

УДК 520.272.5

В. В. Кошовий, А. Б. Лозинський, О. Л. Івантишин,
Б. С. Харченко, Р. А. Лозинський

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОГО РАДІОМЕТРА НА БАЗІ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОТЕЛЕСКОПА УРАН-3 ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ СОНЦЯ

The results of observations of the solar eclipse on 1, August 2008 using digital radiometer on basis the decameter radio telescope URAN-3 are presented. The observations were performed using a technique of scanning the passing source by a fixed beam pattern of antenna. In culmination for the coordinates of the radio telescope URAN-3 obscuration of the Sun at optical wavelengths was 11,5%. Relations of integral flux of the Sun masked by the Moon to not masked has been obtained.

Key words: *digital radiometer, solar corona, radio observations.*

Наведено результати спостережень сонячного затемнення 1 серпня 2008 р з використанням цифрового радіометра на базі декаметрового радіотелескопа УРАН-3. Спостереження проводили методом проходження джерела через нерухому діаграму спрямованості антени. В момент кульмінації для координат радіотелескопа УРАН-3 величина затемнення видимого диска Сонця становила 11,5%. За результатами експериментального дослідження отримано оцінки відношення густини потоків Сонця, замаскованого Місяцем, до незамаскованого.

Ключові слова: *цифровий радіометр, сонячна корона, радіоспостереження.*

Дослідження процесів у сонячній короні розпочалося відразу після відкриття радіовипромінювання Сонця. Сонячна корона є ключем до розуміння процесів, що відбуваються на Сонці, а також важливим передвісником подальших подій в геліосфері.

Для ідентифікації подій у сонячній короні необхідні інструменти передусім з відповідним для цієї мети просторовим, часовим і спектральним розділенням та з достатнім динамічним діапазоном для одночасної миттєвої реєстрації подій різних масштабів за інтенсивністю [1–3].

На радіометри радіотелескопів системи УРАН поставлена задача безпосереднього вимірювання нормованого коефіцієнта кореляції сигналів, прийнятих антенами в рознесених пунктах, що, відповідно, не вимагає ні великого динамічного діапазону пристрою, ні значного його часового розділення.

Радіометри радіотелескопів системи УРАН використовують зміну геометрії відносного розташування антени і радіоджерела внаслідок обертання Землі [2]. Для цього антена радіотелескопа поділена по сигналу на східну і західну половини, кожна з яких спрямовується в напрямку на джерело. Виникає змінна в часі різниця ходу променів від джерела до півантен. Вона пропорційна проекції відстані між фазовими центрами півантен (вектора бази – для радіотелескопів УРАН ~120 м) на напрямок на джерело. В тракт передачі сигналу від однієї з півантен вмикається кабельна лінія затримки, яка компенсує до нуля геометричну затримку в певному (центральному) напрямку. Якщо під час обертання Землі джерело переміщається точно на цей напрямок, то різниця часу приходу прийнятих обома половинами антени сигналів стає нульовою, в інших випадках вона більша чи менша від нуля.

Сигнали з півантен поступають на корелятор, вихід якого пропорційний густині потоку випромінювання джерела

© В. В. Кошовий, А. Б. Лозинський, О. Л. Івантишин, Б. С. Харченко, Р. А. Лозинський, 2010

$$R(\vec{k}) \propto S_0^2 \cos(\varphi(\vec{k})),$$

\vec{k} – напрямок на джерело; φ – різниця фаз вхідних сигналів. Звідси зрозуміла можливість оцінки густини потоку випромінювання джерела, в певний розрахунковий (центральный) момент часу косинус стає рівним одиниці.

Корелятор радіометра базується на використанні модуляційного принципу, т. зв. методу модуляції фази. На вхід приймача подається по чергові то сума, то різниця сигналів, прийнятих двома півантенами, тобто один з сигналів поступає або в фазі з іншим, або в протифазі (звідси і назва методу та радіометра). Виділення кореляційного продукту здійснюється спеціалізованим синхронним пристроєм на виході приймача.

Для досліджень декаметрового радіовипромінювання об'єктів Сонячної системи та інших об'єктів, що характеризуються складною частотно-часовою структурою, виникла необхідність створити радіометр нового покоління.

Чотириканальний цифровий модуляційний радіометр радіотелескопа УРАН-3.

