

В. Є. Корепанов, А. А. Лукенюк, В. О. Проненко, Ф. Л. Дудкін, А. А. Марусенков, С. Г. Шендерук

Львівський центр Інституту космічних досліджень

Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Львів

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ АПАРАТУРИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліджується можливість зменшення температурного дрейфу нуля ферозондових магнітометрів. Запропоновано новий спосіб зниження дрейфу шляхом створення поля компенсації вимірюваного магнітного поля заданої конфігурації. Запропоновано принцип побудови структурної схеми системи збору та опрацювання наукової інформації для наносупутників і розроблено швидкісний інтерфейс для передачі даних з системи в апаратуру радіолінії. Опрацьовано великий обсяг даних з мікросупутника «Чибис-М» та експерименту «Варіант» на борту супутника «Січ-1М», де працювали бортові комплекси апаратури, виготовленої в ЛЦ ІКД. Виявлено випромінювання потужних ліній електропередач на основній частоті 50 (60) Гц та моди коливань шуманівського резонансу, які просочувалися в іоносферу вище шару F2.

Ключові слова: ферозондовий магнітометр, СЗНІ, опрацювання даних, випромінювання, шуманівські резонанси.

ВСТУП

Наукові космічні дослідження в Україні до останнього часу підтримувалися контрактами з Державним космічним агентством України (ДКАУ) та Радою з космічних досліджень (РКД) Президії НАНУ. У 2014 році ДКАУ припинило фінансування цих досліджень, і на 2015 рік поки що підтримка не планується. У таких умовах навіть відносно невелике фінансування експериментальних робіт від РКД має велике значення для подальшого розвитку космічних досліджень.

Саме розвиток експериментальних космічних досліджень призводить до накопичення нових даних про процеси, які відбуваються в земному доквіллі, та особливо ті, що впливають на стан найближчої оболонки Землі (іоносфери) — так звані терагенні ефекти, тобто події на поверхні Землі, як природного походження (землетруси, виверження вулканів, тайфуни тощо), так і штуч-

ного (вибухи, потужні виробничі процеси, старту ракет тощо). Дослідження цих процесів, в основному набагато слабших, ніж реакція іоносфери на космічні чинники, передусім на сонячну активність, вимагає подальшого підвищення рівня параметрів бортової вимірювальної апаратури.

У даній роботі підведено підсумки виконання завдань Договору № 6-02/14-1/1588 від 11.06.2014 р. на тему «Наукові основи та технічні пропозиції щодо створення комплексу апаратури для перспективних космічних досліджень». Метою робіт в рамках цього договору було продовження досліджень для створення бортових приладів, параметри яких не поступаються кращим світовим зразкам, з можливістю їхньої адаптації під конкретний космічний носій. Також для перевірки відповідності рівня параметрів апаратури, створеної у Львівському центрі Інституту космічних досліджень НАН та ДКА України (ЛЦ ІКД), кращим світовим зразкам була проведена експрес-обробка отриманих у космічних експериментах даних.

Для досягнення поставленої мети були досліджені базові параметри ферозондового магнітометра, одного з головних приладів, використовуваних практично в кожному космічному експерименті, зокрема його температурну стабільність. Також продовжено дослідження принципів побудови бортової системи збирання та обробки наукової інформації (СЗНІ) з акцентом на зменшенні габаритів і споживаної потужності, що дасть можливість використовувати її для наносупутників, при цьому не тільки для збирання наукових даних, але й забезпечення достатньої потужності для керування малими космічними апаратами.

Крім того, опрацьований великий обсяг даних з мікросупутника «Чибис-М» та експерименту «Варіант» на борту супутника «Січ-ІМ», де працювали бортові комплекси апаратури, виготовленої в ЛЦ ІКД.

Нижче наведений короткий огляд отриманих результатів.

ПОКРАЩЕННЯ ТЕРМОСТАБІЛЬНОСТІ ФЕРОЗОНДОВИХ МАГНІТОМЕТРІВ

Найважливішими характеристиками магнітометрів космічного призначення є рівень власних шумів та довготривала й температурна стабільність зміщення нуля і коефіцієнтів перетворення. Довготривала й температурна стабільність пов'язані одна з одною і залежать як від параметрів давача та вторинних вимірювальних перетворювачів, узятих окремо, так і від їхньої взаємодії [2]. Разом з шумами, вони беруть участь у формуванні похибки вимірювання, яка переважно визначається параметрами кола зворотного перетворення і залежить від таких факторів:

- 1) стабільності постійної перетворення котушки зворотного зв'язку (або котушки компенсації);
- 2) стабільності електронних компонентів, які визначають струм через котушку зворотного зв'язку;
- 3) стабільності ефективної довжини осердя давача.

Перші два фактори є загально відомими і не потребують додаткового пояснення. Згідно з даними [13] температурний коефіцієнт дрейфу

найкращих магнітометрів для вимірювання геомагнітних варіацій складає $2 \cdot 10^{-6}$ 1/К. Для досягнення таких малих значень використовують кварцові або ситалові каркаси котушок компенсації та високостабільні електронні компоненти. Подальшого зменшення температурної залежності коефіцієнта перетворення можна досягти використанням температурної корекції [12]. Однак її ефективність обмежується нелінійними та гістерезисними ефектами, причиною яких може виступати третій фактор зі вказаного списку — стабільність ефективної довжини осердя давача. Він виявляється в такий спосіб. Оскільки обмотка зворотного зв'язку має обмежені розміри, вона створює магнітне поле з певною неоднорідністю. З іншого боку, ферозондовий давач (ФЗД) вимірює усереднене по його довжині магнітне поле [7]. Ефективна довжина ФЗД залежить від параметрів його збудження й властивостей осердя, які можуть змінюватися з часом та температурою. Якщо давач розміщений у неоднорідному полі, то зміна ефективної довжини його осердя призводить до відповідної зміни компенсованого магнітного поля. Це еквівалентно зміні компенсаційної постійної обмотки зворотного зв'язку. В роботі [1] при використанні поняття парціальної чутливості були отримані аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнта перетворення ФЗД в неоднорідному полі. Було вказано на залежність парціальної чутливості від режиму збудження осердя заданим струмом чи заданою напругою. У таких режимах збудження характер зміни магнітної проникності матеріалу осердя в часі добре апроксимується прямокутником. У сучасних ФЗД використовується ферорезонансний режим збудження (ФРЗ) [10]. У ФРЗ характер зміни магнітної проникності матеріалу осердя в часі є далекий від прямокутного, тому використання виразів з [1] для розрахунку парціальної чутливості не дає достовірних результатів.

