

УДК 621.376.56

Бортова інформаційна система для дослідження потоків часток в навколоземному просторі

В. О. Погрібний^{1, 3}, І. В. Рожанківський², С. А. Таянов²

¹Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

²Державний Університет «Львівська політехніка», Львів

³Інститут Телекомунікації Сільськогосподарсько-технічної академії, Бидгощ, Польща

Надійшла до редакції 13.04.98

Бортова інформаційна система СТЕП-Е призначена для ідентифікації, вимірювання енергії та визначення просторово-часових характеристик енергійних частинок магнітосфери та космічного простору. Вона працює разом із телескопічними детекторами, які встановлюються ззовні супутника. В результаті обробки сигналів давачів виявляються нестационарності потоків у вигляді різких змін інтенсивності потоку в порівнянні з середньою інтенсивністю, а також досліджуються стохастичні зв'язки між інтенсивностями випадкових потоків частинок і параметрами електричних і магнітних полів за допомогою крос-кореляційного аналізу.

ВСТУП

Проблема вивчення впливу сейсмічної активності Землі на її іоносферу та магнітосферу є актуальною як в фундаментальному, так і в прикладному аспектах. Ці дослідження мотивовані необхідністю пошуку тих явищ в іоносфері та магнітосфері, які можуть випереджати активну стадію землетрусів, що дуже важливо для комплексного вирішення питання про прогнозування землетрусів. Вивчення ж сейсмо-іоносферно-магнітосферних зв'язків за допомогою штучних супутників Землі дозволяє вести регулярні спостереження глобального масштабу.

Встановлено, що відгуки хвильових та корпускулярних складових магнітосфери несуть інформацію про землетруси. Однією з таких складових є захоплені та висиплені з радіаційних поясів Землі енергійні частинки: електрони, протони та альфа-частинки.

У ході різноманітних космічних експериментів з дослідження характеристик потоків енергійних частинок, зокрема з допомогою магнітного спектрометра «Марія» на орбітальній станції «Салют-7» у

1985 р. [9], магнітного спектрометра-телескопа на орбітальній станції «Мир» в 1987 р. [1–3], комплексу наукової апаратури «Електрон» на борту штучного супутника Землі «Метеор-3» в 1985–1986 рр. [7], виявлена просторова і часова кореляція між змінами інтенсивності потоків високоенергійних заряджених частинок і землетрусами. Це дає можливість розробити надійний метод короткотермінового прогнозування землетрусів.

Метою запланованого космічного експерименту «Попередження» є перевірка можливості короткотермінового прогнозу сейсмічної активності методом одночасного спостереження потоків захоплених і висиплених з радіаційних поясів Землі енергійних електронів, протонів і альфа-частинок. Такі спостереження будуть здійснюватись за допомогою розробленої авторами інформаційної системи СТЕП-Е, яка призначена для обробки сигналів двох ідентичних блоків давачів потоків енергійних частинок. Блоки давачів у вигляді телескопічних детекторів встановлюватимуться ззовні космічного апарата, а система СТЕП-Е — всередині об'єкта. Блок давачів складається з двох матричних напів-

провідникових кремнієвих детекторів D1 та D2 та двох сцинтиляційних детекторів D3, D4 з кристала CsJ(Tl). Матричні кремнієві детектори призначені для ідентифікації частинок та визначення напрямку їх приходу. Сцинтиляційний детектор D3 дає можливість одержувати енергетичні спектри в широкому діапазоні, а D4 дозволяє визначати інтегральні спектри найбільш енергійних частинок, що перетнули усі попередні детектори D1, D2, D3.

Нижче розглядаються особливості функціонування та побудови системи СТЕП-Е.

ОБРОБКА СИГНАЛІВ ДАВАЧІВ

Складність визначення параметрів та обробки сигналів давачів потоків енергійних частинок обумовлена, насамперед, накладанням сусідніх імпульсних сигналів, нестационарністю потоків частинок та специфікою знаходження кореляційних зв'язків між імпульсними потоками та неперервними сигналами, які надходять від давачів електричних та магнітних полів.