Основні вимоги до цифрового модуляційного радіометра:

- збільшення динамічного діапазону радіометра не менше на 10 дБ;
- реєстрування мілісекундної структури сигналів;
- цифрове керування радіометром;
- цифровий вихід та можливість гальванічної розв'язки електронного блоку та керуючого комп'ютера.

Фазовий модулятор (ФМ) і генератор керуючих напруг (ГКН) радіометра залишено без змін. ГКН забезпечує перемикання фази вхідного сигналу в ФМ та керування знаком коефіцієнта передачі ключового демодулятора. Окрім того, під час чергової зміни фази вхід модуляційної приставки на короткий час блокується для забезпечення нечутливості до комутаційних ефектів на виході приймача.

Вхідний сигнал радіометра оцифровується безпосередньо на вході приставки і всі наступні перетворення здійснюються над цифровим представленням сигналу. Для оцифрування вхідного аналогового сигналу вибрано мікросхему АЦП THS1206. Цифрова обробка здійснюється в два етапи – більш швидкодіючу частину виконується апаратно, проміжні результати передаються в комп'ютер, а завершується обробка програмно (в реальному часі). Як канал зв'язку вибрано послідовний порт RS232. Його максимальна пропускна здатність ~10 кБ/с, що дає змогу просто виконати лінію зв'язку і легко реалізувати гальванічну розв'язку.

Для можливості реєстрації імпульсних процесів (наприклад, радіовипромінювання шумових бур) частоту передачі пакетів проміжних результатів вибрано 2 кГц. З врахуванням обмежень на потік даних розмір одного пакету становитиме 3 байти, тому проміжні результати передаються в компресованому вигляді, тобто замість накопиченого за певний час значення дисперсії передається середньоквадратичне значення.

Як синхронізуючий генератор використано кварцовий генератор частотою 10 МГц, яким обладнаний ГКН. Вибрано такі характеристики відбору, попередньої обробки та передачі проміжних даних:

- частота дискретизації вхідних сигналів – 833 кГц (10 МГц, поділені на 12);
- розрядність аналогово-цифрового перетворення – 5 бітів;
- швидкість передачі даних по RS232 – 115 кБод;
- частота передачі пакетів проміжних даних – 2 кГц;
- час накопичення проміжного середньоквадратичного значення – 0,5 мс;
- кількість виборок первинних даних на одне передане значення – 420;
- розмір пакету проміжних даних – 3 байти (24 біти – 3 службових біти, 4 канали по 5 бітів даних, біт модуляції фазового модулятора);

– кількість проміжних виборок середньоквадратичного значення на половині періоду модулюючої частоти (10 Гц) – 100.

Цифрова частина радіометра здійснює необхідні операції керування АЦП, відбір даних, накопичення середньоквадратичного значення, формування і передачу в лінію пакету. Для цього вибрано ПЛІС ЕРМ3128АТС100-10 і розроблено відповідну прошивку для неї.

Окрім того, зауважимо, що оцінку середньоквадратичного значення з успіхом можна замінити оцінкою середнього абсолютного відхилення. В реальних умовах спостережень, коли розподіл значень сигналу часто спотворюється завадами, такий алгоритм оцінки потужності (дисперсії) є значно стійкішим (робастним) [3].

Структурна схема цифрового модуляційного радіометра радіотелескопа УРАН-3 наведена на рис. 1 (показано один канал).

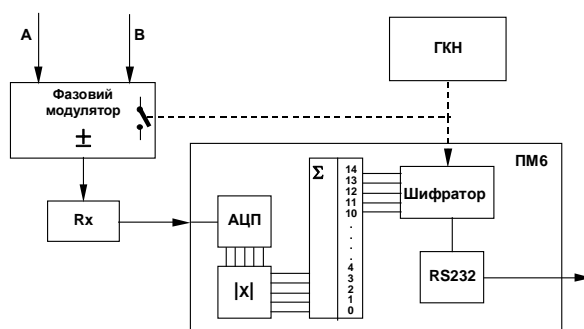


Рис. 1. Структурна схема цифрового модуляційного радіометра радіотелескопа УРАН-3.

Розділення алгоритмів попередньої (на апаратному рівні) і наступної програмної цифрової обробки разом з реалізацією апаратури на сучасній елементній базі дає змогу реалізувати в комплекті чотири ідентичних канали – зазвичай це сигнали в двох лінійних ортогональних поляризацій на двох різних частотах, які дотепер реєструвалися чотирма окремими пристроями.

