та технологій, які обумовлюють стабільний розвиток національної економіки;
- створення потужного експортного потенціалу космічної галузі;
- забезпечення доступу в космос, здійснення наукових досліджень Землі та космічного простору;
- створення та підтримка космічними засобами сучасного інформаційного простору держави;
- забезпечення довгострокових інтересів держави в сфері національної безпеки та обороноздатності;
- сприяння вдосконаленню освіти;
- участь у контролі за виконанням угод, учасницею яких є Україна, що стосуються міжнародної безпеки.

Стаття 4. ЗАСАДИ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Основними засадами космічної діяльності в Україні є:

- державне регулювання;
- еволюційність розвитку і послідовність реформування державної політики у галузі дослідження та використання космічного простору;
- ефективне використання науково-технічного потенціалу України, можливостей, які надає космічна діяльність, в інтересах національної економіки, науки, безпеки держави і в комерційних цілях;
- сприяння міжнародному співробітництву, збереження та розвиток існуючих міжнародних зв'язків у космічній галузі з урахуванням національних інтересів.

Розділ II. ОРГАНІЗАЦІЯ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Стаття 5. ДЕРЖАВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ У СФЕРІ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Державне регулювання та управління у сфері космічної діяльності в Україні здійснюється шляхом:

- законодавчого встановлення основних принципів, норм і правил космічної діяльності;
- розробки концептуальних основ державної політики у галузі дослідження і використання космічного простору в мирних цілях та в інтересах безпеки держави;
- формування Загальнодержавної (Національної) космічної програми України;

планування та фінансування космічної діяльності за рахунок коштів Державного бюджету України, а також сприяння залученню інших джерел фінансування, не заборонених чинним законодавством України;

цільової підготовки кадрів за рахунок Державного бюджету України;

запровадження ліцензійного (дозвільного) порядку на таку діяльність, а також інших правил та обмежень згідно з чинним законодавством.

Спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику в галузі космічної діяльності, є Національне космічне агентство України.

Стаття 6. КОМПЕТЕНЦІЯ НАЦІОНАЛЬНОГО КОСМІЧНОГО АГЕНТСТВА УКРАЇНИ

Національне космічне агентство України в межах своєї компетенції:

розробляє концептуальні основи державної політики у галузі дослідження і використання космічного простору в мирних цілях та в інтересах безпеки держави;

забезпечує організацію космічної діяльності в Україні та під юрисдикцією України поза її межами;

розробляє разом з міністерствами, іншими центральними органами виконавчої влади та Національною академією наук України Загальнодержавну (Національну) космічну програму України та забезпечує її виконання;

здійснює керівництво у сфері управління та координації діяльності підприємств, установ і організацій космічної та суміжних галузей;

є державним генеральним замовником науково-дослідних робіт з дослідження і використання космічного простору, науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт з проектування, виготовлення та випробування космічної техніки, у тому числі міжнародних космічних проектів;

забезпечує разом із міністерствами та іншими центральними органами виконавчої влади України експлуатацію, підтримку та вдосконалення об'єктів космічної діяльності;

здійснює ліцензування космічної діяльності в Україні та ліцензування цієї діяльності під юрисдикцією України поза її межами;

організовує розроблення та функціонування Системи сертифікації космічної техніки України (УкрСС КТ);

забезпечує суб'єкти космічної діяльності в Україні необхідною нормативною документацією;

здійснює реєстрацію космічної техніки;

організовує співробітництво України з іншими державами та міжнародними організаціями у космічній галузі, а також забезпечує збереження і розвиток існуючих міжнародних зв'язків у сфері космічної діяльності;

вживає заходів, спрямованих на вдосконалення зовнішньо-економічних відносин України з іншими державами в галузі космічної діяльності;

бере участь у підготовці міжнародних договорів України; здійснює інші функції у сфері космічної діяльності відповідно до чинного законодавства.

Стаття 7. ЗАГАЛЬНОДЕРЖАВНА (НАЦІОНАЛЬНА) КОСМІЧНА ПРОГРАМА УКРАЇНИ

Космічна діяльність в Україні здійснюється на основі Загальнодержавної (Національної) космічної програми України, яка розробляється на п'ять років і затверджується Верховною Радою України за поданням Кабінету Міністрів України.

Формування Загальнодержавної (Національної) космічної програми України здійснюють Національне космічне агентство України разом із відповідними центральними органами виконавчої влади та Національною академією наук України, виходячи із мети та основних засад космічної діяльності в Україні.

На основі Загальнодержавної (Національної) космічної програми України здійснюється:

- визначення потреб у космічній техніці цивільного, оборонного та подвійного призначення, а також укладання контрактів, згідно з чинним законодавством, на проведення науково-дослідних робіт (далі — замовлення на космічну техніку) і виробництво космічної техніки на поточний рік, що затверджуються Кабінетом Міністрів України;
- виділення коштів із Державного бюджету України для фінансування космічної діяльності за державними замовленнями;
- підготовка кадрів за рахунок коштів Державного бюджету України і вжиття заходів щодо соціального захисту персоналу об'єктів космічної діяльності;
- забезпечення підтримки та вдосконалення об'єктів космічної діяльності наземної інфраструктури, а також необхідного рівня безпеки космічної діяльності;
- забезпечення міжнародного співробітництва в космічній сфері, у тому числі участі України в міжнародних космічних проектах.

Стаття 8. ПРАВИЛА КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УКРАЇНІ

До правил космічної діяльності в Україні належать норми експлуатаційної придатності об'єктів космічної діяльності, стандарти та нормативні документи, якими регулюється порядок:

- ліцензування космічної діяльності;
- сертифікації та реєстрації об'єктів космічної діяльності;
- організації, виконання та забезпечення космічних запусків і польотів; нагляду і контролю за безпекою космічних запусків і польотів та експлуатації космічної техніки;
- охорони довкілля в процесі космічної діяльності;
- проведення пошукових, аварійно-рятувальних робіт у космічній галузі;
- проведення службового розслідування інцидентів та надзвичайних подій;
- будівництва, експлуатації, утримання та ремонту споруд і обладнання об'єктів наземної інфраструктури;
- навчання персоналу об'єктів космічної діяльності;
- реалізації заходів щодо захисту космічної діяльності від незаконного втручання в цю діяльність.

До правил космічної діяльності належать також інші нормативні акти, що регламентують діяльність у космічній галузі та її безпеку, а також дотримання вимог щодо охорони прав інтелектуальної власності, державної, воєнної та комерційної таємниці.

Правила космічної діяльності встановлюються відповідними державними органами України згідно з їхньою компетенцією та є обов'язковими для виконання всіма суб'єктами космічної діяльності.

Стаття 9. ЗАБОРОНА ТА ОБМЕЖЕННЯ У КОСМІЧНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

При здійсненні космічної діяльності в Україні забороняється: виведення на орбіту чи розміщення в космосі будь-яким чином ядерної зброї та всіх інших видів зброї масового

знищення чи випробування такої зброї;

використання космічної техніки як засобу впливу на довкілля для воєнних чи інших небезпечних для людства цілей;

використання Місяця та інших небесних тіл для воєнних цілей;

створення безпосередньої загрози життю та здоров'ю людей, заподіяння шкоди довкіллю;

порушення міжнародних норм та стандартів щодо забруднення космічного простору;

інші дії, пов'язані з космічною діяльністю, які не допускаються міжнародним правом.

Космічна діяльність у межах окремого проекту, що призвела до людських жертв, значних матеріальних збитків або завдала значної шкоди довкіллю, може бути обмежена або заборонена відповідно до чинного законодавства України.

Стаття 10. ЛІЦЕНЗУВАННЯ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Будь-які суб'екти космічної діяльності, які здійснюють або мають наміри здійснювати цю діяльність в Україні або під юрисдикцією України поза її межами, повинні одержати в Національному космічному агентстві України ліцензію на право здійснення цієї діяльності.

Перелік видів космічної діяльності, що підлягають ліцензуванню, встановлюється законодавством України.

Порядок здійснення ліцензування космічної діяльності в Україні встановлює Кабінет Міністрів України.

Стаття 11. ФІНАНСУВАННЯ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Фінансування космічної діяльності з науковою та господарською метою у тих випадках, коли замовником робіт є держава, здійснюється на підставі Загальнодержавної (Національної) космічної програми України і передбачається в Державному бюджеті України окремим рядком.

Фінансування космічної діяльності в цілях оборони та безпеки України здійснюється за рахунок коштів Державного бюджету України в частині витрат на оборону. Фінансування здійснюється через державних замовників робіт по створенню і використанню космічної техніки та розподіляється між виконавцями відповідно до державного контракту.

Іноземні кредити та інвестиції у космічну діяльність, пов'язану з виконанням Загальнодержавної (Національної) космічної програми України, гарантується державою відповідно до чинного законодавства України.

Розділ III. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОБ'ЄКТІВ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Стаття 12. СЕРТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Будь-який об'єкт космічної діяльності в Україні підлягає сертифікації на відповідність вимогам експлуатаційної придатності, встановленим чинними в Україні нормативними документами, з оформленням сертифіката відповідності.

Порядок сертифікації космічної техніки в Україні визначається Системою сертифікації космічної техніки України, яка діє у межах Державної системи сертифікації (УкрСЕПРО).

Порядок випробування та сертифікації імпортованого об'єкта космічної діяльності або об'єкта космічної діяльності, що експортується з України, а також оформлення відповідних сертифікаційних документів встановлюється Правилами сертифікації космічної техніки в Україні, які затверджує Кабінет Міністрів України.

Стаття 13. РЕЄСТРАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Об'єкти космічної діяльності підлягають обов'язковій державній реєстрації в Державному реєстрі об'єктів космічної діяльності України згідно з Правилами реєстрації об'єктів космічної діяльності в Україні, які затверджує Кабінет Міністрів України. Якщо об'єкт космічної діяльності створюється спільно з юридичними особами інших держав чи міжнародними організаціями, то питання його реєстрації вирішується згідно з укладеними міжнародними договорами (контрактами).

На об'єкт космічної діяльності, внесений до Державного реєстру об'єктів космічної діяльності України, видається реєстраційне посвідчення.

Після внесення об'єкта космічної діяльності до Державного реєстру об'єктів космічної діяльності України всі записи щодо цього об'єкта, зроблені раніше у реєстрах об'єктів космічної діяльності інших держав, не визнаються Україною.

Внесення об'єкта космічної діяльності до реєстру об'єктів космічної діяльності іншої держави, якщо цей об'єкт не виключено з Державного реєстру об'єктів космічної діяльності України, не визнається Україною.

Стаття 14. ВИЛУЧЕННЯ ОБ'ЄКТІВ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ З ДЕРЖАВНОГО РЕЄСТРУ

Об'єкт космічної діяльності вилучається з Державного реєстру об'єктів космічної діяльності України Національним космічним агентством України у разі:

зняття його з експлуатації;

фізичного знищення (загибелі);

передачі у встановленому порядку іншій державі, міжнародному або іноземному підприємству, установі чи організації.

У разі вилучення об'єкта космічної діяльності з Державного реєстру об'єктів космічної діяльності України реєстраційне посвідчення втрачає чинність.

Стаття 15. ДОПУСК, ОБМЕЖЕННЯ ТА ЗАБОРОНА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Об'єкт космічної діяльності допускається до експлуатації, якщо він має сертифікат відповідності та його зареєстровано у Державному реєстрі об'єктів космічної діяльності України.

Національне космічне агентство України може обмежити або заборонити експлуатацію об'єктів космічної діяльності у разі:

прострочення або відсутності сертифіката відповідності;

експлуатації об'єкта космічної діяльності з порушенням чинного законодавства України;

експлуатації об'єкта космічної діяльності з порушенням вимог, установлених експлуатаційно-технічною документацією на цей об'єкт.

Стаття 16. ПЕРЕДАЧА ОБ'ЄКТА КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В ОРЕНДУ

Порядок і правила передачі об'єкта космічної діяльності в оренду міжнародному або іноземному суб'єкту космічної діяльності регулюються чинним законодавством, якщо інше не передбачено міжнародними договорами України, укладання яких відбулось у формі закону.

Розділ IV. УЧАСТЬ УКРАЇНИ У МІЖНАРОДНОМУ СПІВРОБІТНИЦТВІ В КОСМІЧНІЙ СФЕРІ**Стаття 17. УКРАЇНА ЯК СУБ'ЄКТ МІЖНАРОДНОГО КОСМІЧНОГО ПРАВА**

Україна як суб'єкт міжнародного космічного права здійснює свою космічну діяльність на засадах рівноправності з іншими державами з урахуванням своїх національних інтересів.

Україна забезпечує виконання взятих на себе міжнародних зобов'язань у галузі космічної діяльності та несе відповідальність згідно з загальновизначеними нормами міжнародного права та положеннями міжнародних договорів України.

Стаття 18. ЗАСАДИ МІЖНАРОДНОЇ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Основними засадами міжнародної космічної діяльності в Україні є:

- зміцнення національного суверенітету;
- дотримання загальновизначених принципів і норм міжнародного права;
- збереження та подальший розвиток існуючих міжнародних зв'язків;
- сприяння інтеграції країни у світову економіку;
- свобода зовнішньоекономічного підприємництва;
- юридична рівність суб'єктів космічної діяльності;
- захист інтересів суб'єктів космічної діяльності на території України і поза її межами.

Стаття 19. ВИРИШЕННЯ СПОРІВ

Спори, що виникають у процесі міжнародного співробітництва у космосі, підлягають розгляду в судах України, якщо інше не визначено міжнародними договорами України.

Розділ V. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ**Стаття 20. ДЕРЖАВНИЙ НАГЛЯД ЗА БЕЗПЕКОЮ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ**

Державний нагляд за дотриманням вимог безпеки космічної діяльності, а також навчання та атестація осіб, які контролюють дотримання космічних правил і наявність необхідного рівня безпеки космічної діяльності, а також осіб, які розслідують інциденти та надзвичайні події, покладається на Національне космічне агентство України, Міністерство оборони України та інші органи виконавчої влади відповідно до їхньої компетенції.

Стаття 21. БЕЗПЕКА НАСЕЛЕННЯ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

У процесі космічної діяльності суб'єкти космічної діяльності повинні дотримуватися вимог безпеки щодо життя та здоров'я населення, майна громадян, підприємств, установ, організацій і довкілля.

Суб'єкти космічної діяльності забезпечують вжиття необхідних заходів щодо запобігання екологічним збиткам від космічної діяльності згідно з чинним законодавством України.

Стаття 22. ТРАНСПОРТУВАННЯ КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Для транспортування космічної техніки, що становить загрозу для життя та здоров'я населення або довкілля, необхідно використовувати спеціальний транспорт під охороною.

Порядок організації охорони та транспортування космічної техніки встановлюється спеціальними правилами, що затверджуються Кабінетом Міністрів України.

Стаття 23. СПОВІЩЕННЯ ПРО ІНЦИДЕНТИ ТА НАДЗВИЧАЙНІ ПОДІЇ

Суб'єкти космічної діяльності в обов'язковому порядку повинні подавати повну інформацію органам виконавчої влади про будь-які інциденти та надзвичайні події.

Національне космічне агентство України, міністерства та інші центральні органи виконавчої влади повинні подавати своєчасну та достовірну інформацію про небезпеку, яка виникає при здійсненні космічної діяльності, а також про заходи щодо створення необхідних умов безпеки для населення, майна та довкілля уповноваженому державному органу, підприємствам, установам та організаціям, а також громадянам на їхню вимогу.

У разі виникнення загрози під час здійснення космічної діяльності для населення та довкілля України чи іноземних держав Національне космічне агентство України негайно інформує про це відповідні державні органи України згідно з чинним законодавством, а також вживає необхідних заходів щодо забезпечення безпеки населення, майна громадян, підприємств, установ і організацій та довкілля.

Стаття 24. ОБОВ'ЯЗКОВЕ СТРАХУВАННЯ ПРИ ЗДІЙСНЕННІ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УКРАЇНІ

Перелік видів обов'язкового страхування при здійсненні космічної діяльності встановлюється чинним законодавством України.

Порядок обов'язкового страхування встановлюється Кабінетом Міністрів України.

Стаття 25. ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ ЗА ШКОДУ, ЗАПОДІЯНУ ПІД ЧАС КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ, ТА ВІДШКОДУВАННЯ ШКОДИ

Відповідальність за шкоду, заподіяну під час космічної діяльності, а також порядок визначення розмірів цієї шкоди, що підлягає відшкодуванню, встановлюються відповідно до чинного законодавства України.

Розділ VI. КОСМІЧНА ДІЯЛЬНІСТЬ У СФЕРІ ОБОРОНИ ТА БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ

Стаття 26. ЗДІЙСНЕННЯ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ У СФЕРІ ОБОРОНИ ТА НАЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ

Космічна діяльність у сфері оборони та національної безпеки здійснюється Міністерством оборони України, на яке разом з відповідними міністерствами та іншими центральними органами виконавчої влади покладається відповідальність за виконання Загальнодержавної (Національної) космічної програми України в частині, що стосується створення та використання космічної техніки військового та подвійного призначення.

Стаття 27. ВЗАЄМОДІЯ МІНІСТЕРСТВА ОБОРОНИ УКРАЇНИ З НАЦІОНАЛЬНИМ КОСМІЧНИМ АГЕНТСТВОМ УКРАЇНИ У СФЕРІ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Порядок взаємодії Міністерства оборони України і Національного космічного агентства України при здійсненні космічної діяльності визначається положенням, яке затверджується Кабінетом Міністрів України.

Стаття 28. КОМПЕТЕНЦІЯ МІНІСТЕРСТВА ОБОРОНИ УКРАЇНИ У СФЕРІ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Міністерство оборони України в межах своєї компетенції:
розробляє концептуальні основи державної космічної політики та Загальнодержавну (Національну) космічну програму України в частині, пов'язаній зі створенням та використанням космічної техніки
військового призначення, а також разом із Національним космічним агентством України — космічної техніки подвійного призначення;
формує та організовує виконання замовлень на роботи, пов'язані зі створенням і використанням космічної техніки військового, а також разом із Національним космічним агентством України — космічної техніки подвійного призначення на основі Загальнодержавної (Національної) космічної програми України;
здійснює використання космічної техніки у сфері оборони України;
забезпечує разом із Національним космічним агентством України функціонування і розвиток об'єктів наземної та космічної інфраструктури;
бере участь у здійсненні сертифікації космічної техніки військового призначення.

Розділ VII. ЗАКЛЮЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Стаття 29. ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ ЗА ПОРУШЕННЯ ЗАКОНОДАВСТВА ПРО КОСМІЧНУ ДІЯЛЬНІСТЬ В УКРАЇНІ

Порушення законодавства про космічну діяльність в Україні має наслідком дисциплінарну, цивільно-правову або кримінальну відповідальність згідно з чинним законодавством України.

Президент України
м. Київ
15 листопада 1996 року
№ 503/96-ВР

Л. КУЧМА

Закон України «Про космічну діяльність» і витоки національного космічного права

О. В. Бєглій

Національне космічне агентство України, Київ

Надійшла до редакції 17.12.96

Обговорюються концептуальні положення Закону України «Про космічну діяльність».

ІСТОРИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ

Наполегливі зусилля підприємств, установ і організацій національної космічної галузі на протязі 1993—1996 рр. дозволили започаткувати процес світового визнання України як сувореної космічної держави:

- підписано угоди про співробітництво у космічній галузі з США, КНР, Російською Федерацією, рядом інших держав світу;
- національна космічна галузь почала досить активно інтегруватись у світовий ринок космічних послуг та технологій (міжнародні проекти «Морський старт», «Глобалстар», «УкрБалкан-сат» тощо);
- Україна все частіше відіграє активну роль у міжнародних форумах з проблем співробітництва у космічній галузі (наприклад, самміт керівників космічних агентств країн Центрально-Європейської ініціативи у липні 1996 р.);
- планується більш активне заалучення України до роботи керівних організацій ООН по космосу (про що було проінформовано Генерального директора НКАУ О. Негоду під час візиту в Україну заступника Генерального секретаря ООН Д. Джакомелі у вересні 1996 р.).

Тобто, склалися об'єктивні умови, за яких Україна, входячи до світового клубу космічних держав і по-господарськи розумно використовуючи свій науковий та технічний потенціал, могла б на кінець цього десятиліття отримувати додатково до свого національного бюджету сотні мільйонів «космічних» доларів щорічно.

Проте унікальність ситуації полягає в тому, що

всі ці потенції сьогодні реалізувати у повному обсязі практично не можливо через майже повну відсутність нормативно-правової бази, необхідної для нормального функціонування національної космічної галузі та розвитку цивілізованих міжнародних відносин.

Цілком зрозуміло, що за умов активної розбудови української державності, національного законодавства в багатьох сферах нашої економіки так чи інакше брачувало (та й на сьогодні ще бракує) оптимальної множини правових актів, що регулюють діяльність у відповідній галузі. Але, мабуть, тільки космічна галузь зустрілася на самому початку свого самостійного розвитку з надзвичайно «обтяжуючими обставинами». Космічне право провідної у недалекому минулому космічної наддержави (СРСР) ледь не на сто відсотків складалося з постанов і рішень Політбюро та Уряду, нормативних актів відповідних міністерств і відомств.

Чим загрожує практична відсутність узгоджених з міжнародним правом законодавчих, нормативно-правових рамок у ракетно-космічній галузі в умовах перебудови національної економіки на сучасних ринкових засадах?

По-перше, неможливістю ефективно використати космічний потенціал України;
по-друге, ослабленням регулюючої функції з боку держави в галузі, яка є об'єктом підвищеної зацікавленості як міжнародних, так і національних фірм, що спеціалізуються в цій сфері, а також спецслужб різних країн;
по-третє, загрозою втрати частини національного надбання через несанкціоновані та неконтрольовані державою комерційні контракти;

по-четверте, можливими фінансовими втратами держави у випадках неконтрольованої з її боку космічної діяльності українських організацій та фірм, не готових з різних причин до такої діяльності, і за яку згідно з міжнародним правом (див. Конвенцію про міжнародну відповіальність за шкоду, заподіяну космічними об'єктами) держава несе абсолютну (повну) відповіальність;

і, нарешті, по-п'яте, можливими політичними та економічними негативними наслідками за недотримання міжнародних зобов'язань України (наприклад, вимог Керівних Принципів РКРТ — див. Меморандум про взаєморозуміння між Урядом України і Урядом Сполучених Штатів Америки щодо передачі ракетного обладнання та технологій).

Таким чином, навіть не згадуючи про вагомість і наслідки для Держави виходу на світовий ринок космічних послуг і технологій, функціонування галузі в умовах відсутності національного космічного права є досить сумнівним з точки зору ефективності та ризикованим з точки зору захисту наших надбань і пріоритетів.

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПРАВОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Нова Конституція України закріпила пріоритет норм і принципів міжнародного права перед національним законодавством. Нею ж передбачено, що чинні міжнародні договори, згода на обов'язковість яких надана Верховною Радою України, є частиною національного законодавства України (стаття 9). Ці положення Конституції повністю стосуються і міжнародного космічного права. Для України в цьому зв'язку важливими є три аспекти:

- необхідність формування національної системи космічного права на засадах відповідної галузі міжнародного права;
- проведення робіт з імплементації норм міжнародного космічного права в національне законодавство;
- вжиття заходів щодо розвитку міжнародного космічного права, що випливає з сучасного статусу України як повноправного суб'єкта міжнародних відносин.

Принцип пріоритету норм міжнародного права перед національним законодавством вимагає високого рівня досконалості галузі міжнародного космічного права. Зараз ця галузь знаходитьться у стадії формування і з точки зору якості не є бездоганною, а отже, сама потребує подальшого удосконалення. Тут багато що залежить від спеціальних між-

народних організацій і окремих держав світового співтовариства. Як космічна держава Україна також має зайняти у цьому процесі активну позицію. Йдеться, зокрема, про ініціативи України щодо вирішення актуальних проблем міжнародного права. Доцільним уявляються заходи України щодо скликання міжнародних конференцій для обговорення актуальних питань міжнародного космічного права, встановлення більш тісних контактів з Комітетом ООН по космосу та іншими відповідними міжнародними органами та організаціями та розширення теоретичних досліджень в Україні актуальних проблем розвитку міжнародного космічного права.

Подальша розбудова космічного законодавства України здійснюватиметься різними шляхами, в тому числі й шляхом імплементації норм міжнародного космічного права в цю галузь національного космічного законодавства. За умови країного кількісного та якісного розвитку міжнародного космічного права в порівнянні з космічним законодавством України, імплементація відповідних норм може мати важливе значення для розвитку галузі національного законодавства. Слід проте усвідомлювати, що процес імплементації не відбувається автоматично. Для цього потрібні реальні дії з боку вітчизняного законодавця.

Вже зараз є нагальна потреба в імплементації у національне космічне законодавство багатьох норм і правил таких міжнародно-правових актів, як

Конвенція про міжнародну відповіальність за шкоду, заподіяну космічним об'єктом,

Конвенція про реєстрацію об'єктів, запущених у космічний простір,

Угода про рятування космонавтів, повернення космонавтів і повернення об'єктів, які запущені у космічний простір тощо.

З проблемою імплементації у національне космічне законодавство положень міжнародного права пов'язане й питання про ратифікацію Україною міжнародних договорів і угод з питань використання космічного простору. Зокрема, в найближчий час потрібно законодавчо висловити своє відношення до Угоди про діяльність держав на Місяці та інших небесних тілах (1979 р.), Конвенції про розповсюдження сигналів, які несуть програми і розповсюджуються за допомогою супутників (1974 р.), Європейської Конвенції щодо транскордонного телебачення (1989 р.) та ряду інших. Це є обов'язковою передумовою практичної імплементації норм та принципів міжнародного космічного права у внутрішнє законодавство України.

Крім зазначеного вище, є й інші механізми впливу міжнародного права на поведінку суб'єктів

космічної діяльності. Зокрема, має набути поширення практика введення в комерційні контракти положень міждержавних угод загальностратегічного і політичного характеру, в яких держави беруть на себе пряму відповідальність за дії юридичних і фізичних осіб, що знаходяться під їх юрисдикцією, і, наприклад, торгують космічними технологіями та послугами. В необхідних випадках може бути введено положення щодо держави як гаранта з космічних угод.

В українському космічному законодавстві недостатньо повно сформульовані проблеми міжнародного співробітництва України з іншими державами і міжнародними організаціями в галузі космічної діяльності. Цим питанням значно більше уваги надається в більшості космічних держав світу. У зв'язку з цим варто вжити заходів до розширення космічного співробітництва в рамках СНД, а також з такими спеціалізованими міжнародними організаціями, як ІНТЕЛСАТ, ІНМАРСАТ, Європейське космічне агентство тощо. Крім цього, можливими напрямками інтеграції України у світовий ринок космічних послуг і технологій можуть бути:

утвердження провідної ролі України в космічних проектах країн Центрально-Європейської Ініціативи;

участь у спільному проекті щодо використання космічних технологій для побудови Європейської системи екологічної безпеки в межах міжнародної програми Ради Європи;

участь у створенні глобальної (загальноєвропейської) системи навігації на базі космічних засобів;

конверсійні проекти щодо використання ракет СС-18, СС-24 для наукових та комерційних запусків вантажів і виробництва медичних та біологічних препаратів в умовах мікрогравітації;

участь у міжнародному проекті створення космічних засобів забезпечення системи оперативного рятування на морі та суші КОСПАС-САРСАТ;

більш активна участь (на самостійній основі або в кооперації з Російською Федерацією) у міжнародному проекті «Альфа».

Важливим є й подальше розширення двостороннього міжнародного співробітництва у цій сфері. Це співробітництво зараз базується на чотирьох головних рівнях:

- міждержавні угоди про співпрацю у космічній галузі;

- міжурядові угоди з питань освоєння космосу;
- міжгалузеві угоди НКАУ з відповідних питань;
- міжнародні комерційні контракти, що стосуються створення та використання космічної техніки і технологій.

Розвиток двостороннього космічного співробітництва і відповідної правової бази має виходити з вимоги об'єктивного стратегічного партнерства, обумовленого економічними, екологічними, науково-технічними та політичними інтересами. У цьому зв'язку важливими є питання про визначення наших стратегічних партнерів у галузі космічної діяльності та змісту двостороннього співробітництва України на найближчу (до 2000—2005 рр.) та дальню (2015—2020 рр.) перспективу. Саме на це має бути спрямований розвиток міжнародно-договірного процесу з боку України.

Космічне законодавство України знаходиться на стадії становлення. Його на сьогодні практично складають: Закон України «Про космічну діяльність», три укази Президента України від 29 лютого 1992 р. «Про створення Національного космічного агентства України», від 7 жовтня 1995 р. «Про заходи щодо вдосконалення державного регулювання космічної діяльності в Україні» та від 12 серпня 1996 р. «Про Національний центр управління та випробувань космічних засобів», а також ряд відповідних постанов Кабінету Міністрів України. Деякі законодавчі акти побічно торкаються правового регулювання питань космічної діяльності.

В основу розвитку космічного законодавства України з самого початку має бути покладений системний підхід. Це випливає як з вітчизняного досвіду, так і з досвіду передових космічних держав світу. Стрижневим актом такої системи (галузі права) став Закон України «Про космічну діяльність». Він створює правові передумови для побудови взаємозгодженої діяльності усіх складових піраміди національного космічного законодавства.

Даний Закон, однак, не може охопити всю широку гаму відповідних суспільних відносин. Для цього будуть потрібні інші закони, укази Президента і постанови Кабінету Міністрів України, прийняті у відповідності до цього Закону. Зважаючи на потреби практики і зарубіжний досвід, вже в найближчій перспективі слід нормативно врегулювати питання, що стосуються:

- ліцензування космічної діяльності;
- страхування космічної діяльності;
- сертифікації об'єктів космічної діяльності;
- реєстрації об'єктів космічної діяльності;
- охорони інтелектуальної та промислової власності;

- відповідальності за шкоду, спричинену космічними об'єктами;
- використання даних дистанційного зондування Землі з космосу;
- здійснення безпосереднього телемовлення через штучні супутники Землі;
- особливостей комерційного використання об'єктів космічної діяльності.

Особливо терміновими у цьому переліку є питання ліцензування і страхування космічної діяльності.

ЗАКОН УКРАЇНИ «ПРО КОСМІЧНУ ДІЯЛЬНІСТЬ»

Розробляючи Закон України «Про космічну діяльність», ми виходили з положень сучасного міжнародного космічного права, в першу чергу

Договору про принципи діяльності держав по дослідження та використанню космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла (набув чинності 10.10.1967 р., ратифікований Україною 16.01.1969 р.);

окремих норм та принципів багатосторонніх міжнародних угод щодо космічної діяльності, учасницею яких є або до яких приєдналася Україна:

Угоди про порятунок космонавтів, повернення космонавтів і повернення об'єктів, що запускаються у космічний простір (відповідно, 03.12.1968 р. та 16.01.1969 р.);

Конвенції про міжнародну відповідальність за шкоду, заподіяну космічними об'єктами (01.09.1972 р., 16.10.1973 р.);

Конвенції про реєстрацію об'єктів, які запускаються у космічний простір (15.09.1976 р., 14.09.1977 р.)

та інших міжнародних угод, які мають відношення до космічної діяльності:

«Договору про заборону випробувань ядерної зброї в атмосфері, космічному просторі та під водою»,

«Конвенції про заборону воєнного та будь-якого іншого ворожого використання засобів впливу на природне середовище»,

«Міжнародної конвенції з електrozв'язку»

тощо, а також положень чинного законодавства України.

Закон України «Про космічну діяльність» складається з семи розділів і двадцяти дев'яти статей. Не коментуючи їх всі, хочу зазначити, що вперше в нашій юридично-правовій практиці ми в статті 1 вводимо визначення специфічних термінів косміч-

ної діяльності, максимально наблизених до своїх міжнародно-правових аналогів.

У статтях 3, 4 викладені головні мета та засади, на яких ґрунтуються космічна діяльність в Україні.

Другий розділ Закону висвітлює концепцію та норми державного регулювання в сфері космічної діяльності, що, на наш погляд, в умовах перехідної економіки України є надзвичайно важливим для національних інтересів та безпеки держави. Закон передбачає ліцензування космічної діяльності, сертифікацію та реєстрацію об'єктів космічної діяльності, види обов'язкового страхування в цій сфері. Ці механізми державного регулювання покликані узпечити космічну діяльність, оптимізувати економічні, нормативно-правові, екологічні та інші умови створення та експлуатації цих об'єктів, забезпечити високу якість їх виготовлення (конкурентоспроможність на зовнішньому ринку) та запобігти некваліфікованим діям у цій галузі.

У третьому розділі наведені положення правового режиму об'єктів космічної діяльності в Україні.

Четвертий розділ висвітлює участь України в міжнародній співпраці у космосі. У статтях 17—19 цього розділу викладені основні принципи міжнародного співробітництва, найважливіші положення, якими потрібно керуватися суб'єктам космічної діяльності при цьому, відстоюючи інтереси України.

П'ятий розділ висвітлює загальні принципи узбереження космічної діяльності.

Важливим є шостий розділ, де викладено норми та принципи космічної діяльності у сфері оборони та безпеки України.

Таким чином, підсумовуючи зазначене вище, визнання України суверенною космічною державою та надання її світовим співтовариством можливостей для реалізації свого космічного потенціалу (вихід на світовий ринок космічних послуг і технологій) знаходиться в залежності від ефективності трансформації положень міжнародного права у її національне законодавство.

Із прийняттям 15 листопада 1996 року Верховною Радою України у другому читанні Закону України «Про космічну діяльність», який акумулює на національному рівні основні міжнародно-правові принципи та норми космічної діяльності, зроблено перший і дуже важливий крок у цьому напрямку.

THE UKRAINIAN LAW “ON SPACE ACTIVITIES” AND SOURCES OF THE NATIONAL SPACE LAW

O. V. Beglyi

Basic ideas of the Ukrainian law “On Space Activities” are discussed

УДК 629.7.05

Магнитная система управления угловым движением микроспутника

Д. В. Лебедев, А. И. Ткаченко, Ю. Н. Штепа

Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, Київ

Надійшла до редакції 21.10.96

Розглядається алгоритмічне забезпечення для системи керування орієнтацією та стабілізацією малого КА (мікроспутника), побудованої з використанням виключно геомагнітних ефектів як у вимірювальній підсистемі, так і в підсистемі керування. Швидкий розв'язок задачі орієнтації та стабілізації при довільному початковому кутовому положенні апарату та значних кутових швидкостях досягається за допомогою ефективних алгоритмів оцінки стану та керування.

Задача управления угловым движением малого искусственного спутника Земли — микроспутника (МС) осложняется жесткими ограничениями, налагаемыми на массу, габариты и энергопотребление бортового оборудования. Представляет интерес решение этой задачи, использующее магнитное поле Земли как в качестве источника информации о движении аппарата относительно центра масс, так и для формирования управляющих воздействий. Известные решения указанной задачи или ее отдельных аспектов с использованием чисто магнитных эффектов в сочетании с действием гравитационного поля (Hodgart, 1988; Psiaki et al., 1990) предполагают определенную степень близости МС к желаемому положению равновесия либо некоторую точность задания начальной ориентации МС. Реальность таких предположений сомнительна в случае достаточно больших угловых скоростей, приобретаемых аппаратом в момент отделения от носителя.

Рассматриваемая здесь задача управления схематически формулируется следующим образом: используя только установленные на МС магнитометры, измеряющие вектор индукции магнитного поля Земли, и магнитные исполнительные органы, обеспечить приведение МС из свободного вращения с

недоступными непосредственному измерению сравнительно большими угловыми скоростями и произвольной неизвестной начальной ориентацией в заданное положение относительного равновесия на орбите и последующую стабилизацию этого положения.

