КОРЕЛЯЦІЙНА ОБРОБКА СИГНАЛІВ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ РАДІОСИСТЕМ

Пуляєв В. О., Решетняк Т. В.

Рассмотрен пример модернизации коррелятора специализированной радиосистемы – радара некогерентного рассеяния, работающего в реальном времени в режиме мониторинга состояния околоземного космического пространства. В структуру этого коррелятора вводятся дополнительные вычислительные каналы, линии задержки и элементы связи между ними. Данная модернизация позволяет получать высотное распределение автокорреляционных функций сигнала, рассеянного на ионизированных частицах ионосферной плазмы, в виде основных и зеркальных составляющих, которые взаимно дополняют друг друга. Как результат – вдоль направления зондирования на каждом участке без ухудшения высотного и временного разрешений повышается статистическая точность расчета статистических характеристик этого сигнала. Также дополнительно учитываются характерные особенности поведения высотного профиля мощности сигнала рассеяния.

Розглянуто приклад модернізації корелятора спеціалізованої радіосистеми – радара некогерентного розсіяння, працюючого в реальному часі в режимі моніторингу стану навколоземного космічного простору. В структуру цього корелятора вводяться додаткові обчислювальні канали, лінії затримки та елементи зв'язку між ними. Дана модернізація дозволяє отримувати висотний розподіл автокореляційних функцій сигналу, розсіяного на іонізованих частках іоносферної плазми, у вигляді основних і дзеркальних складових, що взаємно доповнюють одна одну. Як результат – вздовж напрямку зондування на кожній ділянці без погіршення висотного та часового розрізнень підвищується статистична точність розрахунку статистичних характеристик цього сигналу. Також додатково враховуються характерні особливості поведінки висотного профілю потужності сигналу розсіяння.

An example of the modernization of the correlator of a specialized radiosystem – of the incoherent scatter radar, which is operating in real time in the mode of monitoring the state of near-Earth space, is given. In the structure of this correlator introduces additional computational channels, delay lines and communication elements between them. This modernization makes it possible to obtain of the height distribution of the autocorrelation functions of the signal scattered by ionized particles of the ionospheric plasma, in the form of basic and complementary mirror components. These components mutually complement each other. As a result, along the direction of sound for each high-rise element without degrading the resolution of height and time, the statistical accuracy of calculating the statistical characteristics of this signal increases. Also, the characteristic features of the behavior of the power profile of the scattering signal along altitude are also taken into account.

Пуляєв В. О. д-р техн. наук, проф.,
зам. дир. Інститута іоносфери НАН та МОН України
pulyayev@kpi.kharkov.ua

Решетняк Т. В. ст. преп. каф. ІСПР ДДМА
reshetnyak_201@mail.ru

Інститут іоносфери НАН та МОН України, м. Харків.

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

УДК 628.396

Пуляєв В. О., Решетняк Т. В.

КОРЕЛЯЦІЙНА ОБРОБКА СИГНАЛІВ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ РАДІОСИСТЕМ

При дистанційному дослідженні верхньої атмосфери Землі за допомогою радіохвиль [1] завдання стоїть у визначенні таких статистичних характеристик відбитого від іоносферної плазми сигналу, як його автокореляційна функція (АКФ). Ця характеристика для даного шумоподібного сигналу, або, як його ще називають, сигналу некогерентного розсіяння (НР) є базовою в розрахунках [2] низки параметрів навколоземного космічного простору. На висотному інтервалі 80–1000 км такими параметрами є електронна концентрація, кінетичні температури іонів і електронів, газовий складу, тощо. Для цього АКФ обчислюють на кожній висотній ділянці, протяжність якої уздовж напрямку зондування задається довжиною імпульсного об'єму розсіяння в зоні діаграми спрямованості антени у складі спеціалізованої радіосистеми. Роль цієї радіосистеми виконує імпульсний радар НР, що призначений для випромінювання зондуючої радіохвилі та відповідного розрахунку статистичних характеристик прийнятого сигналу.