Отже, у межах відомих моделей не вдається оцінити зміну показів ФЗД під дією факторів впливу — температури давача та зміни параметрів його збудження. Але нехтування такою залежністю може викликати неочікувані додаткові похибки. Так, при дослідженні стабільності коефіцієнта перетворення ФЗД з еліпсоїдним

осердям довжиною 20 мм, який був розміщений в однорідному поздовжньому полі величиною 40 мкТл, виявлено, що зміна струму збудження удвічі викликає зміну показів магнітометра на 10...12 нТл при компенсації зовнішнього поля власною соленоїдною обмоткою компенсації довжиною 20 мм. Можна припустити, що одною з найімовірніших причин цього є температурні ефекти, пов'язані з неоднорідністю поля компенсації. Для зменшення похибки за рахунок неоднорідності поля компенсації можливі два основні підходи: а) стабілізація ефективної довжини давача; б) створення поля компенсації з максимально можливою однорідністю.

Для створення однорідного магнітного поля застосовують різноманітні системи котушок та соленоїдів, як, наприклад, кільця Гельмгольца, соленоїд Гарета та інші [6]. Застосування системи котушок у ФЗД для компенсації магнітного поля Землі вимагає від них забезпечення стабільного в часі й температурі магнітного поля з необхідним рівнем однорідності в об'ємі магніточутливого елемента при обмежених габаритах системи. Для синтезу таких систем застосовують локальний або інтегральний методи [6, С. 31—33]. Локальний метод базується на розкладанні напруженості поля, утворюваного системою, в ряд і виборі такої геометрії й числа витків окремих секцій, при яких декілька коефіцієнтів ряду дорівнюють нулю. Цей метод дає добрі результати для невеликої ділянки біля центра системи. Якщо ж необхідно створити рівномірне поле у відносно великому об'ємі, то критерій синтезу — мінімальна неоднорідність поля в локальній ділянці — не відповідає поставленому завданню. У цьому випадку застосовують інтегральний метод, критерієм якого є заданий рівень неоднорідності в робочому об'ємі. На основі обох методів розрахована певна кількість універсальних кільцевих та соленоїдних систем, які можуть бути використані з давачами довільних габаритів (у межах робочої зони). Однак, якщо давач чутливий до усередненого значення поля, і його розміри наперед відомі, з'являється можливість синтезувати меншу за розміром котушку компенсації з підібраним для даного розміру давача розподілом поля. Як критерій оцінки в цьому

випадку доцільно використати відносну зміну усередненого по довжині давача значення магнітного поля при невеликих змінах положення або габаритів давача. Така ідея була запропонована Р. Я. Беркманом, а одна з її реалізацій була використана в [5] для побудови компенсатора постійних магнітних полів у вигляді системи з чотирьох кілець. При цьому поле кілець апроксимували рядом поліномів Лежандра і, враховуючи розподіл чутливості по довжині давача, виражали середнє значення напруженості поля як функцію довжини давача. Вибором відповідного співвідношення параметрів кілець обертали в нуль тільки другий член ряду. Оскільки внесок старших членів ряду зростає при віддаленні від центра системи, то для давачів, довжина яких близька до довжини системи, така компенсація буде малоефективною.

Сформулюємо критерій покращеної форми неоднорідності поля у математичних термінах. Припустимо, що вісь давача довжиною $2l_0$ лежить на осі системи обмоток, а його поперечними розмірами можна знехтувати. У такому випадку завдання зводиться до синтезу розподілу поля на осі котушки. Виберемо таку систему координат, щоб вісь z збігалася з осями котушки й давача, а початок координат збігався з їхніми центрами. Покращена форма неоднорідності поля має одночасно відповідати двом умовам:

$$\frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} H(z) dz = H(l_0), \quad (1)$$

$$\left. \frac{dH(z)}{dz} \right|_{l_0} = 0. \quad (2)$$

Графічне пояснення цих умов наведено на рис. 1, де зображено неоднорідність поля на осі котушки, обчислена відносно значення поля в точці $z_0 = l_0/R$ (по осі абсцис відкладено значення координати z в одиницях радіуса R системи). Виконання першої умови забезпечує рівність усереднених відхилень у плюс (площа S_1) та мінус (площа S_2) відносно значення поля в точці z_0 . Виконання другої умови забезпечує плоску ділянку неоднорідності навколо точки. За рахунок цього при зміні розмірів або положення давача відбувається дуже незначна зміна площі S_2 . В результаті усереднене по його довжині поле мало

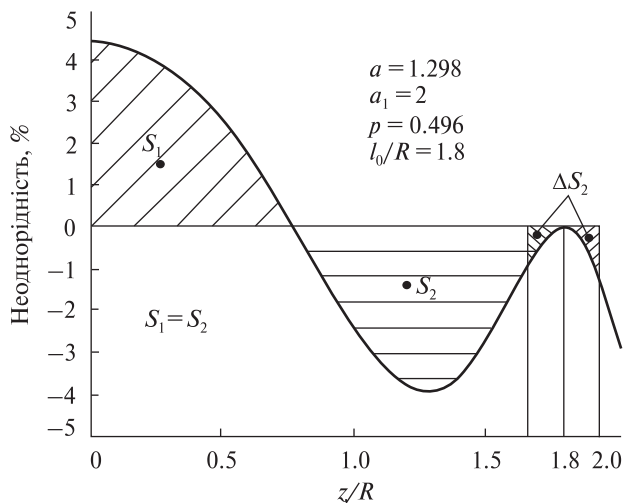


Рис. 1. Покращена форма неоднорідності поля

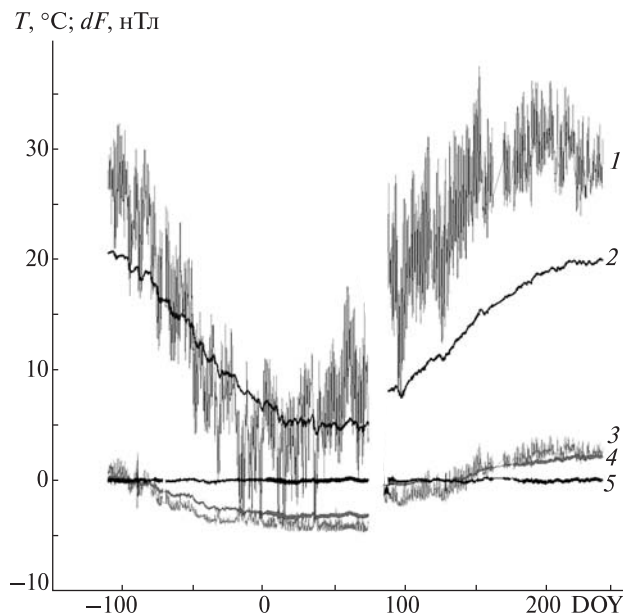


Рис. 2. Результати аналізу стабільності характеристик ферозондового магнітометра при зміні температури: крива 1 — температура T_c блоку електроніки, 2 — давача T_s , 3 — різницевий сигнал, 4 — різницевий сигнал після корекції температурної залежності блоку електроніки, 5 — різницевий сигнал після корекції температурної залежності блоку електроніки та давача

змінюється, незважаючи на відносно високий рівень неоднорідності поля.