Прийняті комп'ютером пакети проміжних даних декодуються і поступають на завершальну програмну обробку, яка дає змогу отримати п'ять вихідних сигналів:

- 1) класичний вихід модуляційного радіометра;
- 2) вихід, пропорційний потужності сигналу, прийнятого сумарною антеною радіотелескопа, часова розгортка прописує діаграму потужності антени;
- 3) вихід, пропорційний потужності сигналу, прийнятого різницевою антеною радіотелескопа, часова розгортка прописує діаграму потужності різницевої антени;
- 4) вихід, пропорційний середній потужності сигналу, прийнятого двома половинами антени радіотелескопа, часова розгортка прописує діаграму потужності половини антени;
- 5) прямий вихід проміжних даних, що дає можливість зареєструвати мілісекундні імпульси зміни потужності радіовипромінювання джерела.

Перед отриманням перших чотирьох вихідних сигналів спочатку здійснюється накопичення протягом 1 с декомпресованих проміжних даних у двох буферних змінних $\overline{U^+}$ і $\overline{U^-}$, які відповідають знаку операції в фазовому модуляторі (у цьому разі автоматично відбувається демодуляція і часткова фільтрація). Далі перший вихід формується як їх різниця, для отримання другого використовується тільки $\overline{U^+}$, третього – $\overline{U^-}$, а четвертий є результатом сумування $\overline{U^+}$ і $\overline{U^-}$. Завершується обробка подальшою фільтрацією простим рекурсивним фільтром з вибраною постійною часу.

Експериментальна апробація цифрового радіометра. За результатами тестування визначено, що розроблений цифровий радіометр дає змогу реєструвати мілісекундну структуру прийнятого сигналу, а його динамічний діапазон збільшено порівняно з попереднім на 12 дБ.

З використанням розробленого радіометра проведені експериментальні записи радіовипромінювання спокійного Сонця та потужних радіоджерел ЗС144 і ЗС274. На рис. 2 показані експериментальні записи для двох частот і двох поляризацій, проведені 1 серпня 2008 р., в день затемнення (зверху), і для порівняння через день (знизу). Записи підлягали попередній обробці для фільтрації явних завад.

На записах чітко вирізняються Сонце і два потужних радіоджерела, які в подальшому використані для уточнення калібрування.

На рис. 3 показано співставлення різних фрагментів вищеописаних експериментальних записів. Вони впорядковані по джерелах і по днях спостережень. Рівні сигналів наведені у відносних одиницях, масштаби осей збережені, але, для наочності, для кожного джерела вибрано свій масштаб. Добре простежується стабільність рівнів ЗС144 і ЗС274, що свідчить про достатньо стабільну іоносферу та інші умови прийому радіовипромінювання. В той же час записи Сонця для різних днів суттєво відрізняються по рівню. Під час подальшого аналізу виявилось, що таке значне зменшення рівня сигналу ніяк не може бути пояснено одним тільки ефектом затемнення корони.

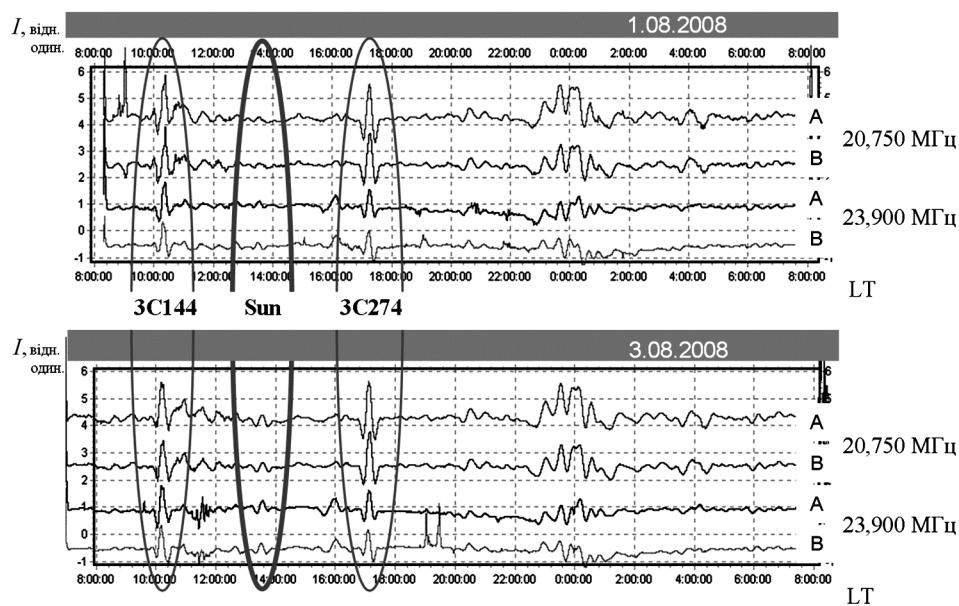


Рис. 2. Експериментальні записи радіовипромінювання спокійного Сонця та радіоджерел ЗС144 і ЗС274.