Метою роботи є зменшення статистичних похибок обчислень ординат АКФ, не використовуючи методи, що погіршують висотне (збираючи результати вздовж декількох ділянок) або часове (довго накопичуючи дані) розрізнення. Для цього пропонується покращення результатів обчислень шляхом удосконалення структури кореляційного пристрою обчислювальної системи радара.

Для розрахунку автокореляційних функцій випадкових процесів, як правило, використовують пристрої, які отримали назву кореляторів [3–5]. Якщо вони здійснюють одночасний (паралельний) кореляційний аналіз, то мають назву багатоканальних пристроїв реального часу. В кожному із їхніх n каналів (за номерами $k = 0, 1, 2, ..., n-1$) розраховуються миттєві значення ординат автокореляційної функції $R(k\tau)$ кожна для своїх фіксованих затримок $k\tau = 0, \tau, 2\tau, ..., (n-1)\tau$, де τ – крок за затримкою (елементарний часовий зсув), який вибирається з оглядом на фізичні особливості характеристик досліджуваного середовища.

Такий розрахунок відбувається послідовно для всіх поточних ділянок, що мають центри на висотах (дальностях) $h = ct/2$ (де t – часова затримка сигналу на радіолокаційній розгортці (тобто вздовж шкали висот) відносно моменту випромінювання радіоімпульсу, а c – швидкість світла). Кількість ординат (каналів) корелятора n залежить від тривалості T радіоімпульсу зондування прямокутної форми, а також кроку τ.

Наприклад, обчислювальний пристрій радара Інституту іоносфери (м. Харків) розраховує до $n = 20$ ординат АКФ [6], при цьому для радіозондування іоносферної плазми у метровому діапазоні радіохвиль (частота випромінювання $f_0 = 158$ МГц) елементарний зсув прийнято за величину $\tau = 30$ мкс. В результаті цього тривалість радіоімпульсу зондування, що задається із співвідношення $T \geq n\tau$, вибрана у 660 мкс. Це значення дає можливість перекрити досліджуваний інтервал кореляції флуктуацій густини електронної плазми для даного (100–1000 км) діапазону висот і частоти f_0, тобто дозволяє отримати АКФ у вигляді лінії достатньої для подальшого аналізу довжини. Тривалість радіоімпульсу зондування при цьому задає висотне розрізнення, а саме $\Delta H = cT/2 = 100$ км.

А от радіосистема обсерваторії Хайстек (США) для зондування використовує дециметровий діапазон (f_0 = 440 МГц). При цьому залучено значення $\tau = 12$ мкс, а значить – є можливість користуватися коротшим радіоімпульсом, тривалість якого за тієї ж кількості необхідних ординат АКФ відповідає висотному розрізненню у $\Delta H = 36$ км.

Розрахунок ординат АКФ у кореляторі в кожному з його *k* каналів відбувається відповідно до виразу [6]:

$$R(k\tau, h) = \int_{\Delta T} U(t) \cdot U(t - k\tau) dt \,, \tag{1}$$

де $U(t)$ і $U(t-k\tau)$ – основний і затриманий сигнали розсіяння, що поступають в корелятор від ділянок з центрами на висотах *h*. Результати для кожної ділянки статистично накопичуються від випромінювання до випромінювання на протязі часу ΔT.

Недолік такого режиму обробки в тому, що хоч пристрій і дає можливість отримати максимально можливе висотне розрізнення ΔH, проте не забезпечує задовільну статистичну точність результату. Справа в тому, що сигнал розсіяння, будучи сам випадковим процесом, приймається на фоні космічних та апаратурних шумів, і відношення сигнал/шум часто (а для висот вище 500 км практично завжди) менше одиниці. І хоч спеціалізовані радіосистеми використовують антени з поверхнями у тисячі квадратних метрів, потужні (мегавати) передавачі, надчутливі приймачі, проте без шляхів покращення варіантів статистичної обробки надійність даних все ж залишається низькою.