Із застосуванням умов (1) і (2) виконано розрахунок параметрів котушки, яка реалізує задану

форму поля компенсації. Випробування показали, що створення магнітного поля компенсації, результуюче значення якого не змінюється при зміні довжини давача, при побудові компенсатора магнітного поля дозволило значно покращити метрологічні характеристики ФЗД. Для аналізу стабільності характеристик ферозондового магнітометра (ФЗМ) при зміні температури порівнювались його відліки, накопичені протягом року, з даними скалярного магнітометра, який практично не має температурної залежності, тобто проводився так званий dF-тест. Результати аналізу подано на рис. 2. Базуючись на результатах dF-тесту, можна розрахувати значення температурних коефіцієнтів дрейфу і скоригувати температурну залежність цих компонентів. Після корекції температурної залежності блоку електроніки (рис. 2, лінія 4) було оцінено вплив температури давача на базі сезонних коливань температури. Оскільки залежність $dF(T_s)$ дещо нелінійна, для корекції цієї складової температурного дрейфу давача використовувалася апроксимація поліномом 3-го порядку. Сигнал dF після корекції залежностей від температури блоку електроніки та давача подано на рис. 2 (лінія 5). Як бачимо, він не має довготривалого тренду, і його зміни протягом одного року вкладаються у межі ± 0.5 нТл, що є найкращим з відомих результатів оцінки часового дрейфу нуля ФЗМ.

У майбутньому дослідження будуть спрямовані на зменшення габаритів і споживаної потужності ФЗМ, що викликано прогресуючою тенденцією до зменшення габаритів космічних апаратів, особливо для наукових досліджень.

ПРИНЦИП ПОБУДОВИ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА ОПРАЦЮВАННЯ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ НАНОСУПУТНИКІВ

Система збору та опрацювання наукової інформації (СЗНІ) є головним службовим приладом у кожному науковому супутнику. Для наносупутників (НС), на які поступово переносяться наукові дослідження, потрібна компактна, але інформаційно потужна СЗНІ. Вона може бути досить швидко виготовлена на основі вбудованих плат зі стандартними інтерфейсами або ок-