У вересні 2008 р. були проведені за такою ж схемою додаткові спостереження для визначення впливу Галактичного тла на рівень сигналу від Сонця в день затемнення.

Виявили, що в день затемнення положення Сонця збіглося з локальним мінімумом тла, який впливав на рівень прийнятого сигналу. Щоб усунути цей вплив тла на записи радіовипромінювання Сонця, їх відповідно було скоректовано на величину цього впливу (рис. 4).

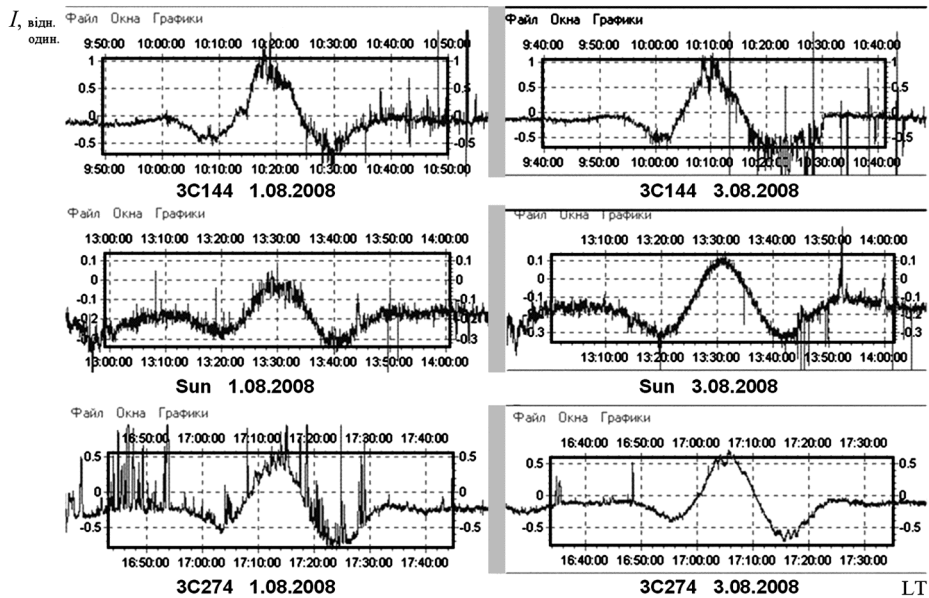


Рис. 3. Фрагменти експериментальних записів.