Решение этой задачи достигается с помощью алгоритма оценки параметров углового движения МС, обладающего быстрой сходимостью в широкой области значений оцениваемых неизвестных при ограниченной информации о возмущающих факторах, и эффективных законов управления ориентацией МС.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть МС, схематизируемый моделью твердого тела, обращается по круговой орбите вокруг Земли, совершая движение относительно центра масс под действием гравитационного момента M_g , управляющего момента M_u и недоступного учету малого возмущающего момента M_r .

Направим по главным центральным осям инерции МС оси координатного трехгранника xuz , с которым сопоставим ортонормированный базис E .

Введем правый ортогональный трехгранник $\xi\eta\zeta$ (орбитальный базис J) с ортами j_1, j_2, j_3 , вращающийся с постоянной угловой скоростью ω_* в инерциальном пространстве (эволюцией орбиты пренебрегаем). Орт j_1 базиса J направим по касательной к орбите в сторону движения МС; орт j_2 , ортогональный плоскости орбиты, направим так, что обращение МС по орбите, наблюдаемое с конца оси η , происходит против часовой стрелки. Единичный вектор j_3 совпадает с направлением геоцентрической вертикали. Тогда $\omega_* = \omega_0 j_2$, где ω_0 — угловая скорость орбитального движения.

Взаимное положение трехгранников xuz и $\xi\eta\zeta$ условимся характеризовать единичным кватернионом $\Lambda = \lambda_0 + \lambda$ со скалярной частью λ_0 и векторной частью $\lambda = \{\lambda_i\}$ ($i = 1, 2, 3$). По условию нормировки $\lambda_0^2 + \|\lambda\|^2 = 1$ (здесь и ниже $\|x\|$ — евклидова норма вектора x).

Динамику углового (сферического) движения МС будем описывать уравнениями

$$I\dot{\omega} + \omega \times I\omega = M_g + M_u + M_r, \quad (1)$$

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \cdot \omega - \omega_* \cdot \Lambda. \quad (2)$$

В уравнении (1) ω — вектор абсолютной угловой скорости МС, заданный в базисе Е. Матрица инерции I имеет диагональный вид; ее элементы I_x, I_y, I_z для определенности связаны соотношением $I_y \geq I_x > I_z$. Векторы-отображения ω и ω_* в (2) трактуются как кватернионы с нулевыми скалярными частями; \cdot — знак умножения кватернионов.

Гравитационный момент M_g , действующий на МС, обращающийся по круговой орбите в ньютоновском центральном поле сил, задается соотношением

$$M_g = 3\omega_0^2 e_R \times Ie_R, \quad (3)$$

где e_R — представление в базисе Е орта j_3 геоцентрической вертикали.

Магнитные исполнительные органы системы управления МС формируют управляющий момент M_u , связанный с вектором индукции магнитного поля Земли B и вектором магнитного момента системы управления L соотношением

$$M_u = L \times B. \quad (4)$$

Структуру магнитного момента L зададим в виде

$$L = \{L_i\} = \{l_i u_i\} \quad i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Здесь l_i — постоянные коэффициенты; координаты u_i вектора управления и принимают значения из

трехмерного единичного куба U :

$$u \in U = \{u: |u_i| \leq 1; i = 1, 2, 3\}. \quad (6)$$

Введем вектор относительной угловой скорости y , полагая

$$y = [y_1, y_2, y_3]^T = \omega - \omega_0 e_N, \quad (7)$$

где e_N — представление орта j_2 нормали к плоскости орбиты в базисе Е (индекс Т — символ транспонирования).

Учитывая выражения (3) и (7), запишем уравнения (1), (2) в параметрах относительного движения

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \cdot y, \quad (8)$$

$$I\dot{y} + y \times Iy = \omega_0^2 (3e_R \times Ie_R - e_N \times Ie_N) - \\ - \omega_0 [\Gamma(e_N \times y) + y \times Ie_N + e_N \times Iy] + M_u + M_r. \quad (9)$$

Векторы e_R и e_N связаны с компонентами λ_i ($i = 0, 1, 2, 3$) кватерниона Λ равенствами

$$e_R = \begin{bmatrix} 2(\lambda_1\lambda_3 - \lambda_0\lambda_2) \\ 2(\lambda_2\lambda_3 + \lambda_0\lambda_1) \\ \lambda_0^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$e_N = \begin{bmatrix} 2(\lambda_1\lambda_2 + \lambda_0\lambda_3) \\ \lambda_0^2 - \lambda_1^2 + \lambda_2^2 - \lambda_3^2 \\ 2(\lambda_2\lambda_3 - \lambda_0\lambda_1) \end{bmatrix}.$$

Из четырех устойчивых положений относительного равновесия

$$y = 0,$$

$$e_R = [0, 0, \pm 1]^T,$$

$$e_N = [0, \pm 1, 0]^T,$$

которые при $I_y > I_x > I_z$ и $M_u = M_r = 0$ имеет МС на круговой орбите в ньютоновском центральном поле сил (Белецкий, 1975), будем рассматривать положение равновесия, отвечающее режиму трехосной ориентации МС в орбитальной системе координат:

$$y = 0,$$

$$e_R = [0, 0, 1]^T,$$

$$e_N = [0, 1, 0]^T,$$

или с учетом соотношений (10)

$$y = 0, \quad (11)$$

$$\Lambda = \Lambda_* = \{\pm 1, 0, 0, 0\}.$$

Предполагается, что тремя магнитометрами измеряются координаты B_i вектора B в базисе Е;

кроме того, на борту МС имеется модель геомагнитного поля, заданная проекциями вектора \mathbf{B} на оси базиса J .

Под задачей управления угловым движением МС будем понимать отыскание управляющих воздействий $u_i = u_i(t, \Lambda, \mathbf{y})$ ($i = 1, 2, 3$), которые обеспечивают асимптотическую устойчивость невозмущенного движения (11) в силу уравнений (8), (9) при $M_r = 0$. Назовем эту задачу, следуя работе Красовского (1966), задачей стабилизации и сформулируем следующую задачу управления: располагая информацией о векторе геомагнитной индукции \mathbf{B} , заданном в базисе E , и его представлением в орбитальной системе координат $\xi\eta\zeta$, обеспечить стабилизацию режима (11) трехосной ориентации МС при произвольном начальном угловом положении аппарата и наличии ограничения (6) на параметры управления.

2. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Вопрос о возможности стабилизации движения (11), связанный со свойством управляемости системы (8), (9) в окрестности указанного движения, решается положительно, поскольку выполненный Лебедевым и Ткаченко (1996) анализ свидетельствует о локальной управляемости исследуемой системы при любом наклонении орбиты $i \neq 0$.

Синтез алгоритмов управления осуществим вторым методом Ляпунова в два приема: из решения кинематической задачи ориентации (Бранец, Шмыглевский, 1973) найдем требуемый закон изменения угловой скорости МС, а затем с учетом динамических уравнений движения объекта вокруг центра масс завершим синтез, указав условия, выполнение которых гарантирует асимптотическую устойчивость исследуемого режима движения МС.

Пусть отклонение текущего углового положения МС от заданного режима ориентации характеризуется вектором \mathbf{x} . Координаты его в задаче трехосной ориентации суть компоненты векторной части λ кватерниона Λ , а в задаче одноосной ориентации — разности координат единичных векторов s и ξ , занимающих неизменное положение в орбитальных осях и в связанной системе координат соответственно (Лебедев, Ткаченко, 1991). Меру упомянутого отклонения зададим в виде положительно-определенной функции $\rho(\mathbf{x})$. Зададимся также законом изменения производной функции $\rho(\mathbf{x})$ по времени t в силу кинематических уравнений движения, например, вида

$$\dot{\rho}(\mathbf{x}) = -\alpha W(\mathbf{x}), \quad (12)$$

который гарантирует асимптотическую устойчивость положения равновесия $\mathbf{x} = 0$.

В выражении (12) α — положительная постоянная, $W(\mathbf{x})$ — положительно-определенная функция (при выполнении условий теоремы Барбашина — Красовского (Барбашин, 1970) допустима неотрицательность функции $W(\mathbf{x})$).

Условие (12) положим в основу выбора требуемого закона изменения вектора относительной угловой скорости \mathbf{y} , рассматриваемого при решении кинематической задачи ориентации как управление.

Множество законов \mathbf{y}_* изменения угловой скорости \mathbf{y} , доставляющих решение кинематической задачи, формируется в результате задания конкретных множеств функций $\rho(\mathbf{x})$ и $W(\mathbf{x})$.

Исследуя задачу трехосной ориентации, примем $\rho(\Lambda) = 2(1 - |\lambda_0|) \equiv 2[1 - (1 - \lambda^T \lambda)^{1/2}]$. Тогда из условия (12) следует, что искомый вектор \mathbf{y}_* удовлетворяет уравнению

$$\mathbf{y}_*^T \lambda = -\alpha W(\Lambda) \text{sign} \lambda_0 \quad (13)$$

и определяется, например, выражением

$$\mathbf{y}_* = -\alpha W(\Lambda) \text{sign} \lambda_0 / (1 - \lambda_0^2) + \mathbf{c}, \quad (14)$$

в котором произвольный вектор \mathbf{c} ортогонален векторной части кватерниона Λ .

В формулах (13), (14) под $\text{sign} \lambda_0$ понимается функция, равная 1 при $\lambda_0 \geq 0$ и равная -1 при $\lambda_0 < 0$.

Особая точка $|\lambda_0| = 1$ в (14) исключается соответствующим выбором функции $W(\Lambda)$. Так, приняв $W(\Lambda) = 1 - \lambda_0^2$, приходим к известному (Лебедев, 1974) закону изменения вектора \mathbf{y} :

$$\mathbf{y}_* = -\alpha \lambda \text{sign} \lambda_0 \quad (15)$$

(здесь и ниже принимается $\mathbf{c} = 0$).

Задание же функции $W(\Lambda) = \rho(\Lambda)$ приводит к иному закону:

$$\mathbf{y}_* = -\frac{2\alpha \lambda \text{sign} \lambda_0}{1 + |\lambda_0|}. \quad (16)$$

Хотя дифференциальные системы (8), в которых управления \mathbf{y} выбираются в виде (15) либо (16), асимптотически эквивалентны (Демидович, 1967), важно отметить, что алгоритм (16) наделяет режим $\Lambda = \Lambda_*$ трехосной ориентации свойством экспоненциальной устойчивости. Действительно, дифференцируя по времени в силу уравнений (8) условие нормировки кватерниона Λ и учитывая выражение (16), приходим к неравенству

$$\frac{d\|\lambda\|}{dt} = -\frac{\alpha|\lambda_0|}{1+|\lambda_0|}\|\lambda\| \leq -\frac{1}{2}\alpha\|\lambda\|,$$

из которого следует искомый результат:

$$\|\lambda(t)\| \leq \|\lambda(t_0)\| \exp[-1/2\alpha(t-t_0)] \quad (t > t_0).$$

При этом область

$$\|\lambda(t_0)\| \leq 1 \quad (17)$$

является областью экспоненциального притяжения (Фурасов, 1977) невозмущенного движения $\Lambda = \Lambda_*$.

Алгоритмы (15), (16) можно получить и при ином задании функций $\rho(\Lambda)$ и $W(\Lambda)$. Так, к алгоритму (16) приводят также функции $\rho(\Lambda) = 1 - \lambda_0^2$, $W(\Lambda) = 2|\lambda_0|(1 - |\lambda_0|)$. Однако при таком выборе указанных функций для отыскания области экспоненциального притяжения в виде (17) необходимо привлечение теоремы Барбашина — Красовского.

Кинематическую задачу управления односной ориентацией МС сформулируем как задачу отыскания вектора $y = y_*$, наделяющего невозмущенное движение $s = \xi$ системы

$$\dot{s} = s \times y \quad (18)$$

свойством асимптотической устойчивости.

В качестве меры возмущения (отклонения текущего положения МС от состояния $s = \xi$) примем функцию $\rho(s, \xi) = 1/2\|s - \xi\|^2 \equiv 1 - \xi^T s$.

Множество векторов y_* , которые, как следует из соотношения (12), решают задачу, представим в виде

$$y_* = -\frac{\alpha W(s, \xi)(s \times \xi)}{\|s \times \xi\|^2}. \quad (19)$$

Выражение (19) записано с точностью до вектора, ортогонального вектору $\xi = s \times \xi$.

Как пример выбора функций $W(s, \xi)$, конкретизирующих структуру алгоритмов управления односной ориентацией МС, укажем следующие две функции: $W_1(s, \xi) = (1 + \xi^T s)\rho(s, \xi)$ и $W_2(s, \xi) = \rho(s, \xi)$. Первая приводит к встречающемуся (Зубов и др., 1978; Лебедев, Ткаченко, 1991) управлению

$$y_* = -\alpha(s \times \xi); \quad (20)$$

вторая же функция формирует управление

$$y_* = -\frac{\alpha(s \times \xi)}{1 + \xi^T s}, \quad (21)$$

обеспечивающее экспоненциальную устойчивость

режима $s = \xi$ во всей области изменения вектора s , кроме точки $s = -\xi$.

Рассматривая МС как своего рода «исполнительный орган», организуем его управляемое движение относительно центра масс таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия $y = y_*$. Реализация этого условия — сущность второго этапа синтеза управления.

Учитывая, что магнитная система управления реализует только составляющую требуемого значения управляющего момента M_* , ортогональную вектору геомагнитной индукции B , представим момент M_u в виде соотношения

$$\begin{aligned} M_u &= M_* - b(b^T M_*), \\ b &= B / \|B\|. \end{aligned} \quad (22)$$

Введем новую переменную $Y = y - y_*$. В параметрах Λ и Y уравнения возмущенного движения МС (8), (9) запишутся:

$$\begin{aligned} 2\dot{\Lambda} &= \Lambda \cdot (Y + y_*), \\ \dot{I}Y + Y \times IY &= M_* + \Psi(t, \Lambda, Y), \\ \Psi(t, \Lambda, Y) &= F(\Lambda, Y) - b(b^T M_*), \end{aligned} \quad (23)$$

где вектор-функция $F(\Lambda, Y)$ в области $H = \{\lambda, Y, t: \|\lambda\| \leq 1, \|Y\| \leq Y_0, 0 \leq t < \infty\}$ разлагается в ряд по степеням указанных аргументов, начиная с квадратичных членов; кроме того $F(\Lambda_*, 0) = 0$.

Следует отметить, что при $M_u = 0$ положению равновесия системы (8), (9) отвечает точка $\Lambda = \Lambda_*$, $Y = 0$ системы уравнений (23).

Рассмотрим систему первого приближения

$$\begin{aligned} 2\dot{\Lambda} &= \Lambda \cdot (Y + y_*), \\ \dot{I}Y + Y \times IY &= M_*. \end{aligned} \quad (24)$$

Считая, что вектор M_* имеет три независимые координаты, из условия асимптотической устойчивости невозмущенного движения $\Lambda = \Lambda_*$, $Y = 0$ найдем управляющий момент M_* .

Охарактеризуем меру близости текущего состояния системы (24) к режиму $\Lambda = \Lambda_*$, $Y = 0$ функцией Ляпунова вида

$$V(\Lambda, Y) = 1/2 Y^T I Y + \beta \|\lambda\|^2 \quad (25)$$

(β — положительная постоянная).

Если вектор y_* в первом уравнении системы (24) принять в виде (16), то производная $\dot{V}(\Lambda, Y)$ в силу уравнений (24) определяется соотношением

$$\dot{V}(\Lambda, \mathbf{Y}) = \mathbf{Y}^T \mathbf{M}_* + \beta \lambda_0 \mathbf{Y}^T \lambda - \frac{2\alpha\beta |\lambda_0| \|\lambda\|^2}{1 + |\lambda_0|}. \quad (26)$$

Для решения сформулированной задачи стабилизации достаточно соответствующим выбором вектора \mathbf{M}_* добиться определенной отрицательности правой части выражения (26).

Определим управляющий момент \mathbf{M}_* , например, равенством

$$\mathbf{M}_* = -k\mathbf{Y}, \quad k > 0 \quad (27)$$

(без потери общности считаем k скаляром).

Воспользуемся легко проверяемым неравенством

$$-az^2 + bz \leq -\frac{a}{2}z^2 + \frac{b^2}{2a},$$

справедливым при $a > 0$ и $b \geq 0$. С помощью этого неравенства и формулы (27) для управляющего момента \mathbf{M}_* выражение (26) преобразуем к виду

$$\dot{V}(\Lambda, \mathbf{Y}) \leq -1/2 k \|\mathbf{Y}\|^2 - \beta(\alpha - \beta/(2k)) \|\lambda\|^2, \quad (28)$$

где коэффициент k выбирается из условия

$$k > \beta/(2\alpha).$$

Учитывая отмеченное выше свойство вектор-функции $\mathbf{F}(\Lambda, \mathbf{Y})$ и управление \mathbf{M}_* в форме (27), можно утверждать, что в области H функция $\Psi(t, \Lambda, \mathbf{Y})$ удовлетворяет условию Липшица по переменным λ_i, Y_i ($i = 1, 2, 3$) (постоянную Липшица обозначим через S).

Таким образом, для уравнений первого приближения (24) существует положительно-определенная квадратичная форма (25), полная производная которой по времени на движениях (24) с управлением (27) удовлетворяет неравенству (28). Правые части выражений (25) и (28) — квадратичные формы с постоянными коэффициентами, а вектор-функция $\Psi(t, \Lambda, \mathbf{Y})$ возмущенной системы (23) удовлетворяет условию Липшица. Следовательно, при достаточно малой постоянной S управление (27), которому удобно придать вид

$$\mathbf{M}_* = -k \left(\mathbf{y} + \frac{2\alpha\lambda \operatorname{sign} \lambda_0}{1 + |\lambda_0|} \right), \quad (29)$$

гарантирует асимптотическую устойчивость тривиального решения $\Lambda = \Lambda_*, \mathbf{Y} = 0$ уравнений возмущенного движения (23) (Демидович, 1967).

Найдем требуемые для реализации алгоритма (29) значения параметров управления u_i ($i = 1, 2, 3$), учитывая особенности функционирования системы управления с магнитными исполнительными органами и ограничение $\mathbf{u} \in U$.

Будем искать вектор \mathbf{u} параметров управления как псевдорешение уравнения

$$\Phi(\mathbf{B})\mathbf{L}_* = -\mathbf{M}_* \quad (30)$$

относительно вектора $\mathbf{L}_* = \{L_i^*\}$. Здесь и далее $\Phi(\mathbf{r})$ — кососимметрическая (3×3) -матрица, которая ставится в соответствие вектору $\mathbf{r} \in R^3$ посредством равенства $\mathbf{r} \times \mathbf{p} = \Phi(\mathbf{r})\mathbf{p}$, записанного в системе координат xuy .

С учетом (27) в качестве решения уравнения (30) принимается вектор

$$\mathbf{L}_* = -k\Phi^+(\mathbf{B})\mathbf{Y},$$

где $\Phi^+(\mathbf{B})$ — псевдообратная матрица, определяемая равенством

$$\Phi^+(\mathbf{B}) = -\Phi(\mathbf{B})/\|\mathbf{B}\|^2.$$

Принимая во внимание структуру (5) вектора \mathbf{L} и область его определения (6), искомые значения параметров управления u_i ($i = 1, 2, 3$) находим по формулам

$$u_i = \sigma L_i^* / l_i \quad (i = 1, 2, 3). \quad (31)$$

Параметр σ в выражении (31) равен 1, если $\varphi = \max_i \{|L_i^*|/l_i\} \leq 1$, либо σ_* , если $\varphi > 1$, где σ_* — наибольшее значение параметра σ из диапазона $0 < \sigma \leq 1$, при котором $\mathbf{u} \in U$.

Приведенная процедура учета ограничения $\mathbf{u} \in U$ не нарушает асимптотической устойчивости невозмущенного движения $\Lambda = \Lambda_*, \mathbf{Y} = 0$. Действительно, производная $\dot{V}(\Lambda, \mathbf{Y})$ в рассматриваемом случае удовлетворяет оценке

$$\begin{aligned} \dot{V}(\Lambda, \mathbf{Y}) &\leq Q(\Lambda, \mathbf{Y}) = \\ &= -1/2 \Sigma_* k \|\mathbf{Y}\|^2 - \beta(\alpha - \beta/(2\Sigma_* k)) \|\lambda\|^2, \end{aligned}$$

в которой

$$\Sigma_* = \min_t \sigma_*(t),$$

а $Q(\Lambda, \mathbf{Y})$ при $k > \beta/(2\alpha\Sigma_*)$ — отрицательно-определенная квадратичная форма с постоянными коэффициентами. Остальные же условия, выполнение которых гарантирует асимптотическую устойчивость положения равновесия $\Lambda = \Lambda_*, \mathbf{Y} = 0$ системы (23), не нарушаются.

Найденные таким образом параметры управления u_i , будучи подставленными в выражения (5), (4), формируют управляющий момент в виде (22).

Повторяя аналогичные рассуждения при исследовании задачи стабилизации режима одноосной ориентации МС в орбитальной системе координат,

можно утверждать, что управление

$$\mathbf{M}_* = -k(\mathbf{y} - \mathbf{y}_*), \quad (32)$$

сформированное с учетом выражения (20) или (21), обеспечивает невозмущенному движению МС $\mathbf{s} = \xi$, $\mathbf{y} = 0$ асимптотическую устойчивость. Вывод справедлив только для тех режимов одноосной ориентации МС, которые являются положениями равновесия системы уравнений (18), (9).

3. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Непременным элементом решения задачи, сформулированной в предыдущем пункте, является определение параметров движения, фигурирующих в законе управления, по измерениям вектора геомагнитного поля. Для оценки названных параметров можно использовать рассматриваемый ниже алгоритм, структурно подобный алгоритму фильтрации из (Psiaki et al., 1990). Он предназначен для оценивания угловой скорости и параметров ориентации МС, а также постоянной составляющей возмущающего момента, действующего на МС, при произвольном и неизвестном начальном отклонении трехгранника xyz от $\xi\eta\xi$.

Реализация алгоритма оценивания включает обычные для дискретной фильтрации этапы прогноза и обработки измерений. Этап прогноза состоит в общем случае из нескольких шагов численного интегрирования уравнений движения МС относительно центра масс:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{N}} &= \frac{1}{2}(\mathbf{N} \cdot \omega' - \omega_* \cdot \mathbf{N}), \\ \dot{\omega}' &= \mathbf{I}^{-1}(\mathbf{I}\omega' \times \omega' + \mathbf{M}_s) + \mathbf{m}', \quad \dot{\mathbf{m}}' = 0, \end{aligned} \quad (33)$$

где $\mathbf{N} = \nu_0 + \nu$ — единичный кватернион, используемый как оценка кватерниона Λ ; ω' — оценка вектора ω ; $\mathbf{M}_s \in R^3$ — аппроксимация суммы всех доступных учету моментов, действующих на МС, сформированная с использованием решения системы (33); $\mathbf{m}' \in R^3$ — оценка вектора $\mathbf{m} = \mathbf{I}^{-1}\mathbf{M}_r$, где $\mathbf{M}_r = \text{const}$ — неизвестный возмущающий момент. Орбита МС здесь предполагается низкой, но не обязательно круговой. Начальные условия для интегрирования уравнений (33) можно задать в виде $\mathbf{N}(t_0) = \{1, 0, 0, 0\}$, $\omega'(t_0) = \{0, \omega_0, 0\}$, $\mathbf{m}'(t_0) = 0$.

Точность, с которой решение системы (33) аппроксимирует искомые параметры движения, охарактеризуем посредством вектора ошибок $\mathbf{w} \in R^9$, $\mathbf{w}^T = [\mu^0 \Delta\omega^T \Delta\mathbf{m}^T]$, где $\Delta\omega = \omega' - \omega$, $\Delta\mathbf{m} = \mathbf{m}' - \mathbf{m}$, а μ — векторная часть кватерниона \mathbf{M} , задающего ошибку определения ориентации: $\mathbf{M} = \mu^0 + \mu =$

$= \bar{\Lambda} \cdot \mathbf{N}$. Чертой отмечается сопряженный кватернион. Линеаризованные уравнения ошибок имеют вид

$$\dot{\mu} = -\Phi(\omega_E)\mu + \frac{1}{2}\Delta\omega,$$

$$\Delta\dot{\omega} = \mathbf{G}(\omega_E)\Delta\omega - 6\omega_0^2\mathbf{G}(\mathbf{e}_R)\Phi(\mathbf{e}_R)\mu + \Delta\mathbf{m}, \quad (34)$$

$$\Delta\dot{\mathbf{m}} = 0,$$

где $\mathbf{G}(\omega) = \mathbf{I}^{-1}[\Phi(\mathbf{I}\omega) - \Phi(\omega)\mathbf{I}]$. В обозначениях Егорова (1992) при $\omega_E = [\omega_1 \omega_2 \omega_3]^T$

$$\mathbf{G}(\omega_E) = \begin{vmatrix} 0 & \beta_1\omega_3 & \beta_1\omega_2 \\ \beta_2\omega_3 & 0 & \beta_2\omega_1 \\ \beta_3\omega_2 & \beta_3\omega_1 & 0 \end{vmatrix}, \quad (35)$$

$$\beta_1 = \frac{I_y - I_z}{I_x},$$

$$\beta_2 = \frac{I_z - I_x}{I_y},$$

$$\beta_3 = \frac{I_x - I_y}{I_z}.$$

Интегрирование уравнений (33) сопровождается вычислением (9×9) -матрицы \mathbf{P} по формуле

$$\mathbf{P}(t_{k+1}) = \mathbf{F}_{k+1}\mathbf{P}(t_k)\mathbf{F}_{k+1}^T,$$

где (9×9) -матрица $\mathbf{F}_{k+1} = \mathbf{F}(t_{k+1}, t_k)$ — переходная матрица системы (34) на шаге интегрирования $[t_k, t_{k+1}]$.

Обработка измерений, чередующаяся с этапами прогноза, предусматривает оценку элементов вектора \mathbf{w} по показаниям бортовых магнитометров и коррекцию решения системы (33). Представим показания магнитометров в виде вектора $\mathbf{n} = [n_1 n_2 n_3]^T$, элементы которого с точностью до аддитивных погрешностей измерений равны проекциям вектора \mathbf{B} на оси трехгранника xyz . При формировании уравнения измерений находится вектор $\mathbf{z} = [z_1 z_2 z_3]^T = \mathbf{n} - \mathbf{n}^*$, где $\mathbf{n}^* = \bar{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{B}^* \cdot \mathbf{N}$; \mathbf{B}^* — гиперкомплексное представление вектора \mathbf{B} в орбитальной системе координат. Учитывая правила сложения поворотов, заданных кватернионами (Бранец, Шмыглевский, 1973), получаем уравнение измерений

$$\mathbf{z} = -(\mathbf{n} + \mathbf{n}^*) \times \varphi, \quad \varphi = \mu / \mu^0. \quad (36)$$

Уравнение (36) при $\mu^0 \neq 0$ является точным. Однако при $\mu^0 = 0$ выражение (36) некорректно. Поэтому в случае, когда априори допускаются малые значения $|\mu^0(t_0)|$, вместо (36) следует ис-

пользовать уравнение измерений с ошибкой порядка $\|\mu\|^3$:

$$\mathbf{z} = -(\mathbf{n} + \mathbf{n}^*) \times \mu. \quad (37)$$

Для получения оценки вектора w предлагается последовательно обрабатывать координаты вектора z по формулам, включающим элементы построения гарантированных и размытых эллипсоидальных оценок (Бакан, 1995):

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_j &= \frac{\mathbf{P}_j^- \mathbf{H}_j}{\theta + \mathbf{H}_j^T \mathbf{P}_j^- \mathbf{H}_j}, \\ \mathbf{P}_j^+ &= \sigma_j (\mathbf{P}_j^- - \mathbf{K}_j \mathbf{H}_j^T \mathbf{P}_j^-), \\ \sigma_j &= 1 + \frac{\tau z_j^2}{\theta + \mathbf{H}_j^T \mathbf{P}_j^- \mathbf{H}_j}, \\ \mathbf{w}_j &= \mathbf{K}_j z_j \quad (j = 1, 2, 3), \\ \mathbf{w}_j &\in R^3, \quad \mathbf{w} = \mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2 + \mathbf{w}_3, \end{aligned} \quad (38)$$

где $\mathbf{K}_j \in R^9$ — вектор коэффициентов алгоритма оценивания при обработке j -го элемента вектора z ; \mathbf{P}_j^- , \mathbf{P}_j^+ — значения матрицы P до и после обработки очередной координаты z_j ; \mathbf{H}_j^T — j -я строка (9×9) -матрицы $\mathbf{H} = [-\Phi(\mathbf{n} + \mathbf{n}^*) \mathbf{0}_3 \mathbf{0}_3]$; $\mathbf{0}_3$ — нулевая (3×3) -матрица; $\theta > 0$, $\tau > 0$ — постоянные параметры. Последние в данном алгоритме задаются одинаковыми при обработке всех трех координат вектора z , хотя стандартные отклонения шумов трех магнитометров в общем случае не одинаковы и лишь принадлежат определенному диапазону значений.

Для коррекции решения системы (33) после нахождения вектора w по формулам (38) используются выражения

$$\begin{aligned} \mathbf{N}^+ &= \mathbf{N}^- \cdot (\mu^0 - \mu), \\ \omega'^+ &= \omega'^- - \Delta\omega, \\ \mathbf{m}'^+ &= \mathbf{m}'^- - \Delta\mathbf{m}. \end{aligned} \quad (39)$$

Индексами « $-$ » и « $+$ » отмечаются значения уточняемых величин до и после коррекции.

При замене μ на φ функциональная зависимость матрицы \mathbf{F}_{k+1} от \mathbf{N} и ω' остается неизменной. Поэтому альтернативный выбор выражения (36) или (37) в качестве уравнения измерений не учитывается явным образом ни в операциях на этапе прогноза, ни при вычислениях по формулам (38), (39). Различия проявляются лишь при нахождении вектора μ и скаляра μ^0 . Если под «измерением» подразумевается выражение (37), то μ находится в составе вектора w , а μ^0 — по формуле $\mu^0 =$

$= (1 - \|\mu\|^2)^{1/2}$. Если же «измерением» служит выражение (36), то в составе w вместо μ оценивается вектор φ ; тогда $\mu^0 = (1 + \varphi^T \varphi)^{-1/2}$, $\mu = \mu^0 \varphi$.

Можно показать (Лебедев, Ткаченко, 1995), что при использовании модели геомагнитного поля «косой диполь» (Белецкий, Хентов, 1985) динамическая система (34), (36) вполне наблюдаема в окрестности номинального движения (11) (формально при любом наклонении орбиты, хотя количественные характеристики наблюдаемости ухудшаются для орбит, близких к экваториальным).

Приняв для анализа упрощенную модель геомагнитного поля «прямой диполь», находим, что вектор z из (36) в первом приближении удовлетворяет уравнению

$$\dot{z} = -\Phi(\omega)z + 2\Phi(\mu)C\Omega B^* + \Phi(\Delta\omega)CB^*, \quad (40)$$

где C — матрица направляющих косинусов, задающая преобразование координат из орбитальной системы в связанную; $\Omega = [\Omega_{ij}]$ — (3×3) -матрица с элементами $\Omega_{13} = 3/2 \omega_0$, $\Omega_{31} = -3\omega_0$ и остальными элементами, равными нулю.

Из (40) следует, что элемент $\Delta\omega$ любого состояния, порождающего малый выход z , обязан быть малым, в отличие от элемента μ . Такая возможность имеется при $I_x = I_y = I_z$, когда в соответствии с (34), (35) $\Delta\dot{\omega} = \Delta\mathbf{m}$. Это означает, что в случае $I_x = I_y = I_z$ элементы $\Delta\omega$, $\Delta\mathbf{m}$ вектора состояния системы (34), (36) хорошо наблюдаемы, координаты же вектора μ слабо наблюдаются.

Началу процесса оценки параметров движения должна предшествовать «настройка» — задание величин θ , τ и начального значения матрицы P соответственно предполагаемому диапазону характеристик случайных погрешностей магнитометров и иных параметров, влияющих на сходимость и точность оценок. Отметим, что система перечисленных параметров настройки является избыточной. Если умножить θ , τ и $P(t_0)$ на один и тот же положительный скаляр, то структура формул (38) сохраняется, а значения \mathbf{K}_j и оценка w практически не изменяются. Такое преобразование, по-видимому, может быть обобщено применительно к некоторым иным методам рекуррентной оценки состояния.

Рассмотренный алгоритм оценивания, учитывающий в выражениях (36) или (37) величины до второго порядка малости, имеет структуру линейного фильтра, за исключением неизбежного интегрирования нелинейных уравнений (33) и кватернионных операций в (39). Переход от ω' к оценке вектора u не вызывает затруднений.

Анализ показывает, что моделирование подтверж-

дает, что рассмотренный выше алгоритм с уравнением измерений $\mathbf{z} = \mathbf{n} - \mathbf{n}^* = -2\mathbf{n}^* \times \boldsymbol{\mu}$ обеспечивает приемлемую точность оценивания величин ω , Λ в малой окрестности номинального режима (11) при использовании любых двух из описанных выше трех магнитометров (двух элементов вектора \mathbf{z}). Это обстоятельство может быть использовано для повышения надежности системы определения параметров углового движения МС.

4. ОПИСАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При моделировании рассмотренных выше процедур оценивания и управления сферическим движением МС использовалась модель магнитного поля «косой диполь» (Коваленко, 1975, формулы (2.36)). Высота круговой орбиты МС задавалась равной 690 км. Интервал между моментами прогноза при оценивании составлял 2 с, интервал между моментами обработки измерений — 10 с. В качестве возмущающих факторов, не учитываемых при оценивании, вводились постоянные смещения нуля магнитометров (до 120 нТл), неопределенность установки магнитометров относительно осей xuz (до 10°), цена младшего разряда показаний магнитометра 20 нТл, нормально распределенные возмущающие случайные моменты, действующие на МС, со стандартными отклонениями до 10^{-5} нм.

Результаты моделирования хорошо согласуются с полученными выше выводами. Так, надлежащая настройка фильтра обеспечивала сходимость оценок параметров движения в течение промежутка времени, не превышающего половины периода обращения по орбите, как в неуправляемом, так и в управляемом режиме, при различных наклонениях орбиты, различных значениях моментов инерции МС (удовлетворяющих оговоренному выше условию), произвольной начальной ориентации МС и компонентах начальной угловой скорости до 3°/с. Управление, сформированное, как указано в п. 2, обеспечивало приведение МС в требуемое положение относительно орбитального трехгранника в течение 3—4 витков и последующую стабилизацию этого положения с точностью порядка 1° при принятых выше параметрических возмущениях.