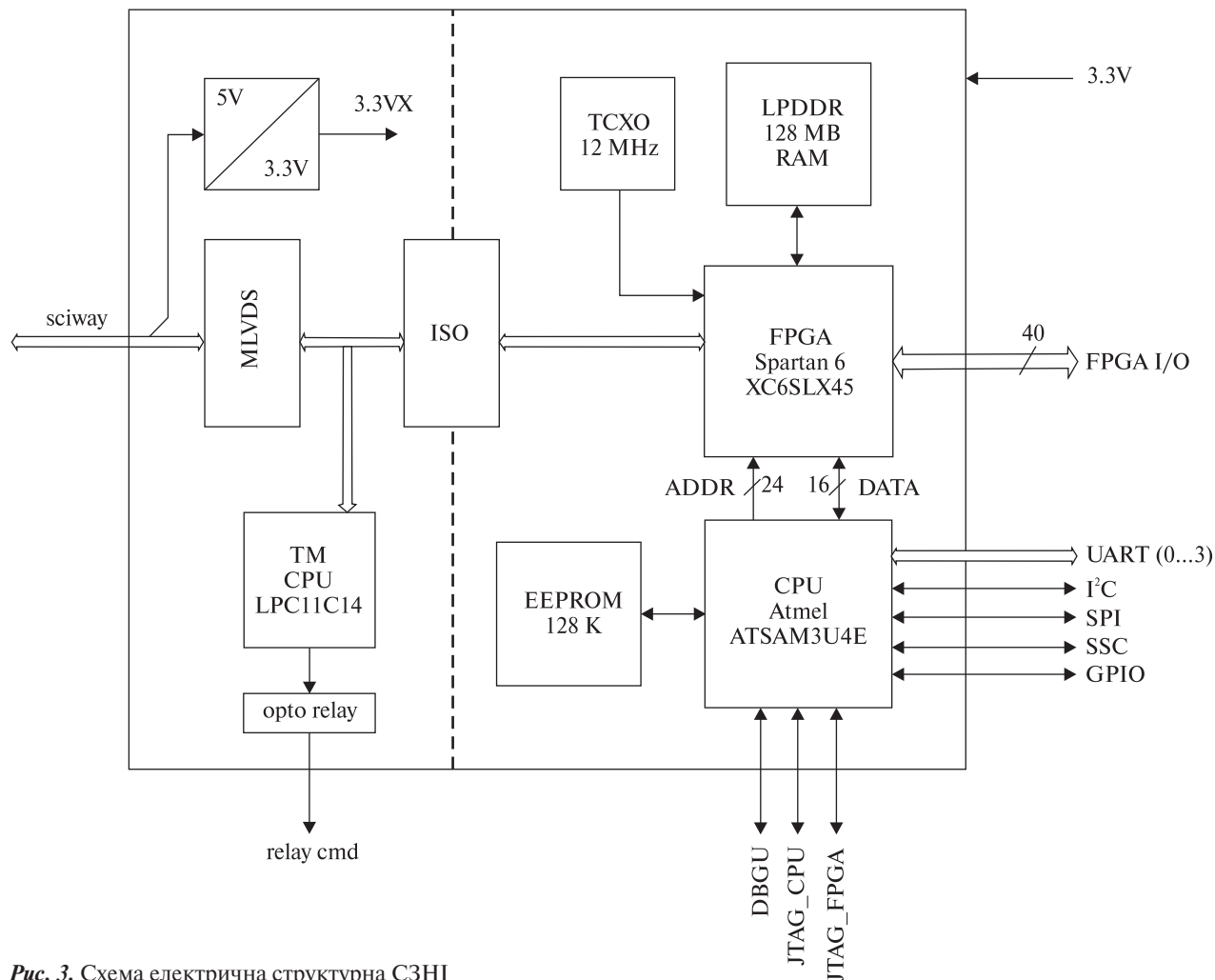


Рис. 3. Схема електрична структурна СЗНІ

ремих модулів. Однак це завжди приводить до надлишковості, збільшення габаритів та споживання. Кращі результати дають мультиплексорні системи збору даних. Типова мультиплексорна система складається з датчиків, аналогового комутатора, вимірювального підсилювача, аналого-цифрового перетворювача, контролера збору даних, вузла інтерфейсу. При потребі вона може містити також цифрові лінії вводу-виводу та цифро-аналогові перетворювачі. Найефективнішим шляхом досягнення малих масогабаритних характеристик та енергоспоживання є широке використання програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС).

На рис. 3 наведена електрична структурна схема СЗНІ. Для стикування з датчиками та науковими приладами можуть бути використані стандартні інтерфейси процесора. Для забезпечення належного рівня інтегрування бортових приладів і СЗНІ передбачено достатню кількість виводів від ПЛІС. Таке рішення дозволить вбудовувати СЗНІ до складу комплексу наукової апаратури (КНА) і при потребі використовувати надлишки обчислювального ресурсу СЗНІ для інших приладів. Також можливе збільшення обсягу накопичувальної пам'яті до 128 Гбайт.

Розміщення значної кількості вузлів на ПЛІС дозволяє суттєво зменшити масу і габарити

СЗНІ. Вузол спряження СЗНІ з електронними схемами приладів реалізується шляхом програмування (прошивки) ПЛІС, що дозволяє без збільшення маси і габаритів СЗНІ створити певну уніфікацію застосування. СЗНІ містить також швидкісний інтерфейс SciWay [14], до складу якого входить асинхронний канал передачі даних по CAN-протоколу та швидкісний канал синхронної передачі даних. Асинхронний канал передачі даних по CAN-протоколу може використовуватись для управління чи подачі команд для СЗНІ. Для передачі великих обсягів даних з високою швидкістю в базовому варіанті інтерфейсу SciWay до асинхронного каналу управління додається однобітовий синхронний напівдуплексний канал передачі з тактуванням від джерела даних. Реалізація цього каналу відбувається за допомогою двох сигнальних ліній — Data і Strobe. При цьому використовується метод DS-кодування [4].

Швидкість передачі через синхронний канал не фіксована — пристрої КНА можуть видавати дані з різною швидкістю, потрібно лише, щоб приймальний вузол забезпечував приймання з будь-якою швидкістю. Максимальна швидкість синхронного каналу визначається сучасною елементною базою і складає 200 Мбіт/с без гальванічної розв'язки і 150 Мбіт/с з гальванічною розв'язкою. Для тих випадків, коли необхідно суттєво збільшити швидкість передачі даних, інтерфейс SciWay дозволяє збільшити кількість паралельних ліній передачі даних.

Канал синхронної передачі даних може бути використаний для їхньої передачі безпосередньо в апаратуру радіолінії НС. Приймачі-передавачі уніфікованого швидкісного інтерфейсу SciWay, контролери CAN-протоколу і пам'яті, формувач транспортних кадрів та кодер реалізовані на ПЛІС, завдяки чому й досягається суттєве зменшення маси і габаритів СЗНІ.

Отже, з урахуванням досвіду створення систем збору й опрацювання інформації запропоновано принцип побудови СЗНІ для НС на основі широкого використання ПЛІС, що забезпечує малі масогабаритні характеристики при успішному виконанні покладених на СЗНІ завдань. Розроблений інтерфейс для сполучення СЗНІ з борто-

вою апаратурою, зокрема з апаратурою радіолінії, дозволяє проводити передачу інформації з високою швидкістю.

На наступному етапі необхідно провести макетування та випробування такого варіанта СЗНІ з метою перевірки можливості його адаптації до різних варіантів космічних носіїв, а також перевірки наявності достатньої потужності СЗНІ для забезпечення управління всіма службовими системами НС.

АНАЛІЗ ДАНИХ КОСМІЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Експеримент «Варіант» на борту супутника «Січ-1М». ЛЦ ІКД займається розробкою та створенням бортової електромагнітної (ЕМ) апаратури для наукових космічних досліджень. За роки незалежності України проведено два успішні наукові експерименти. Перший з них — «Варіант» — був започаткований у 1997 році рішенням НКАУ від 18.09.97 і проведений у 2004 році як міжнародний експеримент на борту супутника «Січ-1М» з метою вивчення тонкої структури електричних струмів та ЕМ-полів у іоносферній плазмі. В цьому експерименті брали участь Україна, Великобританія, Польща, Росія, Франція. Через нештатну орбіту та відсутність стабілізації супутника «Січ-1М» експеримент «Варіант» виявився фактично єдиним з усіх запланованих на ньому експериментів, проведення якого не втратило наукового сенсу. За період політних випробувань «Січ-1М» проведено серію вмикань КНА «Варіант». Всього відбулось 11 сеансів зв'язку, в яких дані проекту «Варіант» були передані на Землю. Основним завданням наших апаратурно-методичних досліджень в межах цього експерименту були порівняльні вимірювання густини просторового струму у плазмі за допомогою трьох незалежних давачів: циліндра Фарадея (виробництво Великобританії), пояса Роговського (виробництво Франції) та щілинного зонда Ленгмюра (виробництво України). Завдяки надзвичайно сприятливій ситуації для проведення бортових ЕМ-вимірювань, яка виникла через відмову багатьох систем супутника, що викликало практичну відсутність ЕМ-шумів на борту, крім виконання цього завдання, вдалося отримати ряд актуальних дотепер фундаментальних результатів,