Ще один з варіантів обробки [2] полягає в наступному. Він також використовує пристрій з рядом паралельно працюючих кореляційних каналів, кожний з яких складається з лінії затримки та перемножувача, і за рахунок цього реалізує одночасне обчислення всіх ординат АКФ у реальному часі. Однак у цьому способі з метою покращення статистичної точності розрахунків погоджуються на погіршення часового розрізнення, накопичуючи *n* ординат АКФ в оперативній пам'яті обчислювача протягом *m* циклів випромінювання (утворюючи сеанси тривалістю від декількох до десятків хвилин) для кожної ділянки на висотах $h = ct/2$ згідно з виразом:

$$\begin{gathered} R^{(i)}(k\tau, h) = U^{(i)}(t) \cdot U^{(i)}(t - k\tau); \\ k = 0, 1, ..., (n-1); \\ i = 1, 2, ..., m. \end{gathered} \tag{2}$$

А потім додатково статистичну точність підвищують ще й за рахунок вторинної обробки. Для цього після накопичення починається аналіз інформації, сортування ординат АКФ вздовж висоти та усереднення їх по висотним групам.

Недоліком цього методу є те, що підвищення статистичної точності, як було сказано вище, досягається за рахунок погіршення висотного розрізнення, що в методі НР не бажано, особливо при дослідженні швидкоплинних процесів в тонких іоносферних шарах, які мають назву D, E, F1, F2 [1]. Ще й видача кінцевого результату відсувається на деякий термін, тобто корелятор перестає працювати в режимі реального часу. Унеможливлюється оперативний аналіз стану іоносфери, коли рішення треба приймати миттєво під час реєстрації раптових процесів в іоносферній плазмі (поява ефектів від вибухів, землетрусів, під час випробувань ядерної та геофізичної зброї, запусків ракет, від дії сонячного термінатору, магнітних збурень та ін.).

В основу функціонування нової структури корелятора поставлено задачу по видачі результатів не тільки в реальному часі, але ще й при підвищеній статистичній точності обчислень, яка не буде визивати потреби в подальшому об'єднанні результатів від декількох висотних ділянок. Суть роботи такого корелятора є наступною [7].

Якщо розглядати особливості поведінки елементів випадкового ряду, який відображує стаціонарний процес, то відомо, що його АКФ є парна (дзеркальна). Для отримання автокореляційної функції у цьому випадку не має значення, як організовано процес перемножування

відліків сигналу, тобто по відношенню до поточного елемента цифрового ряду $U(t)$ все одно, де знаходиться його пара – зліва, тобто $U(t-k\tau)$, чи справа, тобто $U(t+k\tau)$, результат об'єднання цих множень суттєво точність не покращує. Що ж до некогерентно розсіяного іоносферою сигналу, то його відліки вздовж висотної ділянки відображують поведінку вже нестаціонарного процесу, що пов'язано зі зміною з висотою параметрів іоносфери, тобто у цьому випадку парні АКФ будуть відрізнятися. А отже, розрахувавши основну і так звану дзеркальну АКФ, ми гарантуємо, що в цьому випадку вони будуть відображати характер різних частин висотної ділянки протяжністю ΔН. Тобто відбудеться врахування інтенсивності сигналу НР, яка змінюється вздовж цієї ділянки. А так як кількість відліків збільшується вдвічі, то вони додатково статистично доповнять один одного.

Цю особливість розрахунків наглядно демонструє наведене на рис. 1 графічне зображення процесу імпульсного зондування. На цьому рисунку ілюструється, як просувається радіоімпульс зондування тривалістю Т в іоносфері на фоні профілю потужності сигналу НР. Прийняті в моменти часу ($t \pm k\tau$) відліки сигналу U прив'язані кожний до свого конкретного висотного положення радіоімпульсу. Ці положення вздовж напрямку зондування для наочності додатково поділені ще й на елементи *hi*, зв'язані з періодом тактування АЦП серією *UT*. Їх кількість на протязі інтервалу ΔH (в даному випадку $n = 4$) визначає кількість ординат АКФ, які можна отримати.