Исследовался также вариант организации управляемого движения МС, в котором построению режима трехосной ориентации предшествовал перевод аппарата в режим одноосной ориентации оси z относительно геоцентрической вертикали. Перевод осуществлялся алгоритмом управления (21), (32) с ортами ξ и s , равными соответственно $\xi = [0, 0, 1]^T$, $s = e_R$. Такой прием в ряде случаев

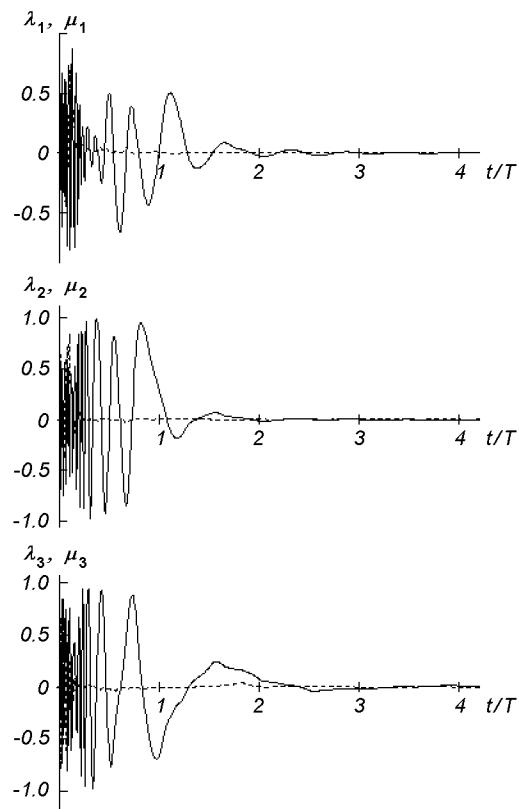


Рис. 1. Параметры ориентации МС и ошибки их оценивания

ускорял процесс построения трехосной орбитальной ориентации МС.

В одном из вариантов моделирования задавались значения $i = 98^\circ$, $I_x = I_y = 118 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $I_z = 19.6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $t_0 = 0$, $\Lambda(0) = \{0.36, 0.48, -0.48, 0.64\}$, $\omega(0) = [-3, 3, 3]^T$, (°/с); $m = [10^{-8}, 10^{-8}, 3 \cdot 10^{-8}]^T$, с⁻². Хотя гауссовые шумы x -, y - и z -магнитометров имели различные стандартные отклонения (375, 25 и 65 нТл соответственно), в формулах (38) использовались одинаковые значения θ и τ при обработке трех элементов вектора z , который в этом примере рассматривался в виде (36).

На рис. 1 показано поведение параметров λ_1 , λ_2 , λ_3 (сплошные линии) и ошибок определения ориентации μ_1 , μ_2 , μ_3 (штриховые линии) в зависимости от времени t , отнесеного к периоду обращения по орбите T .

Рис. 2 показывает поведение составляющих u_1 , u_2 , u_3 относительной угловой скорости МС (сплошные линии) и соответствующих ошибок оценивания Δu_1 , Δu_2 , Δu_3 (штриховые линии). Видно, что

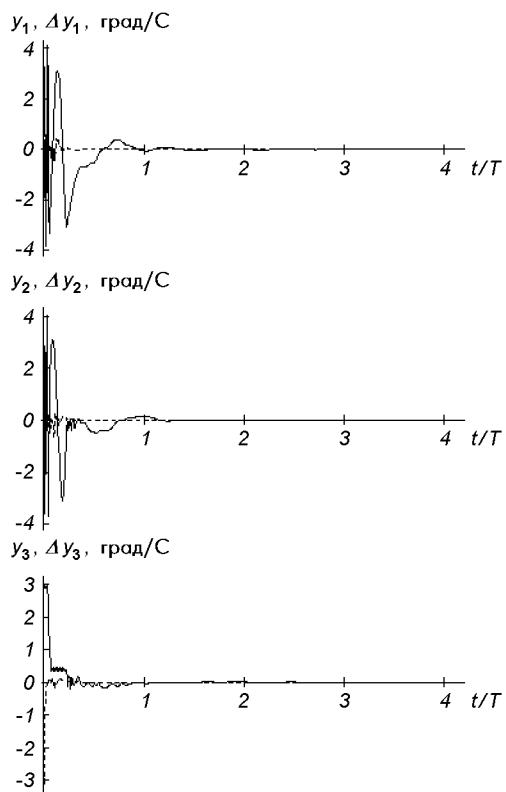


Рис. 2. Составляющие угловой скорости МС и ошибки их оценивания

МС достаточно быстро приводится в требуемое положение относительно орбитального трехгранника; еще быстрее оценки параметров сферического движения сходятся к истинным значениям этих параметров.

Бакан Г. М. Алгоритмы построения гарантированных и размытых эллипсоидальных оценок в линейных системах на основе метода наименьших квадратов // Проблемы управления и информатики.—1995.—№ 3.—С. 117—129.

Барбашин Е. А. Функции Ляпунова. — М.: Наука, 1970.—240 с.

Белецкий В. В. Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле. — М.: Изд-во Московск. ун-та, 1975.—308 с.

Белецкий В. В., Хентов А. А. Вращательное движение намагниченного спутника. — М.: Наука, 1985.—285 с.

- Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. — М.: Наука, 1973.—320 с.
- Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. — М.: Наука, 1967.—472 с.
- Егоров С. Н. Об использовании уравнений динамики при анализе алгоритмов определения ориентации // Космич. исследования.—1992.—30, вып. 1.—С. 38—44.
- Зубов В. И., Ермолин В. С., Сергеев С. Л. и др. Управление вращательным движением твердого тела. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978.—200 с.
- Коваленко А. П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1975.—248 с.
- Красовский Н. Н. Проблемы стабилизации управляемых движений // Малкин И. Г. Теория устойчивости движения. — М.: Наука, 1966.—С. 475—514.
- Лебедев Д. В. Управление ориентацией твердого тела с использованием параметров Родрига—Гамильтона // Автоматика.—1974.—№ 4.—С. 29—32.
- Лебедев Д. В., Ткаченко А. И. Системы инерциального управления. Алгоритмические аспекты. — Киев: Наук. думка, 1991.—203 с.
- Лебедев Д. В., Ткаченко А. И. Управление сферическим движением космического аппарата в магнитном поле Земли: ч. I. Информационное обеспечение // Проблемы управления и информатики.—1995.—№ 6.—С. 5—18.
- Лебедев Д. В., Ткаченко А. И. Управление сферическим движением космического аппарата в магнитном поле Земли. Часть II. Ориентация и стабилизация // Проблемы управления и информатики.—1996.—№ 3.—С. 5—18.
- Фурасов В. Д. Устойчивость движения, оценки и стабилизация. — М.: Наука, 1977.—247 с.
- Hodgart M. S. Gravity gradient and magnetorquing attitude control for low-cost low-Earth orbit satellites: the UOSAT experience // Proc. of the AIAA/AAS Astrodynamics Conf. — Washington, DC, 1988.—P. 421—430.—(Coll. Tech. Pap).
- Psiaki M. L., Martel F., Pal P. K. Three-axis attitude determination via Kalman filtering of magnetometer data // J. Guid., Control and Dynamics.—1990.—13, N 3.—P. 506—514.

MAGNETIC SYSTEM FOR CONTROLLING THE ANGULAR MOTION OF A MICRO-SATELLITE

D. V. Lebedev, A. I. Tkachenko, and Yu. N. Shtepa

An algorithmic support for the attitude control and stabilization system of a small spacecraft (micro-satellite) is considered. This system uses geomagnetic field effects only in both the measuring subsystem and the control subsystem. Fast solution is attained for the orientation and stabilization problem with any initial spacecraft attitude and large angular rates by means of effective algorithms for state estimation and control.

УДК 621.317.44

Измерительные контуры и селектирующие функции для определения тессеральных мультиполей интегральным преобразованием магнитных сигнатур

С. А. Волохов, А. В. Кильдишев

Відділення магнетизму Інституту електродинаміки НАН України, Харків

Надійшла до редакції 14.10.96

Робота присвячена розв'язку задачі метрологічного забезпечення магнітної чистоти космічного апарату. Доведена можливість виділення тессеральних мультиполів даного технічного об'єкта методом інтегральних перетворень магнітних сигнатур, отриманих при переміщенні апарату через поперечні контури запропонованої конфігурації.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное совершенствование систем навигации и ориентации космических аппаратов (Боевкин, Гуревич, 1976; Конюхов и др., 1995), а также оснащение современных геофизических спутников высокочувствительным магнитометрическим оборудованием (Коцаренко и др., 1995) порождает ряд проблем, связанных с собственным внешним магнитным полем (ВМП) таких объектов. Все более актуальной становится задача уменьшения данного ВМП для обеспечения магнитной чистоты КА, и как следствие, повышения их эксплуатационных и метрологических характеристик.

Для решения задач исследования и снижения внешнего магнитного поля любых энергонасыщенных технических объектов и комплектующего оборудования традиционно используется мультипольная модель источника магнитного поля и постоянно развиваются методы определения ее параметров (Волохов и др., 1996). Так для определения компонент магнитного момента диполя (Ильченко, Ковш, 1989; Окон, Семенов, 1989), широко используется метод интегрирования магнитных сигнатур, то есть зависимостей сигналов магнитометрических

датчиков от изменения текущего положения объекта. В качестве магнитометрических датчиков, как правило, используются контурные катушки, расположенные на цилиндрической поверхности, охватывающей трассу движения объекта.

Для измерения зональной (продольной) компоненты магнитного момента используется плоский контур, ортогональный направлению движения исследуемого КА, для измерения секториальных (поперечных) компонент — поперечные контуры различной конфигурации. Лучшими из них являются селектирующие контуры, состоящие из двух последовательно-встречно включенных секций, расстояние между которыми изменяется по закону $L_x = L \cos\varphi$ (для определения компоненты M_{11}^g) и $L_x = L \sin\varphi$ (для определения компоненты M_{11}^h). В этом случае площадь сигнатуры равна соответствующей компоненте магнитного момента:

$$\begin{Bmatrix} M_{11}^g \\ M_{11}^h \end{Bmatrix} = c_{11} \int_{-\infty}^{\infty} \begin{Bmatrix} \Phi_{11}^g \\ \Phi_{11}^h \end{Bmatrix} dx,$$

где c_{11} — постоянный коэффициент, x — расстояние от объекта до плоскости измерительного контура.

Использование аналогичных селектирующих контуров с закономерностями изменения длины по образующей цилиндра $L_x = L \cos m\varphi$ (для компоненты с индексом g и $L_x = L \sin m\varphi$ (для компоненты с индексом h) позволяет выделить секториальные компоненты магнитного момента мультиполя порядка и степени n :

$$M_{nn} = c_{nn} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{nn}(x) dx, \quad (1)$$

где соответствующие индексы g и h в (1) и далее опущены.

Настоящая работа посвящена вопросу определения тессеральных компонент магнитного момента мультиполя (в дальнейшем — тессеральных мультиполей) интегрированием преобразованных магнитных сигнатур, полученных при перемещении КА через селектирующие контуры описанной конфигурации.

ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕ ОБЪЕКТА С ПОПЕРЕЧНЫМИ КОНТУРАМИ

Геометрия селектирующего контура. Геометрическое представление взаимного расположения объекта и поверхности поперечного магнитоизмерительного контура представлено на рис. 1.

Положение объекта относительно измерительно-го контура определяется координатами: $x' = R \cos \theta$, $y' = R \sin \theta \cos \varphi$, $z' = R \sin \theta \sin \varphi$. Трасса движения может быть условно окружена цилиндром радиуса

r . Измерительный контур (на рисунке приведен контур для выделения пространственной гармоники 3-го порядка) образован двумя встречно включенными секциями, расположенными на поверхности цилиндра. Размер L_x , измерительного контура по образующей цилиндра изменяется в зависимости от цилиндрической координаты φ по закону $L_x = L \cos(k\varphi)$, причем его максимальный размер L на порядок меньше радиуса цилиндра. Полученный контур ориентирован в поперечном направлении. Аналогичный контур, ортогональный первому по φ может быть получен поворотом на $\pi/(2k)$ вокруг оси x . Для такого контура $L_x = L \sin(k\varphi)$.

Магнитный поток через селектирующий контур. Магнитный поток через соответствующий поперечный контур равен

$$\Phi_k(x) = \int_S B_r(x) dS, \quad (2)$$

причем

$$dS = r^2 \alpha \begin{bmatrix} \cos(k\varphi) \\ \sin(k\varphi) \end{bmatrix} d\varphi,$$

где $\alpha = L/r$.

Учитывая, что

$$B_r = B_R \sin \theta + B_\theta \cos \theta,$$

$$B_R = -\mu_0 \frac{\partial U}{\partial R},$$

$$B_\theta = -\mu_0 R^{-1} \frac{\partial U}{\partial \theta},$$

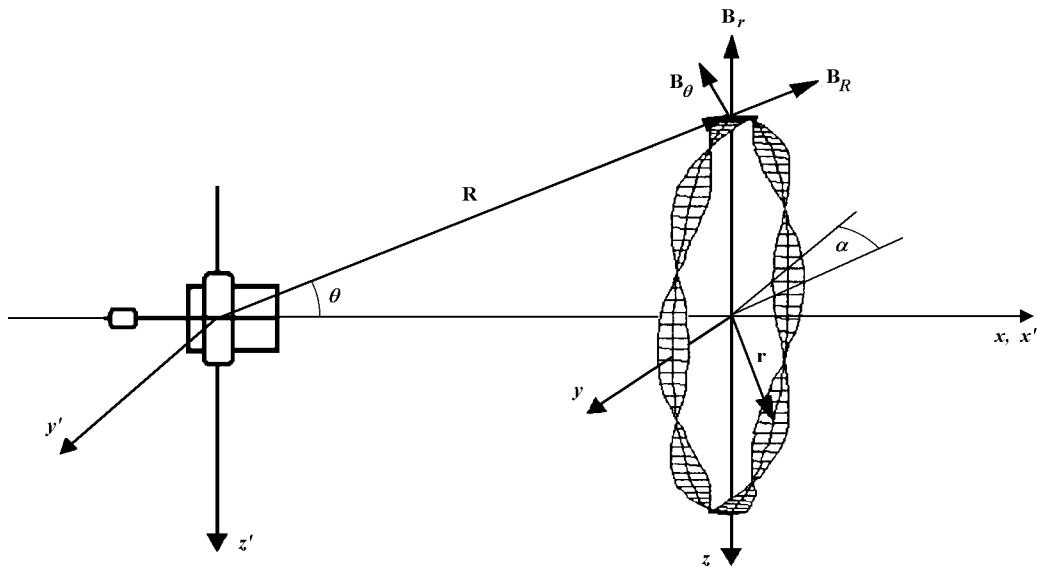


Рис. 1. Геометрическое представление взаимного расположения объекта и магнитоизмерительного контура

и, представляя потенциал U в виде ряда Гаусса, а также используя подстановки $t = \cos\varphi$, $R = r/\sqrt{1-t^2}$ для получения нормализованных сигнатур, т. е. сигнатур, переведенных из отрезка длиной от $-\infty$ до $+\infty$ в отрезок длиной от -1 до $+1$, находим из (2), что магнитный поток через измерительный контур равен

$$\Phi_k(t) = \frac{\mu_0\alpha}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{nk}(t), \quad (3)$$

где n -ю составляющую потока определяет выражение:

$$\Phi_{nk}(t) = M_{nk} \frac{(1-t^2)^{(n+1)/2}}{r^n} \times \\ \times [(n+1)P_n^k(t) - (n-k+1)t P_{n+1}^k(t)]. \quad (4)$$

Здесь $M_{nk} = 4\pi g_{nk}$ — компонента магнитного момента мультиполя порядка n и степени k , $P_n^k(t)$ и $P_{n+1}^k(t)$ — присоединенные функции Лежандра.

Для выделения из (1) и (2) тессеральных мультиполей необходимо отыскать такую селектирующую функцию $f_n^k(t)$, при умножении сигнатуры на которую выполнялось бы равенство

$$M_{nk} = c_{nk} \int_{-1}^1 \Phi_k(t) f_n^k(t) (\sqrt{1-t^2})^{-3} dt. \quad (5)$$

Здесь

$$(\sqrt{1-t^2})^{-3} dt = dx, \quad k = 1, \dots, (n-1).$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕССЕРАЛЬНЫХ МУЛЬТИПОЛЕЙ ПО МАГНИТНЫМ СИГНАТУРАМ

В приложении показан пример селектирующей функции $f_m^k(t)$ и доказана справедливость равенства

$$\int_{-1}^1 \Phi_{nk}(t) f_m^k(t) (\sqrt{1-t^2})^{-3} dt = 0, \quad n > m, \quad (6)$$

Равенство нулю интеграла (6) при $n < m$ обеспечено описанным ранее методом обработки сигнатур (Волохов и др., 1996).

Используя известные соотношения (Абрамович, Стиган, 1979)

$$t P_{n+1}^k(t) = \frac{1}{2n+3} \times \\ \times [(n-k+2)P_{n+2}^k(t) + (n+k+1)P_n^k(t)],$$

получим преобразованное выражение (4):

$$\Phi_{nk}(t) = M_n^k \frac{(1-t^2)^{(n+1)/2}}{r^n} [a P_n^k(t) - b P_{n+2}^k(t)],$$

где коэффициенты a и b определены выражениями

$$a = n + 1 - \frac{[(n+1)^2 - k^2]}{2n+3}, \\ b = \frac{(n-k+2)(n-k+1)}{2n+3}.$$

Выбирая в качестве селектирующей функцию

$$f_m^k(t) = r^m (\sqrt{1-t^2})^{-m} P_m^k(t) \quad (7)$$

и учитывая интегральное выражение ортогональности функций Лежандра:

$$\int_{-1}^1 \frac{P_\eta^\xi(t) P_\eta^\lambda(t)}{1-t^2} dt = \begin{cases} \frac{(\eta+\xi)!}{\xi(\eta-\xi)!}, & \xi = \lambda, \\ 0, & \xi \neq \lambda, \end{cases}, \quad (8)$$

получим, что интеграл в (5) с учетом (7) и (8) равен

$$M_n^k \frac{\mu_0\alpha}{4r^{n-m}} \sum_{n=m}^{\infty} \int_{-1}^1 \left[\frac{a P_n^k(t) P_m^k(t) - b P_m^k(t) P_{n+2}^k(t)}{1-t^2} \right] dt = \\ = \begin{cases} \frac{\mu_0\alpha}{4} \frac{(n+k)!}{(n-k)!} M_n^k, & n = m, \\ 0, & n > m, \end{cases}$$

что доказывает справедливость равенства (5) и определяет постоянную c_n^k :

$$c_n^k = \frac{4(n-k)!}{\mu_0\alpha(n+k)!}.$$

МАГНИТНЫЕ СИГНАТУРЫ ТЕССЕРАЛЬНЫХ МУЛЬТИПОЛЕЙ

Данные потоки определяются из выражения (4) и приводятся к следующему виду:

$$\Phi_{nk}(t) = \frac{\mu_0\alpha M_n^k}{4r^n (1-t^2)^{\frac{-2n-1}{2}}} \left(\sum_{q=0}^{E(\frac{n-k+2}{2})} K_{n,k}^q t^{-n+2q+k-2} \right). \quad (9)$$

Здесь

$$K_{n,k}^q = \frac{(2n-2q+2)![n-k+1)(n-2q-k+2)+2q(n+1)]}{(-1)^q 2^{n+1} (n-q+1)!(n-2q-k+2)! q! t^{-n+2q+k-2}},$$

$E[\nu]$ — целая часть числа ν .

Нормализованные сигнатуры тессеральных мультиполей $M_{4,k} = 1$, $k \in [1; 3]$, представленные на рис. 2, получены для контура, изображенного на

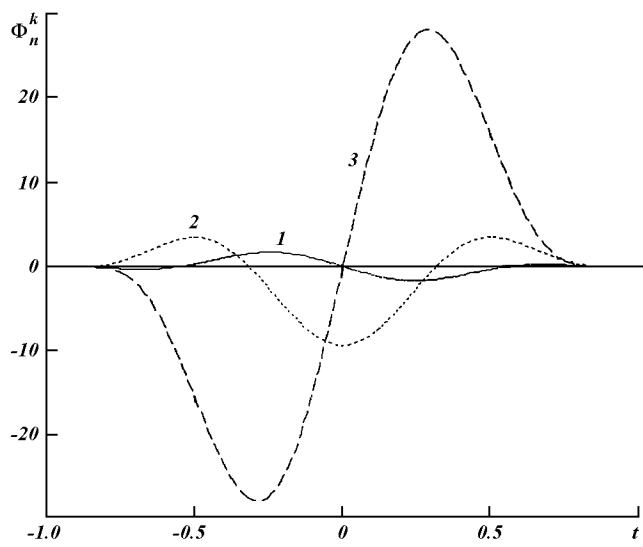


Рис. 2. Нормализованные сигнатуры трех тессеральных мультиполей четвертого порядка (номера кривых соответствуют k)

рис. 1 при значениях $r = 1$ и $\alpha = 1$.

Из выражения (9) следуют соответствующие частные выражения для магнитных потоков:

$$\Phi_{41} = -\frac{5}{2} \frac{\mu_0 a M_{41}}{4r^4} (1-t^2)^3 (63t^5 - 77t^3 + 18t),$$

$$\Phi_{42} = -\frac{15}{2} \frac{\mu_0 a M_{42}}{4r^4} (1-t^2)^{3.5} (63t^4 - 56t^2 + 5),$$

$$\Phi_{43} = -105 \frac{\mu_0 a M_{43}}{4r^4} (1-t^2)^4 (9t^3 - 6t).$$

Выводы

Для решения задач метрологического обеспечения магнитной чистоты КА использованы и развиты методы сферического гармонического анализа, основанные на интегральных преобразованиях магнитных сигнатур этого объекта.

Получены как общие, так и частные аналитические выражения для магнитных потоков и магнитных сигнатур тессеральных мультиполей объекта при его движении через поперечные селектирующие контуры.

Показано, что определение тессеральных мультиполей объекта интегральным преобразованием его магнитных сигнатур становится возможным при использовании предложенной селектирующей функции и выбранной конфигурации измерительных контуров.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Выберем в качестве селектирующей следующую функцию:

$$f_m^k(t) = AP_m^k(t)(\sqrt{1-t^2})^{-m}, \quad m > k.$$

Рассмотрим определенный интеграл с симметричными пределами:

$$I_n^m = \int_{-1}^1 \Phi_{nk}(t) f_m^k(t) (\sqrt{1-t^2})^{-3} dt, \quad n > m. \quad (\text{П1})$$

Существует два варианта, определяемые четностью разности $n - m$.

- I вариант.** Пусть n и m образуют нечетную разность. В таком случае выражение (П1) равно нулю вследствие интегрирования нечетной функции, ограниченной на симметричном интервале.
- II вариант.** Пусть n и m образуют четную разность: $n - m = 2p$, где $p = 1, 2, \dots, \infty$.

Выражение (П1) примет вид:

$$I_{m+2p}^m = \int_{-1}^1 \Phi_{m+2p}^k(t) f_m^k(t) (\sqrt{1-t^2})^{-3} dt, \quad m > k. \quad (\text{П2})$$

Произведение функций Лежандра в (П2) допускает переразложение в отрезки ряда (Ерофеенко, 1981), что дает возможность записать

$$I_{m+2p}^m = \sum_{q=2p}^{2(m+p)} \int_{-1}^1 (1-t^2)^{p-1} [\alpha_q P_q(t) + \beta_q t P_{q+1}(t)] dt \quad (\text{П3})$$

где α_q, β_q — постоянные коэффициенты переразложения.

Воспользуемся известным равенством (Градштейн, Рыжик, 1963):

$$\int_{-1}^1 t^\lambda P_\eta(t) dt = 0, \quad \eta > \lambda. \quad (\text{П4})$$

Слагаемые ряда в (П3) всегда соответствуют равенству в (П4), так как $q > 2p - 2$. Следовательно, интеграл (П3) всегда соответствует выражению (П4) и также равен нулю. Объединяя оба варианта, подтверждим справедливость следующего равенства

$$\int_{-1}^1 \Phi_{nk}(t) f_m^k(t) (\sqrt{1-t^2})^3 dt = 0, \quad n > m.$$

Абрамович М., Стиган И. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. — М.: Мир, 1979.—832 с.

Боевкин В. Н., Гуревич Ю. Г. Ориентация искусственных спутников в гравитационных и магнитных полях. — М.:

- Наука, 1976.—304 с.
 Волохов С. А., Добродеев П. Н., Ивлева Л. Ф., Кильдишев А. В. Пространственный гармонический анализ внешнего магнитного поля технического объекта // Технич. электродинамика.—1996.—№ 2.—С. 3—9.
- Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: Физматгиз, 1963.—1100 с.
- Ерофеенко В. Т. Теоремы сложения и решение краевых задач математической физики. — Минск, 1981.—33 с.
- Ильченко М. М., Ковш Ю. В. Установка для измерения магнитных моментов в широком диапазоне // Тез. докл. VII Всесоюз. конф. «Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры». — Л.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1989.—С. 158—159.
- Конюхов С. Н. Научно-технические направления разработок космических аппаратов КБ «Южное» им. М. К. Янгеля // Космічна наука і технологія.—1995.—1, № 1.—С. 12—34.
- Коцаренко М. Я., Корепанов В. С., Івченко В. М. Дослідження іоносферних провісників землетрусів (експеримент «Попередження») // Космічна наука і технологія.—1995.—1, № 1.—С. 96—99.

Окон П. И., Семенов В. Г. Исследование метода интегрирования магнитного потока для измерения поперечных компонент магнитного момента // Совершенствование методов и средств поверки магнитоизмерительной аппаратуры, используемой для контроля качества магнитных материалов. — Л.: Энергоатомиздат, 1989.—С. 59—73.

**MEASURING LOOPS AND SELECTIVE FUNCTIONS FOR
TESSERAL MULTIPOLE DETERMINATION BY INTEGRAL
TRANSFORMS OF MAGNETIC SIGNATURES**

S. A. Volokhov and A. V. Kil'dishev

We report a solution for the problem of metrological support of spacecraft magnetic purity. A new method is suggested for the separation of spacecraft tesseral harmonics by integral transforms of the magnetic signatures received by spacecraft dragging through transverse measuring loops of a certain configuration.

УДК 629.07.54

Об одномерных механических колебаниях тела под действием акустического излучения

В. В. Каракун

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Надійшло до редакції 12.05.96

Робиться аналіз руху тіла у рідині під дією акустичної хвилі тиску для деяких випадків пружно-в'язких властивостей механічної системи.

Установлено, что при положительной плавучести тела ($M < M^0$) окончательное перемещение его под действием акустической волны больше, а при отрицательной — меньше перемещения частиц идеальной жидкости (Каракун, Мартыненко, 1991). Вместе с тем в реальной жидкости, как оказалось, масса тела не оказывает влияния на величину перемещений. Под реальной подразумевается вязкая жидкость.

Каждущееся противоречие объясняется тем, что при $t > T$ тело положительной плавучести, хотя бы и медленно (при малом трении), но получив большее, чем жидкость, перемещение, возвратится назад настолько, что его перемещение сравняется с перемещением частиц жидкости. Точно так же и тело отрицательной плавучести в конце концов достигнет перемещения, равного перемещению частиц среды.

Сказанное можно проиллюстрировать таким примером. Пусть абсолютно твердое тело массы M перемещается в реальной, для простоты несжимаемой, жидкости вдоль одной координатной оси. Функции, определяющие перемещение среды и ее взаимодействие с рассматриваемым телом, имеют вид:

$$F = m\delta_1(t) + \alpha;$$

$$U^{\Phi*} = \dot{U}^{\Phi} = \delta_0(t) - \delta_0(t-1),$$

где m — присоединенная масса; α — коэффициент трения; $\delta_1(t)$ — дельта-функция Дирака, представляющая мгновенное значение импульса акустического воздействия и обладающая, как известно, свойствами —

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta_1(t) dt = \begin{cases} 1, & t \in (a, b); \\ 0, & t \notin (a, b) \end{cases}$$

или:

$$\int_0^a \delta_1(t) dt = \begin{cases} 1, & t \in (0, a); \\ 0, & t \notin (0, a), \end{cases}$$

причем

$$\delta_1(-t) = -\delta_1(t),$$

$$\delta_1(t) \rightarrow 1,$$

$$\delta_1(t = \tau) \rightarrow \exp(-p\tau),$$

$\delta_0(t)$ — единичная функция Хевисайда. Связь между функциями Дирака и Хевисайда определяется равенством

$$\dot{\delta}_0(t) = \delta_1(t),$$

причем

$$\delta_0(t) \rightarrow \frac{1}{p};$$

$$\delta_0(t - \tau) \rightarrow \frac{\exp(-p\tau)}{p}.$$

Тогда очевидно, что

$$\ddot{U}^\Phi = \delta_1(t) - \delta_1(t-1).$$

Имеют место равенства:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) \delta_1(t) dt &= \varphi(0) > 0; \\ \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t-\tau) \delta_1(\tau) d\tau &= \varphi(t) * \delta_1(t) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau) \delta_1(t-\tau) d\tau = \varphi(t); \\ \int_a^b \varphi(t) \delta_1(t-t_0) dt &= \begin{cases} \varphi(t_0), & t \in (a, b); \\ 0, & t \notin (a, b). \end{cases} \end{aligned}$$

Эти соотношения позволяют получить следующие уравнения движения тела (Каракун, Мартыненко, 1991):

- с учетом упругих и демпфирующих свойств системы:

$$\begin{aligned} M\ddot{U}(t) + b\dot{U}(t) + c_1 U(t) + \int_0^t [m\delta_1(t-\tau) + \alpha] \ddot{U}(\tau) d\tau &= \\ = M^0 [\delta_1(t) - \delta_1(t-1)] + \\ + \int_0^t [m\delta_1(t-\tau) + \alpha] [\delta_1(\tau) - \delta_1(\tau-1)] d\tau; \quad (1) \end{aligned}$$

- с учетом только демпфирующих свойств системы:

$$\begin{aligned} (M+m)\ddot{U}(t) + (\alpha+b)\dot{U}(t) &= \\ = (M^0 + m)[\delta_1(t) - \delta_1(t-1)] + \\ + \alpha[\delta_0(t) - \delta_0(t-1)]; \quad (2) \end{aligned}$$

- с учетом только упругих свойств системы:

$$\begin{aligned} (M+m)\ddot{U}(t) + \alpha \dot{U}(t) + c_1 U(t) &= \\ = (M^0 + m)[\delta_1(t) - \delta_1(t-1)] + \\ + \alpha[\delta_0(t) - \delta_0(t-1)]; \quad (3) \end{aligned}$$

- с учетом только трения тела о среду:

$$\begin{aligned} M\ddot{U}(t) + \int_0^t [m\delta_1(t-\tau) + \alpha] \ddot{U}(\tau) d\tau &= \\ = M^0 [\delta_1(t) - \delta_1(t-1)] + \\ + \int_0^t [m\delta_1(t-\tau) + \alpha] [\delta_1(\tau) - \delta_1(\tau-1)] d\tau, \quad (4) \end{aligned}$$

где M^0 — масса вытесненной телом жидкости; b и c_1 — приведенные коэффициенты демпфирования и упругости системы.

Рассмотрим вначале самый общий случай движения тела в реальной (вязкой) жидкости с учетом упругих и демпфирующих свойств системы. На природе возникновения этих сил подробно останавливаются не будем, констатируя, что при внешнем акустическом воздействии они проявляются при поступательном перемещении тела в сторону распространения акустической волны давления, полный импульс которой считается ограниченным по величине.

Уравнение (1) после одностороннего преобразования Лапласа в операторной форме имеет вид

$$\begin{aligned} (M+m)p^2 U + (\alpha+b)pU + c_1 U &= \\ = (M^0 + m)[1 - \exp(-p)] + \alpha p^{-1}[1 - \exp(-p)]. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} U(p) &= \frac{M^0 + m}{M + m} \frac{1}{(p+\nu)^2 + \omega^2} + \\ &+ \frac{\alpha}{M + m} \frac{1}{p[(p+\nu)^2 + \omega^2]} - \left\{ \frac{M^0 + m}{M + m} \times \right. \\ &\left. \times \frac{1}{(p+\nu)^2 + \omega^2} + \frac{\alpha}{M + m} \frac{1}{p[(p+\nu)^2 + \omega^2]} \right\} \times \\ &\times \exp(-p), \end{aligned}$$

где

$$\frac{c_1}{M + m} - \nu^2 = \omega^2;$$

$$\nu = \frac{\alpha + b}{2(M + m)}.$$

Переходя к оригиналу, получаем:

$$\begin{aligned} U(t) &= \frac{1}{\omega} \exp(-\nu t) \left(\frac{M^0 + m}{M + m} - \frac{\alpha\nu}{c_1} \right) \times \\ &\times [\sin\omega t - \exp(\nu)\sin\omega(t-1)] - \\ &- \frac{\alpha}{c_1} \exp(-\nu t) [\cos\omega t - \exp(\nu)\cos\omega(t-1)] + \\ &+ \frac{\alpha}{c_1} [\delta_0(t) - \delta_0(t-1)]. \quad (5) \end{aligned}$$

Рассуждая аналогично, получаем

- решения уравнения (2):

$$\begin{aligned} U(t) &= \frac{2}{(\alpha+b)^2} [M^0 + m - \alpha(M+m)] \exp(-\nu t) \times \\ &\times [\operatorname{sh}\nu t - \exp(\nu)\operatorname{sh}\nu(t-1)] + \frac{\alpha}{\alpha+b}, \quad (6) \\ \nu &= \frac{\alpha + b}{2(M + m)}, \end{aligned}$$

- решения уравнения (3):

$$\begin{aligned} U(t) &= \frac{1}{\lambda} \exp(-\mu t) \left(\frac{M^0 + m}{M + m} - \frac{\alpha \mu}{c_1} \right) \times \\ &\quad \times [\sin \lambda t - \exp(\mu) \sin \lambda(t-1)] - \\ &- \frac{\alpha}{c_1} \exp(-\mu t) [\cos \lambda t - \exp(\mu) \cos \lambda(t-1)] + \\ &+ \frac{\alpha}{c_1} [\delta_0(t) - \delta_0(t-1)], \quad (7) \\ &\lambda^2 = \frac{c_1}{M+m} - \mu^2; \end{aligned}$$

- решения уравнения (4):

$$\begin{aligned} U(t) &= \left\{ t - \frac{M - M^0}{\alpha} [1 - \exp(-\nu_1 t)] \delta_0(t) - \right. \\ &\left. \left\{ -t - 1 - \frac{M - M^0}{\alpha} [1 - \exp(-\nu_1(t-1))] \right\} \delta_0(t-1) \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

Если в формуле (8) сомножители $1 - \exp(-\nu_1 t)$ и $1 - \exp[-\nu_1(t-1)]$ представить в виде разложения в ряд при $t \geq 1$, то получим выражение

$$\begin{aligned} U(t) &= \frac{M^0 + m}{M + m} + \frac{M^0 - m}{M + m} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \times \\ &\times \nu_1^n \frac{t^{n+1} - (t-1)^{n+1}}{(n+1)!}, \quad (9) \end{aligned}$$

целиком совпадающее с формулой, выведенной Новожиловым (1962). Отсюда следует, что при достаточно малом трении и большом T ($\nu_1 T \ll 1$) в период времени $1 \leq t \leq T$ перемещение незакрепленного тела под действием акустической волны определяется первым слагаемым, т. е.:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} U(t) = \frac{M^0 + m}{M + m} \Rightarrow U_{\infty} = \frac{M^0 + m}{M + m} U_{\infty}^{\Phi},$$

так как при единичном смещении $U_k(t)|_{t>0} = 1$ для обобщенной силы $\dot{F}_{ik}(t)$ в реальной жидкости имеет место равенство:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} U(t) = U_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} U^{\Phi} = U_{\infty}^{\Phi} = 1;$$

$$U_{\infty} = U_{\infty}^{\Phi} = 1.$$

В дальнейшем с увеличением времени t перемещение U тела уменьшается, если $M < M^0$, и увеличивается, если $M > M^0$.