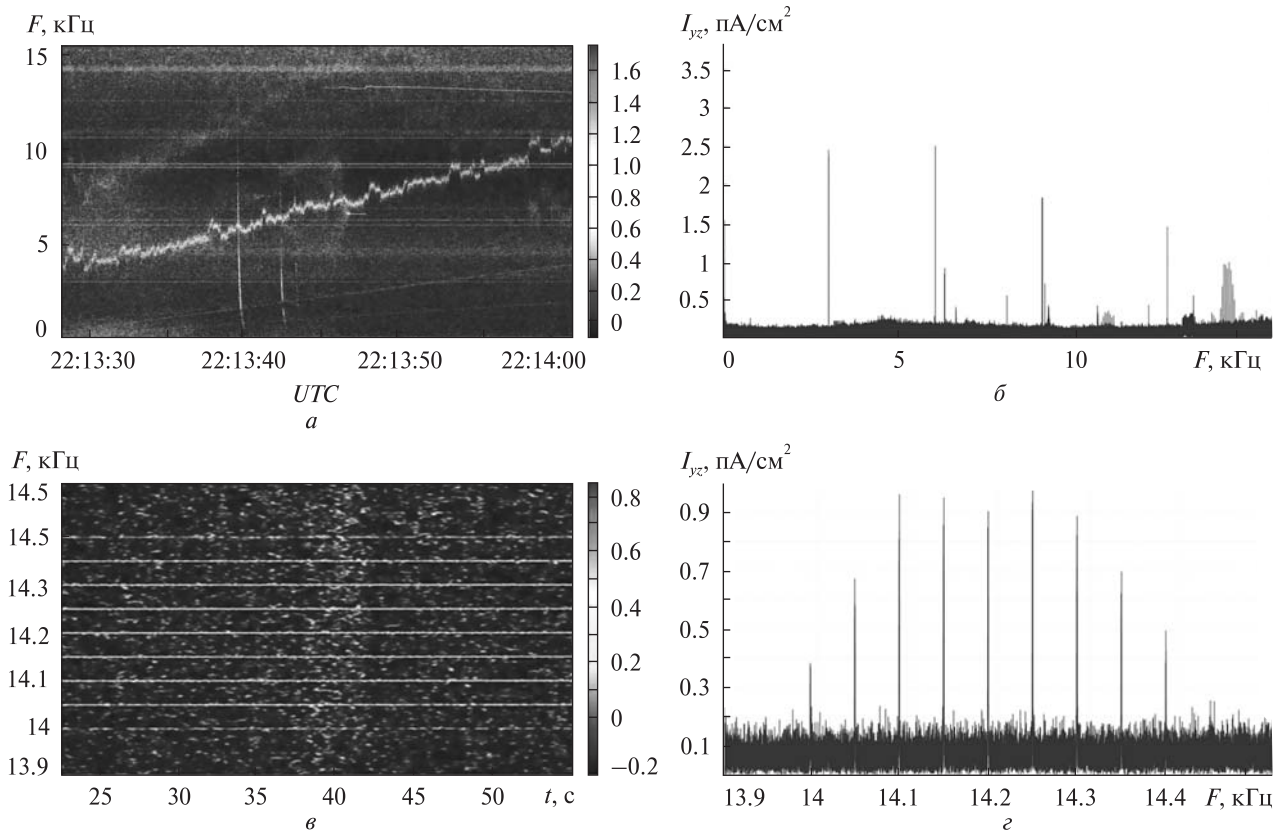


Рис. 4. Динамічний спектр (а) і статичний фур'є-спектр (б) густини струму J_{yz} для $F = 0 \dots 15$ кГц, отримані на витку 1363 (22 березня 2005 р., 22:13:06 — 22:14:02 UTC); в, г — деталізація для $F = 13.9 \dots 14.5$ кГц

зокрема реєстрацію вищих гармонік випромінювання ліній електропередач та індукованих грозовими розрядами хвильових процесів.

З уривків пошкоджених файлів, переданих з борту «Січ-1М», вдалося виділити інформативні частини даних (загалом близько 150 Мбайт наукової інформації) та провести їхнє опрацювання. Прийняті дані містять багато збоїв, які не дозволяють працювати стандартним програмам. Ці збої є випадковими, їхня кількість залежить від багатьох факторів та змінюється від сеансу до сеансу. У зв'язку з цим було розроблене програмне забезпечення для аналізу отриманих з борту супутника даних та відновлення їхньої структури до стану, який дозволив працювати іншим програмам.

Основним досягненням супутника було здійснене вперше у світі безпосереднє вимірювання густини просторового електричного струму за

допомогою оригінального приладу — щілинного зонду Ленгмюра [9]. Приклад таких даних, отриманих на витку 1363, показаний на рис. 4 у вигляді загальних динамічного та статичного фур'є-спектрів для каналу густини струму J_{yz} .

На показаних фур'є-спектрах цього каналу добре видно декілька незвичних послідовностей сигналів — короткі імпульси, які зустрічаються через однакові частотні проміжки, та ширші випромінювання, які зустрічаються на декількох частотах. При деталізації спектрів цих сигналів, поданих у вигляді випромінювань на декількох частотах, виявлено, що вони є декількома мультиплетами частоти мережі 50 Гц, центральні частоти яких зсунуті у більш височастотну ділянку — найбільша частота становила приблизно 14.2 кГц (рис. 4, в, г). Як видно з рис. 4, а, б, такі ж форми повторювалися на частотах 10.2 кГц, 3.4 кГц та 1.5 кГц.

Вірогідність цих даних підтверджена тим, що їх можна спостерігати у показах усіх давачів КНА «Варіант» — не тільки густини просторового струму, як описано вище, але й звичайних індукційних та електричних. Підтвердженням невідповідності таких даних були ще декілька результатів спостереження кластерів, зсунутих по частоті спектральних ліній гармонік мережі 50 (60) Гц, отриманих на двох інших витках не тільки над суходолом, але й над океаном, а також над Кавказом. Кластери гармонік мережі 50 (60) Гц спостерігалися і в інших експериментах, передусім ДЕТЕТЕР (2006—2010 рр.), при цьому в експерименті ДЕТЕТЕР за шість років отримано всього 148 випадків реєстрації таких мультиплетів, а їхні центральні частоти були зосереджені в основному в ділянці 2.1 кГц [11].

Такі результати, особливо кластери, зсунуті на високі частоти 14 і 11 кГц, також отримано вперше, і поки що вони не мають фізичного пояснення. Перша спроба зроблена нами в роботі [3], але вважати ці пояснення достатньо переконливими не можна.

Крім вказаних нез'ясованих сигналів, спостерігались також відомі форми, наприклад вістлери, які є наслідком глобальної грозової активності. Ці сигнали постійно зустрічаються в даних космічних експериментів і добре вивчені. Для нашого аналізу вони були використані в основному з метою калібрування давачів КНА «Варіант» і підтвердження їхньої працездатності. Цікаво відзначити й інші явища, відображені в даних проекту «Варіант», наприклад тригерні запальні процеси, а також велика кількість інших, зовсім незрозумілих і досі не ідентифікованих.