При розробці системи обробки сигналів СТЕП-Е використані запропоновані авторами методи корекції накладань імпульсів, визначення інтенсивностей нестационарних потоків енергійних частинок та знаходження кореляційних зв'язків між параметрами імпульсних потоків та електричних і магнітних полів.

Для усунення накладань імпульсів, які надходять від давачів потоків енергійних частинок, авторами запропонований алгоритм автоматичної корекції цих накладань [8]. Алгоритм полягає у запам'ятовуванні та відніманні від амплітуди накладеного імпульсу його п'єдесталу, що сформований попереднім імпульсом. Точність запропонованого методу не залежить від форми зрізу попереднього імпульсу, що суттєво спрощує реалізацію пристрою автоматичної корекції накладань.

Наступний метод стосується аналізу інтенсивності потоку $\lambda(t)$, яка є одним з найважливіших параметрів потоку і визначається як відношення числа зареєстрованих частинок або відповідно імпульсів до часового інтервалу аналізу. Для потоків енергійних частинок характерна постійність інтенсивності $\lambda(t) = \text{const}$ на довгих складових інтервалах реалізації θ_i . На коротких інтервалах аналізу інтенсивності можуть бути не однакові й суттєво відрізнятися від середньої інтенсивності $\lambda(t)$ в повному інтервалі θ_x [4]. Однак такі нестационарні послідовності імпульсів є найбільш інформативними при дослідженні навколосемного середовища. В залежності від процесів у навколосемному просторі

може мати місце різке збільшення інтенсивності $\lambda_i(t) \gg \lambda(t)$ на окремих інтервалах аналізу, що носять назву мікросплеск інтенсивності, або її спад $\lambda_i(t) \ll \lambda(t)$ (бухта інтенсивності) [6]. Мікросплески і бухти інтенсивності пропонуються визначати наступними умовами: якщо

$$\lambda_i^m(t) \geq K^{(+)} \overline{\lambda(t)}, \quad K^{(+)} > 1,$$

то таке перевищення розцінюється як мікросплеск інтенсивності, якщо

$$\lambda_i^m(t) \leq K^{(-)} \overline{\lambda(t)}, \quad K^{(-)} < 1,$$

то це бухта інтенсивності. Тут $K^{(+)}$, $K^{(-)}$ – априорно задані коефіцієнти.

При аналізі інтенсивності потоків виникає питання вибору тривалості інтервалів аналізу та середньої інтенсивності. Пропонуємо вибирати останню з попередньої реалізації випадкової послідовності імпульсів такої ж загальної тривалості θ_x :

$$\overline{\lambda(t)} = N_\theta(t) / \theta_x,$$

де $N_\theta(t)$ – число імпульсів, підраховане протягом попереднього інтервалу θ_x реалізації.

При відсутності даних про зв'язок $\lambda(t)$ з числом мікросплесків або бухт, i -й інтервал аналізу $\theta_i(t)$ доцільно визначати сумою випадкових інтервалів часу (пауз) Δt_m між імпульсами, число $N_c = \text{const}$ яких вибирається априорно, виходячи з характеру послідовності:

$$\theta_i = \sum_{m=1}^{N_c} \Delta t_m. \quad (1)$$

Таким чином, інтервал $\theta_i(t)$ починається від моменту появи останнього імпульсу $(i-1)$ -го інтервалу аналізу і триває до моменту появи N_c -го імпульсу. Для цього випадку поточна інтенсивність набуває вигляду

$$\lambda_i(t) = N_c / \theta_i(t).$$

Окрім аналізу інтенсивності на інтервалах $\theta_i(t)$, для визначення мікросплесків і бухт пропонуються аналізувати інтенсивність на коротких інтервалах аналізу τ . При цьому на інтервалах τ визначається поточна інтенсивність

$$\lambda_i^{(\tau)} = N_i^{(\tau)} / \tau,$$

де $N_i^{(\tau)}$ – кількість імпульсів, які прийшли за час τ .