Положив в формулах (5)–(8) $t \rightarrow \infty$, получим значения предельных перемещений:

- с учетом демпфирующих и упругих свойств системы —

$$U_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} U(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\alpha}{c_1} [\delta_0(t) - \delta_0(t-1)] = \frac{\alpha}{c_1};$$

- с учетом только демпфирующих свойств —

$$U_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} U(t) = \frac{\alpha}{\alpha + b};$$

- с учетом только упругих свойств —

$$U_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} U(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\alpha}{c_1} [\delta_0(t) - \delta_0(t-1)] = \frac{\alpha}{c_1};$$

- с учетом только трения о среду —

$$U_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} U(t) = \frac{M^0 + m}{M + m}, \quad \nu_1 T \ll 1.$$

В этих формулах (в правых частях) значения предельного перемещения частиц среды при $t \geq 1$ равны единице, т. е. имеет место равенство: $U_{\infty}^{\Phi} = 1$.

Карачун В. В., Мартыненко В. С. О перемещении абсолютно твердой оболочки под воздействием внешней акустической волны давления // Докл. АН УССР.—1991, № 3.—С. 48—51.

Новожилов В. В. Теория тонких оболочек. — Л.: Судпромгиз, 1962.—430 с.

ON THE UNIVARIATE MECHANICAL OSCILLATIONS OF A BODY UNDER THE INFLUENCE OF ACOUSTIC EMISSION

V. V. Karachun

We analyze the univariate motion of a body in an acoustic medium under the influence of disturbing pressure wave. The laws of such motion in time have been established.

УДК 629.07.54

О перемещении деформируемого тела в акустической среде

В. В. Карабун

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Надійшло до редакції 12.05.96

Робиться аналіз переміщення тіла, що деформується в акустичному середовищі під дією хвилі тиску. Визначаються граничні переміщення для деяких видів механічного зв'язку тіла з корпусом та фізичних властивостей середовища.

При решении ряда прикладных задач анализа и синтеза механических систем бортовой аппаратуры космических аппаратов возникает необходимость учета механических перемещений (деформаций) подвижных элементов под действием акустической волны давления.

Пусть волна внешнего возмущающего воздействия ограничена во времени либо затухает, а среда, в которой находится изучаемое тело, безгранична. Задачу будем решать в линейной постановке. Поэтому уравнения движения тела произвольной формы в акустической среде в проекциях на его главные центральные оси инерции для трех случаев — незакрепленного, соединенного с корпусом упругой связью, либо демпфером — будут иметь вид (Кочин и др., 1948)

$$\begin{aligned} M_{ii}\ddot{U}_{*i} + Q_i &= P_i, \\ M_{ii}\ddot{U}_{*i} + c_i U_{*i} &= P_i - Q_i, \quad (1) \\ M_{ii}\ddot{U}_{*i} + b_i \dot{U}_{*i} &= P_i - Q_i, \quad i = 1, \dots, 6, \end{aligned}$$

где M_{ii} — масса тела (либо момент инерции в случае углового движения), \ddot{U}_{*i} — ускорение центра масс (линейное либо угловое), Q_i — дополнительная сила (момент в случае углового движения) упругого взаимодействия перемещающейся оболочки с окружающей средой:

$$Q_i = \iint_S q(x, y, t) \tau_i(x, y) dS.$$

Здесь q — давление, вызванное перемещением тела, τ_i — единичный вектор соответствующей оси координат, c_i , b_i — соответственно коэффициент жесткости упругой связи и коэффициент демпфирования, S — поверхность тела.

Пусть поверхность тела перемещается либо деформируется так, что обобщенная координата U_k увеличивается с единичной скоростью:

$$\begin{aligned} \dot{U}_k |_{t>0} &= 1, \\ \dot{U}_k |_{t<0} &= 0, \\ U_m |_{m \neq k} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Обобщенная сила $Q_i(t)$ определяется равенством, вытекающим из принципа суперпозиции:

$$Q_i(t) = \sum_k Q_{ik}(t) = \sum_k \int_0^t F_{ik}(t-\tau) \ddot{U}_k(\tau) d\tau, \quad (3)$$

а обобщенные силы P_i — также с помощью функций F_{ik} :

$$P_i = \sum_n M_{nn}^\Phi \ddot{U}_{*n}^\Phi + \sum_k \int_0^t F_{ik}(t-\tau) \ddot{U}_k^\Phi(\tau) d\tau,$$

$$P_i = \sum_n M_{nn}^\Phi \ddot{U}_{*n}^\Phi + \sum_k \int_0^t F_{ik}(t-\tau) \ddot{U}_k^\Phi(\tau) d\tau + c_n U_{*n}, \quad (4)$$

$$P_i = \sum_n M_{nn}^\Phi \ddot{U}_{*n}^\Phi + \sum_k \int_0^t F_{ik}(t-\tau) \ddot{U}_k^\Phi(\tau) d\tau + b_n \dot{U}_{*n},$$

где M_{ni}^Φ — масса фиктивного тела, которое не отделено от среды.

С учетом сказанного уравнения движения тела произвольной формы могут быть записаны в виде интегро-дифференциальных соотношений, которые после преобразований Лапласа запишутся так:

$$\begin{aligned} M_{ii}p^2U_{*i}^+ + \sum_k F_{ik}^+ p^2 U_k^+ = \\ = \sum_n M_{ni}^\Phi p^2 U_{*n}^{\Phi+} + \sum_k F_{ik}^+ p^2 U_k^{\Phi+}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M_{ii}p^2U_{*i}^+ + \sum_k F_{ik}^+ p^2 U_k^+ + c_i U_{*i}^+ = \\ = \sum_n M_{ni}^\Phi p^2 U_{*n}^{\Phi+} + \sum_k F_{ik}^+ p^2 U_k^{\Phi+} + c_n U_{*n}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} M_{ii}p^2U_{*i}^+ + \sum_k F_{ik}^+ p^2 U_k^+ + b_i p U_{*i}^+ = \\ = \sum_n M_{ni}^\Phi p^2 U_{*n}^{\Phi+} + \sum_k F_{ik}^+ p^2 U_k^{\Phi+} + b_n p U_{*n}, \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь смысл индекса «+» и параметра p определяется соотношением

$$\int_0^\infty \Phi(t) \exp(-pt) dt = \Phi^+(p). \quad (8)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} U_{*i}(t) &\rightarrow U_{*i}(p) \rightarrow U_{*i}^+, \\ U_{*i}(0) &= 0, \\ \dot{U}_{*i}(0) &= 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \ddot{U}_{*i}(t) &\rightarrow p^2 U_{*i}^+, \\ F_{ik}(t) &\rightarrow F_{ik}^+, \\ \ddot{U}_k(t) &\rightarrow p^2 U_k^+; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\int_0^t F_{ik}(t-\tau) \ddot{U}_k(\tau) d\tau = F_{ik} \ddot{U}_k \rightarrow F_{ik}^+ p^2 U_k^+ \quad (11)$$

(по теореме Э. Бореля);

$$\begin{aligned} U_{*n}^\Phi(t) &\rightarrow U_{*n}^{\Phi+}, \\ \ddot{U}_{*n}^\Phi(t) &\rightarrow p^2 U_{*n}^{\Phi+}, \\ \int_0^t F_{ik}(t-\tau) \ddot{U}_k^\Phi(\tau) d\tau &\rightarrow F_{ik}^+ p^2 U_k^{\Phi+}. \end{aligned} \quad (12)$$

Чтобы из уравнений (5)–(7) определить величины окончательных, т. е. предельных перемещений тела, достаточно воспользоваться формулой

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Phi(t) = \Phi_\infty = \lim_{p \rightarrow 0} \Phi^+(p), \quad (13)$$

справедливой, если предел (не обязательно ограниченный) в ее левой части существует и выполняет-

ся условие

$$[\lim_{t \rightarrow \infty} \Phi(t) \exp(-pt)]_{p \rightarrow 0} = 0. \quad (14)$$

При принятом предположении об ограничении во времени внешнего возмущения и безграничности окружающей тело жидкости можно утверждать, что перемещения тела будут удовлетворять указанным условиям. Действительно, излучение волн возмущений при колебаниях тела в безграничной среде вызывает затухание колебаний. Поэтому, если они и будут иметь место, то с прекращением внешнего воздействия также должны затухать, и следовательно, перемещения тела будут стремиться к пределу. Кроме того, предусмотренное ограничение по величине исключает экспоненциальное увеличение перемещений при $t \rightarrow \infty$.

Характер взаимосвязи окончательных перемещений тела с перемещениями фиктивного тела (перемещений среды при отсутствии тела), как следует из соотношений (5)–(7), существенным образом зависит от поведения функций $[F_{ik}(p)]_{p \rightarrow 0}$ или, что то же самое, от $[F_{ik}(t)]_{t \rightarrow \infty}$.

В случае тела ограниченных размеров, в зависимости от свойств безграничной среды, можно следующим образом классифицировать функции F_{ik} .

Идеальная жидкость (без учета вязкости). Если при $t > 0$ тело движется (или деформируется) в безграничной жидкости с единичной скоростью $\dot{U}_k = 1$ ($[U_k]_{t < 0} = 0$), то по прошествии достаточно большого времени, когда обтекание установится, сжимаемость жидкости уже не будет влиять на поле скоростей в достаточно большой окрестности тела и количество движения жидкости будет характеризоваться присоединенными массами m_{ik} . Движение жидкости обусловлено силами F_{ik} при $\dot{U}_k = 1$. Поэтому количество движения при $t \rightarrow \infty$ равно m_{ik} , так как $m_{ik} \dot{U}_k(t) |_{t \rightarrow \infty} = m_{ik} - 1 = m_{ik}$.

Тогда

$$\frac{\partial}{\partial t} [m_{ik} \dot{U}_k(t)]_{t \rightarrow \infty} = F_{ik}(t) |_{t \rightarrow \infty},$$

$$\int_0^t \frac{\partial}{\partial t} [m_{ik} \dot{U}_k(t)]_{t \rightarrow \infty} = \int_0^t F_{ik}(\tau) d\tau |_{t \rightarrow \infty},$$

$$m_{ik} = \int_0^t F_{ik}(\tau) d\tau,$$

$$m_{ik} = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t F_{ik}(\tau) d\tau,$$

$$m_{ik} = \int_0^\infty F_{ik}(\tau) d\tau.$$

Применим одностороннее преобразование Лапласа:

$$F_{ik}(t) \rightarrow F_{ik}^+(p) = \int_0^\infty \exp(-pt) F_{ik}(\tau) d\tau,$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} F_{ik}^+(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \int_0^\infty \exp(-pt) F_{ik}(\tau) d\tau,$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} F_{ik}^+(p) = \int_0^\infty F_{ik}(\tau) d\tau = m_{ik}.$$

Таким образом, в случае идеальной жидкости функции F_{ik} интегрируемы, а применение формулы (13) дает

$$\lim_{p \rightarrow 0} F_{ik}^+(p) = \int_0^\infty F_{ik}(\tau) d\tau = m_{ik}. \quad (15)$$

Реальная жидкость. Равномерное движение в реальной жидкости будет встречать сопротивление трения α_{ik} , поэтому

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F_{ik}(t) = \alpha_{ik}. \quad (16)$$

Можно утверждать, что $\alpha_{ii} > 0$. Кроме того, очевидно, что все величины сопротивления α_{ik} ограничены.

В соответствии с формулой (13)

$$\lim_{p \rightarrow 0} F_{ik}^+ = \alpha_{ik}. \quad (17)$$

Так как $\dot{U}_{*i} \mid_{t \rightarrow \infty} = \text{const}$, то $\ddot{U}_{*i} \mid_{t \rightarrow \infty} = 0$.

При установившемся процессе перемещения тела, т. е. при $t \rightarrow \infty$ силы уравновешиваются силами сопротивления α_{ik} :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F_{ik} = \alpha_{ik} \quad (\alpha_{ik} > 0; \quad \alpha_{ik} < M_{\text{орп}}).$$

Твердая упругая среда. Из соотношения

$$Q_i(t) = \sum_k Q_{ik}(t) = \sum_k \int_0^t F_{ik}(t-\tau) \ddot{U}_k(\tau) d\tau$$

видно, что

$$Q_{ik}(t) \rightarrow Q_{ik}^+,$$

$$F_{ik}(t) \rightarrow F_{ik}^+,$$

$$\ddot{U}_k(t) \rightarrow p^2 U_k^+,$$

$$\int_0^t F_{ik}(t-\tau) \ddot{U}_k(\tau) d\tau \rightarrow F_{ik}^+ p^2 U_k^+.$$

С учетом этого можно записать

$$Q_{ik}^+ = F_{ik}^+ p^2 U_k^+ = p F_{ik}^+ p U_k^+ = -p F_{ik}^+ (-p U_k^+) =$$

$$= [\int_0^\infty \exp(-pt) F_{ik}(t) dt]' [\int_0^\infty \exp(-pt) U_k(t) dt]' =$$

$$= [\dot{F}_{ik}] + [\dot{U}_k]^+,$$

где $F_{ik}^+ \rightarrow \dot{F}_{ik}(t)$ — обобщенная сила, возникающая при единичном смещении $[U_k(t)]_{t>0} = 1$ ($[U_k]_{t<0} = 0$).

Тогда

$$p Q_{ik}^+ = p \dot{F}_{ik}^+ U_k^+,$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} p Q_{ik}^+ = \lim_{p \rightarrow 0} \dot{F}_{ik}^+ \lim_{p \rightarrow 0} U_k^+,$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} \dot{F}_{ik}^+ = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{F}_{ik}(t) = \beta_{ik},$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} \dot{U}_k^+ = \lim_{p \rightarrow 0} p^2 F_{ik}^+ = \beta_{ik}.$$

В случае твердой упругой среды предел этой силы при $t \rightarrow \infty$ равен β_{ik} и отличен от нуля, по крайней мере при $k = i$. При этом $\beta_{ik} > 0$. Кроме того, очевидно, что все жесткости ограничены.

Формула (13), применительно к F_{ik} , дает следующую зависимость:

$$\lim_{p \rightarrow 0} p^2 F_{ik}^+ = \beta_{ik},$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} \dot{U}_k^+ = \lim_{p \rightarrow 0} U_k^+ = \lim_{t \rightarrow \infty} U_k(t) = U_{k\infty},$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} p^2 U_k^+ = \lim_{p \rightarrow 0} \lim_{p \rightarrow 0} U_k^+ = \lim_{p \rightarrow 0} \lim_{t \rightarrow \infty} U_k(t) =$$

$$= \lim_{p \rightarrow 0} \cdot U_{k\infty} = 0.$$

Теперь можно рассмотреть предельные (при $p \rightarrow 0$) соотношения, определяющие величины окончательных перемещений тела. Если умножить все члены уравнений (5)–(7) на p^q (здесь $q = -1; 0; 1$ соответственно рассмотренным выше трем случаям состояния среды) и устремить p к нулю, то предельные соотношения будут иметь следующий вид.

Незакрепленное тело

- Идеальная жидкость:

$$M_{ii} U_{i\infty} + \sum_{k=1}^6 m_{ik} U_{k\infty} + [M_{ii} [U_{*i\infty} - U_{i\infty}]] +$$

$$+ \left[\sum_{k=7}^\infty m_{ik} U_{k\infty} \right] = \sum_n M_{ni}^\Phi U_{n\infty}^\Phi + \sum_{k=1}^6 m_{ik} U_{k\infty}^\Phi +$$

$$+ \left[\sum_n M_{ni}^\Phi [U_{*n\infty}^\Phi - U_{n\infty}^\Phi] \right] + \left[\sum_{k=7}^\infty m_{ik} U_{k\infty}^\Phi \right]; \quad (18)$$

- реальная жидкость:

$$\sum_{k=1}^6 \alpha_{ik} U_{k\infty} + \left[\sum_{k=7}^\infty \alpha_{ik} U_{k\infty} \right] =$$

$$= \sum_{k=1}^6 \alpha_{ik} U_{k\infty}^\Phi + \left[\sum_{k=7}^\infty \alpha_{ik} U_{k\infty}^\Phi \right]; \quad (19)$$

- твердая упругая среда:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^6 \beta_{ik} U_{k\infty} + \left[\sum_{k=7}^{\infty} \beta_{ik} U_{k\infty} \right] &= \\ = \sum_{k=1}^6 \beta_{ik} U_{k\infty}^{\Phi} + \left[\sum_{k=7}^{\infty} \beta_{ik} U_{k\infty}^{\Phi} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Тело на упругих связях

- Идеальная жидкость:

пределное перемещение отсутствует,

- реальная жидкость:

пределное перемещение отсутствует,

- твердая упругая среда:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^6 \beta_{ik} U_{k\infty} + \left[\sum_{k=7}^{\infty} \beta_{ik} U_{k\infty} \right] + c_i U_{k\infty} &= \\ = \sum_{k=1}^6 \beta_{ik} U_{k\infty}^{\Phi} + \left[\sum_{k=7}^{\infty} \beta_{ik} U_{k\infty}^{\Phi} \right] + c_n U_{k\infty}. \end{aligned} \quad (21)$$

Внутреннее тело соединено с корпусом демпфером

- Идеальная жидкость:

пределное перемещение отсутствует;

- реальная жидкость:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^6 \alpha_{ik} U_{k\infty} + \left[\sum_{k=7}^{\infty} \alpha_{ik} U_{k\infty} \right] + b_l U_{k\infty} &= \\ = \sum_{k=1}^6 \alpha_{ik} U_{k\infty}^{\Phi} + \left[\sum_{k=7}^{\infty} \alpha_{ik} U_{k\infty}^{\Phi} \right] + b_n U_{k\infty}; \end{aligned} \quad (22)$$

- твердая упругая среда:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^6 \beta_{ik} U_{k\infty} + \left[\sum_{k=7}^{\infty} \beta_{ik} U_{k\infty} \right] &= \\ = \sum_{k=1}^6 \beta_{ik} U_{k\infty}^{\Phi} + \left[\sum_{k=7}^{\infty} \beta_{ik} U_{k\infty}^{\Phi} \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Слагаемые в квадратных скобках соответствуют остаточным деформациям тела (в левых частях уравнений) и фиктивного тела (в правых).

Анализ полученных результатов показывает, что упругие деформации не влияют на окончательные перемещения тела, так как величины M_{ii} , m_{ik} , α_{ik} , β_{ik} ограничены, а остаточные деформации равны нулю, вследствие чего равны нулю и члены, им соответствующие.

В том случае, когда функции F_{ik} не интегрируемы (реальная жидкость, упругая среда), масса тела и деформации внутри тела не влияют на предельные перемещения его поверхности — этот вывод следует из выражений (18)–(23), не содержащих обобщенные массы.

Если деформации упругие, то главные центральные оси, а также массы (моменты инерции) их соответственно совпадают и окончательные перемещения рассматриваемого тела и фиктивного тела (т. е. среды в отсутствии тела) равны между собой. Деформации фиктивного тела будут упругими, например, в случае плоской волны, когда все частицы среды перемещаются на одно и то же расстояние.

Отсутствие предельного перемещения тела в идеальной и реальной жидкостях с учетом упругих и демпфирующих свойств механической системы имеет тот физический смысл, что тело после прекращения внешнего воздействия совершает незатухающие колебания (Карачун, Мартыненко, 1991).

Карачун В. В., Мартыненко В. С. О перемещении абсолютно твердой оболочки под воздействием внешней акустической волны давления // Докл. АН УССР.—1991.—№ 3.—С. 48—51.

Кочин Н. Е., Кibel' Н. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. — М.: ОГИЗ, 1948.—Ч. 1.—535 с.

ON THE MOTION OF A STRAINED BODY IN AN ACOUSTIC MEDIUM

V. V. Karachun

We analyze the motion of a body of an arbitrary form in an acoustic medium for various physical and mechanical conditions in a liquid which surrounds the body. We estimate the extreme dislocations and the influence of medium properties on them.

УДК 539.1

**Методика испытаний
конструкционных материалов
на циклическую прочность в условиях
околоземного космического пространства**

В. А. Стрижало, Ю. Д. Скрипник

Інститут проблем міцності Національної академії наук України, Київ

Надійшла до редакції 14.03.96

Наведено аналіз факторів навколоzemного космічного простору, що впливають на міцність конструкційних матеріалів. Запропонована методика випробувань матеріалів на циклічну міцність в умовах відкритого космічного простору та схема побудови автоматичної багатозразкової установки з автономним приводом, що працює на сонячній енергії.

Сопротивление материалов усталостному разрушению обладает наибольшей чувствительностью к воздействию различных факторов окружающей среды (ФОС) по сравнению со статической и длительной прочностью материалов. Поэтому при постановке экспериментов по изучению влияния условий околоземного космоса на механические свойства конструкционных материалов в числе первоочередных должны быть испытания на усталость. В связи с этим следует также отметить, что усталостные явления наиболее опасны и характерны для конструкций космических аппаратов, а режимы испытаний могут быть приближены к эксплуатационным.

Все виды ФОС околоземного космического пространства, как и любые среды, действуют на материалы через их поверхность. Часть из них, относящаяся к проникающим излучениям, взаимодействует со всем объемом материала. Химические элементы, соединения и ионы остаточной атмосферы Земли начинают свое действие на поверхность через механизм адсорбции с последующей диффузией либо коррозией (образованием химических соединений). Еще одну группу факторов составля-

ют те, которые энергетически взаимодействуют с поверхностью посредством электромагнитных и кинетических воздействий (Феоктистов (ред.), 1983; Белан и др., 1984; Космическая технология..., 1982; Мизун, 1988).

Имитация сложного комплекса ФОС в лабораторных условиях является практически непреодолимой задачей. В специальных камерах (Патон и др., 1973; Нусимов, 1982) воссоздаются лишь отдельные параметры космического пространства, а также некоторые их сочетания.

В связи с влиянием на долговечность конструкционных материалов наиболее изучены вакуумные и низкотемпературные условия (Алексеев и др., 1972; Алексеев, 1972; Гринберг и др., 1972; Стрижало, 1978; Стрижало, Скрипченко, 1987; Стрижало и др., 1988).

Долговечность в вакууме всех исследованных конструкционных металлических материалов (меди, алюминий, железо, титан и сплавы на их основе) увеличивается по сравнению с долговечностью при атмосферном давлении. Причем это увеличение происходит до некоторого уровня вакуума, выше которого долговечность остается постоянной.

Например, для меди такое насыщение наблюдается при вакууме 10^{-2} Па. Амплитуда деформации в цикле существенно изменяет эффективность влияния вакуума: с уменьшением амплитуды долговечность увеличивается в большей степени, чем при больших амплитудах. Металлографические исследования показали решающую роль поверхностных слоев материала в эффектах воздействия вакуума. Влияние состояния поверхности в этом случае часто является определяющим. Например, предварительное упрочнение пластическим деформированием поверхностных слоев титановых образцов вовсе исключает влияние вакуума на долговечность.

Основными процессами, протекающими в металлах при понижении температуры и определяющими характер изменения их служебных свойств, являются низкотемпературное упрочнение и охрупчивание. В общем случае увеличение прочности металлов за счет низкотемпературного упрочнения может быть нейтрализовано их охрупчиванием, вызывающим существенное снижение номинальных разрушающих напряжений. Для материалов с ОЦК-решеткой, к которым относятся углеродистые и низколегированные ферритные стали, характерным является значительное увеличение предела текучести и существенное уменьшение пластичности с понижением температуры.

Характерно также наличие так называемой критической температуры хрупкого перехода, при которой резко снижается вязкость разрушения. У материалов с ГЦК-решеткой (алюминиевые и медные сплавы, никель, аустенитные стали с высоким содержанием никеля) при понижении температуры прочность увеличивается, изменяется характер деформационного упрочнения и может повышаться пластичность. Металлы этой группы во всей низкотемпературной области не имеют порога хладноломкости. Необходимо отметить, что ряд сплавов нестабилен при низкой температуре. Так, в хромоникелевых сплавах протекают мартенситные превращения, способствующие значительному охрупчиванию материала и изменению его механических характеристик. Металлы с ГПУ-решеткой, к которым относятся титановые сплавы, по температурной зависимости механических свойств занимают среднее положение между металлами с ОЦК- и ГЦК-решетками и характеризуются наряду с повышением предела прочности значительным увеличением предела текучести, уменьшением пластичности и снижением сопротивления хрупкому разрушению при переходе в область криогенных температур. При понижении температуры наряду с увеличением статической прочности исследованных сплавов наблюдается увеличение их циклической

прочности во всей области малоцикловой усталости. В комнатных условиях и при азотной температуре кривые малоцикловой усталости характеризуются наличием хорошо развитых участков квазистатического и усталостного разрушения. При температуре жидкого гелия участок квазистатического разрушения и циклической ползучести на кривых малоцикловой усталости может не проявляться, как, например, для титановых сплавов, кривые малоцикловой усталости смещаются в область меньших долговечностей, и даже при напряжениях, близких к пределу прочности, разрушение имеет усталостный характер.

Влияние среды на циклическую долговечность металлов и сплавов изучается в рамках сравнительно нового направления науки о прочности — механики коррозионного разрушения (Карпенко и др., 1977; Петров и Сопруньюк, 1991). При усталости наиболее типичным является двухстадийный процесс. Вначале происходит адсорбция активных элементов среды (атомы, ионы, комплексы), снижающая поверхностную энергию металла и облегчающая работу приповерхностных источников дислокаций. Затем на неоднородностях поверхности и приповерхностной структуры образуются коррозионные пары. Под коррозией металлов понимается в настоящее время переход металлов в ионное состояние в результате взаимодействия их с окружающей средой. Совместное воздействие механических напряжений и агрессивной среды обуславливает так называемое коррозионно-механическое разрушение. При этом различают коррозионное растрескивание — хрупкое разрушение металлов при статических напряжениях и коррозионную усталость — снижение циклической долговечности при переменных напряжениях. При малоцикловой усталости, особенно в режиме с выдержкой времени под максимальным напряжением цикла, в той или иной мере одновременно присутствуют оба вида разрушений. Очевидно, в рассматриваемом случае околоземного космического пространства невозможно возникновение электропроводящих сред. Поэтому принципиально возможна лишь химическая газовая коррозия, которая реализуется обычно при высоких температурах. Учитывая высокую кинетическую энергию частиц разреженной плазмы околоземного космического пространства, такие процессы, по-видимому, могут иметь место.

В условиях сверхвысокого вакуума даже при низких температурах происходит сублимация материалов, скорость которой зависит от давления насыщенного пара данного вещества. В диапазоне температур поверхности КА (± 150 °C) металлические конструкционные материалы достаточно ус-

тойчивы к испарению в вакууме (Феоктистов (ред.), 1983). Однако влияние вакуума может привести к появлению микрошероховатости вследствие различия энергий связи внутри зерен и на их границе, а также разной скорости сублимации для неодинаково ориентированных зерен. В поверхностном слое толщиной в несколько межатомных расстояний могут сублимировать наиболее летучие составляющие сплавов, например цинк в бронзе (Белан и др., 1984). Внешние напряжения увеличивают скорость сублимации и понижают температуру, при которой образуются поверхностные дефекты. Такие изменения параметров поверхности увеличивают опасность коррозионных явлений.

Механическое воздействие метеорных частиц и космической пыли при высоких скоростях движения вызывает эрозию на поверхности материала (коррозионную эрозию). В исследованиях мишней из алюминия и меди площадью 2.89 см^2 , экспонированных в течение двух лет в открытом космосе на околоземной орбите высотой около 350 км, обнаружены микрократеры, наибольшая плотность которых находилась на кратеры диаметром 2 мкм (Зиновьева и др. 1990). С увеличением размеров кратеров плотность их распределения уменьшалась. Величина потока частиц оценивалась для кратеров диаметром менее 5 мкм в $(2\div4) \cdot 10^{-3}$ частиц· $\text{м}^{-2}\text{s}^{-1}$, для больших кратеров — $(1\div2) \cdot 10^{-4}$ частиц· $\text{м}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Также посредством изменения структуры поверхностного слоя (образование дефектов) на протекание процессов адгезии и коррозии влияют α -, β - и γ -излучения, в также потоки нейтронов и протонов (Петров и Сопрунюк, 1991), что снижает циклическую долговечность. Корпускулярное излучение вызывает радиационные повреждения материалов в виде поверхностной эрозии, ионизации вещества и смещения атомов, зависящих от энергии частиц и времени облучения. Наиболее опасное — излучение радиационного пояса Земли, способное при экспозиции менее года существенно изменить свойства материалов (Феоктистов, 1983).

Электромагнитное излучение с длиной волны менее $3 \cdot 10^{-7}$ м, называемое коротковолновым, является ионизирующим и также может приводить к изменениям поверхностных свойств материалов наружных устройств КА. Металлы и сплавы, как правило, устойчивы к воздействию электромагнитной радиации (Феоктистов, 1983). Различные виды облучений, особенно проникающие, выше некоторых пороговых значений изменяют механические свойства материалов, в том числе и циклическую долговечность (Киселевский, 1990; Скрипник и Косов, 1979).

Помимо влияния на адгезионный и коррозионный механизмы снижения прочности описанные выше изменения параметров поверхности оказывают непосредственное влияние на циклическую долговечность и рассматриваются как самостоятельный фактор (Карпенко и др., 1977; Коцальда, 1976).

В упомянутых выше исследованиях влияния внешних воздействий на циклическую долговечность параметры среды, как правило, далеки от космических, так как в этих работах ставились иные задачи. Так, по-видимому, не изучались явления адгезии и коррозии в разреженной плазме, соответствующей космической, не изучалось влияние в сочетании с другими факторами разных видов радиоактивных облучений при допороговых дозах на механические свойства материалов и т. п. Каждый отдельно взятый фактор космической среды при кратковременной экспозиции оказывает пренебрежимо малое повреждающее действие на материалы. Однако при длительном пребывании КА на орбите и воздействии целого комплекса факторов на фоне эксплуатационных нагрузок, когда возможно проявление синергетических эффектов, для материалов конструкций может наступить такое состояние, при котором становится недопустимо большой вероятность внезапного разрушения либо накопление запредельных деформаций. В связи с трудностью воссоздания и удержания длительное время описанного комплекса ФОС в наземных условиях очевидным является проведение механических испытаний непосредственно в открытом космическом пространстве на специальном оборудовании, установленном на внешней поверхности КА.

В настоящее время практически нет опыта механических испытаний в космических условиях, в связи с чем априори отсутствуют сведения о длительности экспериментов, достаточной для надежного обнаружения эффектов воздействия ФОС и длительного прогноза работоспособности конструкций. Продолжительность известных материаловедческих экспериментов в космосе, непосредственно не относящихся к вопросам прочности, составляет примерно один год (Феоктистов, 1983; Космическая технология, 1982). Поэтому при разработке настоящей методики один год был принят в качестве временной базы испытаний, т. е. за это время должны быть определены кривые долговечности исследуемых материалов.

При разработке методики исследования циклической долговечности ориентировались на такой вид испытаний, которым, с одной стороны, обеспечивал бы простоту, надежность, малую массу и габариты

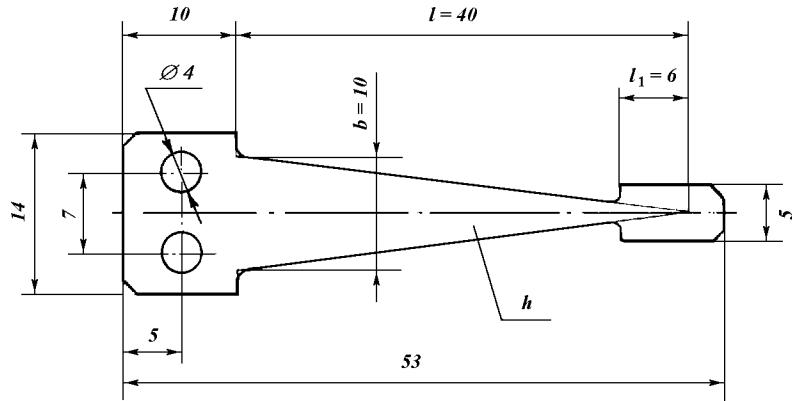


Рис. 1. Образец для испытаний

оборудования, минимум потребления энергии, а с другой — возможность охвата наибольшего диапазона режимов испытаний. Геометрия и расположение образцов в нагружающем устройстве должны обеспечивать максимальное восприятие ФОС, автоматическую смену образцов и регистрацию данных эксперимента. Необходимо также подчеркнуть, что дефицит энергии на борту КА диктует применение автономного силового привода испытательной машины, возможно с использованием солнечной энергии.

Указанным требованиям удовлетворяют, на наш взгляд, испытания в условиях циклического знакопеременного изгиба с кинематическим заданием перемещения точки приложения нагрузки, т. е. жесткий режим нагружения. Реализация малоциклического нагружения в данном случае имеет то преимущество перед кратковременными статическими испытаниями и испытаниями на многоцикловую усталость, что режим внесения повреждений от механических нагрузений и внешних воздействий приближается к реальным. О другой стороне, создать нагружение с автономным приводом оказывается проще в случае малоциклического испытания, чем многоциклического. Кроме того, долговечность при малоциклической усталости является характеристикой, весьма чувствительной к слабым и длительным воздействиям ФОС.

Выбор частоты нагружения, циклограммы испытаний и типа силового привода оказывается в определенной степени взаимосвязанным.

Из-за ограниченного доступа к зоне испытаний нагружающее устройство должно иметь такой запас образцов, который бы обеспечил проведение законченного цикла исследований — получение одной или нескольких кривых долговечности материала. Одновременное испытание, например, 24 образцов, размещенных в рабочих органах машины, описанной ниже, позволит построить три кривые долговечности либо две с большим числом

экспериментальных точек. Если испытания выполнять на базе 10^5 циклов, то частота нагружения должна быть не менее 0.2 цикла/мин. При большей частоте могут быть созданы циклы с выдержкой времени.

Для испытаний (рис. 1) взят плоский образец, изготовленный в виде балки равного сопротивления изгибу. Широкой частью он закреплен консольно в рабочих органах машины. Свободный конец имеет нерабочую часть l_1 для приложения нагрузки в расчетной точке на расстоянии l от заделки. Толщину образца h выбирают в зависимости от требуемой деформации на его поверхности (краиних волокнах) при заданном перемещении консоли, осуществляемом ползуном 2 (рис. 2) через кромки 6, образованные проточкой. Ползуны для всех образцов 1 имеют постоянный ход между упорами 3, а размах заданной для каждого образца деформации определяется его толщиной и шириной проточки.

Пренебрегая деформацией нерабочего участка образца l_1 , а также предполагая справедливыми гипотезы плоских сечений и неразрывности деформаций, зависимость деформации на поверхности образца ε от прогиба w (на расстоянии l от заделки) найдем из выражения $\varepsilon_y = wh/(l^2 - l_1^2)$.

В предлагаемой методике испытаний на малоциклическую усталость задается амплитуда полной деформации ε_a , равная сумме упругой ε_y и пластической ε_{pl} составляющих. Известно, что долговечность при малоциклическом нагружении определяется пластической деформацией в цикле — шириной петли диаграммы циклического деформирования $\Delta\varepsilon_{pl}$ (рис. 3, a), которая при тех же предположениях описывается аналогичной зависимостью: $\Delta\varepsilon_{pl} = \Delta w_{pl}h/(l^2 - l_1^2)$, где Δw_{pl} — удвоенный остаточный прогиб в полуцикле.