Підводячи підсумки цього підрозділу, зауважимо, що в експерименті «Варіант» на борту супутника «Січ-1М» вперше у світі вдалося здійснити порівняльні вимірювання густини струму в плазмі за допомогою трьох давачів: циліндра Фарадея, пояса Роговського та щілинного зонда Ленгмюра. При цьому найкращі результати (показники чутливості й ширини смуги частот) отримані за допомогою щілинного зонда Ленгмюра. Крім того, щілинний зонд Ленгмюра та циліндр Фарадея виявили, на відміну від пояса Роговського, високу стійкість до магніт-

них завад. Завдяки унікальній ситуації (досить низькому рівневі ЕМ-завад після виходу з ладу деяких бортових систем і частини наукового обладнання супутника), за допомогою магнітно-хвильового комплексу (МХК), розробленого в ЛЦ ІКД, вдалося отримати кількісні дані про тонку структуру ЕМ-полів ряду хвильових процесів у плазмі, зокрема індукованих наземними джерелами — грозовими розрядами та потужними лініями електропередач (в діапазоні НВЧ). У межах даної роботи вдалося систематизувати весь обсяг отриманих даних та привести його до вигляду, зручного для подальшого аналізу. Хоча у підсумку на Землю був переданий відносно невеликий обсяг інформації, і від закінчення експерименту «Варіант» минуло більше 10 років, багато цікавих даних і фізичних загадок, отриманих у ньому, ще досі чекають на кваліфікованого дослідника.

Експеримент на мікросупутнику «Чиби́с-М». Вивчення нових фізичних процесів при висотних атмосферних грозових розрядах і механізмів формування в них гама-спалахів, інфрачервоних, ультрафіолетових і ЕМ-випромінювань у широкому діапазоні частот привертає увагу дослідників усього світу. На експериментальне проведення таких досліджень скеровані три експерименти: російський «Чиби́с-М», французький ТАРА́НІС і данський АСИМ на борту Міжнародної космічної станції (МКС).

Першим стартував мікросупутник (МС) «Чиби́с-М», запущений восени 2011 р. на МКС транспортним космічним кораблем «Прогрес». Після виконання основного завдання та відділення від МКС корабель «Прогрес» вийшов на вищу орбіту і 25 січня 2012 р. вивів МС «Чиби́с-М» на орбіту висотою 513 км з нахилом 52°. Після 2.5 років роботи 15 жовтня 2014 МС «Чиби́с-М» увійшов у щільні шари атмосфери і згорів на 15310-му витку на висоті близько 80 км.

Наукова апаратура МС «Чиби́с-М» була об'єднана у КНА «Гроза», складовою частиною якого був магнітно-хвильовий комплекс (МХК), призначений для вимірювання змінних магнітних і електричних полів в УНЧ-діапазоні (від 0.1 Гц до 40 кГц). Цей комплекс був розроблений і виготовлений в ЛЦ ІКД спільно з фахів-

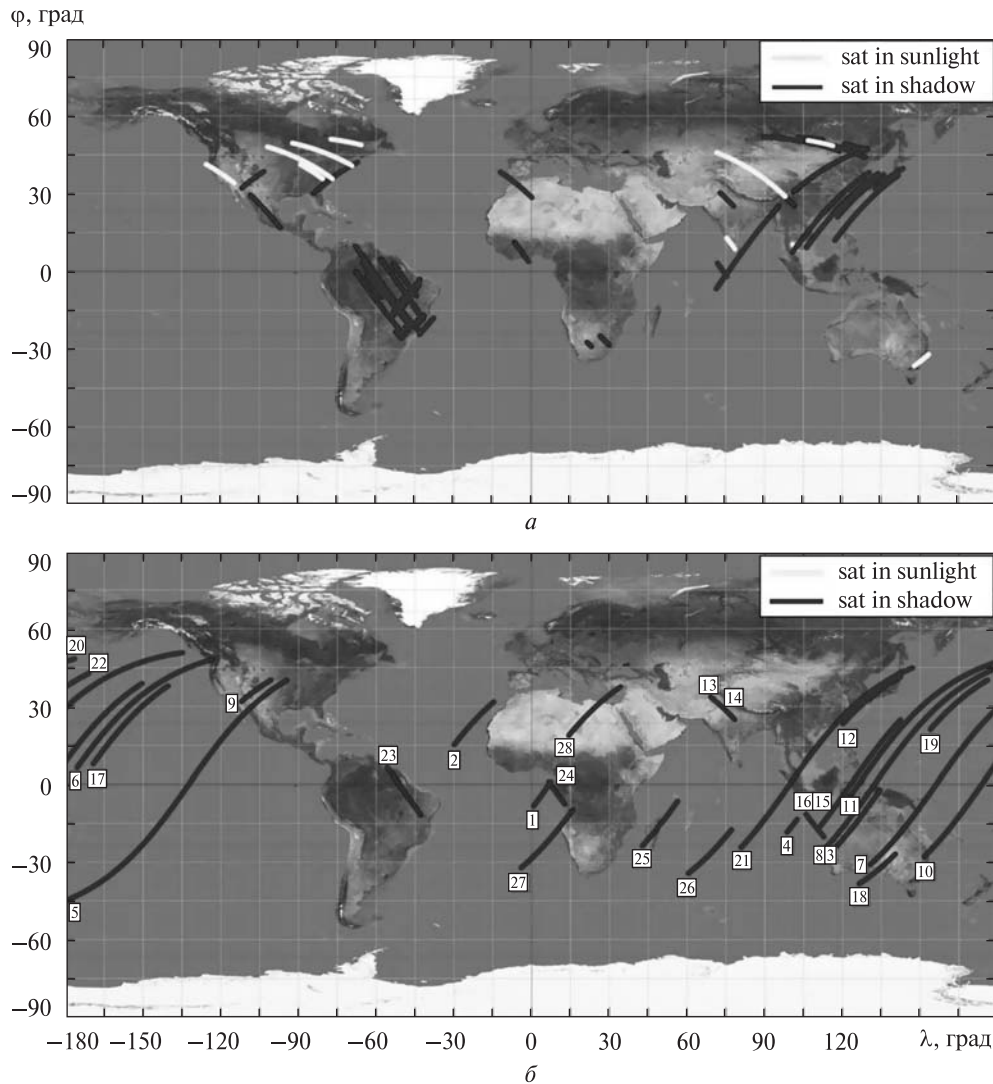


Рис. 5. Ділянки орбіт МС «Чибис-М»: *а* — для інтервалів часу, коли реєструвалась перша гармоніка ліній електромережі, *б* — для інтервалів часу, коли реєструвався ШР (орбіти пронумеровані згідно з послідовністю реєстрації ШР від 7 серпня 2013 р. до 26 серпня 2014 р.). Темним кольором виділені орбіти, коли супутник перебував у зоні тіні, світлим — коли супутник був освітлений Сонцем