Для зменшення масиву даних, що передаються бортовою телеметрією та несуть інформацію про інтенсивність, пропонують застосувати екстремальний аналіз. При цьому запам'ятовуються тільки інтервали аналізу з мінімальними і максимальними

значеннями поточної інтенсивності. Умова максимуму інтенсивності на i -му інтервалі:

$$(\lambda_i > \lambda_{i-1}) \wedge (\lambda_i > \lambda_{i+1}) \wedge (|\lambda_{i+1} - \lambda_i| > \delta),$$

де δ — априорно вибране значення в залежності від сигналу і вимог до точності.

Умова мінімуму на i -му інтервалі:

$$(\lambda_i < \lambda_{i-1}) \wedge (\lambda_i < \lambda_{i+1}) \wedge (|\lambda_{i+1} - \lambda_i| > \delta).$$

Після цього формується масив значень інтенсивності в екстремальних точках λ_i та інтервалів часу, коли вона вимірюється. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити масив даних при малих похибках перетворення, коли відсутні короткочасні різкі зміни інтенсивності. В цьому випадку інтервали аналізу інтенсивності доцільно вибирати достатньо широкими, тобто виходячи з умови (1).

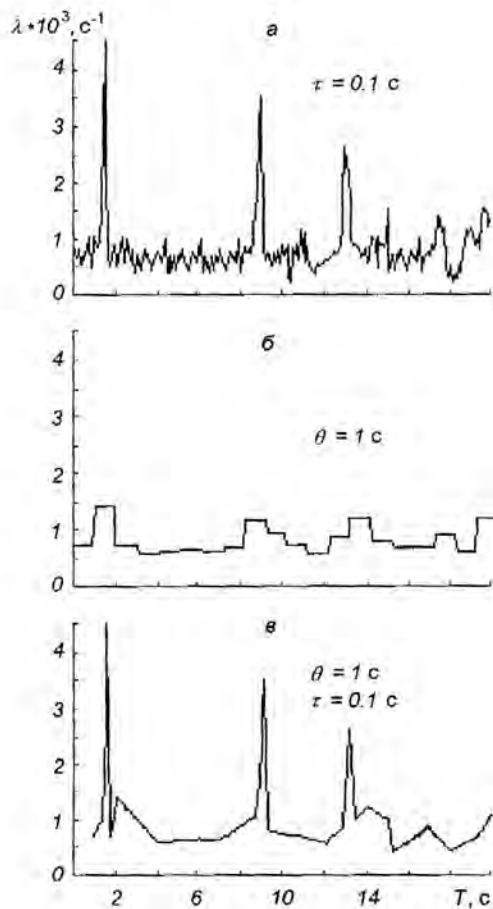


Рис. 1 Залежність інтенсивності від часу: *a* — виміряна під час космічного експерименту САМБО-79; *б* — перетворена при збільшеному інтервалі; *в* — перетворена за допомогою екстремального аналізу і лінійної інтерполяції

При наявності різких змін інтенсивності розглянутий метод дає велику похибку перетворення, аж до втрати інформації про мікросплески та бухти. Щоб не допустити втрати інформації і одночасно зменшити масив переданих телеметриєю даних, пропонуємо такий підхід. За допомогою екстремального аналізу на коротких інтервалах τ запам'ятовуються тільки початкові, максимальні (мінімальні) та кінцеві значення мікросплесків (бухт) і моменти часу їх появи. Вершина мікросплеску $\lambda_i^{(\tau)}$ визначається з допомогою екстремального аналізу за критерієм

$$(\lambda_i^{(\tau)}(t) \geq K^{(+)} \overline{\lambda(t)}) \wedge (\lambda_i^{(\tau)} > \lambda_{i-1}^{(\tau)}) \wedge (\lambda_i^{(\tau)} > \lambda_{i+1}^{(\tau)}).$$

Початок і кінець мікросплеску визначається наступними умовами. Якщо

$$(\lambda_i^{(\tau)}(t) < K^{(+)} \overline{\lambda(t)}) \wedge (\lambda_{i+1}^{(\tau)} \geq K^{(+)} \overline{\lambda(t)}),$$

то $\lambda_i^{(\tau)}$ — початкове значення мікросплеску, а якщо

$$(\lambda_i^{(\tau)}(t) < K^{(+)} \overline{\lambda(t)}) \wedge (\lambda_{i-1}^{(\tau)} \geq K^{(+)} \overline{\lambda(t)}),$$

то $\lambda_i^{(\tau)}$ — кінцеве значення.