В данных испытаниях нагрузка P и напряжения σ на поверхности образца не оцениваются, так как

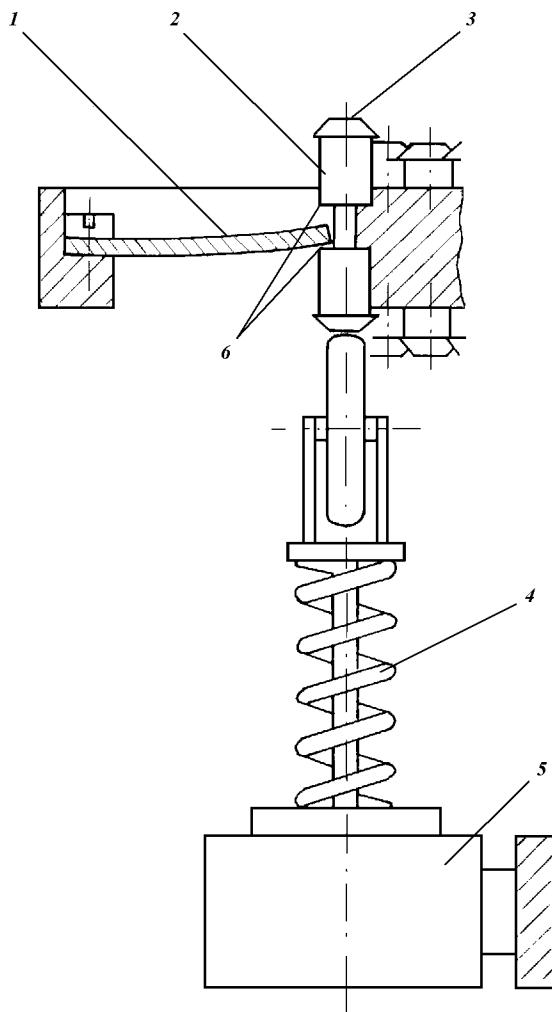


Рис. 2. Схема нагружения образца

экспериментальные результаты представлены в координатах $\Delta\varepsilon_{\text{пл}} - \lg N$, N — число циклов до разрушения. Остаточный прогиб в полуцикле $0.5\Delta w_{\text{пл}}$ устанавливают в ненагруженном состоянии с помощью датчика перемещений 5 (рис. 2) по положению ползуна, которое он занимает под действием пружины 4, обеспечивающей малое измерительное усилие. Разрушение фиксируется тогда, когда ползун в процессе измерения утапливается до упора, не испытывая сопротивления образца.

При анализе данных экспериментов, очевидно, следует учитывать наиболее влияющие ФОС, регистрация которых осуществляется штатными средствами на борту, и в данной работе не рассматривается. Для интегральной оценки воздействий ФОС возможно использование ненагружаемых образцов-свидетелей.

Экспериментальная установка (рис. 4) состоит из нагружающего устройства *НУ* и преобразователя солнечной энергии *ПСЭ*, расположенных на внешней поверхности КА, а также системы автоматического управления и регистрации экспериментальных данных *АСУ*, находящейся внутри станции.

Нагружающее устройство содержит кассету 1 с образцами 2 и ползунами 3 (в рассматриваемой конструкции их 24), расположенными по окружности. Кассета приводится во вращение двигателем 21. С двух сторон кассеты размещены нагружающие ролики 4 так, что ползуны, проходящие под ними при вращении кассеты, занимают одно из крайних положений. За один оборот кассеты каждый образец деформируется по одному симметричному циклу, состоящему из двух полуциклов, смещенных во времени (рис. 3, б). Между роликами образцы находятся в ненагруженном состоянии. Их остаточный прогиб в полуцикле измеряется датчиком перемещений 22. Каждый оборот кассеты фиксируется с помощью метки 7 и датчика оборотов 6. Температура образцов контролируется термопарой 5. Сигналы с датчиков 22, а также с термопары 5 поступают в разъем 20. С учетом максимальных нагрузок и КПД механизмов *НУ* мощность двигателя, необходимая для вращения кассеты со скоростью 3 оборота/мин, составляет около 15 Вт.

Преобразователи солнечной энергии в механическую могут быть построены на разных принципах. Наиболее простым является использование циклического изменения температуры соответствующих конструктивных элементов испытательной установки при орбитальном движении КА вокруг Земли с продолжительностью цикла нагружения, равной периоду обращения станции (около 100 мин). Здесь может быть реализовано термическое расширение газообразных, жидких или твердых рабочих тел в таких устройствах, как сильфоны, биметаллические пластины, а также сплавы с памятью. Однако при этом способе за указанный срок (один год) можно получить лишь 10^3 циклов. Следовательно, необходимо обеспечить более производительное устройство. Его можно создать из приведенных выше, если запасенная в каждом цикле нагрев—охлаждение механическая потенциальная энергия будет высвобождаться постепенно посредством специального механизма (например, типа маятникового часовного спуска), приводя в движение рабочие органы испытательной машины.

Известны и другие способы преобразования солнечной энергии в механическую — через тепловую и электрическую: солнечные полупроводниковые элементы в сочетании с электродвигателем, концентратор солнечных лучей с тепловым двигателем

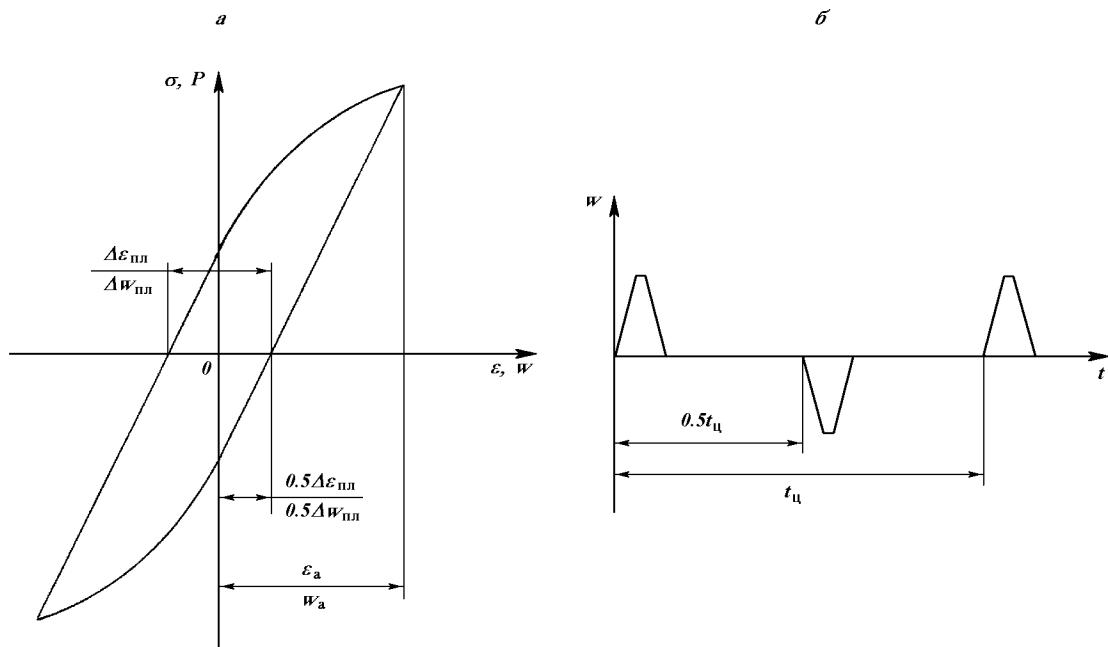


Рис. 3. Диаграмма (а) и циклограмма (б) деформирования образца

и радиатором для сброса тепла в окружающее пространство. Последнее принято в настоящей методике, причем в качестве двигателя привлечена тепловая машина с замкнутым термодинамическим циклом — двигатель Стирлинга в исполнении по схеме Сименса — рис. 4 (Уокер, 1985). Этот тип двигателя выбран в связи с тем, что в нем можно достичь хорошей балансировки механизма, устраивающей вибрации, которые недопустимы при расположении установки на специальной платформе, предназначенной для научного оборудования. Конструктивная схема двигателя показана на рис. 4. На нагревателе 9 концентрируются при помощи параболического отражателя 8 солнечные лучи. Тепло от холодильника 13 отводится в окружающее пространство посредством радиатора 11. Механизм косой шайбы 15 соединен с поршнями 12 толкателями 14. Вал двигателя 18 соединен с электродвигателем-генератором 17, который может служить стартером при запуске теплового двигателя. Для балансировки механизма служат противовесы 16. В данной конструкции, благодаря толкателям в своих направляющих 19, цилиндры освобождены от поперечных усилий со стороны поршней, что имеет большое значение в условиях сухого трения. Заполнение рабочим телом (как правило, гелием) под давлением $5 \cdot 10^5$ Па и герметизацию двигателя производят при его изготовлении. Из-за

сопротивления движению рабочих поршней со стороны генератора и при перекачивании газа между полостями, а также в результате потерь на трение двигатель может устойчиво работать, начиная с определенной разности температур между горячей и холодной зонами рабочего объема, которая составляет 250—300 К. Для благоприятной ориентации ПСЗ относительно направления солнечных лучей его устанавливают так, чтобы ось параболоида была перпендикулярна к плоскости штатных солнечных батарей КА. Электрическая энергия, вырабатываемая генератором 17, через согласующий преобразователь напряжения ПН поступает на электропривод нагружающего устройства.

Поскольку колебания температур одинаково ориентированных образцов, горячей зоны двигателя и любой поверхности конструкции под действием солнечных лучей подобны, запуск двигателя можно осуществить по показаниям термопары 5, контролирующей температуру какой-либо неподвижной площадки НУ, путем подачи напряжения на мотор-генератор от внешнего источника. Контроль за работой двигателя выполняют по генерируемому току.

Система автоматического управления АСУ включает следующие основные функциональные узлы: измерительные преобразователи ПИ сигналов датчиков перемещения w , оборотов n , температуры T ,

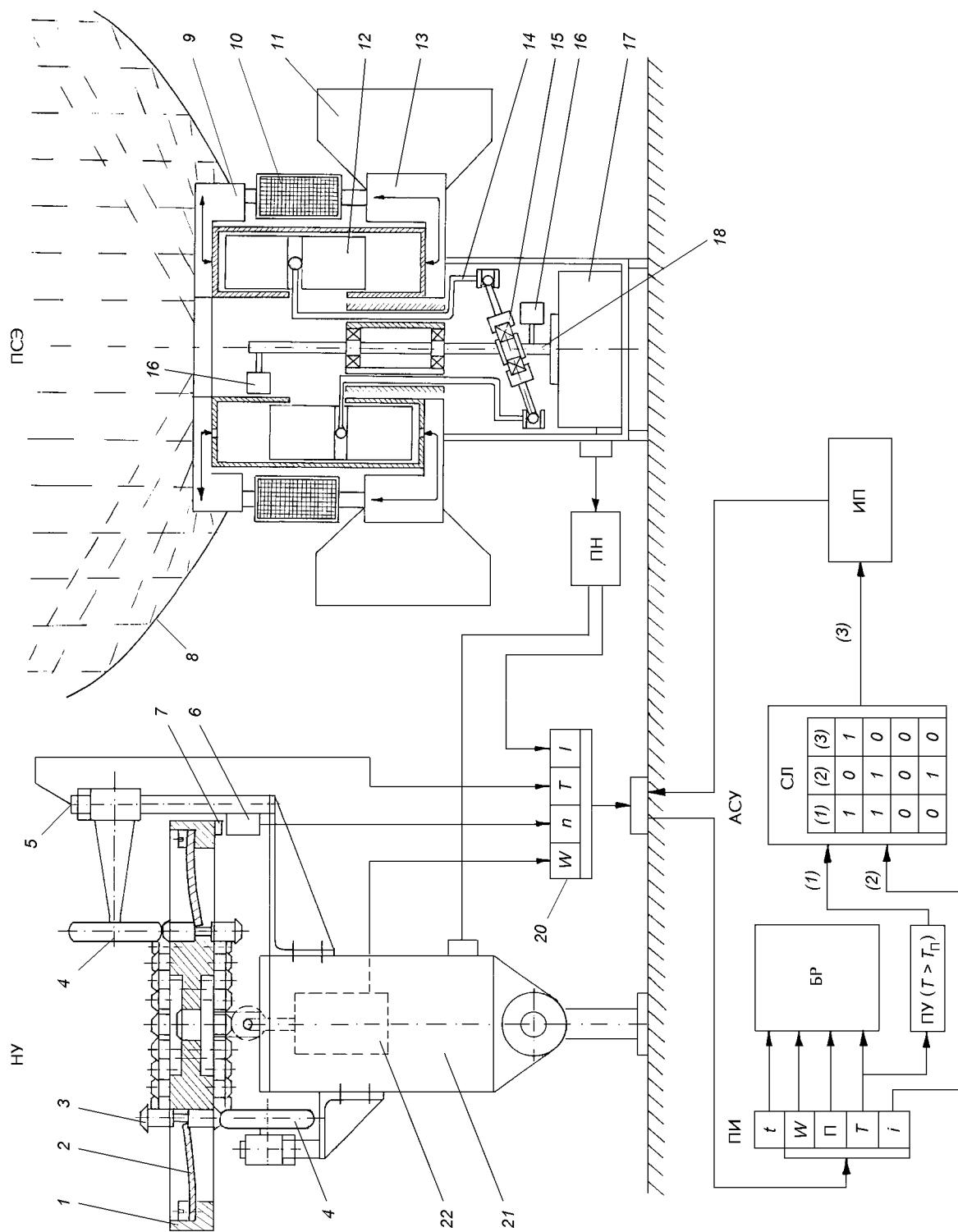


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

генерируемого тока i , а также таймер t ; блок регистрации экспериментальных данных BR ; пороговое устройство $ПУ$; логическую схему $СЛ$ и источник питания $ИП$.

В автоматическом режиме установка работает следующим образом. При выходе КА на дневную часть орбиты показания термопары 5 достигают экспериментально установленной величины T_n , достаточной для запуска теплового двигателя; пороговое устройство $ПУ$ ($T > T_n$) подает сигнал на первый вход логической схемы $СЛ$. Поскольку двигатель еще не работает, на второй вход сигнал от преобразователя i не поступает. Логическая схема устроена так, что в этом случае на ее выходе будет 1, при всех других комбинациях входных сигналов на выходе будет 0. По команде $СЛ$ включается источник питания $ИП$, который через генератор 17 запускает тепловой двигатель. С началом работы двигателя на втором входе $СЛ$ появляется сигнал и $ИП$ отключается. После захода КА в ночную область орбиты вследствие понижения температуры горячей зоны двигатель останавливается.

При вращении кассеты происходит нагружение образцов, измерение их остаточных прогибов w_1, \dots, w_{24} и оборотов кассеты n (т. е. циклов). Эти величины, а также температура и время анализируются и регистрируются в построенном на базе микроЭВМ BR , выполняющем по программе следующее: счет числа циклов n , регистрацию через определенное заданное число циклов всего указанного комплекса данных, выявление разрушенных образцов по условию $w^s < w_p$, где w_p — перемещение ползуна до упора; s — номер образца, отсчитываемого от метки на кассете. В случае обнаружения вновь разрушенного образца происходит внеочередная запись данных. При испытании одной кассеты (24 образцов) ориентировочное количество регистрируемых чисел не превышает 10^4 , что потребует объема памяти до 100 Кбайт.

Таким образом, предложенная методика испытаний на малоцикловую усталость в условиях космического пространства, на наш взгляд, проста и надежна, отвечает весогабаритным и энергетическим характеристикам экспериментального оборудования, а значит, может быть реализована на практике.

Алексеев А. И. Влияние скорости пластической деформации на характер зависимости долговечности меди от глубины вакуума // Поведение материалов в условиях вакуума и низких температур. — Харьков: Физ.-техн. ин-т низких температур АН УССР, 1972.—С. 57—60.

Алексеев А. И., Гринберг В. М., Любарский И. М. Особенности воздействия вакуума на усталостное разрушение меди в

высоко- и низкоамплитудной области деформации // Поведение материалов в условиях вакуума и низких температур. — Харьков: Физ.-техн. ин-т низких температур АН УССР, 1972.—С. 52—56.

Белан Н. В., Гайдуков В. Ф., Гусляков А. А. и др. Особенности поведения материалов в условиях низких температур, вакуума и невесомости: Учеб. пособие. — Харьков: Изд-во ХАИ, 1984.—188 с.

Гринберг Н. М., Любарский И. М., Цуриков Н. А. Усталостное разрушение армко железа в вакууме // Поведение материалов в условиях вакуума и низких температур. — Харьков: Физ.-техн. ин-т низких температур АН УССР, 1972.—С. 61—66.

Зиновьева Н. Г., Родз О. Д., Кузин Г. А. и др. Микрократеры на мишенях, экспонированных на околоземной орбите // Космические исследования.—1990.—28, № 1.—С. 117—124.

Карпенко Г. В., Кацков К. Б., Кокотайло И. В., Руденко В. П. Малоциклическая усталость стали в рабочих средах. — Киев: Наук. думка, 1977.—112 с.

Киселевский В. Н. Прочность конструкционных материалов ядерных реакторов / Под ред. А. А. Лебедева. — Киев: Наук. думка, 1990.—168 с.

Космическая технология и материаловедение. — М.: Наука, 1962.—188 с.

Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов: Пер. с польск. — М.: Металлургия, 1976.—456 с.

Мизун Ю. Г. Процессы в геосфере. — М.: Знание, 1988.—64 с.

Нусинов М. Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. — М.: Машиностроение, 1982.—176 с.

Патон Б. Е., Патон В. Е., Дудко Д. А. и др. Стенд для исследования технологических процессов в условиях, имитирующих космос // Космические исследования на Украине.—1973.—Вып. 1.—С. 5—9.

Петров Л. Н., Сопрунок Н. Г. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1991.—216 с.

Скрипник Ю. Д., Косов Б. Д. Уравнение малоциклической усталости облучаемой стали ОХ16Н15М3Б // Проблемы прочности.—1979.—№ 1.—С. 12—17.

Стрижало В. А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоциклическом нагружении в условиях низких и высоких температур. — Киев: Наук. думка, 1978.—238 с.

Стрижало В. А., Скрипченко В. И. Малоциклическая усталость при низких температурах. — Киев: Наук. думка, 1987.—216 с.

Стрижало В. А., Филин Н. В., Куранов В. А. и др. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах. — Киев: Наук. думка, 1988.—240 с.

Уокер Г. Двигатели Стирлинга: Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985.—408 с.

Феоктистов К. П. (ред.) Космические аппараты. — М.: Воениздат, 1983.—319 с.

TECHNIQUE FOR TESTING CONSTRUCTION MATERIALS FOR THE CYCLIC STRENGTH UNDER THE OUTER SPACE CONDITIONS

V. A. Stryzhalo and Yu. D. Skrypnik

We analyze the outer space agents that affect the strength of construction materials. We propose a technique for testing materials for the cyclic strength under the outer space conditions and suggest a design of an automatic multisample installation with an autonomous drive powered by solar energy.

УДК 629.78+550.388.1

Бортовий прискорювач електронів на накопичувачах-ємностях: основні співвідношення та оцінки

М. А. Леонов

Київський Національний університет імені Тараса Шевченка

Надійшла до редакції 09.07.96

Прискорювач електронів на накопичувачах-ємностях для космічних та лабораторних експериментів в порівнянні з прискорювачами традиційної схеми прямого живлення має менші масу, об'єм та потужність енергоспоживання та інші цінні властивості. В статті детально описано принцип роботи та приводяться співвідношення, які можуть бути основою для розрахунку прискорювача.

ВСТУП

Прискорювач електронів на накопичувачах-ємностях (Куклинський, 1983; Манагадзе, 1983; Балебанов, 1983; Managadze, 1983) орієнтований на область застосування, де вимагається імпульсна інжекція, коли після зондувального імпульсу інжекції наступає пауза для реєстрації відгуку середовища на зондування, яка дещо довша від тривалості інжекції. Цей прискорювач потенційно здатний відповісти принципам енерго- та ресурсозберігаючої технології.

Однією з особливостей схеми прискорювача електронів на накопичувачах-ємностях — це широке поле вибору, гнучкість у досягненні компромісу між можливими характеристиками прискорювача, наявною матеріально-технічною базою та вимогами наукових задач експерименту. В цьому плані прискорювач електронів на накопичувачах надає фізику-експериментатору унікальні можливості.

В порівнянні з традиційною схемою прямого перетворення і прямого живлення (Paton, 1978), прискорювач цього типу має принципові особливості. Наприклад, крім модульованих імпульсів

будь-якої форми, він потенційно здатний інжектувати імпульси абсолютно гладкі, або з мінімальною можливою паразитною модуляцією електронного пучка.

В статті описуються основні процеси, що відбуваються в прискорювачі електронів на накопичувачах-ємностях під час його роботи. Приводяться співвідношення, що лежать в основі розрахунку прискорювача цього типу.

Основні характеристики льотного зразка прискорювача такого типу, масо-габаритні показники та роботу під час експерименту планується описати в наступних статтях.

Для ілюстрації: в ракетному експерименті Г60С (Куклинський, 1983; Манагадзе, 1983; Балебанов, 1983; Managadze, 1983) під час інжекції прямокутних та трикутних імпульсів, що чергуються, з тривалістю імпульсів близько 0.6 с і 0.5 с відповідно та періодом їх слідування 5 с з максимальною енергією 6 кВ та струмом пучка 0.5 А прискорювач електронів споживав струм менше 15 А від бортової енергомережі напругою 30 В (тобто, замість 3 кВт споживалось менше 450 Вт). При цьому маса прискорювача не перевищувала 30 кГ.

Слід окремо підкреслити, що прискорювач цього

типу відрізняється характеристиками, які не тільки особливо цінні зараз з огляду на економічні обставини, але й важливі взагалі в космічних та в лабораторних експериментах.

ЗАГАЛЬНА СХЕМА ПРИСКОРЮВАЧА НА ЕМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧАХ ТА ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ В НЬОМУ

Оскільки найчастіше в експериментах застосовується імпульсна інжекція електронного пучка, то й засновувати роботу прискорювача доцільно на такому принципі, який базується саме на імпульсному типі інжекції. Крім того, потрібно врахувати, що основними відхиленнями від норми в роботі прискорювача електронів є переважно газовий розряд та високовольтні пробої в проміжку «анод-катод» електронної гармати.

СХЕМА ПРИСКОРЮВАЧА ТА ЙОГО ПРИНЦІП ДІЇ

Принципова схема прискорювача показана на рис. 1. За джерело енергії для прискорення електронного пучка та живлення електронної гармати ЕГ використовується високовольтний ємнісний накопичувач $\mathbb{E}H$ достатньо великої ємності.

Електронна гармата ЕГ в момент інжекції вмикається послідовно в коло розряду високовольтного ємнісного накопичувача $\mathbb{E}H$ за допомогою лампи Л, яка може служити або простим ключом, або аналоговим регулюючим елементом. Тобто, керу-

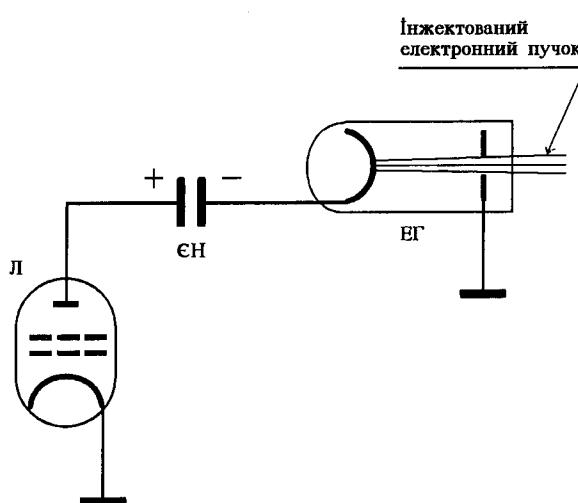


Рис. 1. Основна принципова схема прискорювача на ємнісних накопичувачах: $\mathbb{E}H$ — ємнісний накопичувач, Л — регулююча лампа, ЕГ — електронна гармата

вання струмом розряду ємності $\mathbb{E}H$ і, відповідно, струмом інжекції, виконується потужною лампою.

Очевидно, що в прискорювачі має місце баланс енергії для процесів заряду й розряду ємнісного накопичувача.

Ємнісний накопичувач $\mathbb{E}H$ неперервно підзаряджається від високовольтного зарядного пристрою (ВВЗП) невеликої потужності, достатньої для відновлення енергії, втраченої на прискорення електронного пучка в імпульсах інжекції. Розряд накопичувача $\mathbb{E}H$ великим струмом під час імпульсів інжекції компенсується неперервною підзарядкою невеликим струмом на протязі всього експерименту за допомогою ВВЗП.

За потужністю енергоспоживання прискорювач електронів з ємнісним накопичувачем, як це показано далі, може бути вигіднішим, ніж прискорювачі традиційних схем прямого перетворення і прямого живлення. Відношення потужності інжектованого електронного пучка до потужності, яка споживається прискорювачем на ємнісному накопичувачі від бортової енергомережі в значній мірі визначається величиною

$$\eta \frac{T_n + \tau_{\text{інж}}}{\tau_{\text{інж}}}$$

де $\tau_{\text{інж}}$ — тривалість імпульсу інжекції, а T_n — тривалість пауз між інжекціями, η — коефіцієнт корисної дії ВВЗП.

ПОПЕРЕДНІ ПРИПУЩЕННЯ

Для викладу суті зробимо деякі припущення обмежувального характеру, які, проте, не зачіпають головного та важливих деталей.

Найчастіше робота прискорювача організована за певною циклограмою і складається із елементарних циклів інжекції — груп імпульсів інжекції, що повторюються. Один такий цикл може містити в собі імпульси різноманітної форми: модульовані або немодульовані, прямокутні, трикутні чи інші, складнішої форми.

Для простоти процеси в прискорювачі розглянемо на прикладі, коли циклограма інжекції складається тільки із імпульсів прямокутної форми. Нехай $\tau_{\text{інж}}$ — тривалість імпульсу інжекції, T_n — тривалість пауз, I_{kr} — струм гармати (струм її катода) та U_r — прискорююча напруга на гарматі. В загальному випадку циклограму інжекції різноманітних за формою імпульсів можна звести до еквівалентної циклограми, коли інжектуються серії тільки прямокутних імпульсів, але з різними параметрами $\tau_{\text{інж}}$, T_n , U_r , I_{kr} .

Можна прийняти, що для регулювальної лампи струм аноду практично дорівнює струму її катоду $I_{\text{ал}} \approx I_{\text{кл}}$. Звичайно в лампі типу пентода струм катода $I_{\text{кл}}$ розгалужується на струми анода $I_{\text{ал}}$, екранної сітки $I_{\text{екр}}$, та антидинатронної сітки. Але, наприклад, у пролітного пентода ПП1-0.5/10 струм антидинатронної сітки відсутній взагалі, а струмом екранної сітки можна занехтувати, оскільки

$$\frac{I_{\text{екр}}}{I_{\text{кл}}} \approx 0.002 \dots 0.006$$

при анодних напругах $U_{\text{ал}} > 300$ В.

Крім того, можна вважати, що струм анода лампи точно дорівнює струму катода гармати $I_{\text{ал}} \approx I_{\text{кр}}$, оскільки інші струми відгалуження у високовольтному колі (струми високовольтних дільників напруги і т. п.) можна зробити мінімальними.

Для простоти можна також вважати, що

$$I_{\text{інж}} = I_{\text{кр}},$$

тобто, струм катода гармати $I_{\text{кр}}$ точно дорівнює струму інжектованого пучка $I_{\text{інж}}$. Хоча в загальному випадку в будь-якій гарматі струм її катода $I_{\text{кр}}$ розгалужується на струм інжектованого електронного пучка $I_{\text{інж}}$ та струми електродів гармати. Для діодної гармати струм пучка $I_{\text{інж}}$ може відрізнятись від струму її катода $I_{\text{кр}}$ на величину струму аноду гармати $I_{\text{ар}}$:

$$I_{\text{кр}} = I_{\text{інж}} + I_{\text{ар}}.$$

Величина струму $I_{\text{ар}}$ залежить від конструкції гармати і може становити значну величину. Але при розгляді процесів у прискорювачі це принципово не грає суттєвої ролі, оскільки струм $I_{\text{ар}}$ можна або врахувати при розрахунках, або звести до необхідного мінімуму при конструюванні гармати.

РОБОТА СХЕМИ ПРИСКОРЮВАЧА

Її можна описати графіками (рис. 2), використовуючи для кола живлення діодної гармати прості спiввiдношення:

$$U_{\text{ен}} = U_{\text{л}} + U_{\text{р}}, \quad (1)$$

$$I_{\text{кл}} = I_{\text{ал}} + I_{\text{екр}}, \quad (2)$$

$$I_{\text{кр}} = I_{\text{ар}} + I_{\text{інж}}, \quad (3)$$

де $U_{\text{ен}}$, $U_{\text{л}}$, $U_{\text{р}}$ — напруги на накопичувачі, лампі та гарматі відповідно, $I_{\text{кл}}$, $I_{\text{ал}}$, $I_{\text{екр}}$ — струми катода, анода лампи та її екранної сітки, $I_{\text{кр}}$, $I_{\text{ар}}$ —

струми катода та анода гармати, $I_{\text{інж}}$ — струм інжектованого електронного пучка.

Враховуємо, що на джерелі живлення — ємнісному накопичувачі — напруга залежить від часу:

$$U_{\text{ен}} = \frac{1}{C_{\text{ен}}} \int_0^t (i_{\text{зар}} - I_{\text{кр}}) dt, \quad (4)$$

де $C_{\text{ен}}$ — ємність накопичувача, $i_{\text{зар}}$ — зарядний струм від ВВЗП.

Електронна діодна гармата являється навантаженням для лампи в колі джерела живлення, котрим виступає ємнісний накопичувач. Це навантаження має нелінійну залежність від напруги, що може описуватись у вигляді

$$I_{\text{кр}} = p U_{\text{р}}^{3/2}, \quad (5)$$

де p — первеанс гармати.

На рис. 2 на сімейство вольт-амперних характеристик лампи $I_{\text{ал}} = I_{\text{ал}}(U_{\text{ал}}, U_{\text{екр}})$ накладена крива навантаження — вольт-амперна характеристика гармати (5).

Точка A перетину кривої навантаження з вольт-амперною характеристикою лампи, яка відповідає миттевому значенню керуючої напруги екранної сітки $U_{\text{екр}}$, є графічним розв'язком системи рівнянь (1) — (5) і визначає миттєві напруги на гарматі $U_{\text{р}}$, на лампі $U_{\text{л}}$ і миттєвий струм катода гармати $I_{\text{кр}}$.

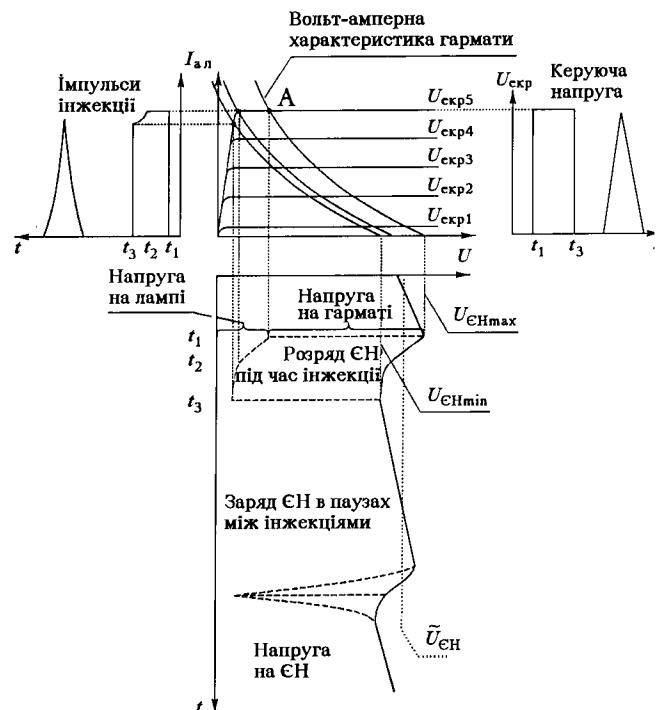


Рис. 2. Робота схеми прискорювача

для якогось певного моменту часу t і певної напруги накопичувача $U_{\text{ен}}$.

При інжекції послідовності імпульсів (рис. 2) напруга ємнісного накопичувача $U_{\text{ен}}$ «пульсує» між максимальним значенням $U_{\text{енmax}}$ і мінімальним $U_{\text{енmin}}$, зменшуючись під час інжекції $\tau_{\text{інж}}$ (при розряді струмом гармати I_{kr}) і збільшуясь за час паузи T_{n} (при підзарядці струмом $i_{\text{зар}}$ від ВВЗП). Внаслідок цього паралельно осі напруг U плаває й крива навантаження $I_{\text{kr}} = pU^{\frac{1}{2}}$.

ПАУЗА МІЖ ІМПУЛЬСАМИ ІНЖЕКЦІЙ (ЗАРЯД НАКОПИЧУВАЧА)

Лампа в цей час закрита. Високовольтний зарядний пристрій неперервно працює, постійно заряджаючи високовольтний накопичувач струмом $i_{\text{зар}}$.

Тому напруга на накопичувачі, що в момент часу після закінчення імпульсу інжекції і на початку паузи рівна $U_{\text{енmin}}$, збільшується в кінці паузи на величину

$$\Delta U_{\text{ен}}^+ = \frac{1}{C_{\text{ен}}} \int_{\tau_{\text{інж}}}^{T_{\text{n}}} i_{\text{зар}} dt, \quad (7)$$

або грубо на

$$\Delta U_{\text{ен}}^+ = \frac{\tilde{i}_{\text{зар}} T_{\text{n}}}{C_{\text{ен}}}, \quad (8)$$

де $\tilde{i}_{\text{зар}}$ — зарядний струм, усереднений за час паузи між імпульсами інжекції T_{n} . При цьому в кінці паузи напруга на накопичувачі досягає максимального значення $U_{\text{енmax}}$.

ІМПУЛЬС ІНЖЕКЦІЇ (РОЗРЯД НАКОПИЧУВАЧА)

На початку імпульса інжекції лампа відкривається й починає регулювати струм розряду накопичувача $I_{\text{ал}} = I_{\text{ал}}(t)$ у відповідності з формою керуючого сигналу. При цьому високовольтний зарядний пристрій (підкреслимо це) неперервно працює також і під час інжекції, постійно підзаряджаючи ємнісний накопичувач струмом $i_{\text{зар}}$.

Тоді за час імпульсу інжекції $\tau_{\text{інж}}$ напруга $U_{\text{ен}}$ на накопичувачі знижується на величину

$$\Delta U_{\text{ен}}^- = \frac{1}{C_{\text{ен}}} \int_0^{\tau_{\text{інж}}} (I_{\text{kr}} - i_{\text{зар}}) dt, \quad (9)$$

або приблизно на

$$\Delta U_{\text{ен}}^- = \frac{(\tilde{I}_{\text{kr}} - \tilde{i}_{\text{зар}})\tau_{\text{інж}}}{C_{\text{ен}}}, \quad (10)$$

де \tilde{I}_{kr} — струм катода гармати та $\tilde{i}_{\text{зар}}$ — струм заряду від ВВЗП, усереднені за час інжекції $\tau_{\text{інж}}$.

ЗВ'ЯЗОК ЄМНОСТІ НАКОПИЧУВАЧА ТА ПОТУЖНОСТІ, ЩО РОЗСЮЮТЬСЯ НА АНОДІ ЛАМПИ

Коли лампа відкрита повністю, на ній падає мінімальна напруга $U_{\text{відкр}}$. Тому потужність, що губиться при цьому на відкритій лампі, буде мінімальною. А вершина імпульсу інжекції має форму, подібну до експоненти, але відмінну від неї через нелінійність вольт-амперної характеристики гармати.