цями Університету ім. Етвоша (Угорщина). Він складався з двох комбінованих хвильових зондів (КХЗ) та одного індукційного магнітометра. Зовнішні поверхні КХЗ утворили давач напруженості електричного поля, база якого складала всього 42.4 см [8]. За більш як два роки роботи МС «Чибис-М» отримано великий обсяг даних, які попередньо оброблялися в ході даної роботи. Оскільки МХК не входив до основного наванта-

ження КНА «Гроза», він працював в основному у режимі низької частоти опитування каналів. Отримані дані дозволили продовжити вивчення ЕМ-випромінювань, які виникають при грозових розрядах, (вістлерів), а також виявити нові фізичні ефекти, яким поки що немає пояснення. На жаль, високий рівень шумів на борту МС «Чибис-М», викликаних як службовими системами, так і КНА, заважав отриманню даних для

подальшої обробки. Для боротьби з цим видом завад була створена спеціальна програма під назвою «denoise». Оскільки частоти завад, як правило, не змінювалися, ця програма дозволила досить ефективно з ними боротися.

Незважаючи на компактні розміри МС (не було штанг для давачів ЕМ-поля), що суттєво підвищило рівень ЕМ-завад у місці проведення вимірювань, та ту обставину, що маса мікросупутника «Чибис-М» складала усього 1.8 % маси супутника «Січ-1М», експеримент, проведений за допомогою МХК, дозволив отримати результати світового рівня. Через невелику кількість даних, отриманих у високочастотному режимі опитування МХК, за більш як два роки роботи не було зареєстровано жодного високочастотного явища, подібного до тих, які ми бачили в даних «Січ-1М». Натомість несподівано було виявлено досить багато випадків реєстрації випромінювання потужних ліній електропередач на основній частоті 50 (60) Гц, яке просочувалося в іоносферу вище шару F2. Загалом зареєстровано 48 таких подій, причому це випромінювання виявлялося як на денній, так і на нічній сторонах Землі (рис. 5, а).

При цьому з'ясувалося, що локалізація наземної лінії електропередач чітко ідентифікувалася максимумом сигналу при пролітанні над нею супутника. Спектральна густина електричного поля основної гармоніки 50(60) Гц змінювалася від десятих часток до $2 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^{-1} \text{Гц}^{-0.5}$. Слід відзначити, що було багато спроб пояснити механізм просочування першої гармоніки мережі в іоносферу, але переконливого пояснення цього механізму досі немає.

В даних вимірювань напруженості електричного поля знайдено також численні випадки реєстрації ЕМ-випромінювань з частотою шуманівського резонансу (ШР) і його вищих гармонік. Загальну карту всіх реєстрацій гармонік ШР подано на рис. 5, б.

Були виявлені моди коливань ШР (аж до 11-ї), які також просочувалися в іоносферу вище шару F2. На відміну від гармонік мережі, моди ШР виявлено лише на нічній стороні Землі, іноді навіть у ділянці термінатора, коли супутник був освітлений Сонцем. Спектральна густина гар-

монік ШР змінювалася у межах від десятої доли до $0.5 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^{-1} \text{Гц}^{-0.5}$.

Результати вимірювань основної гармоніки потужних ліній електропередач і мод шуманівського резонансу отримано вперше у світі. Перші результати були отримані за допомогою супутника C/NOFS NASA (масою близько 400 кг і з антенами довжиною 20 м) у 2008—2010 рр. Однак, незважаючи на велику різницю габаритів і мас супутників «Чибис-М» та C/NOFS (маса МС «Чибис-М» на порядок менша, а давачі електричного поля майже у 50 разів коротші), результати, отримані на МС «Чибис-М», мають добре співвідношення сигнал/завада в частині вимірювань електричного поля вказаних джерел. Крім того, ці дані отримані для ширшого діапазону широт ($\pm 52^\circ$), порівняно зі супутником C/NOFS ($\pm 13^\circ$), що дозволяє узагальнити результати вимірювань не тільки на екваторіальну ділянку, але й на середні широти.

Отримані результати є підставою для перегляду теорії поширення хвиль з частотами одиниці-десятки герц у порожнині Земля — іоносфера, оскільки перед цим вважалось, що ЕМ-поле такої частоти не просочується вище шару F іоносфери.

Висока чутливість електричного каналу і відносно малий рівень ЕМ-завад в даних вимірювача напруженості електричного поля дозволили отримати цікаву інформацію і при вивченні іоносферного альвенівського резонансу (ІАР), зазвичай досить рідко спостережуваного на борту супутників. У даних МС «Чибис-М» знайдено багато випадків реєстрації ІАР, при цьому вони спостерігалися в основному цілком близько від грозових фронтів і до того ж не тільки на нічній стороні, як виключно спостерігається при наземних вимірюваннях, але й на денній стороні орбіти. У деяких випадках форма ІАР була відмінною від нормальної або ж варіації ІАР доходили майже до 20 Гц, чого ніколи не спостерігається на Землі.

Як і в даних ШСЗ «Січ-1М», у даних МС «Чибис-М» часто спостерігаються сигнали дивної форми, які не ідентифікуються з жодним із відомих фізичних процесів. Ці події також викликають інтерес дослідників і вимагають детальнішого аналізу.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання завдань Договору № 6-02/14-1/1588 від 11.06.2014 р. на тему «Наукові основи та технічні пропозиції щодо створення комплексу апаратури для перспективних космічних досліджень» отримана така нова інформація.

1. Досліджено базові параметри одного з головних приладів, який використовується практично в кожному космічному експерименті — ферозондового магнітометра, зокрема його температурної стабільності. Розроблено новий підхід до розв'язання проблеми — замість мінімально можливої нелінійності поля котушки компенсації вимірюваного магнітного поля запропоновано й розраховано таку форму цього поля, при якій його усереднене значення не змінюється від коливань температури. Це дало змогу отримати найменший з відомих температурний дрейф магнітометра постійного струму, що підтверджено натурним експериментом. Подальші роботи будуть скеровані на зменшення габаритів і споживаної потужності ФЗМ, що необхідно у зв'язку з прогресуючою тенденцією до зменшення габаритів космічних апаратів, особливо для наукових досліджень.