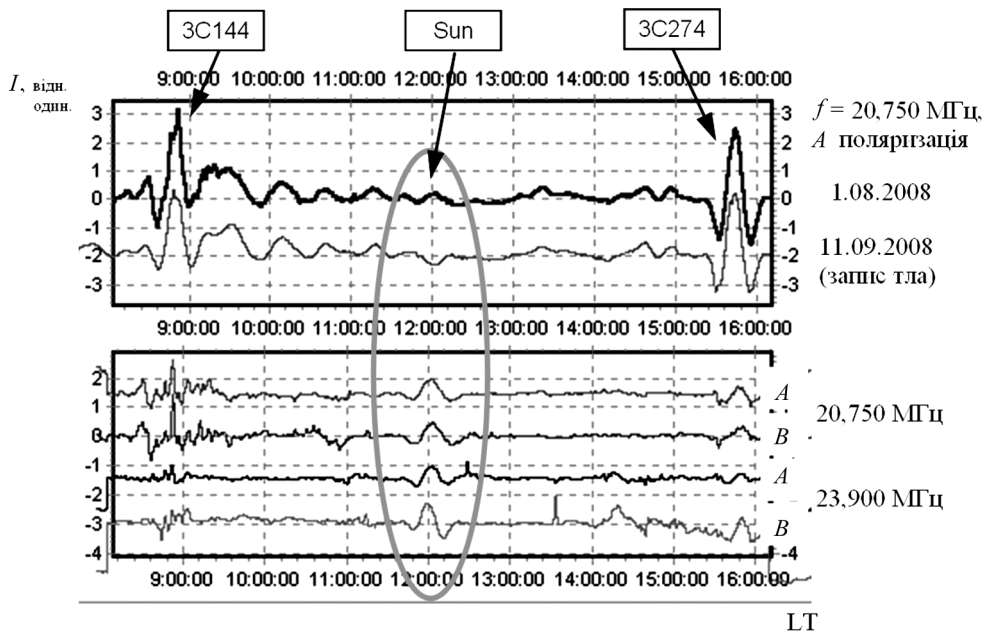


Рис. 4. Скоректовані записи радіовипромінювання Сонця з урахуванням впливу тла.

Подальша обробка полягала в усередненні всіх однотипних записів. Зокрема, усереднення було зроблене і для двох поляризацій, а також визначено відношення густини потоків Сонця, замаскованого Місяцем до незамаскованого. На рис. 5 наведено графіки усереднених записів радіовипромінювання незатемненого Сонця (1) і запису радіовипромінювання Сонця в день затемнення (2) для двох частот.

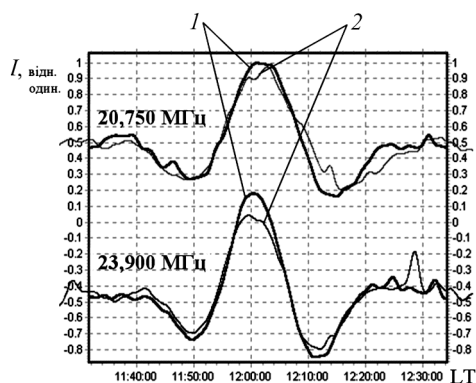


Рис. 5. Експериментальні записи радіовипромінювання Сонця.

Відношення густини потоків Сонця, замаскованого Місяцем до незамаскованого, для частоти $f = 20,750$ МГц становило $Se/S = 0,89 \pm 0,03$, а для частоти $f = 23,900$ МГц – $Se/S = 0,82 \pm 0,02$.

ВИСНОВКИ

Розроблений цифровий радіометр радіотелескопа УРАН-3 при експериментальній апробації продемонстрував суттєво низькі власні шуми та широкий динамічний діапазон, що дає змогу проводити спостереження без необхідності перемикання чутливості, як це було в попередньому радіометрі.

Створений цифровий радіометр дає можливість проводити спостереження мілісекундної структури радіовипромінювання Сонця та Юпітера. Створюються можливості спостережень флуктуацій інтенсивності та фази радіовипромінювання радіоджерел (мерехтіння) на неоднорідностях середовища поширення, наприклад, у кореляційній діаграмі можна врахувати флуктуації інтенсивності радіовипромінювання, прийнятого половинами антени радіотелескопа, чи, навпаки, сумарною антеною.

Винесення завершальної обробки в програмну частину дає змогу легко модифікувати та розширювати алгоритми роботи цифрового радіометра, отримувати додаткову корисну інформацію, яка була недоступною в попередній реалізації модуляційного радіометра.

За результатами експериментального спостереження сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. з використанням цифрового радіометра отримані оцінки відношення густини потоків Сонця, замаскованого Місяцем, до незамаскованого. Для частоти $f = 20,750$ МГц це відношення становило $Se/S = 0,89 \pm 0,03$, для частоти $f = 23,900$ МГц – $Se/S = 0,82 \pm 0,02$.

Створення цифрового радіометра на базі декаметрового радіотелескопа УРАН-3 дасть можливість на якісно новому рівні проводити дослідження декаметрового радіовипромінювання Сонця.

1. Крюгер А. Солнечная радиоастрономия и радиофизика. – М.: Мир, 1984.
2. Subramanian K. R. Brightness temperature and size of the quiet Sun at 34.5 MHz // *Astronomy & Astrophysics*. – 2004. – **426**. – P. 329–331.
3. Ramesh R. Low Frequency Radio Emission from the “Quiet” Sun // *J. Astrophysics and Astronomy*. – 2000. – **21**. – P. 237–240.
4. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН / А. В. Мень, С. Я. Брауде, С. Л. Рашковский и др. // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1997. – **2**, № 4. – С. 385–401.
5. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. – М.: Финансы и статистика, 1983. – С. 341–343.