Для інжекції імпульсів різноманітної форми лампа повинна працювати не як ключовий елемент, а як аналоговий регулюючий елемент. В такому випадку величина потужності, що розсюються на аноді лампи під час імпульсу інжекції, може суттєво залежати від величини ємності накопичувача $C_{\text{ен}}$. Оптимізацію величини цієї потужності не складно провести з урахуванням міркувань, викладених нижче.

Розглянемо рис. 3, що ілюструє інжекцію електронного пучка з одними і тими ж параметрами, але за допомогою двох майже ідентичних прискорювачів, які мають різні тільки ємності накопичувачів $C_{\text{ен}1}$ та $C_{\text{ен}2}$, причому $C_{\text{ен}1} < C_{\text{ен}2}$.

Для створення можливості інжектувати неспотворений імпульс з однаковими в обох випадках параметрами $\tau_{\text{інж}}$, T_{n} , U_{r} , I_{kr} (назвемо його стандартним імпульсом) накопичувач меншої ємності $C_{\text{ен}1}$ перед початком імпульсу інжекції повинен бути зарядженим до більшої напруги $U_{\text{ен}1} > U_{\text{ен}2}$. Тільки

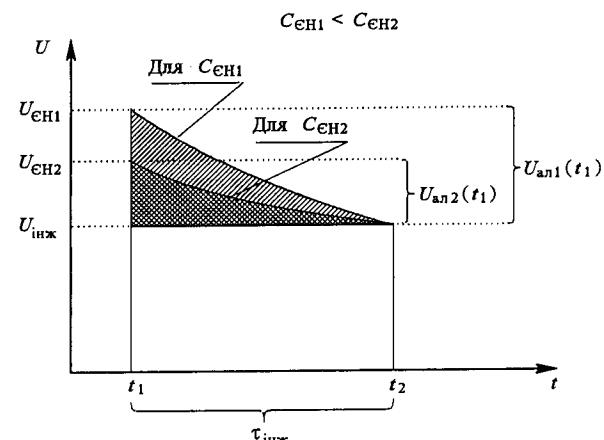


Рис. 3. Інжекція одинакового прямокутного імпульсу двома прискорювачами з накопичувачами різної ємності

в такому випадку накопичувач $C_{\text{ен1}}$ не зможе розрядитись до напруги нижчої, ніж напруга $U_{\text{ал}} = U_A$, при якій лампа повністю відкривається і вже перестає бути регулятором струму інжекції.

Необхідна прискорююча напруга на гарматі завжди отримується як різниця

$$U_{\text{kr}} = U_{\text{ен}} + U_{\text{ал}},$$

тобто, для того щоб одержати необхідну неспотворену форму імпульса інжекції, необхідно створювати надлишок напруги на накопичувачі, який регулююча лампа завжди гасить на своєму аноді.

Наприклад, для прямокутного імпульса струму з плоскою вершиною ($I_{\text{kr}} = \text{const}$) напругу на гарматі U_{kr} необхідно підтримувати сталою як з накопичувачем $C_{\text{ен1}}$, так і з накопичувачем $C_{\text{ен2}}$. Зрозуміло, що з вольт-амперною характеристикою діодної гармати $I_{\text{kr}} = pU_{\text{r}}^{3/2}$ отримати $I_{\text{kr}} = \text{const}$ можна, забезпечуючи $U_{\text{kr}} = \text{const}$. В обох випадках для виконання умови $U_{\text{kr}} = \text{const}$ на лампі, згідно з рівнянням (9), завжди потрібно гасити надлишок напруги на накопичувача, що за величиною не менше ніж

$$\Delta U_{\text{ен}} = \Delta U_{\text{ен}}^-.$$

А оскільки $C_{\text{ен1}} < C_{\text{ен2}}$, то очевидно, що для інжекції однакового імпульсу в обох випадках заряджати ці накопичувачі треба по-різному, щоб було $U_{\text{ен1}} > U_{\text{ен2}}$.

Отже, потужності, що розсіюються на аноді лампи, відрізняються аналогічно напругам. При цьому, очевидно, що допустима для лампи імпульсна потужність $P_{\text{ал, доп}}$ не повинна перевищуватись, тобто треба, щоб

$$P_{\text{ал, доп}} \geq P_{\text{ал1}} > P_{\text{ал2}}.$$

Звідси втрати енергії

$$A_{\text{ал}} = \int_0^{\tau_{\text{інж}}} I_{\text{kr}} U_{\text{kr}} dt,$$

що розсіюються за час інжекції стандартного імпульсу на аноді лампи в двох прискорювачах, також відрізняються:

$$A_{\text{ал1}} > A_{\text{ал2}}.$$

Це ілюструє рис. 3, на якому заштриховані площини, що відповідають втратам $A_{\text{ал1}}$ та $A_{\text{ал2}}$.

Отже, в цих двох випадках при одній і тій самій потужності інжектованого пучка $P_{\text{інж}} = I_{\text{kr}} U_{\text{kr}}$ втрати потужності на лампі будуть більшими для прискорювача з накопичувачем меншої ємності. А більші втрати у високовольтному колі при одній і тій же корисній роботі, необхідній для інжекції, вимагатимуть і високовольтного зарядного пристрою більшої

потужності, а отже, й більшої маси та габаритів. Крім того, лампа буде працювати у більш важкому режимі, що може вплинути на надійність прискорювача в цілому.

Висновки

- Більша ємність накопичувача може забезпечити більший коефіцієнт корисної дії всього прискорювача, оскільки при цьому будуть меншими втрати енергії, що розсіюється на аноді лампи.
- Є оптимум для величини енергії, що розсіюється на аноді лампи, в залежності від ємності накопичувача. Зменшення ємності накопичувача з одного боку приводить до зменшення його маси та маси всього прискорювача, але з іншого боку це означає і більші втрати енергії, що розсіюється на аноді лампи.
- Є оптимуми для величин маси, об'єму та потужності енергоспоживання всього прискорювача в залежності від ємності накопичувача. Зменшення загальної маси та об'єму при зменшенні ємності накопичувача можливе, очевидно, до певної межі, яка залежить від максимально допустимої миттєвої потужності, що лампа здатна розсіювати на своєму аноді. Подальше зменшення ємності накопичувача може привести до збільшення загальної маси та об'єму прискорювача або через появу пристрою для відводу тепла від аноду лампи, або через необхідність застосування більш потужної лампи разом з більш потужним її обрамленням і т. п.

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН ЄМНОСТІ НАКОПИЧУВАЧА ТА ПОТУЖНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ

Ємність накопичувача. Із графіків (рис. 2) легко бачити, що в стаціонарному режимі роботи прискорювача при нормальніх умовах (відсутність високовольтних пробоїв чи газового розряду в гарматі) висока напруга на накопичувачі $U_{\text{ен}} = U_{\text{ен}}(t)$ «пульсує» біля деякого середнього робочого значення $\bar{U}_{\text{ен}}$.

За прийнятною амплітудою цих коливань напруги на накопичувачі

$$\Delta U_{\text{ен, доп}} = U_{\text{ен, max}} - U_{\text{ен, min}}$$

якою можна обмежитись, щоб забезпечити одночасно і потрібну форму інжектованого імпульсу, і допустимий режим роботи лампи, легко визначити необхідну величину ємності накопичувача $C_{\text{ен}}$.

Отже, з рівняння (9) розряду накопичувача під час імпульсу інжекції маємо

$$C_{\text{ен}} = \frac{1}{\Delta U_{\text{ен}}} \int_0^{\tau_{\text{інж}}} (I_{\text{кг}} - i_{\text{зар}}) dt.$$

Або через усереднені параметри для грубої оцінки

$$C_{\text{ен}} \equiv \frac{(\tilde{I}_{\text{кг}} - \tilde{i}_{\text{зар}})}{\Delta U_{\text{ен}}} \tau_{\text{інж}}.$$

Параметри $I_{\text{кг}}$ та $\tau_{\text{інж}}$ є заданими циклограмою інжекції. На амплітуду «пульсування» напруги накопичувача $\Delta U_{\text{ен}}$ можуть, як підкresлювалось вище, накладатись обмеження вимогами до форми імпульсу інжекції та гранично допустимої потужності, що лампа здатна розсіювати на своєму аноді.

Зарядний струм $i_{\text{зар}}$, як показано нижче в наступному розділі, визначається через параметри циклограми інжекції, їй може бути виражений через заданий струм інжекції $I_{\text{інж}}$.

Потужність високовольтного зарядного пристрою. Оцінку потужності високовольтного зарядного пристрою (ВВЗП) проведемо, виходячи із умови балансу енергії в накопичувачі при його заряді та розряді в нормальніх умовах роботи. В стаціонарному режимі роботи прискорювача, враховуючи співвідношення (7)–(10), для напруги на ємністю накопичувачі маємо

$$\Delta U_{\text{ен}}^- = \Delta U_{\text{ен}}^+,$$

і через усереднені величини

$$(\tilde{I}_{\text{кг}} - \tilde{i}_{\text{зар}})\tau_{\text{інж}} = \tilde{i}_{\text{зар}} T_{\text{n}}.$$

Або, якщо ввести скважність імпульсів інжекції таким чином:

$$Q = \frac{T_{\text{n}} + \tau_{\text{інж}}}{\tau_{\text{інж}}},$$

то для оцінки середнього зарядного струму $\tilde{i}_{\text{зар}}$, який повинен давати ВВЗП в нормальному режимі роботи для забезпечення інжекції тільки прямокутних імпульсів, одержимо приблизне співвідношення

$$\tilde{i}_{\text{зар}} = \frac{\tilde{I}_{\text{кг}}}{Q}.$$

Враховуючи попередні припущення, потужність інжектованого імпульсу приблизно дорівнює $\tilde{P}_{\text{інж}} = \tilde{I}_{\text{кг}} \tilde{U}_{\text{кг}}$. Тому необхідну вихідну потужність ВВЗП (при інжекції тільки прямокутних імпульсів), усереднену за час інжекції $\tau_{\text{інж}}$, орієнтовно можна оцінити за грубою формулою

$$\tilde{P}_{\text{ввзп}} = \frac{\tilde{P}_{\text{інж}}}{Q}.$$

Тобто, ВВЗП може мати невелику потужність, яка в Q раз менша від потужності високовольтного перетворювача традиційної схеми з прямим живленням гармати і яка достатня лише для поповнення втрат енергії в ємністю накопичувачі, що йде на прискорення електронного пучка.

Загальний виграш в потужності споживання всього прискорювача від бортової енергомережі легко оцінити по загальному бюджету енергії, тобто якщо в прискорювачі прослідкувати всі канали споживання та перетворення енергії, починаючи від бортового енергоджерела й закінчуячи інжектованим пучком та всіма іншими розгалуженнями в споживанні енергії. Найвагоміша частина енергії йде через ВВЗП. Тому загальний виграш в значній мірі залежить саме від потужності ВВЗП та від його коефіцієнта корисної дії.

В будь-якому конкретному випадку циклограма роботи прискорювача електронів може містити в собі елементарні цикли інжекції з загальною тривалістю цикла T_0 . Кожен такий цикл є послідовністю N імпульсів інжекції різноманітних тривалостей $\tau_{\text{інж},m}$, форм та амплітуд, яка повторюється. Загальні витрати енергії накопичувача за елементарний цикл інжекції

$$A_{\Sigma} = \sum_{m=1}^N \int_0^{\tau_m} I_{\text{кг}}(U_{\text{ен}} - U_{\text{кг}}) dt$$

складаються із корисної роботи, затраченої на прискорення електронного пучка, а також енергії, що даремно втрачається на лампі, на опорі стікання $\rho_{\text{ен}} = \rho_{\text{ен}}(U_{\text{ен}})$ через діелектрик накопичувача та високовольтній ізоляції і таке інше.

Тоді відношення

$$P_{\Sigma} = \frac{A_{\Sigma}}{T_0}$$

дасть грубу оцінку максимальної корисної потужності P_{Σ} на вихіді ВВЗП для забезпечення інжекції за потрібною циклограмою. А звідси, враховуючи можливий коефіцієнт корисної дії ВВЗП, легко зробити грубу оцінку максимальної потужності споживання ВВЗП від низьковольтного джерела бортової енергомережі.

Висновки

- Високовольтний зарядний пристрій може мати невелику потужність, достатню для поповнення втрат енергії в ємністю накопичувачі, що йдуть на прискорення інжектованого електронного пучка.
- Виграш в потужності, що розуміється як відношення інжектованої потужності до потуж-

ності, що споживається від бортмережі, може бути значним і визначається величиною $Q = (T_n + \tau_{\text{інж}})/\tau_{\text{інж}}$. Це тягне за собою також і значне зменшення маси та об'єму всього прискорювача електронів.

Куклинский Б. Д., Леонов Н. А., Манагадзе Г. Г. и др.
Ускоритель электронов на емкостных накопителях для активных экспериментов в космосе. — М., 1983.—18 с.—
(Препринт / АН СССР, ИКИ; № 860).

Манагадзе Г. Г., Мартинсон А. А., Леонов Н. А., Седов Н. А.
Бортовая малогабаритная система инъекции электронов на
накопителях для активных ракетно-космических экспери-
ментов // Активные эксперименты в космосе: Тр. ИПГ. —
1983.—Вып. 5.

Балебанов В. М., Гагуя Т. И., Клос З. и др. Особенности плазменных процессов, возникающих в зоне инжекции пучка электронов с высотного зонда. Исследование пучково-плазменного разряда. — М., 1983.—38 с.—(Препринт / АН СССР. ИКИ; №781).

Managadze G. G., Balebanov V. M., Burchuladze A. A., et al.
Potential observations of an electron-emitting rocket payload
and other relayed plasma measurements // Planet. Space
Sci.—1988.—36, N 4.—P. 399—410.

Paton B. E., Dudko D. A., Bernadsky V. N. et al. A powerful electron accelerator for active space experiments // Space Sci. Instrum.—1978.—4, N 2—3.—P. 131—138.

THE ON-BOARD ELECTRON ACCELERATOR WITH A CAPACITANCE STORAGE: MAIN CORRELATIONS AND ESTIMATIONS

M. A. Leonov

An on-board electron beam accelerator with a capacitance storage is described. The accelerator is thought to be the most suitable for pulse injection. Such an accelerator conforms to the principles of the resource and energy saving technology. The accelerator has many important features, it provides many unique possibilities to a physicist. The main features of this accelerator type are as follows:

- low power of the accelerator on-board supply as against traditional direct supply systems;
 - small general mass and volume of the accelerator in comparison with traditional direct supply systems;
 - low cost of the whole device;
 - possibility to inject pulses with absolutely smooth vertices;
 - flexible conjugation of electron accelerator characteristics with the scientific tasks of an experiment and the present-day component types.

Many of these features are very important now from the economic reasons, especially in rocket or satellite experiments.

The main processes in the accelerator are considered and the basic correlations of accelerator parameters are given. These correlations may be used for engineering calculations.

The accelerator performance and the peculiarities of operation in typical experimental conditions will be published in detail elsewhere.

УДК 621.396.11

Применение методов векторной медианной фильтрации при обработке многоканальных радиолокационных дистанционного зондирования данных

А. А. Курекин, В. В. Лукин, А. А. Зеленский

Харківський авіаційний інститут ім. М. С. Жуковського

Надійшла до редакції 17.09.96

В роботі розглядається можливість використання методів векторної медіанної фільтрації при спільній обробці радіолокаційних зображень. Показано, що ефективним є підхід, оснований на двохетапних алгоритмах фільтрації, що дає змогу врахувати відмінність статистичних характеристик багатоканальних радіозображені та ефективно використовувати при фільтрації кореляційні властивості векторного сигналу. Розроблено векторний фільтр, що підвищує детальність зображень і усуває ефект несправжніх границь об'єктів, викликаний неточністю суміщення радіозображені. На тестових і реальних багатоканальних радіолокаційних зображеннях проведено аналіз ефективності запропонованих методів фільтрації.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при дистанционном зондировании Земли радиофизическими методами широко применяются комплексные многочастотные и многополяризационные радиолокационные системы, установленные на космических и авиационных носителях. Результаты эксплуатации космических радиолокационных систем ERS, JERS-1, SIR-C/X-SAR (Freeman, 1996), многочастотного самолетного радиолокационного комплекса МАРС (Калмыков, 1994) подтверждают высокую информативность данных, полученных через определенные промежутки времени на нескольких частотах при разных поляризациях и углах облучения поверхности. Многоканальные радиолокационные данные эффективно используются для мониторинга сельскохозяйственных и лесных угодий, определения влажности почвы, снежного покрова, для решения ряда задач океанографии и геологии (Keydel,

1996). Применение многоканальных радиофизических измерений не только существенно повышает надежность анализа и интерпретации данных, но и позволяет использовать принципиально новые методы обработки радиолокационной информации. Так, по радиолокационным изображениям (РЛИ) одного и того же участка подстилающей поверхности, полученным через определенные промежутки времени может быть изучена динамика созревания урожая, образования и дрейфа морских льдов и т. д. Многополяризационные измерения в мм-диапазоне радиоволн используются в радиофизических методах определения влажности почвы и эродированности сельскохозяйственных угодий (Кулемин, 1995).

Использование многоканальных радиолокационных систем дистанционного зондирования (ДЗ) предъявляет определенные требования к алгоритмам обработки информации и требует разработки новых методов совместной фильтрации радиоизоб-

ражений. Целью данной работы является исследование возможности применения для многоканальных РЛИ методов векторной медианной фильтрации и ее модификаций, используемых при обработке цветных оптических изображений и в системах одновременной оценки нескольких параметров (Astola, 1990; Nikolaidis, 1995).

СОВМЕСТНАЯ ОБРАБОТКА МНОГОКАНАЛЬНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ

Особенность большинства методов интерпретации многоканальных данных заключается в анализе соотношений и собственно значений интенсивностей объектов на РЛИ, полученных на различных частотах, при разных поляризациях и углах зондирования. Часто результаты радиолокационных измерений анализируются совместно с измерениями, выполненными в оптическом и ИК-диапазоне, а также радиометрическими данными. В результате использования дополнительной информации повышается достоверность дистанционных измерений и появляется возможность устранения неоднозначности интерпретации различных объектов, имеющих подобные отражательные свойства для одного из каналов.

Применение методов совместной обработки многоканальных радиоизображений требует осуществления предварительной обработки данных ДЗ. Прежде всего, изображения исследуемого участка поверхности должны быть геометрически совмещены друг с другом, т. е. представлены в едином масштабе и взаимно ориентированы. В многочастотных системах необходимость геометрической коррекции изображений связана с использованием в подсистемах формирования РЛИ раздельных антенн. Наличие погрешностей их ориентации приводит к смещению, изменению масштаба и повороту изображений друг относительно друга. Взаимные геометрические искажения наблюдаются также в РЛИ, полученных в разное время, и вызваны несовпадением траекторий движения носителя. Для геометрического совмещения изображений и их привязки к топографической карте часто используется метод «реперных точек» (Kulemin, 1994). Совмещение осуществляется по заранее заданной модели геометрических искажений РЛИ. Параметры необходимых преобразований определяются значениями координат «реперных точек», выбираемых совпадающими с контрастными, легко идентифицируемыми визуально объектами (мосты, пересечения дорог, изгибы рек и т. д.). Достоинствами такого подхода являются приемлемая для многих

приложений точность геометрического совмещения при низких вычислительных затратах, а также возможность оценки качества привязки по результатам совмещения «реперных точек». В большинстве случаев ошибка совмещения составляет 1–2 отсчета изображения (Kulemin, 1994), что примерно соответствует одному элементу разрешения, и вызвано такими факторами, как флуктуации траектории и скорости движения носителя, неточности определения координат «реперных точек» и т. д. Такие ошибки можно считать приемлемыми при раздельной обработке изображений, когда операция совмещения осуществляется с целью приведения координатной системы РЛИ к координатной системе топокарты. Однако при совместной обработке изображений ошибки взаимной привязки в 1–2 отсчета приводят не только к погрешностям определения координат объектов, но и могут стать причиной ошибочной интерпретации многоканальных данных на краях или границах объектов.

Так, при определении влажности и эродированности почв рассчитывается отношение ЭПР поверхности на горизонтальной и вертикальной поляризациях (Кулемин, 1995)

$$R = \sigma_{\text{ГГ}} / \sigma_{\text{ВВ}}. \quad (1)$$

Две буквы при σ обозначают поляризации излученного и принятого сигналов соответственно.

Ошибки совмещения РЛИ ГГ-поляризации с РЛИ ВВ-поляризации приводят к тому, что при расчете R на границах объектов наблюдаются ложные величины соотношения (1). Аналогичный эффект имеет место при обработке цветных оптических изображений (Tang, 1994). Предположим, что изображение представлено в цветовых координатах красного, синего и зеленого (система координат *RGB*). Если произвести смещение одного из компонентов изображения относительно других, на границах объектов появляются ложные цветовые значения, которых нет на исходном изображении. Такой эффект может наблюдаться, например, в результате передачи цветовых компонентов изображения по информационному каналу с различными временными задержками или при черезстрочном сканировании изображения. Эффект ложных границ также возникает при покомпонентной медианной фильтрации цветных изображений, поскольку при наличии шума медианному фильтру свойственно смещать границы перепадов относительно истинного значения и разрушать таким образом структуру изображения.

Кроме того, методы раздельной фильтрации не учитывают корреляционных свойств компонентов сигнала, что вызывает искажение совместного изо-

бражения. Так, например, при использовании покомпонентного медианного фильтра, не имеющего стабильных точек (по терминологии, используемой в книге Хуанг (1984), поскольку значение векторного сигнала на выходе фильтра не всегда совпадает с одним из входных векторов, наблюдается нарушение структуры изображения (Astola, 1990).

Для устранения подобного эффекта в некоторых работах предлагается декоррелировать изображения, используя преобразование Карунена—Лоэва, что позволяет использовать методы покомпонентной фильтрации (Hunt, 1984). Однако большее распространение получили методы векторной медианной фильтрации, которые являются результатом развития методов обработки на основе порядковых статистик применительно к многоканальным сигналам (Tang, 1993а).

Рассмотрим свойства методов векторной медианной фильтрации и особенности представления многоканальных радиолокационных данных, позволяющие найти ряд интересных аналогий и новых применений.

Известно, что при представлении многоканальных РЛИ в виде отдельных изображений возникают трудности их визуального анализа. Однако если провести аналогию между компонентами многоканального РЛИ (например, изображений, отличающихся по частоте или поляризации) и тремя *RGB*-составляющими цветного изображения, становится очевидным, что трехканальное РЛИ может быть представлено как цветное изображение (Richards, 1986). Для этого необходимо провести геометрическое совмещение РЛИ и отождествить каждое изображение с соответствующим цветовым компонентом. Такая форма представления 3-канальных РЛИ является более компактной при визуализации и удобной при интерпретации. Аналогичным образом методы векторной фильтрации цветных оптических изображений и многоканальных сигналов могут быть использованы при обработке многоканальных РЛИ.

Отметим, что к настоящему времени предложено множество ранговых алгоритмов векторной фильтрации: модифицированные медианные фильтры (Tang, 1991); фильтр усеченного среднего (Estola, 1994); адаптивные ранговые фильтры (Alshatti, 1994); алгоритм векторных оценок на основе градиентного поиска (Tang, 1993б) и т. д. Некоторые из них обладают важными для обработки РЛИ свойствами. Например, предложенный Tang (1994) многоэтапный векторный фильтр позволяет устраниить на изображении эффект «ложных границ», вызываемый в многоканальных РЛИ ошибками совмещения, а также подчеркнуть резкие перепады.

Однако многие алгоритмы векторной фильтрации, являясь эффективными для обработки оптических изображений, не могут непосредственно использоватьсь для решения рассматриваемой в данной работе задачи. Основной трудностью применения векторной медианной фильтрации для обработки РЛИ является существенное различие статистических характеристик помеховой составляющей сигналов и слабая взаимная корреляция изображений (Зеленский, 1994), в то время как составляющие цветного оптического изображения характеризуются высокой взаимной корреляцией и аналогичными статистическими свойствами шумов. Таким образом, при выборе векторного фильтра необходимо учитывать возможность его адаптации к особенностям помех РЛИ.

Наиболее подходящими для фильтрации многоканальных РЛИ с нашей точки зрения являются предложенный Astola (1990) векторный медианный гибридный фильтр, а также его модификация — многоэтапный фильтр, предложенный в работе (Tang, 1994). Особенность этих фильтров заключается в разбиении окна фильтрации на субокна, что дает возможность выполнить раздельную предварительную фильтрацию компонентов многоканального изображения. Кроме того, такие фильтры по сравнению с векторными медианными фильтрами требуют значительно меньших вычислительных затрат. Однако эти фильтры ориентированы на обработку оптических изображений и не могут использоваться для многоканальных РЛИ без учета их характеристик и требований к алгоритмам фильтрации.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ РЛИ И ТРЕБОВАНИЯ К АЛГОРИТМУ СОВМЕСТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Поскольку выбор эффективного алгоритма фильтрации определяется характеристиками обрабатываемых сигналов, следует рассмотреть некоторые особенности многоканальных РЛИ. Вопросам изучения характеристик радиоизображений, формируемых радиолокатором бокового обзора (РБО) и радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) посвящено множество работ (Ахметьянов, 1987; Белокуров, 1990; Lukin, 1993). Тем не менее, отметим здесь некоторые важные особенности, которые должны учитываться в алгоритмах фильтрации РЛИ.

1. Одновременное наличие нескольких типов помех: мультиплексивных, аддитивных, импульсных. Доминирующее влияние оказывают мульти-

пликативные помехи (спекл-шум).

2. Проявление мультиплакативных помех определяется структурой системы формирования изображений (СФИ) — числа накапливаемых отсчетов, вида системы: РБО, РСА. Для СФИ РБО закон распределения мультиплакативных помех близок к нормальному. В системах РСА закон распределения помех для однородного участка зависит от числа взглядов и методики представления данных. Если изображение сформировано одновзглядовым РСА, закон распределения помех экспоненциальный или релеевский при представлении данных в виде модульного значения. Для многовзглядовых РСА мультиплакативные помехи характеризуются γ -распределением (Ахметьянов, 1987).

3. На однородных участках соседние отсчеты, как правило, являются коррелированными. Интервал корреляции занимает 2—4 отсчета изображения, что должно учитываться при выборе размеров окна фильтра.

4. Отсутствие полной и достоверной априорной информации о характеристиках объектов подстилающей поверхности, их форме и размерах, а также широкий диапазон контрастов на изображении.

5. Наличие малоразмерных и протяженных объектов, резких перепадов.

6. Низкий уровень взаимной корреляции между исходными РЛИ в многочастотных системах ДЗ, использующих мм-, см- и дм-диапазоны радиоволн. Наиболее коррелированными являются изображения мм- и см-диапазонов — коэффициент корреляции $R \approx 0.6$. Наименьшая степень корреляции наблюдается между мм- и дм-изображениями, для которых $R \approx 0.2$. Фильтрация РЛИ приводит к увеличению коэффициента корреляции на 20—70 % (Зеленский и Лукин, 1994).

Требования к алгоритму фильтрации также определяются целями обработки изображений. Для большинства задач это

- высокая эффективность подавления спекл шума на однородных участках изображения;
- устранение импульсных помех;
- сохранение малоразмерных объектов и минимальное искажение границ;
- низкие вычислительные затраты.

Во многом для существующих методов фильтрации одноканальных РЛИ рассмотренные требования являются противоречивыми. Например, широко используемый медианный фильтр устраняет импульсные помехи, но не сохраняет малоразмерных и протяженных объектов. Линейный фильтр успешно подавляет мультиплакативные помехи, но сглаживает границы. Эффективными с нашей точки зрения являются аддитивные нелинейные мето-

ды фильтрации (фильтры Ли, Фроста, сигма-фильтр), обеспечивающие компромисс между подавлением шума и сохранением границ. Для фильтрации импульсных помех при одновременном подавлении спекл-шума целесообразно использовать аддитивные алгоритмы на основе порядковых статистик (Lukin, 1995). Однако при фильтрации многоканальных изображений перспективным, на наш взгляд, является многоэтапный подход, основанный на комбинации методов раздельной аддитивной фильтрации каждого изображения и их последующей векторной фильтрации.

МНОГОЭТАПНАЯ ВЕКТОРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ

Развитие методов векторной медианной фильтрации основывается на представлении многоканальных данных в виде векторов и оценке центров их распределения. Одной из таких оценок является вектор среднего значения. Однако при фильтрации оценка среднего приводит к размытию границ объектов и не обладает устойчивостью к выбросам. Более эффективным подходом является использование оценок, основанных на обобщении понятий порядковых статистик и упорядочивания данных, используемых в одноканальных фильтрах на основе порядковых статистик. Поскольку векторные отсчеты не могут быть упорядочены как в одноканальном варианте (когда медиана является центральным отсчетом упорядоченной выборки), предложен иной подход.

Известно, что в скалярном варианте медиана имеет минимальную сумму расстояний к другим отсчетам выборки и может быть вычислена без операции упорядочивания выборки (Tang, 1993a). Такое определение медианы применимо также и к векторным отсчетам. Кроме того, требуется, чтобы векторная медиана обладала следующими свойствами: имела устойчивые точки; совпадала с обычной медианой, когда размерность векторного сигнала $p = 1$; чтобы отсутствовали на выходе медианного фильтра отсчеты, отсутствующие на его входе. Следовательно, требуется, чтобы векторная медиана совпадала с одним из отсчетов в окне фильтра и имела минимальную сумму расстояний к остальным отсчетам.

Обозначим отсчеты p -канального изображения вектором

$$\mathbf{x}(\mathbf{n}) = (x_1(n_1, n_2), x_2(n_1, n_2), \dots, x_p(n_1, n_2)),$$

где n_1 — номер строки, а n_2 — номер столбца многоканального изображения. Используя векторное представление, введем операцию медианы (As-

tola, 1990). Обозначим \mathbf{x}_{vm} векторную медиану N многоканальных отсчетов векторов $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N \in W$. Тогда

$$\mathbf{x}_{\text{vm}} = \min_{\mathbf{x}_{\text{vm}} \in W} \sum_i \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|, \quad (2)$$

где $\|\cdot\|$ обозначает норму L , W — окно фильтра, N — количество отсчетов в окне (выбирается нечетным).

По определению векторной медианы значение \mathbf{x}_{vm} выбирается из входных отсчетов, попавших в окно фильтра. Этим объясняется наличие у векторной медианы стабильных точек (Tang, 1993а). Норма расстояния между отсчетами L определяется в соответствии с законом распределения помех таким образом, чтобы оценка сигнала \mathbf{x}_{vm} соответствовала максимуму апостериорной плотности вероятности. Так, для гауссовского распределения L соответствует возведенному в квадрат евклидову расстоянию, а для симметричного экспоненциального распределения — линейному расстоянию.

Поскольку выходным значением медианного фильтра является один из входных отсчетов, векторная медиана имеет ограниченные возможности в подавлении помех. Для повышения эффективности подавления помех аналогично КИХ (конечная импульсная характеристика) медианным гибридным фильтрам, в (Astola, 1990) предложен векторный медианный гибридный фильтр (ВМГФ), объединяющий векторную медиану с КИХ субфильтрами. На рис. 1 изображен трехточечный ВМГФ, выходным значением которого является векторная медиана выходных сигналов субфильтров. Поскольку количество субфильтров значительно меньше числа отсчетов в окне W , ВМГФ по сравнению с медианным фильтром требует значительно меньших вычислительных затрат. Использование в ВМГФ субфильтров позволяет осуществить его модификацию применительно к многоканальным РЛИ, для которых помехи компонентов сигнала отличаются своими характеристиками. Целесообраз-

но заменить КИХ субфильтры более эффективными для РЛИ адаптивными фильтрами на основе порядковых статистик (сигма-фильтр, фильтр Ли, Фроста).

Комбинирование векторной медианы с субструктурами позволяет также повысить детальность фильтруемого изображения за счет сокращения длины перепадов сигнала и границ объектов (Tang, 1993а). В алгоритме фильтрации предлагается использовать свойство векторной медианы, согласно которому на перепаде сигнала медиана является центральным отсчетом в окне фильтра. В том случае, если текущий отсчет является векторной медианой, выполняется операция повышения детальности, в противном случае текущий отсчет не изменяется. Для подавления помех, как и в модификации ВМГФ, используются адаптивные субфильтры и векторная медиана вычисляется по отфильтрованным отсчетам. Возможные варианты расположения окон субфильтров показаны на рис. 2.

При расположении субфильтров в соответствии с рис. 2, *a*, векторная фильтрация позволяет подчеркнуть вертикальные перепады, а в случае рис. 2, *b* — горизонтальные перепады изображения. Расположение рис. 2, *c* объединяет предыдущие варианты.

Процедура фильтрации состоит из следующих этапов:

- предварительная фильтрация;
- определение направления, в котором сигнал изменяется наиболее интенсивно;
- подчеркивание перепада, если центральный отсчет в окне фильтра является векторной медианой.

Рассмотрим процедуру формирования многоэтапного фильтра (ММФ), позволяющего учитывать особенности многоканальных РЛИ.