Бухти визначаються аналогічно. На основі цього формується масив початкових, екстремальних та кінцевих значень мікросплесків і бухт та часових інтервалів, на яких вони спостерігаються. До нього додається масив даних усереднених інтенсивностей на довгих інтервалах аналізу $\theta_i \gg \tau$ та формується загальний масив «інтенсивність—час».

Перевірка запропонованого методу здійснювалася шляхом імітаційного моделювання на прикладі залежності інтенсивності від часу, яка була отримана під час космічного експерименту САМБО-79 для частинок з енергією $E > 35$ КєВ (рис. 1, *a*). Тут досліджуваний масив даних становить 200 значень інтенсивності, тривалість інтервалу вимірювання якої була задана достатньо малою ($\tau = 0.1$ с) для виявлення мікросплесків та бухт інтенсивності. На рис. 1, *б* зображена ця ж залежність при збільшенні інтервалу вимірювання до $\theta_i = 1.0$ с, в результаті чого кількість значень інтенсивності зменшилася до 20. В цьому випадку досягається суттєвий стиск даних, які передаються через бортову телеметрію, однак втрачається інформація про мікросплески та бухти. На рис. 1, *в* показані результати перетворення вихідної залежності із застосуванням екстремального аналізу та збільшенням інтервалів вимірювання інтенсивності з наступною лінійною інтерполяцією отриманих значень. Тут $\theta_i = 1.0$ с, $\tau = 0.1$ с, $K^{(+)} = 2$, $K^{(-)} = 0.5$, кількість значень інтенсивності 29. Необхідно за-

уважити, що повний масив даних, які необхідно передати бортовою телеметрією, збільшується на число значень часових параметрів мікросплесків та бухт (для розглянутого прикладу їх 9). З рис. 1, а видно, що запропоновані методи дають можливість зменшувати кількість переданих даних та не втрачати при цьому інформацію про мікросплески та бухти інтенсивності потоку часток.

Тепер перейдемо до розгляду методу знаходження кореляційних зв'язків інтенсивностей потоків частинок з параметрами інших неперервних сигналів. Для цього пропонується початково дискретизовану залежність інтенсивності перетворити в неперервну шляхом лінійної інтерполяції, а потім результат інтерполяції знову дискретизувати, але з рівномірною частотою дискретизації. Частота дискретизації вибирається з умови

$$f_{di} \geq 2 / \theta_{min},$$

де θ_{min} — мінімальний інтервал часу вимірювання інтенсивності. Після цього для усунення впливу високочастотних складових застосовується фільтрація низьких частот.

Для згладження коливань Гіббса, які виникають в результаті зрізання безмежної імпульсної характеристики фільтра, потрібно використовувати згладжуюче вікно (Хеммінга, Кайзера і т. п.) [5]. Похибку фільтрації мінімізуємо, використовуючи відповідні типи адаптації. Отриманий продискретизований з рівномірною частотою f_{di} сигнал є придатним для подальшого дослідження за допомогою будь-яких методів обробки неперервного сигналу.

Для визначення стохастичного зв'язку зміни електричного поля навколо Землі зі зміною інтенсивності потоку частинок доцільно використовувати крос-кореляційний аналіз. Для цього спочатку слід вибрати частоту дискретизації f_d обох сигналів. Будемо знаходити її з умови

$$f_d \geq \max[f_{di}, f_{dE}],$$

де f_{dE} — частота дискретизації неперервного сигналу (виходячи з частоти Найквіста).