2. З урахуванням накопиченого досвіду створення систем збору і опрацювання інформації запропоновано принцип побудови СЗНІ для НС, в основі якого лежить широке використання ПЛІС, що забезпечує малі масогабаритні характеристики при успішному виконанні покладених на СЗНІ завдань. Також розроблено інтерфейс для сполучення СЗНІ з бортовою апаратурою, зокрема з апаратурою радіолінії, який дозволяє передавати інформацію з високою швидкістю. На наступному етапі необхідно провести макетування та випробування такої СЗНІ з метою перевірки можливості її адаптації до різних космічних носіїв, а також перевірки наявності достатньої обчислюваної потужності СЗНІ для забезпечення управління усіма службовими системами НС.

3. Опрацьовано великий обсяг даних з МС «Чибис-М» та експерименту «Варіант» на борту супутника «Січ-1М», зібраних бортовими комплексами апаратури, виготовленими в ЛЦ ІКД.

Дані цих експериментів приведено до зручного для подальшого опрацювання вигляду, систематизовано і заархівовано. Звернена увага на великий експериментальний доробок, накопичений в цих експериментах, який вимагає подальшого аналізу.

Робота виконана при підтримці Договору № 6-02/14-1/1588 від 11.06.2014 р. з ІКД НАНУ-ДКАУ.

1. Афанасенко М. П., Беркман Р. Я. Анализ работы феррозонда в неоднородном измеряемом магнитном поле // Геофиз. аппаратура. — 1968. — № 38. — С. 32—43.
2. Беркман Р. Я. О влиянии высших четных гармоник в цепи возбуждения магнитных модуляторов // Автоматика и телемеханика. — 1965. — 26, № 2. — С. 333—336.
3. Ваврух М., Корепанов В. Механізм формування ліній гармонічного випромінювання в іоносфері // Вісник Львів. ун-ту. Сер. фіз. — 2013. — Вип. 48. — С. 180—198.
4. Глухов В. С., Лукенюк А. А., Шендерук С. Г. Унифицированный интерфейс бортовых систем КА // Космический проект «Ионосат-Микро». — К.: Академперіодика, 2013. — С. 126—133.
5. Певзнер Е. М., Петров Е. А., Резник Э. Е. Методика построения и расчета компенсатора постоянных магнитных полей // Геофиз. аппаратура. — 1968. — Вып. 38. — С. 25—29.
6. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев и др. — Л.: Энергия, 1979. — 320 с.
7. Янус Р. И. К теории феррозондовых магнитометров для неоднородных магнитных полей // Физ. металлов и металловедение. — 1962. — 14, № 3. — С. 366—373.
8. Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V., et al. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite // J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys. — 2014. — N 117. — P. 81—87.
9. Dudkin F., Korepanov V., Lizunov G. Experiment VARIANT — first results from Wave Probe instrument // Adv. Space Res. — 2009. — 43, N 12. — P. 1904—1909.
10. Korepanov V., Berkman R., Bondaruk B. Advanced flux-gate magnetometer with low drift // Proceedings of XIV IMEKO Word Congress “New measurements — challenges and visions”. — Tampere, Finland. — 1997. — Vol. IVA. — Topic 4. — P. 121—126.
11. Nemeč F., Santolic O., Parrot M., Berthelier J. J. Power line harmonic radiation: A systematic study using DEMETER spacecraft // Adv. Space Res. — 2007. — 40. — P. 398—403.

12. *Primdahl F.* Temperature compensation of fluxgate magnetometers // IEEE Trans. Magn. — 1970. — 6, N 4. — P. 819—822.
13. *Ripka P.* Magnetic Sensors and Magnetometers. — Boston: Artech House, 2001. — 514 p.
14. *Space engineering.* Space Wire-Links, nodes, routers and networks. — ECSS Secretariat ESA- ESTEC Requirements & Standards Division. — Noordwijk, The Netherlands. — 24 January 2003. - ECSS-E-50-12A. ESA Publications.

Стаття надійшла до редакції 11.12.14

*В. Є. Корепанов, А. А. Лукенюк, В. А. Проненко,
Ф. Л. Дудкин, А. А. Марусенков, С. Г. Шендерук*

Львовский центр Института космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Львов

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АППАРАТУРЫ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуется возможность понижения температурного дрейфа нуля феррозондовых магнитометров. Предложен новый способ уменьшения дрейфа путем создания поля компенсации измеряемого магнитного поля заданной конфигурации. Предложен принцип построения структурной схемы системы сбора и обработки научной информации для наноспутников и разработан скоростной интерфейс для передачи данных из системы в аппаратуру радиолинии. Обработан большой объем данных из микроспутника «Чибис-М» и эксперимента «Вариант»

на борту спутника «Січ-1М», где работали бортовые комплексы аппаратуры, изготовленной в ЛЦ ИКД. Обнаружено излучение мощных линий электропередач на основной частоте 50(60) Гц и моды колебаний шумановского резонанса, которые просачивались в ионосферу выше слоя F2.

Ключевые слова: феррозондовый магнитометр, ССНИ, обработка данных, излучения, шумановские резонансы.

*V. Ye. Korepanov, A. A. Lukeniuk, V. O. Pronenko,
F. L. Dudkin, A. A. Marusenkov, S. G. Shenderuk*

Lviv Centre of Institute for Space Research

INSTRUMENTATION DEVELOPMENT FOR PERSPECTIVE SPACE RESEARCHES

The ways of decreasing the flux-gate magnetometer temperature zero drift are studied. A new method to decrease the drift by creating a special configuration of measured magnetic field compensation field is proposed. The principle of the functional diagram of the system for scientific information processing and collection (SSIC) building for nano-satellites is designed. High-speed interface for data transfer from SSIC to radio line is developed. A large amount of data from microsatellite “Chibis M” and experiment “Variant” on board the satellite “Sich-1M”, which were registered by onboard instruments manufactured in LC ISR, are processed. An emission from power lines at the frequency of 50 (60) Hz and Schumann resonances modes which are penetrating to the ionosphere above the F2 layer were observed in these experiments.

Key words: flux-gate magnetometer, ODHS, data processing, radiation, Schumann resonances.