Обозначим $W[m, n]$ отсчеты многоканального изображения, попавшие в окно субфильтра с центром в точке (m, n) . Будем использовать расположе-

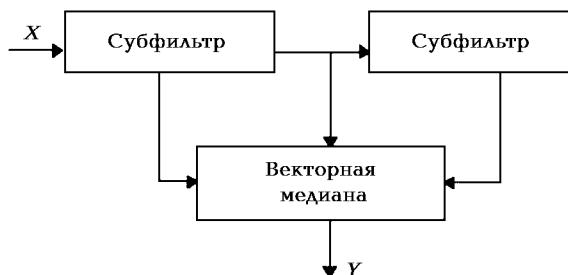


Рис. 1. Структурная схема медианного гибридного фильтра

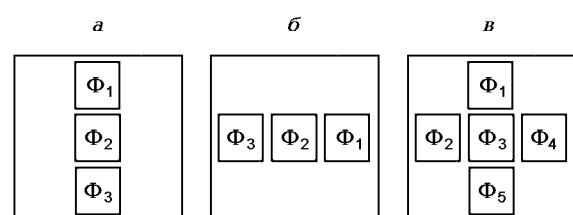


Рис. 2. Возможные варианты расположения окон субфильтров

ние субфильтров, показанное на рис. 2, б, поскольку в данном случае фильтрация позволяет подчеркнуть перепады сигнала как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Обозначим

$$\begin{aligned} y_1 &= \Phi_1(x_i), & x_i \in W[m, n - K], \\ y_2 &= \Phi_2(x_i), & x_i \in W[m - K, n], \\ y_3 &= \Phi_3(x_i), & x_i \in W[m, n], \\ y_4 &= \Phi_4(x_i), & x_i \in W[m + K, n], \\ y_5 &= \Phi_5(x_i), & x_i \in W[m, n + K], \end{aligned}$$

где $\Phi_j(x_i)$, $j = 1, 2, \dots$ — субфильтры, а K — расстояние между центральным отсчетом и центрами субфильтров. Субфильтры $\Phi_j(x_i)$ осуществляют предварительную обработку каждой составляющей многоканального РЛИ в отдельности и выбираются таким образом, чтобы обеспечить эффективную фильтрацию помех при сохранении мелких деталей изображения. Затем, для повышения надежности обнаружения перепадов производится дополнительная фильтрация линейным фильтром с окном размерами 3×3 элемента:

$$\begin{aligned} z_1 &= L\Phi_1(y_i), & y_i \in LW[m, n - K], \\ z_2 &= L\Phi_2(y_i), & y_i \in LW[m - K, n], \\ z_3 &= L\Phi_3(y_i), & y_i \in LW[m, n], \\ z_4 &= L\Phi_4(y_i), & y_i \in LW[m + K, n], \\ z_5 &= L\Phi_5(y_i), & y_i \in LW[m, n + K], \end{aligned}$$

где $L\Phi_j(y_i)$, $j = 1, 2, \dots$, — линейные фильтры с окном LW . Обозначим

$$\begin{cases} z_1^* = z_1, & y_1^* = y_1 \quad \text{при } \|z_2 - z_4\| < \|z_1 - z_5\|, \\ z_1^* = z_2, & y_1^* = y_2 \quad \text{при } \|z_2 - z_4\| \geq \|z_1 - z_5\|, \\ z_2^* = z_5, & y_2^* = y_5 \quad \text{при } \|z_2 - z_4\| < \|z_1 - z_5\|, \\ z_2^* = z_4, & y_2^* = y_4 \quad \text{при } \|z_2 - z_4\| \geq \|z_1 - z_5\|, \\ z_3^* = z_3, & y_3^* = y_3, \end{cases}$$

Для краткости введем параметры d_{i-j} :

$$\begin{cases} d_{1-2} = \|z_1^* - z_2^*\|, \\ d_{1-3} = \|z_1^* - z_3^*\|, \\ d_{2-3} = \|z_2^* - z_3^*\|. \end{cases}$$

Значение отсчета на выходе ММФ y_{MMF} определяется по следующему алгоритму:

$$y = \begin{cases} y_1^*, & \text{при } z_3^* = VM(z_1^*, z_2^*, z_3^*), \\ & d_{1-3} < d_{2-3}, d_{1-2} > t; \\ y_2^*, & \text{при } z_3^* = VM(z_1^*, z_2^*, z_3^*), \\ & d_{1-3} \geq d_{2-3}, d_{1-2} > t; \\ y_3^*, & \text{при } z_3^* \neq VM(z_1^*, z_2^*, z_3^*); \\ & \text{или при } d_{1-2} \leq t, \end{cases}$$

где $VM(\cdot)$ обозначает операцию векторной медианы (2); t — константа, определяющая чувствительность фильтра к перепадам. Значение t определяется минимальную интенсивность перепада сигнала, при которой будет осуществляться его подчеркивание. Норма $\|\cdot\|$ выбирается на основе закона распределения помех на выходе предварительных фильтров. В силу центральной предельной теоремы можно считать, что после предварительной фильтрации помехи имеют гауссовское распределение. Это подтверждает и анализ гистограмм для реальных данных. Тогда по критерию максимума апостериорной плотности вероятности оптимальным для векторной медианы является квадрат расстояния Махalanобиса (Nikolaidis, 1995):

$$\|z_1 - z_2\|_M^2 = (z_1 - z_2)^T \Sigma^{-1} (z_1 - z_2),$$

где Σ — ковариационная матрица отсчетов многоканального изображения.

Поскольку помехи отдельных РЛИ можно считать взаимно некоррелированными, то ненулевыми в ковариационной матрице будут только диагональные элементы, равные дисперсии помех на выходе линейных субфильтров $L\Phi_j(y_i)$. Учитывая мультиплективный характер помех РЛИ, значение дисперсии помех на выходе фильтра i -й составляющей изображения может быть получено из выражения

$$\sigma_{fi}^2 = K_{fi} \sigma_{0i}^2 z_i^2.$$

Здесь σ_{0i}^2 — относительная дисперсия помех, определяемая по однородному участку изображения, а z_i — интенсивность сигнала в i -м канале. Коэффициент K_{fi} позволяет учесть степень подавления помех при фильтрации.

Значения коэффициентов подавления помех субфильтрами в каждом канале могут быть различными в зависимости от используемого алгоритма фильтрации и определяются в результате расчетов или численного моделирования. При этом следует учитывать особенности используемого фильтра: аддитивные свойства при фильтрации резких перепадов и малоразмерных объектов, изменение характеристик в зависимости от параметров помех и т. д.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО МНОГОЭТАПНОГО ФИЛЬТРА

Поскольку алгоритм фильтрации состоит из двух этапов (предварительная покомпонентная фильтрация и векторная фильтрация), свойства ММФ во многом определяются характеристиками субфильтров (алгоритмов обработки, используемых на первом этапе). Поэтому рассмотрим свойства предварительной и векторной фильтрации как отдельные факторы, определяющие основные свойства ММФ.

Подавление импульсных помех. Поскольку выходное значение ММФ является выходным значением одного из субфильтров, подавление импульсных помех в основном определяется свойствами субфильтров. При этом наибольшее влияние при подавлении помех оказывает центральный субфильтр.

Подавление флюктуационных помех также во многом определяется субфильтрами и зависит от выбора порога чувствительности к перепадам t . Так, при увеличении значения t векторный фильтр на втором этапе будет оказывать все меньшее влияние и результаты фильтрации определяются свойствами субфильтров.

Сохранение малоразмерных и протяженных объектов зависит от свойств субфильтров сохранять мелкие детали изображения, поскольку в случае отличия выходного значения центрального субфильтра от значений остальных субфильтров, результат фильтрации определяется центральным субфильтром.

Подчеркивание перепадов сигнала. Обозначим через M размер окна субфильтров, а через K — расстояние между ними. Рассмотрим наклонный перепад векторного сигнала:

$$x_i = \begin{cases} D_1, & i \leq 0, \\ r_i, & 0 < i \leq L, \\ D_2, & L < i, \end{cases}$$

где D_1 и D_2 — векторные константы, r_i — последовательность отсчетов перепада, $r_0 = D_1$, $r_{L+1} = D_2$, L — длина перепада сигнала. При $t = 0$ ММФ преобразует наклонный перепад сигнала протяженностью $L < (2K - M)$ в ступенчатый перепад. Пусть центр окна ММФ находится в отсчете k .

При $k < L/2$ выполняется неравенство

$$\|z_1^* - z_3^*\| < \|z_2^* - z_3^*\|.$$

При $k > L/2$ имеем

$$\|z_1^* - z_3^*\| > \|z_2^* - z_3^*\|$$

При $0 < k \leq L$ соответственно

$$z_3^* = VM(z_1^*, z_2^*, z_3^*).$$

Тогда при $k < L/2$ выход ММФ равен $y_1^* = D_1$, а при $k > L/2$ получаем $y_2^* = D_2$.

Нетрудно показать, что если $L > (2K - M)$, ММФ позволяет сократить длину перепада сигнала до значения $L' = [L - (2K - M)]$.

Приведенные свойства ММФ позволяют сформулировать некоторые рекомендации относительно выбора алгоритмов предварительной фильтрации. Как и при обработке одноканальных радиолокационных изображений, используемые субфильтры должны сохранять мелкие детали изображения, эффективно подавлять помехи и обладать устойчивостью к выбросам. Имеющийся у авторов опыт позволяет рекомендовать использовать модифицированный сигма-фильтр (Зеленский и Мельник, 1995) для обработки РБО-изображений и двухэтапный алгоритм на основе фильтра Ли и КИХ-медианного гибридного фильтра при обработке РСА-изображений (Kalmykov, 1996).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ММФ

Проиллюстрируем эффективность предлагаемого алгоритма фильтрации на тестовых и реальных трехканальных радиоизображениях.

В качестве тестового изображения выбрана мозаичная модель, состоящая из набора плоских участков с различной формой, площадью, интенсивностью, что позволяет проанализировать эффективность подавления помех на однородных участках изображения, а также степень сохранения границ объектов и специфические искажения их формы. В модели изображения учитывается зависимость отражающих свойств объектов ДЗ от длины радиоволн путем варьирования величины контрастов объектов над фоном. Для визуального анализа тестового изображения разработано программное обеспечение, позволяющее представлять трехканальное РЛИ на цветном мониторе в RGB-системе цветовых координат. На рис. 3 в монохромном отображении показано исходное тестовое трехчастотное РЛИ, содержащее: малоразмерные объекты диаметром 5 дискретных отсчетов; протяженный объект шириной 5 отсчетов; объекты с различной пространственной конфигурацией, размеры которых превышают размер окна фильтра.

Для моделирования ошибок геометрического совмещения РЛИ и исследования возможностей устранения эффекта, вызванного неточностью совмещения, два компонента исходного изображения смешены относительно третьего на 1 пиксель в противоположных направлениях. Для изучения

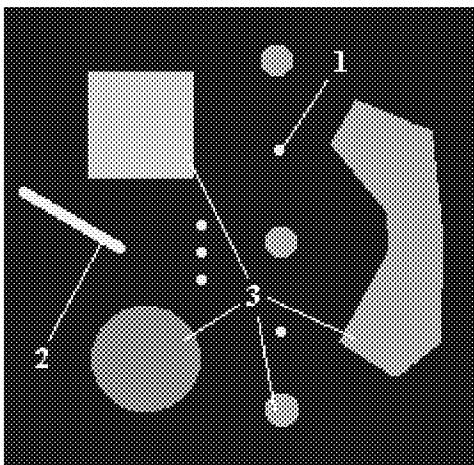


Рис. 3. Исходное тестовое изображение

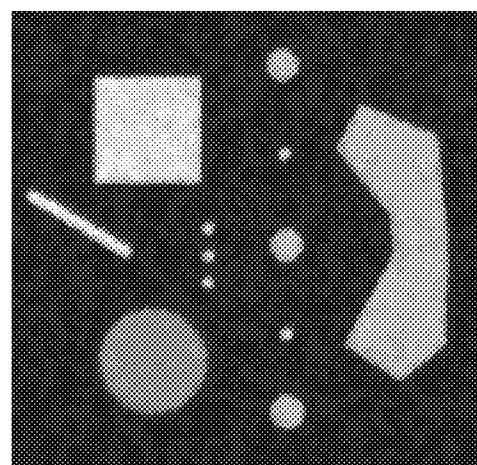


Рис. 5. Тестовое РЛИ после покомпонентной фильтрации

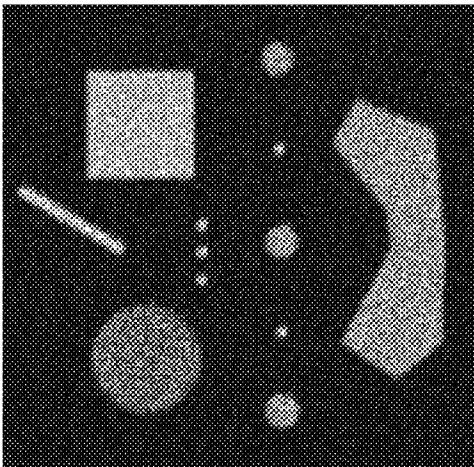


Рис. 4. Модель трехканального РЛИ

эффекта подчеркивания перепадов сигнала произведено «размытие» исходного изображения линейным фильтром 3×3 . Моделирование помеховой обстановки осуществлено в соответствии с характеристиками помех реальных РЛИ. Так, для изображений, моделирующих РЛИ РБО мм- и см-диапазонов помехи выбраны в виде некоррелированного мультиплексивного нормального шума с относительными дисперсиями $\sigma_{0\text{мм}}^2 = 0.005$ и $\sigma_{0\text{см}}^2 = 0.015$. Изображение, моделирующее одновзглядовый РСА дм-диапазона характеризуется мультиплексивным шумом с рэлеевским законом распределения и относительной дисперсией $\sigma_{0\text{дм}}^2 = 0.273$.

На рис. 4 в монохромном отображении представлена модель зашумленного тестового изображения. С целью эффективного подавления спекла и импульсных помех, а также сохранения малоразмерных и протяженных объектов для мм- и см-изобра-

жений на этапе предварительной фильтрации использован модифицированный сигма-фильтр с размерами окна 7×7 элементов (Зеленский, 1995). Для дм-изображения применен алгоритм, основанный на двухэтапной обработке фильтром Ли с окном 7×7 элементов и медианным гибридным фильтром (модификация 3LH+) (Kalmykov, 1996) с окном 5×5 пикселов.

На рис. 5 показано изображение, полученное в результате предварительной покомпонентной фильтрации тестового изображения. После раздельной фильтрации на тестовом РЛИ наблюдается эффект «ложных границ», а также смазанность перепадов сигнала. Следующий этап фильтрации заключается в обработке изображения, представленного на рис. 5, предлагаемым векторным фильтром. Учитывая величину характерных ошибок геометрического совмещения РЛИ в 1–2 отсчета, размер окна векторного фильтра выбран равным $W = 5 \times 5$ отсчетов. Величина коэффициента чувствительности фильтра t определяется характеристиками субфильтров и интенсивностью перепадов сигнала на границе объектов. Коэффициенты подавления помех субфильтрами определены экспериментальным путем по тестовым изображениям и обобщены для однородных и активных участков. Для мм- и см-изображений $K_{f1} = K_{f2} = 0.035$, а для дм-изображений — $K_{f3} = 0.018$.

На рис. 6 приведено контурное изображение, иллюстрирующее операцию векторной фильтрации. При отсутствии в окне фильтрации перепада сигнал на выходе векторного фильтра определяется центральным субфильтром, а при обнаружении перепада — одним из боковых субфильтров, расположение которых показано на рис. 2, в. Выбор для каждого отсчета изображения одного из субфильт-

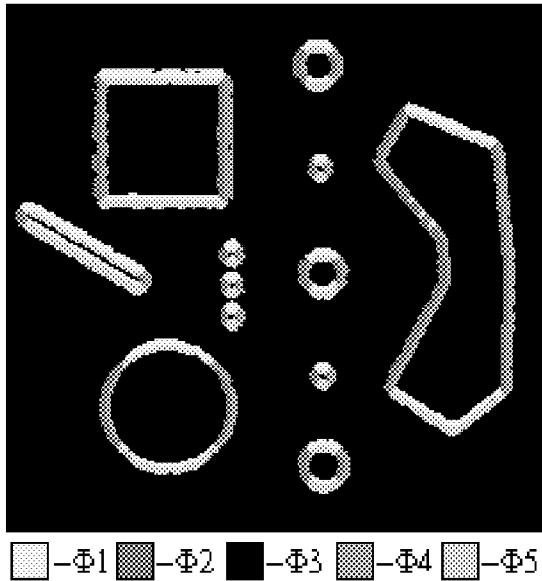


Рис. 6. Контурный препарат тестового изображения

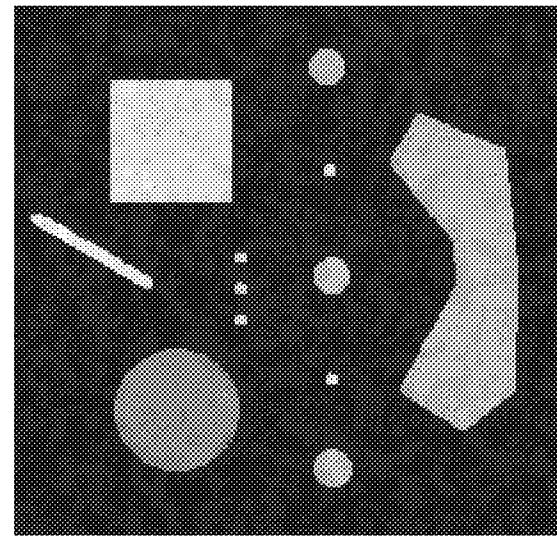


Рис. 7. Тестовое РЛИ после векторной фильтрации

ров иллюстрируется на рис. 6 различными значениями яркости.

На рис. 7 представлено изображение, полученное в результате векторной фильтрации. Из визуального анализа рис. 7 следует, что использование векторного фильтра позволяет подчеркнуть границы объектов и устранить эффект ошибок совмещения.

Для количественной оценки результатов фильтрации тестовых изображений использованы следующие показатели:

$$\begin{aligned}\eta_s &= \sqrt{\frac{1}{K_G} \sum_{m=1}^3 \sum_{i,j} (I_{i,j}^m - \hat{I}_{i,j}^m)^2}, \quad i, j \in G, \\ \eta_A &= \frac{1}{K_G} \sum_{m=1}^3 \sum_{i,j} |I_{i,j}^m - \hat{I}_{i,j}^m|, \quad i, j \in G, \\ R &= \left(\sum_{m=1}^3 \sum_{i,j} I_{i,j}^m \hat{I}_{i,j}^m \right) / \sqrt{\left(\sum_{m=1}^3 \sum_{i,j} I_{i,j}^{m2} \right) \left(\sum_{m=1}^3 \sum_{i,j} \hat{I}_{i,j}^{m2} \right)},\end{aligned}$$

где η_s и η_A — соответственно среднее квадратичное и модульное отклонения между исходным $I_{i,j}^m$ и отфильтрованным $\hat{I}_{i,j}^m$ изображениями; G обозначает анализируемую область, K_G — количество отсчетов, попавших в G , а m — номер компонента многоканального РЛИ; R — коэффициент корреляции между исходным и отфильтрованным изображениями. Значения качественных показателей для вариантов раздельной и векторной фильтрации приведены в таблице.

Как следует из значений качественных показателей, для однородных участков тестового изображе-

Результаты фильтрации тестовых изображений

Используемый метод фильтрации	Показатели качества фильтрации	Область расчета качественных показателей G		
		Однородный участок	Окрестности границ	По всему изображению
Раздельная фильтрация	η_A	0.909	7.376	1.723
	η_s	1.725	12.606	4.755
	R	0.9984	0.9605	0.9895
Векторная фильтрация	η_A	0.908	3.063	1.179
	η_s	1.723	7.242	3.033
	R	0.9984	0.9875	0.9958

ния значения параметров практически идентичны, и эффективность фильтрации полностью определяется свойствами субфильтров. На участках, соответствующих окрестностям границ объектов 1, 2, 3 (рис. 3), после векторной фильтрации наблюдается значительное увеличение корреляции. Параметр η_A уменьшается в 2.4 раза, а η_s — в 1.74 раза, что свидетельствует о увеличении сходства между исходным и обработанным изображениями.

Проиллюстрируем применение векторного фильтра для обработки реальных многоканальных РЛИ. На рис. 8 в монохромном отображении представлено трехчастотное РЛИ мм-, см- и дм-диапазонов предоставленное нам для обработки харьковским Центром радиофизического зондирования Земли НАНУ и НКАУ.

Как следует из рис. 8, трехканальное РЛИ имеет высокий уровень помех и содержит малоразмерные объекты. На рис. 9 показаны результаты раздельной фильтрации модифицированным сигма-фильт-

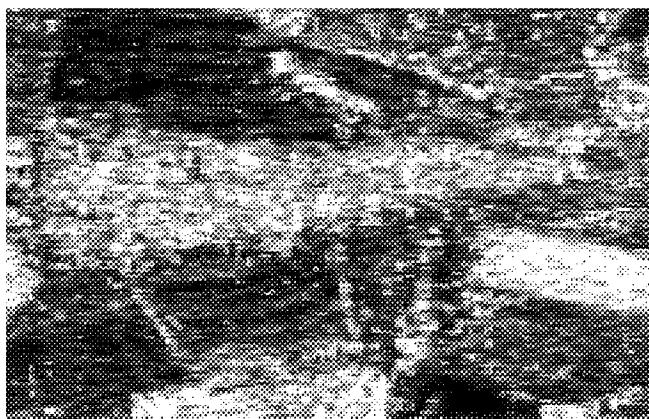


Рис. 8. Трехчастотное РЛИ, полученное многоцелевой системой ДЗ

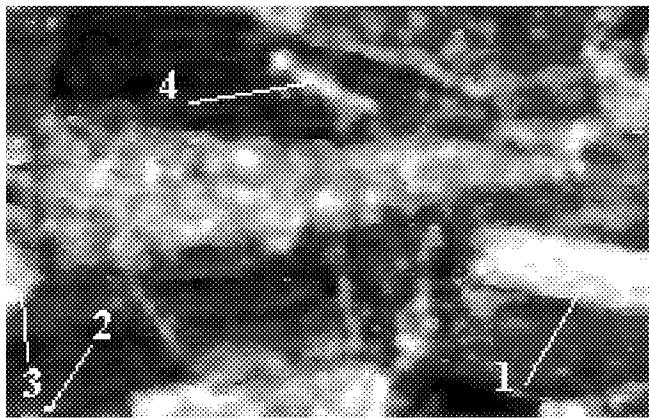


Рис. 9. Результаты покомпонентной фильтрации трехчастотного РЛИ

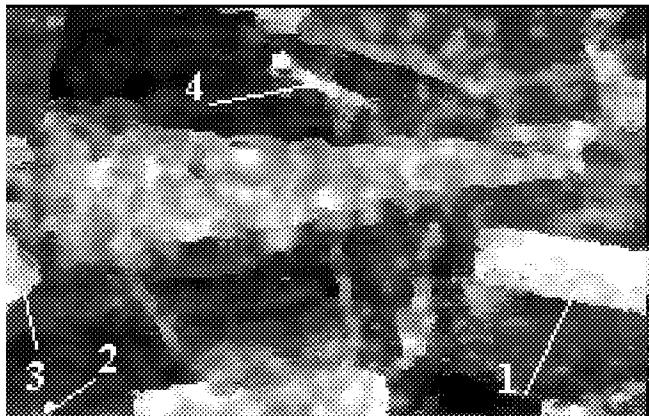


Рис. 10. Результаты векторной фильтрации трехчастотного РЛИ

ром мм-, см-составляющих, а также фильтром Ли и медианным гибридным фильтром дм-составляющей. При раздельном рассмотрении мм-, см- и дм-изображений наблюдаются четкие границы контрастных объектов, однако при совместном ото-

брожении (рис. 9) границы объектов 1, 3 размыты, что свидетельствует о наличии ошибок взаимной привязки компонент трехканального РЛИ.

На рис. 10 показано изображение, обработанное векторным фильтром. Наблюдаются четкие границы и перепады на объектах 1 и 3. Сравнение с рис. 9 свидетельствует о сохранении векторным фильтром малоразмерного объекта 2 и протяженного объекта 4. Отсутствие на обработанном изображении импульсных помех объясняется рабочими свойствами предлагаемого метода фильтрации.

Представленные результаты обработки реальных трехчастотных РЛИ, а также количественные оценки обработанных тестовых изображений свидетельствуют о преимуществах методики векторной обработки многоканальных РЛИ по сравнению с традиционными методами покомпонентной фильтрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что предложенный метод векторной фильтрации многоканальных РЛИ обладает рядом преимуществ по сравнению с методами раздельной фильтрации. Многоэтапная схема обеспечивает высокую эффективность подавления помех, обладает устойчивостью к выбросам и объединяет достоинства методов векторной и раздельной фильтрации. Из экспериментальных результатов следует, что многоэтапный фильтр по эффективности подавления помех не уступает алгоритмам раздельной фильтрации и сохраняет мелкие детали изображения. Использование корреляционных связей между компонентами изображения позволяет устраниить эффекты, связанные с ошибками геометрического совмещения. Свойство подчеркивания границ облегчает визуальное восприятие изображения и повышает надежность алгоритмов выделения контуров, определения формы и размеров объектов.

Предложенный метод фильтрации может быть использован для обработки многоканальных радиолокационных изображений различного типа (многополяризационных, многочастотных) и позволяет повысить качество обработки и достоверность интерпретации данных дистанционного зондирования.

Ахметьянов В. Р., Пасмурев А. Я. Обработка радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования Земли // Зарубежная радиоэлектроника.—1987.—№ 1.—С. 70—81.

Белокуров А. А. Методы сглаживания спектр-шума на радиолокационных изображениях земной поверхности // Зарубежная радиоэлектроника.—1990.—№ 6.—С. 26—35.

Зеленский А. А., Кулемин Г. П., Лукин В. В., Мельник В. П.

- Локально-адаптивные устойчивые алгоритмы обработки радиоизображений. — Харьков, 1993.—37 с.—(Препринт / АН Украины. ИРЭ; № 93-8).
- Зеленский А. А., Лукин В. В. Обработка многочастотных изображений: подход, методы и алгоритмы // Современная радиолокация: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Киев: НИЦ «АНПРЭЛ» 1994.—С. 77—80.
- Зеленский А. А., Мельник В. П., Пономаренко Н. Н. Модифицированный двухпроходный сигма-фильтр для мультиплексивного нормального шума // Тез. докл. Междунар. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». — Туапсе, 1995.—С. 108.
- Калмыков А. И., Фукс И. М. Проблемы рассеяния радиоволн подстилающей поверхностью в задачах дистанционного зондирования // Современная радиолокация: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Киев, 1994.—С. 10—15.
- Хуанг Т. С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г. Дж. и др. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. — М.: Радио и связь, 1984.—224 с.
- Alshatti W., Bolon P., Lambert P. A Class of nonlinear vector filters application to multi-spectral image filtering // SIGNAL PROCESSING VII: Theories and applications / Eds M. Holt, C. Cowan, P. Grant, W. Sandham. — 1994.
- Astola J., Haavisto P., Neuvo Y. Vector median filters // Proc. IEEE.—Apr. 1990.—78.—P. 678—689.
- Estola Kari-Pekka. Multivariate median and trimmed mean filters // SIGNAL PROCESSING VII: Theories and applications / Eds M. Holt, C. Cowan, P. Grant, W. Sandham. — 1994.
- Freeman A., Evans D., Zyl J. J. SAR Applications in the 21st century // Proc. Intern. Conf. EUSAR96, Konigswinter, Germany, 26—28 March, 1996. — Berlin: Verlag, 1996.—P. 25—30.
- Hunt B. R. Karhunen-loeve multispectral image restoration, part I: Theory // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Proc.—1984.—vol. ASSP-32(3).—P. 592—599.
- Kalmykov A. I., Lukin V. V., Zelensky A. A. Some techniques and algorithms of SAR image enhancement on stages of primary and secondary signal processing // Proc. Intern. Conf. EUSAR96, Konigswinter, Germany, 26—28 March, 1996. — Berlin: Verlag, 1996.—P. 135—138.
- Keydel W. SAR techniques and technology, its present state of the art with respect to user requirements // Proc. Intern. Conf. EUSAR96, Konigswinter, Germany, 26—28 March, 1996. — Berlin: Verlag, 1996.—P. 19—24.
- Kulemin G. P., Kurekin A. A., Lukin V. V., Zelensky A. A. MM-wave multichannel remote sensing radar systems and algorithms of image processing // Digest of Intern. Conf. ICMWFST'94, Guanzhou, China. Aug. 1994.—P. 359—362.
- Kulemin G. P., Kurekin A. A., Lukin V. V., Zelensky A. A. Soil moisture and erosion degree estimation from multichannel microwave remote sensing data // Remote sensing for agriculture, forestry and natural resources // Proc. SPIE/EUROPTO Ser., Sept., Paris, 1995 / Eds Edwin T. Engman, Gerard Guyot, Carlo Marino. — Paris, 1995.—2585.—P. 144—155.
- Lukin V. V., Miao Zhenjiang, Yuan Baozong. Multifrequency remote sensing radar images processing and analysis // Proc. 1993 IEEE Region 10 Intern. Conf. Computers, Communication and Automation. — 1993, October 19—21. — Beijing, China.—P. 1042—1045.
- Lukin V. V., Kurekin A. A., Melnik V. P., Zelensky A. A. Application of order statistic filtering to multichannel radar image processing // Proc. of IS&T/SPIE Symp. on Electronic Imaging: Science and Technology. — San Jose, California, USA. — Feb. 5—10, 1995.—Vol. 2424A.—P. 302—312.
- Nikolaidis N., Pitas I. Optimal multichannel L filters based on reduced ordering // IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Proc. / Ed. I. Pitas. — Neos Marmaras, Halkidiki, June 1995.—Vol. II.
- Richards J. A. Remote sensing digital image analysis. An introduction. — Berlin: Springer, 1986.—281 p.
- Tang K. Nonlinear multivariate signal processing with application to color image processing: Thesis for the degree of doctor of technology. University of technology. — Tampere.—1993. — 282 p.
- Tang K., Astola J., Neuvo Y. Multivariate estimate based on gradient search // Inter. Conf. Image Proc.: Theory and applications, 14—16 June, San Remo, Italy, 1993. — Elsevier Science Publ. B. V., 1993.—P. 279—282.
- Tang K., Astola J., Neuvo Y. Multichannel edge enhancement in color image processing // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, October 1994. — Vol. 4.—N 5.
- Tang K., Neuvo Y. A Class of vector median filters with the extended forms // The Intern. Conf. on Digital Signal Proc., 4—6 Sept., Florence, Italy, 1991. — Elsevier Science Publ. B. V., 1991.—P. 288—293.

APPLICATION OF VECTOR MEDIAN FILTERING METHODS TO MULTICHANNEL REMOTE SENSING RADAR DATA PROCESSING

A. A. Kurekin, V. V. Lukin, and A. A. Zelenskii

A possibility to apply the vector median filtering methods to joint processing of radar images is considered. It is shown that an approach based on two-stage filtering algorithms is efficient and allows one to take into account differences in multichannel radar image statistical characteristics and correlation properties of vector signals. The vector filter elaborated possesses edge-enhancing properties and permits elimination of the effect of false object edges caused by the errors of superimposing mutual radar images. The proposed filtering methods are analyzed on the basis of simulated and real multichannel radar images.

УДК 621.391

Безопасность информации в космических системах связи и управления

И. Д. Горбенко¹, Ю. В. Стасев²

¹ Інститут інформаційних технологій НАН України, Харків

² Харківський військовий університет

Надійшла до редакції 10.04.96

Пропонується новий метод забезпечення безпеки інформації в космічних системах зв'язку та керування, що базується на динамічній передачі сигналів. Доводиться адекватність даного методу з методами криптографічного перетворення інформації. Формулюються і доводяться необхідні і достатні умови реалізації динамічного режиму функціонування.

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание и применение систем космической связи и управления является одним из наиболее развитых направлений практического использования космического пространства. В настоящее время созданы и десятки лет эксплуатируются более 40 систем космической связи и управления как коммерческого, так и военного назначения. Опыт эксплуатации этих систем показывает, что требуемое качество их функционирования в существенной мере зависит от решения проблемы безопасности передаваемой информации. Решение проблемы безопасности информации, передаваемой в космических системах связи и управления, связывают с решением проблем помехозащищенности и имитостойкости. Многочисленные исследования показывают, что в настоящее время эти проблемы решаются раздельно. Проблема помехозащищенности решается либо за счет увеличения энергетических ресурсов космической радиолинии, либо за счет применения на физическом уровне сложных сигналов с частотной избыточностью. Требуемая имитостойкость обеспечивается посредством преобразования дискретной информации с использованием специальной аппаратуры.

Однако в такой концепции защиты информации, как показали исследования, не реализуются потенциальные возможности космических систем связи и управления, достигаемые за счет динамической передачи сигналов, при которой соответствие «информационный символ — сигнал-переносчик» изменяется во времени по псевдослучайному закону. Идея динамической передачи сигналов была высказана в 1980-х годах и нашла воплощение в системе MILSTAR (США) (Тузов и др., 1993). Ряд фирм, например Transcrypt Europe (Великобритания), Metricom (США) и другие, связывают решение проблемы безопасности информации с реализацией режима динамической передачи сигналов.

Реализация режима динамической передачи сигналов позволяет на физическом уровне решить проблему защиты от несанкционированного доступа к каналу, а также обеспечивает скрытие смыслового содержания передаваемых сообщений. Кроме того, реализация режима динамической передачи сигналов обеспечивает активную имитозащиту системы — защиту, при которой имитационные сигналы воспринимаются получателем информации как помеховые. Однако широкое внедрение режима динамической передачи сигналов в системы безопасности информации сдерживается, по нашему

мнению, отсутствием строгих доказательств адекватности данного метода передачи сигналов и методов криптографического преобразования информации.

В статье на основе теории Шеннона доказываются возможности обеспечения безопасности информации на физическом уровне и формулируются требования к реализации режима динамической передачи сигналов.

2. МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕКОГО РАДИОКАНАЛА

Структурная схема системы космической связи и управления, реализующая режим динамической передачи сигналов, представлена на рисунке.

Источник сообщений порождает открытое сообщение $\{U\} = \{U_1, U_2, \dots, U_z\}$, содержащие символы некоторого конечного алфавита, в качестве которого часто используется двоичный алфавит $\{0, 1\}$. Устройство кодирования отображает информационные символы во множество сигналов $\{S\} = \{S_1, S_2, \dots, S_Q\}$. В системах, в которых не реализуется режим динамической передачи сигналов, это преобразование имеет вид

$$S_j = F(U_j). \quad (1)$$

Отметим, что сигнал S_i является функцией алфавита открытого сообщения и не изменяется во времени. Как следует из рисунка, на приемной стороне выполняется обратное преобразование вида

$$U_j^* = F(S_i). \quad (2)$$

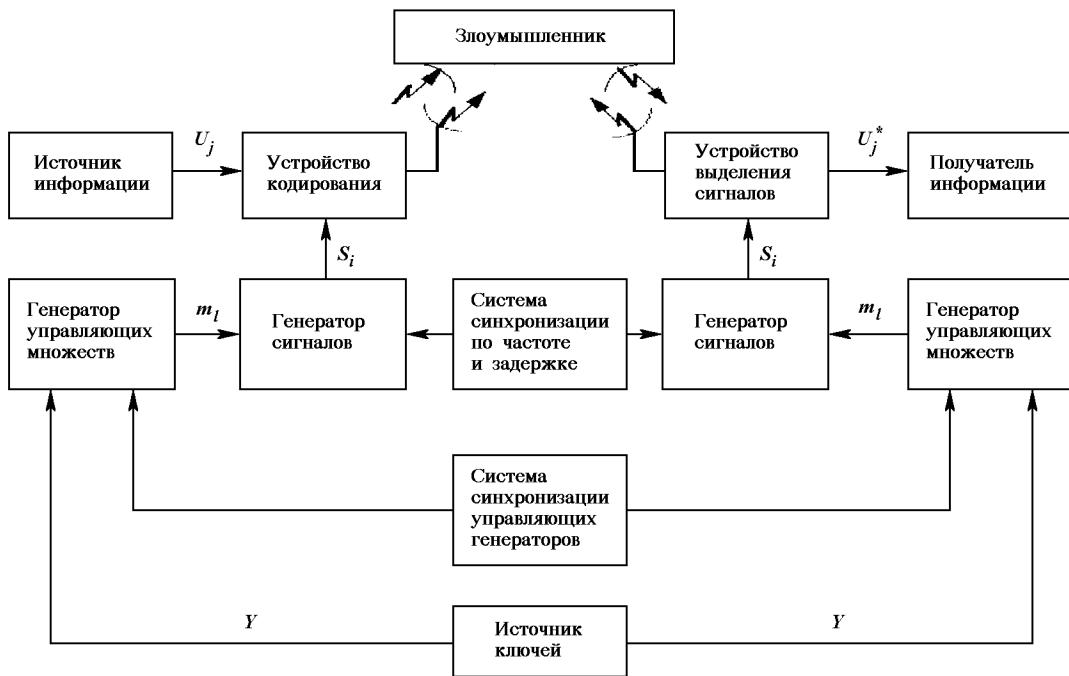
Злоумышленник, принимая сигналы S_i и выполняя преобразование вида (2), восстанавливает открытое сообщение.

Реализация режима динамической передачи сигналов предполагает, что соответствие «информационный символ — сигнал-переносчик» изменяется во времени по закону управляющего множества $\{M\} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$:

$$S_j = F(U_j, m_i). \quad (3)$$

В этом случае соответствие сигнала S_i информационному символу U_i определяется не только информационными символами, но и элементами управляющего множества $\{M\}$.

Синхронность работы наземной и бортовой аппаратуры обеспечивают системы синхронизации по частоте и задержке, а также генераторов управляющих множеств.