Тоді крос-кореляційна функція сигналів інтенсивності і напруженості електричного поля для додатніх та від'ємних часових зсувів запишеться у вигляді:

$$K_{\lambda E}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} \lambda_k E_{k+m},$$

$$K_{\lambda E}(-m) = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} \lambda_{k+m} E_k,$$

де N — число відліків масиву даних, що відповідають напруженості електричного поля або інтенсивності потоку, λ_k та E_k — відліки інтенсивності

та напруженості в k -й момент часу, $m = 0, \dots, P$ — часові зсуви крос-кореляційної функції. Зв'язок зміни магнітного поля з інтенсивністю потоку часток досліджується аналогічно.

Результати моделювання підтвердили доцільність визначення кореляційних зв'язків між інтенсивностями потоків та енергетичними параметрами електричних та магнітних полів за допомогою розробленої методики.

СТРУКТУРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ СТЕП-Е

Запропоновані методи обробки імпульсних потоків реалізовані в інформаційній системі СТЕП-Е, яка, окрім визначення просторово-часових та енергетичних характеристик частинок, забезпечує обмін даними з бортовою телеметрією та автоматичне тестування на борту.

Система включає в себе два аналізатори імпульсів та блок живлення. Аналізатори мають ідентичну будову і призначені для обробки даних двох блоків давачів енергійних частинок СТЕП-D1 та СТЕП-D2 та видачі результатів обробки на бортову телеметрію. Окрім цього, аналізатори формують тестові сигнали для перевірки детекторів.

Аналізатор імпульсів (рис. 2) містить три пристрої попередньої обробки Y1, Y2, Y3, арифметично-логічний пристрій ALU, дешифратор DC, процесор CPU, генератор тактових імпульсів G, інтерфейс зв'язку з штатною телеметрією, інтерфейс зв'язку з системою збору наукової інформації та інтерфейс формування каліброваних імпульсів. Останні три пристрої зображені на рис. 2 одним блоком ST. Перші два пристрої попередньої обробки Y1 та Y2 мають ідентичну будову. На рис. 2 показаний також один із блоків давачів СТЕП-D1, який складається з чотирьох детекторів D1...D4.

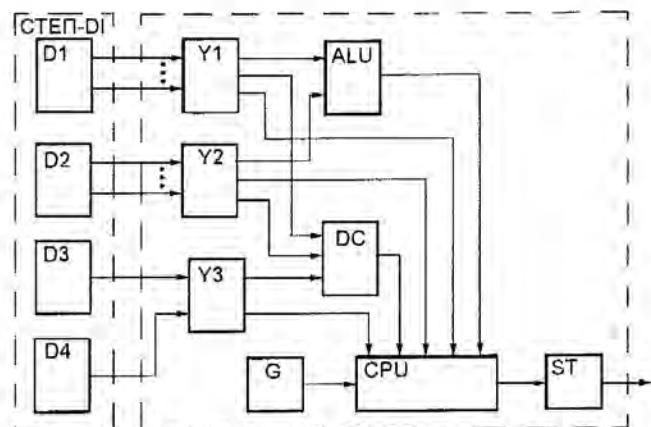


Рис. 2. Аналізатор імпульсів

Аналізатор імпульсів працює наступним чином. Пристрої Y1, Y2 перетворюють сигнали детекторів D1, D2 в дворозрядний двійковий код, що відповідає типу частинки, та п'ятирозрядний двійковий код, що відповідає номеру комірки давача, в яку попала енергійна частинка. Пристрої Y3 запам'ятовує максимальне значення імпульсного сигналу на виході детектора D3, яке відповідає енергії частинки. Далі з допомогою аналого-цифрового перетворювача цей сигнал перетворюється в п'ятирозрядний двійковий код.

Арифметично-логічний пристрій ALU на основі інформації про номери комірок, через які пройшла енергійна частинка в детекторах D1 та D2, визначає номер тілесного кута прильоту цієї частинки. Дешифратор DC на основі аналізу подій визначає номер детектора, до якого долетіла заряджена частинка, що для детекторів D1, D2, D4 відповідає номеру енергетичного діапазону відповідної частинки. Для детектора D3 номер енергетичного діапазону визначається з допомогою аналого-цифрового перетворювача.