Структурная схема системы космической связи и управления, реализующая режим динамической передачи сигналов

Важной частью такой системы является конфиденциальный ключ, порожденный в источнике ключа и защищенный от перехвата. Используемые в космической системе связи и управления ключи, в зависимости от реализованного алгоритма формирования управляющего множества, могут быть как симметричными (совпадающими в наземной и бортовой аппаратуре), так и несимметричными (не совпадающими).

В дальнейшем будем полагать, что злоумышленнику известны все детали процесса формирования множеств $\{S\}$ и $\{M\}$, кроме используемых ключей Y .

3. НЕОБХОДИМЫЕ И ДОСТАТОЧНЫЕ УСЛОВИЯ НЕДЕШИФРУЕМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Если с точки зрения злоумышленника любой сигнал S_i является отображением j -го значения сообщения U_j , то при независимом появлении сигналов энтропия раскрытия n элементов сообщения будет определяться

$$H = \sum_{j=1}^n H_j, \quad (4)$$

где H_j — частная энтропия раскрытия j -го сообщения.

Физически энтропия раскрытия j -го сообщения представляет собой математическое ожидание количества информации в одном сообщении о множестве, реализующем динамический режим функционирования.

Определим условия недешифруемости множества, реализующего динамический режим функционирования. Для этого докажем следующие теоремы.

Теорема 1. Пусть информационному множеству $\{U\} = \{U_1, U_2, \dots, U_z\}$ по правилу преобразующего множества $\{M\}$ ставится в соответствие сигнал из множества $\{S\} = \{S_1, S_2, \dots, S_Q\}$. Тогда энтропия $H_j(U_j, S_i)$ раскрытия j -го сообщения будет принимать максимальные значения при независимом появлении сигналов и сообщений.

Доказательство. Совместную энтропию совокупности U и S можно представить в виде

$$H(U, S) = - \sum_{j=1}^z \sum_{i=1}^Q P(U_j, S_i) \log_2 P(U_j, S_i), \quad (5)$$

где $P(U_j, S_i)$ — вероятность совместного появления U_j сообщения и сигнала S_i .

Известно, что

$$H(U, S) = H(U) + H(U/S). \quad (6)$$

В выражении (6) $H(U, S)$ принимает максимальное значение, если $H(U)$ и $H(U/S)$ максимальны.

В работе Кузьмина и др. (1986) показано, что $H(U)$ принимает максимальное значение при статистически независимых сообщениях.

Найдем максимум $H(U/S)$

$$H(U/S) = - \sum_{j=1}^z \sum_{i=1}^Q P(U_j, S_i) \log_2 P(U_j/S_i). \quad (7)$$

Для условной энтропии $H(U/S)$ справедливо неравенство

$$H(U/S) \leq H(U). \quad (8)$$

Следовательно,

$$- \sum_{j=1}^z \sum_{i=1}^Q P(U_j, S_i) \log_2 P(U_j/S_i) \leq - \sum_{j=1}^z P(U_j) \log_2 P(U_j). \quad (9)$$

В выражении (9) равенство имеет место при условии

$$P(U_j/S_i) = P(U_j).$$

Выполнение этого условия возможно при статистической независимости U_j и S_i . Следовательно,

$$P(U_j, S_i) = P(U_j)P(S_i). \quad (10)$$

Подставив (10) в (7), получим

$$H(U/S) = - \sum_{j=1}^z \sum_{i=1}^Q P(U_j)P(S_i) \log_2 P(U_j). \quad (11)$$

Учитывая, что $\sum_{i=1}^Q P(S_i) = 1$, имеем

$$H(U/S) = - \sum_{j=1}^z P(U_j) \log_2 P(U_j) = H(U). \quad (12)$$

Следовательно, при статистически независимых множествах $\{U\}$ и $\{S\}$ энтропия раскрытия максимальна.

Теорема 2. Пусть информационному множеству $\{U\} = \{U_1, U_2, \dots, U_z\}$ по правилу преобразующего множества ставится в соответствие сигнал из множества $\{S\} = \{S_1, S_2, \dots, S_Q\}$. Тогда энтропия H_j раскрытия j -го сообщения будет принимать максимальные значения при независимом появлении сигналов из множества $\{S\}$.

Доказательство. Пусть информационному множеству $\{U\}$ по закону преобразующего множества $\{M\}$ ставится в соответствие сигнал из

множества $\{S\}$ с вероятностью PS_i . Вероятность появления сигнала S_i зависит от появления сигнала $S_{i-1}, S_{i-2}, \dots, S_{i-n}$ и равна $P(S_i/S_{i-1}, S_{i-2}, \dots)$. Тогда согласно работе Кузьмина и Кедруса (1986) справедливо неравенство

$$H_j(S_i/S_{i-1}, S_{i-2}, S_{i-3}, \dots) \leq H_j(S_i). \quad (13)$$

Средняя условная энтропия H_j равна

$$\begin{aligned} H_j(S_i/S_{i-1}, S_{i-2}, S_{i-3}, \dots) &= \\ &= \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{m=1}^{i-2} \dots \sum_{r=1}^{i-n} P(S_k)P(S_m) \dots P(S_r) \times \\ &\times P(S_i/S_k, S_m, \dots, S_r) \log_2 \frac{1}{P(S_i/S_k, S_m, \dots, S_r)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Преобразуем выражение (13) и (14) к виду

$$\begin{aligned} \log e \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{m=1}^{i-2} \dots \sum_{r=1}^{i-n} P(S_k)P(S_m)P(S_r)P(S_i/S_k, S_m, \dots, S_r) \times \\ \times \log \frac{1}{P(S_i/S_k, S_m, \dots, S_r)} \leq \log e \sum_{i=1}^Q P(S_i) \ln \frac{1}{P(S_i)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Усредня левую часть (15) по k, m, r с весом $P(S_k)P(S_m)P(S_r)$, получим

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^Q P(S_i, S_k, \dots, S_r) \ln \frac{1}{P(S_i/S_k, S_m, \dots, S_r)} \leq \\ \leq \sum_{i=1}^Q P(S_i) \ln \frac{1}{P(S_i)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Равенство $P(S_i) = P(S_i, S_k, S_m, S_r)$ имеет место только при независимом появлении сигналов, что и требовалось доказать.

Теорема 3. Пусть информационному множеству $\{U\} = \{U_1, U_2, \dots, U_z\}$ по закону преобразующего множества $\{M\} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ ставится в соответствие сигнал из множества $\{S\} = \{S_1, S_2, \dots, S_Q\}$. Тогда условная энтропия источника, задающего динамический режим функционирования, после перехвата сообщения $H(M/U)$ будет принимать максимальные значения при независимом появлении элементов из множества $\{M\}$ от информационного множества $\{U\}$.

Доказательство. Определим $H(M/U)$ как

$$H(M/U) = \sum_{k=1}^z \sum_{i=1}^m P(m_i)P(U_k/m_i) = \log \frac{1}{P(U_k/m_i)}.$$

Действительно, если злоумышленник при пере-

хвate k сигналов $k = 1, 2, \dots, Z$, не может уточнить имеющиеся у него априорные вероятности на основе вычисления апостериорных вероятностей

$$\begin{aligned} P(U_j/m_i) &= P(U_j)P(m_i/U_j); \\ P(S_i/U_j) &= \frac{P(m_i)P(U_j/m_i)P(m_i)}{P(U_j)}; \end{aligned} \quad (17)$$

т. е.

$$\begin{aligned} P(U_j/m_i) &= P(U_j); \\ P(m_i/U_j) &= P(m_i), \end{aligned} \quad (18)$$

то задача раскрытия закона изменения преобразующего множества сводится к методам статистического опробования всевозможных вариантов, а условная энтропия $H(M/U)$, определяемая выражением

$$H(M/U) = H(M) = \sum_{k=1}^m P(m_k) \log \frac{1}{P(m_k)} \quad (19)$$

принимает максимальное значение при независимом появлении элементов из множества $\{M\}$ от информационного множества $\{U\}$.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Сформулированные и доказанные выше теоремы определяют необходимые и достаточные условия теоретической недешифруемости динамического режима функционирования и не противоречат основным положениям теории Шеннона (1963).

Практическая реализация динамического режима функционирования в космических системах связи базируется на следствиях из теорем 1—3.

Следствие 1. Количество информации о преобразующем множестве, задающем динамический режим функционирования, определяемое выражением

$$I(U, M) = H(M) - H(M/U), \quad (20)$$

равно нулю, если условная энтропия источника, задающего динамический режим функционирования, максимальна.

Следствие 2. Избыточность, содержащаяся в информации о преобразующем множестве, определяемая выражением

$$D = \frac{H(M) - H(M/U)}{H(M)}, \quad (21)$$

равна нулю, если условная энтропия источника, задающего динамический режим, максимальна.

Результаты исследований показывают, что при практической реализации динамического режима функционирования должны выполняться следующие условия:

- вероятность передачи сигнала не должна зависеть от передаваемых информационных символов и переданных ранее сигналов;
- размер ансамбля используемых сигналов должен удовлетворять требованиям по имито- и помехозащищенности;
- стойкость управляющего множества, задающего динамический режим функционирования не должна снижаться в случаях, когда злоумышленникам становится известен метод реализации динамического режима;
- избыточность, содержащаяся в информации о множестве, задающем динамический режим функционирования, должна быть минимальна.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше мы отметили, что динамический режим функционирования может обеспечить требуемую защиту информации на физическом уровне. Однако согласно работе Шеннона (1963), стойкость динамического режима функционирования, как и стойкость алгоритмов криптографического преобразова-

ния информации, должна опираться не на теоретическую невозможность их раскрытия, а на практическую сложность такого раскрытия. Следует отметить, что реализация динамического режима функционирования позволит решить проблему защиты космических систем связи и управления от несанкционированного доступа к каналу, обеспечит активную имито- и помехозащищенность.

Кузьмин И. В., Кедрус В. А. Основы теории информации и кодирования. — Киев: Вища школа, 1986.—238 с.

Тузов Г. И., Урядников Ю. Ф., Прытков В. И. и др. Адресные системы управления и связи. Вопросы оптимизации / Под ред. Г. И. Тузова. — М.: Радио и связь, 1993.—384 с.

Шеннон К. Э. Теории связи в секретных системах // Работы по теории информации и кибернетике. — М: Изд-во инстр. лит-ры, 1963.—С. 333—402.

INFORMATION SECURITY IN SPACE COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEMS

I. D. Gorbenko and Yu. V. Stasev

We propose a new method for providing information security in space communication and control system. The method is based on dynamic signaling, and it is similar to the methods of cryptographic transformations of information. Necessary and sufficient conditions for the realization of dynamic operation mode are formulated.

Алгоритм синтеза и свойства ортогональных систем сигналов

Ю. В. Стасев, Н. В. Пастухов

Харківський військовий університет

Надійшла до редакції 14.03.96

Розглядаються шляхи розв'язку проблеми забезпечення потрібної якості передавання інформації в космічних системах зв'язку та керування на основі використання похідних ортогональних систем сигналів. Розробляється алгоритм синтезу досліджуються властивості похідних ортогональних систем сигналів.

Решение проблемы обеспечения требуемого качества передачи информации в космических системах связи и управления связывают с сигналами, обладающими требуемыми корреляционными, ансамблевыми и структурными свойствами. Среди известных систем сигналов, которые уже нашли применение значительный интерес представляют ортогональные дискретные сигналы. Интерес разработчиков космических систем связи и управления к ортогональным системам сигналов объясняется тем, что их использование позволяет уменьшить вероятность ошибки в системе связи и управления, повысить их пропускную способность. Среди ортогональных сигналов особое внимание заслуживают производные ортогональные системы сигналов (ПОСС), обладающие хорошими корреляционными, ансамблевыми и структурными свойствами. Однако к настоящему времени разработаны алгоритмы построения и исследованы только производные системы сигналов с числом элементов $L = 2^r$, где $r = 2, 3, 4, \dots$. В то же время ортогональные сигналы существуют практически для любых значений $L \equiv 0 \pmod{4}$ (Горбенко, 1989). Процедура синтеза производной ортогональной системы сигналов заключается в умножении элементов задающей ортогональной матрицы \mathbf{H} на сигнал \mathbf{W}

$$|\mathbf{G}| = \begin{vmatrix} h_{11}w_1 & h_{12}w_2 & \dots & h_{1L}w_L \\ h_{21}w_1 & h_{22}w_2 & \dots & h_{2L}w_L \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{L1}w_1 & h_{L2}w_2 & \dots & h_{LL}w_L \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где h_{ij} — элементы задающего ортогонального сигнала из ансамбля \mathbf{H} ; w_j — элемент производящего сигнала; $h_{ij} \in \{-1; 1\}$, $w_j \in \{-1; 1\}$. Такой алгоритм построения сигналов позволяет получить большое число ансамблей ПОСС, обладающих псевдослучайной структурой и хорошими корреляционными свойствами. Определим условия существования и свойства производных ортогональных систем сигналов.

Лемма 1. Производные ортогональные системы сигналов существуют для длительностей $L \equiv 0 \pmod{4}$.

Доказательство. Пусть $\{g_i\}$ — производный ортогональный сигнал, который получен по правилу (1) и $g_{ij} = h_{ij}w_j$, где i — номер задающего сигнала, j — номер элементов в задающем и производящем сигналах. Тогда

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^L (g_{1j} + g_{2j})(g_{1j} + g_{3j}) = \\ & = \sum_{j=1}^L (h_{1j}w_j + h_{2j}w_j)(h_{1j}w_j + h_{3j}w_j) = \\ & = \sum_{j=1}^L w_j^2(h_{1j} + h_{2j})(h_{1j} + h_{3j}) = \\ & = \sum_{j=1}^L w_j^2h_{1j}^2 + \sum_{j=1}^L w_j^2h_{1j}h_{3j} + \sum_{j=1}^L w_j^2h_{2j}h_{3j} + \sum_{j=1}^L w_j^2h_{1j}h_{2j} = L. \end{aligned} \quad (2)$$

Так как w_j^2 всегда равно 1, второе, третье и четвертое слагаемые равны нулю (строки матриц Адамара ортогональны), а произведение $(h_{1j} + h_{2j}) \times (h_{1j} + h_{3j})$ равно 4 или 0, то находим, что $L = 0 \pmod{4}$.

Лемма 2. Если каждый элемент ортогональной задающей системы сигналов умножить на производящий сигнал w_j , то полученная производная система сигналов ортогональна.

Доказательство.

$$\sum_{j=1}^L g_{1j}g_{2j} = \sum_{j=1}^L h_{1j}w_jh_{2j}w_j = \sum_{j=1}^L w_j^2h_{1j}h_{2j} = 0. \quad (3)$$

Лемма 3. Максимальный уровень боковых лепестков ненормированной периодической функции корреляции производного ортогонального сигнала $R_{g\max}$ связан с ненормированными корреляционными функциями задающего R_h и производящего R_w сигналов соотношениями

$$R_{g\max}(k) \leq R_w(k) - R_h(k) + L, \quad \text{если } R_h > R_w; \quad (4)$$

$$R_{g\max}(k) \leq R_h(k) - R_w(k) + L, \quad \text{если } R_w > R_h. \quad (5)$$

Доказательство. Запишем выражение для функции корреляции двух сигналов:

$$R_g(k) = \sum_{j=1}^L g_j g_{j+k} = \sum_{j=1}^L h_j w_j h_{j+k} w_{j+k} + k. \quad (6)$$

Введем обозначения $h_j h_{j+k} = A_j$ и $w_j w_{j+k} = B_j$. Тогда

$$R_g(k) = \sum_{j=1}^L A_j B_j. \quad (7)$$

A_j и B_j — последовательности, содержащие A_1 и B_1 единиц и A_0 , B_0 минус единиц. При этом $A_1 - A_0 = R_h$, $B_1 - B_0 = R_w$.

Будем считать, что $R_h > R_w$, тогда в (7) число произведений $A_j B_j = 1$ при $A_j = B_j = 1$ максимально равно B_1 , а при $A_j = B_j = -1 = A_0$. Максимальное число несовпадений равно $A_1 - B_1$. Следовательно,

$$R_{g\max}(k) = B_1 + A_0 - (A_1 - B_1). \quad (8)$$

Величины A_1 , B_1 , A_0 и B_0 связаны с R_h , R_w и L соотношениями

$$A_1 = 0.5(L + R_h), \quad (9)$$

$$B_1 = 0.5(L + R_w), \quad (10)$$

$$A_0 = 0.5(L - R_h), \quad (11)$$

$$B_0 = 0.5(L - R_w). \quad (12)$$

Подставив (9)–(12) в (8), получим

$$R_{g\max}(k) \leq R_w - R_h + L. \quad (13)$$

По аналогии получим $R_{g\max}(k)$ при $R_w > R_h$. Необходимо помнить, что при $L \equiv 0 \pmod{4}$ — $R_{g\max}(k) = \pm m$, $m = 0, 1, 2, \dots$

Известно, что R_h стремится к L . Следовательно, для получения ПОСС с минимальным уровнем боковых лепестков функции корреляции, как следует из работы Варакина (1978), производящий сигнал должен обладать хорошими корреляционными свойствами. Анализ известных систем двоичных дискретных сигналов показывает, что большинство сигналов обладает «неудобной» длиной. Кратность четырем может быть получена только за счет дополнения или усечения сигнала, что, естественно, изменит его корреляционные свойства и приведет к увеличению уровня боковых лепестков периодической функции автокорреляции (ПФАК) ПОСС. В этом случае лучшими корреляционными свойствами будут обладать ПОСС, построенные с использованием характеристических сигналов (Свердлик, 1975).

Лемма 4. Если производный сигнал образован с использованием производящего характеристического сигнала и задающего меандрового сигнала, то он принадлежит системе производящего сигнала и обладает такой же ПФАК.

Доказательство. Пусть порождающий сигнал построен по правилу

$$H_i = \begin{cases} \Psi(\Theta^i + 1), & \text{если } \Theta^i + 1 \equiv 0 \pmod{p}, \\ 1, & \text{если } \Theta^i + 1 \not\equiv 0 \pmod{p}, \end{cases} \quad (14)$$

где $\Psi(\Theta_i)$ — характер a_i элемента поля $GF(p)$, Θ^i — первообразный элемент поля $GF(p)$.

Задающий сигнал построен по правилу

$$G_i^0 = (-1)^i, i = 0, L-1. \quad (15)$$

Согласно работе Свердлик (1975) имеем

$$\begin{aligned} R_{np}(l) &= \sum_{i=0}^{L-1} H_i(-1)^i H_{i+l}(-1)^{i+l} = \\ &= \sum_{i=0}^{L-1} \Psi(\Theta^i + 1)(-1)^i \Psi(\Theta^{i+l} + 1) \times \\ &\times (-1)^{i+l} + \Psi(-\Theta^i + 1)(-1)^i + \Psi(-\Theta^{-i} + 1)(-1)^{-i} = \\ &= Z + \Psi(-\Theta^i + 1)(-1)^i + \Psi(\Theta^{-i} + 1)(-1)^{-i}. \end{aligned} \quad (16)$$

Учитывая свойства функции характера элемента поля, составляющую Z (16) представим в виде

$$Z = \Psi(\Theta^l) \sum_{i=0}^{p^n-1} \Psi(\Theta^i + 1)\Psi(\Theta^i + \Theta^{-1})(-1)^i(-1)^{i+1}. \quad (17)$$

Перейдя в (17) от суммы по индексу i к сумме по

всем ненулевым элементам поля $GF(p)$, получим

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=0}^{p^n-1} \Psi(\Theta^i + 1)\Psi(\Theta^i + \Theta^{-1}(-1)^i(-1)^{i+1}) = \\ &= (-1)^i \sum_{\substack{a_i \in GF(p) \\ a_i \neq 0 \pmod p}} \Psi(a_i + 1)\Psi(a_i + \Theta^{-1})(-1)^{2i}. \end{aligned} \quad (18)$$

Обозначим $C_i = a_i + 1$. Учитывая, что $(-1)^2 = 1$, а также то, что C_i пробегает все элементы поля, за исключением 1, если a_i пробегает все ненулевые элементы поля $GF(p^n)$, выражение (18) представится в виде

$$E = (-1)^i \sum_{\substack{C_i \in GF(p) \\ C_i \neq 0 \pmod p}} \Psi(C_i) + \Psi(C_i + \Theta^{-1} - 1). \quad (19)$$

Если $C_i = 1$, то $E = (-1)^i \Psi(\Theta^{-1})$. Добавляя и вычитая $\Psi(\Theta^{-1})$, с учетом того, что $\psi(0) = 0$, выражение (19) можно представить в виде

$$\begin{aligned} E &= (-1)^i \sum_{C_i \in GF(p)} \Psi(C_i)\Psi(C_i + \Theta^{-1} - 1) - \Psi(\Theta^{-1}) = \\ &= (-1)^i \sum_{\substack{C_i \in GF(p) \\ C_i \neq 1 \pmod p}} \Psi(C_i)\Psi(C_i + \Theta^{-1} - 1) - \Psi(\Theta^{-1}) = \\ &= (-1)^i \sum_{\substack{C_i \in GF(p) \\ C_i \neq 0 \pmod p}} \Psi(C_i^2)\Psi[1 + (\Theta^{-1} + 1)C_i^{\mu-1}] - \Psi(\Theta^{-1}) = \\ &= (-1)^i \sum_{\substack{C_i \in GF(p) \\ C_i \neq 0 \pmod p}} \Psi[1(\Theta^{-1} - 1)C_i^{\mu-1}] - \Psi(\Theta^{-1}). \end{aligned} \quad (20)$$

Если $C_i \in GF(p^n)$, $C_i \equiv 0 \pmod p$, то $C_i^{\mu-1}$ пробегает все элементы поля, за исключением 1. Обозначая $b_i = C_i^{\mu-1}$, $d = \Theta^{-1} - 1 \in 0 \pmod p$, получим

$$E = (-1)^i \sum_{\substack{b_i \in GF(p) \\ b_i \neq 0 \pmod p}} \Psi[1 + db_i] - \Psi(\Theta^{-1}). \quad (21)$$

С учетом того, что

$$\sum_{\substack{x \in GF(p) \\ x \neq 0 \pmod p}} \Psi(vx + k) = -\Psi(k),$$

выражение (21) запишем в виде

$$E = (-1)^i [-1 - \Psi(\Theta^{-1} - l)]. \quad (22)$$

Подставляя (22) в (18), (17) и (16), получим

$$\begin{aligned} R_{np}(l) &= \Psi(\Theta^l)(-1)^i [-1 - \Psi(\Theta^{-1})] + \\ &+ \Psi(-\Theta^{-1} + 1)(-1)^i + \Psi(-\Theta^{-1} + 1)(-1)^i. \end{aligned} \quad (23)$$

Полагая, что $L = 0 \pmod 4$, а также учитывая, что

$\Psi(-1) = 1$ (Бельтиков и Сивов, 1982) и $(-1)^1 = (-1)^{-1}$, выражение (23) перепишем в виде

$$R_{np} = (-1)^i [-1 - \Psi(\Theta^l)] + \Psi(\Theta^l - 1)[1 + \Psi(\Theta^l)]. \quad (24)$$

Из выражения (24) следует:

$$\text{при } \Psi(\Theta^l) = 1, \quad \Psi(\Theta^l - 1) = 1 - R_{np}(l) = 0; \quad (25)$$

$$\text{при } \Psi(\Theta^l) = 1, \quad \Psi(\Theta^l - 1) = -1 - R_{np}(l) = 1; \quad (26)$$

$$\text{при } \Psi(\Theta^l) = -1, \quad \Psi(\Theta^l - 1) = 1 - R_{np}(l) = 0; \quad (27)$$

$$\text{при } \Psi(\Theta^l) = -1, \quad \Psi(\Theta^l - 1) = -1 - R_{np}(l) = 0; \quad (28)$$

для $l \equiv 0 \pmod 2$.

Анализ выражения (24) показывает, что события (25) и (28) являются невозможными, так как Θ^l и $\Theta^l - 1$ не могут одновременно быть четными и нечетными.

Таким образом, производный сигнал, построенный с использованием меандрового сигнала в качестве задающего, обладает такой же ПФАК, что и производящий сигнал.

ПФАК и периодическая функция взаимной корреляции (ПФВК) производных ортогональных систем сигналов определяются из соотношения

$$R_{jk}(n) = \sum_{m=1}^L a_j(m)a_k(m+n). \quad (29)$$

Для $j = k$ по формуле (29) можно определить боковые лепестки ПФАК, а для $j \neq k$ — боковые лепестки ПФВК.

Для оценки значений уровня боковых лепестков функций корреляции в выражении (29) сделаем замену вида

$$f_m = a_j(m)a_k(m+n).$$

Тогда уровень боковых лепестков функции корреляции будет определяться разностью между числом положительных и отрицательных членов последовательности f_m . Разность между числом положительных и отрицательных членов последовательности принято называть ее весом W (Варакин, 1978). Отсюда следует, что распределение вероятности боковых лепестков функции корреляции двух сигналов при условии, что они имеют M блоков $p_R(W/\mu)$, определяется вероятностью получения веса W в последовательности f_m при наличии μ блоков в сигналах a_j и a_k .

Варакиным (1978) показано, что $p_R(r/\mu)$ определяется выражением

$$p_R(r/M) = \sum_{\mu=1}^M p_w(r/\mu)p(\mu/M) \quad (30)$$

где $p(r/\mu)$ — вероятность получения веса $W = r$; $p(\mu/M)$ — вероятность перехода знака в последовательности f_m , имеющей M блоков.

Вероятность получения веса $W = r$ определяется выражением

$$p_w(r/\mu) = \frac{L(W\mu)}{L(M)}. \quad (31)$$

Здесь

$$L(W/\mu) = C_{(L+W)/2-1}^{\mu+1} C_{(L-W)/2-1}^{\mu-1} + C_{(L-W)/2-1}^{\mu-1} C_{(L-W)/2-1}^{\mu+1}$$

— количество сигналов в полном коде, имеющих вес W и число блоков μ ; $L(\mu) = 2C_{L-1}^{\mu-1}$ — общее число сигналов с μ блоками; C_y^x — число сочетаний из y по x ; μ^+ — количество единичных блоков; μ^- — количество нулевых блоков;

$$\mu^+ = \mu^- = \mu/2 \text{ — при четном } \mu;$$

$$\mu^+ = (\mu + 1)/2, \mu^- = (\mu - 1)/2 \text{ — при нечетном } \mu.$$

$$p(\mu/M) = \frac{(L - M_1)(M_2 - 1) + (L - M_2)(M_1 - 1)}{(L - 1)^2}, \quad (32)$$

где M_1 — число блоков в сигнале a_j , M_2 — число блоков в сигнале a_k .

При вычислении ПФАК $M_1 = M_2$, и выражение (32) принимает вид

$$p_f(\mu/M) = \frac{2(L - M)(M - 1)}{(L - 1)^2}. \quad (33)$$

Однако число блоков M в производной последовательности может изменяться в пределах

$$\begin{aligned} & |M_1 - M_2| + 1 \leq \mu \leq \\ & \leq \begin{cases} M_1 + M_2 - 1 & \text{при } M_1 + M_2 \geq L + 1, \\ 2L - M_1 - M_2 + 1 & \text{при } M_1 + M_2 \leq L + 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (34)$$

Таблица 1. Параметры корреляционных функций

Число элементов в сигнале	КФ	m	m_{cp}	D_{cp}	D_{Dcp}	U_{max}	DU_{max}
12	ПФАК	$0.6 \cdot 10^{-1}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-2}$	$4.4 \cdot 10^{-2}$	0.235	$3.8 \cdot 10^{-2}$
	ПФВК	$3.8 \cdot 10^{-2}$	$7.5 \cdot 10^{-1}$	$5.6 \cdot 10^{-2}$	$0.4 \cdot 10^{-1}$	0.38	$2.1 \cdot 10^{-3}$
16	ПФАК	$7.2 \cdot 10^{-2}$	$3.6 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	0.171	$2.4 \cdot 10^{-2}$
	ПФВК	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$7.3 \cdot 10^{-1}$	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$5.4 \cdot 10^{-5}$	0.5	$2.4 \cdot 10^{-2}$
60	ПФАК	$0.4 \cdot 10^{-1}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$0.9 \cdot 10^{-2}$	$0.9 \cdot 10^{-5}$	$0.9 \cdot 10^{-1}$	$0.1 \cdot 10^{-2}$
	ПФВК	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$0.5 \cdot 10^{-1}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$6.4 \cdot 10^{-7}$	0.33	$1.8 \cdot 10^{-3}$
108	ПФАК	$4.3 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$
	ПФВК	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$0.9 \cdot 10^{-1}$	$0.8 \cdot 10^{-2}$	$8.4 \cdot 10^{-7}$	0.25	$2.1 \cdot 10^{-3}$
256	ПФАК	$1.9 \cdot 10^{-2}$	$4.4 \cdot 10^{-6}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \cdot 10^{-7}$	$4.7 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$
	ПФВК	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$8.7 \cdot 10^{-1}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	0.19	$1.5 \cdot 10^{-3}$
Усредненные значения	ПФАК	$0.312/\sqrt{L}$	$0.9 \cdot 10^{-4}$	$0.05/\sqrt{L}$	$1.8 \cdot 10^{-5}$	$0.684/\sqrt{L}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$
	ПФВК	$0.367/\sqrt{L}$	$4.5 \cdot 10^{-1}$	$0.12/\sqrt{L}$	$3.3 \cdot 10^{-6}$	$(1+3)/\sqrt{L}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$

а вероятность получения производного сигнала с μ блоками описывается биноминальным законом распределения:

$$p(\mu/M) = C_{L-1}^{\mu-1} p_1^{\mu-1} (1-p_1)^{L-\mu}. \quad (35)$$

Таким образом, при известном числе блоков в задающем и производящем сигнале можно вычислить вероятность появления значения уровня бокового лепестка функции корреляции.

Результаты исследований зависимости $|R_{g_{max}}|$ ПФАК и ПФВК от L при условии, что

$$p_R(r_{max}/M) \ll 1/L,$$

показали, что значение $|R_{g_{max}}|$ для ПФАК не превышает $3.25/\sqrt{L}$, а для ПФВК — $3.96/\sqrt{L}$.

Известно (Варакин, 1978), что средняя вероятность ошибки, вероятность ложной тревоги и пропуска сигнала в системе связи зависят не только от максимальных значений ПФАК и ПФВК, но и от статистических характеристик корреляционных функций сигналов. Статистические характеристики ПФАК и ПФВК: математическое ожидание m ; среднее значение математического ожидания m_{cp} ; дисперсия уровня боковых лепестков функций корреляции D_{Dcp} ; среднее значение максимального уровня U_{max} и среднее значение дисперсии уровня боковых лепестков функций корреляции $D_{U_{max}}$ вычислялись с использованием методики, приведенной в работе Бельтюкова и Сивова (1982). Результаты исследований и усредненные значения характеристик ПФАК и ПФВК представлены в табл. 1.

В табл. 2 приведены средние значения оценок статистических характеристик ПФАК и ПФВК производных ортогональных систем сигналов, пол-

Таблица 2. Параметры корреляционных функций

Тип последовательности	КФ	M/\sqrt{L}	D_{Mcp}	D_{CpL}	D_{Dcp}	$U_{max}\sqrt{L}$	D_{Umax}
ПОСС	ПФАК	0.312	$0.9 \cdot 10^{-4}$	0.05	$0.18 \cdot 10^{-4}$	0.684	$0.15 \cdot 10^{-2}$
	ПФВК	0.367	$0.45 \cdot 10^{-4}$	0.12	$0.33 \cdot 10^{-5}$	1÷3	$0.15 \cdot 10^{-2}$
Полные кодовые кольца	ПФАК	0.433	$0.78 \cdot 10^{-6}$	0.146	$0.113 \cdot 10^{-6}$	1.5	$0.145 \cdot 10^{-3}$
	ПФВК	0.48	$0.79 \cdot 10^{-6}$	0.082	$0.211 \cdot 10^{-6}$	0.5÷0.75	$0.16 \cdot 10^{-2}$
НПКП	ПФАК	0.75	$0.35 \cdot 10^{-3}$	0.321	$0.372 \cdot 10^{-3}$	2.16	$0.3 \cdot 10^{-2}$
	ПФВК	0.73	$0.19 \cdot 10^{-3}$	0.358	$0.117 \cdot 10^{-4}$	2.22	$0.117 \cdot 10^{-1}$
Последовательность Голда	ПФАК	0.75	$0.39 \cdot 10^{-4}$	0.31	$0.46 \cdot 10^{-4}$	1.52	$0.207 \cdot 10^{-2}$
	ПФВК	0.74	$0.25 \cdot 10^{-4}$	0.44	$0.36 \cdot 10^{-4}$	1.52	$0.54 \cdot 10^{-5}$

ных кодовых колец, нелинейных производных кодовых последовательностей (НПКП), последовательностей Голда (Бельюков и Сивов, 1982).

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что нормированные значения ПФАК и ПФВК производных ортогональных систем сигналов с числом элементов $L \equiv 0 \pmod{4}$ меньше, чем для последовательностей Голда и ортогональных систем сигналов, построенных на основе полных кодовых колец и НПКП. Следовательно, использование ПОСС с числом элементов $L \equiv 0 \pmod{4}$ позволит, как следует из работы Варакина (1978), уменьшить вероятность ошибки или увеличить пропускную способность системы связи. При построении космических систем связи и управления наряду с корреляционными характеристиками важное значение имеют и ансамблевые характеристики используемых сигналов. Ансамблевые свойства ПОСС зависят от числа способов построения матриц Адамара S_b , ансамблевых характеристик производящих сигналов и определяются выражением

$$S = S_b S_w L. \quad (36)$$

В табл. 3 приводится сравнительный анализ ансамблевых характеристик ПОСС и характеристических последовательностей, обладающих наилучшими среди известных двоичных сигналов ансамблевыми, корреляционными и структурными свойствами и существующими для широкого спектра длительностей $L = 4x$ и $L = 4x + 2$, $x = 2, 3, 4, \dots$

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что число ПОСС значительно превышает число характеристических последовательностей.

Таким образом, производные ортогональные системы сигналов с числом элементов $L = 0 \pmod{4}$ обладают улучшенными среди известных систем

Таблица 3. Сравнительный анализ ансамблевых характеристик ПОСС и характеристических последовательностей

L	ПОСС	Характеристические последовательности
40	$3.8 \cdot 10^3$	14
100	$8 \cdot 10^3$	38
256	$1.5 \cdot 10^7$	128
1032	$1.3 \cdot 10^8$	336
2088	$5.4 \cdot 10^8$	672
9000	$8 \cdot 10^9$	2400

сигналов ансамблевыми и корреляционными свойствами, что позволяет повысить качество передачи информации в космических системах связи и управления.

Варакин Л. Е. Теория систем сигналов. — М.: Сов. радио, 1978.—304 с.

Горбенко И. Д., Стасев Ю. В. // Радиотехника.—1989.—№ 9.—С. 16—18.

Свердлик М. Б. Оптимальные дискретные сигналы. — М.: Сов. радио, 1975.—200 с.

Бельюков В. В., Сивов В. А. // Радиотехника и электроника.—1982.—27, № 9.—С. 1773—1778

ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS OF ORTHOGONAL SYSTEMS OF SIGNALS AND THEIR PROPERTIES

Yu. V. Stasev and N. V. Pastukhov

We discuss ways for providing a required quality of transmission of information in space communication and control systems based on the use derivative of orthogonal systems of signals. An algorithm has been developed for the synthesis of derivative orthogonal systems of signals, properties of these systems are studied.