На процесор CPU подається інформація про тип частинки (з виходів пристроїв Y1 та Y2), про номер тілесного кута (з виходу ALU) та про номер енергетичного діапазону (з виходів дешифратора DC та пристрою Y3). Через кожні 2.5 с процесор формує повідомлення (інформаційні кадри) про результати вимірювань (енергетичні спектри частинок та кутовий розподіл). При формуванні повідомлень для зменшення кількості передаваних даних використовуються алгоритми екстремального аналізу, наведені вище.

Для визначення мікросплесків та бухт інтенсивності інтервали нагромадження тривалістю 2.5 с додатково розбиваються на коротші інтервали. Мікросплески визначаються шляхом порівняння середньої інтенсивності за час 2.5 с з локальними інтенсивностями на коротших проміжках часу.

Запропоновані методи кореляційного аналізу використовуються при обробці даних на землі.

ВИСНОВОК

Наведені в даній роботі нові методи дозволяють визначати характеристики потоків енергійних частинок у випадку змінної інтенсивності та визначати стохастичні зв'язки між інтенсивностями потоків енергійних частинок та електричними і магнітними полями.

1. Воронов С. Ф., Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г. и др. Регистрация возрастания потоков высокоэнергичных частиц в районе БМА 10 сентября 1985 г. // Космич. исследования. — 1989. — 27, № 4. — С. 629.
2. Воронов С. Ф., Гальпер А. М., Колдашев С. В. и др. Возрастания потоков заряженных частиц высоких энергий в области БМА и сейсмичность Земли // Космич. исследования. — 1990. — 28, № 5. — С. 789.
3. Гальпер А. М., Дмитриенко В. В., Никитина Н. В. и др. Взаимосвязь высокоэнергичных заряженных частиц в радиационном поясе с сейсмичностью Земли // Космич. исследования. — 1989. — 27, № 4. — С. 789.
4. Лазутия Л. Л., Хрушинский А. А. Пульсирующие высыпания энергичных электронов в авроральной зоне // Энергичные частицы в авроральной магнитосфере. — Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1977. — С. 74–93.
5. Опенгейм А. В., Шафер Р. В. Цифровая обработка сигналов. — М.: Связь, 1979. — 416 с.
6. Погрибной В. А. Бортовые системы обработки сигналов. — Киев: Наук. думка, 1984. — 216 с.
7. Пустоветов В. П., Мальшев А. Б. Пространственно-временная корреляция землетрясений и вариаций потока высокоэнергичных частиц во внутреннем радиационном поясе // Космич. исследования. — 1993. — 31, № 5. — С. 84.
8. Pogribnyi V., Rozhankivsky I., Zelinski I., et al. Programable system for measurement and processing of the sensor signals of particles fluxes in space plasma / PDS'98. — Gliwice, 1998. — P. 337–343.
9. Voronov S. A., Galper A. M., Kirillov-Ugriyomov V. G., et al. Registration of sporadic increase of high energy particle flux near Brazilian anomaly region // Proc. 20-th Int. Cos. Ray Conf. — 1987. — Vol. 4. — P. 451.

ONBOARD INFORMATION SYSTEM FOR THE INVESTIGATION OF PARTICLE FLUXES IN THE CIRCUMTERRESTRIAL SPACE

V. O. Pohribnyi, I. V. Rozhankivskyi, and S. A. Taianov

The onboard information system STEP is intended for the identification, energy measurements, and determination of space-time characteristics particles in the magnetosphere and open space. It operates together with telescopic detectors which are installed outside a satellite. Processing of detector signals of energetic particles reveals that the fluxes are non-stationary — the flux intensities vary about drastically the average intensity. Stochastic relationships between the intensities of casual particle flows and the parameters of electric and magnetic fields are studied with the use of cross-correlation analysis.