При такому підході можна спостерігати, що кожне миттєве значення прийнятої напруги $U(t \pm k\tau)$ є суперпозицією елементарних сигналів, некогерентно розсіяних частками об'ємної плазми на ряді висотних елементів на ділянці ΔH (розташовані вздовж вертикалі прямокутники темного кольору).

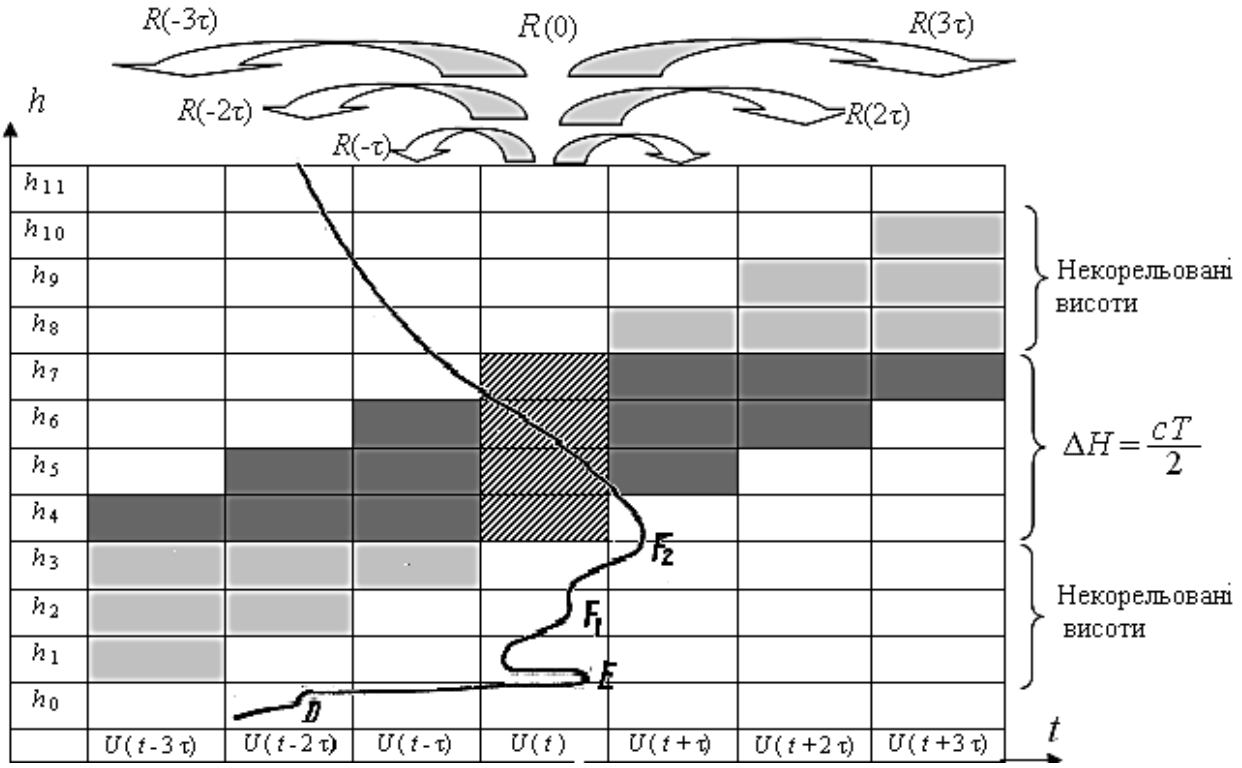

Рис. 1. Процедура отримання основних та додаткових значень ординат АКФ

Для прикладу розглянемо момент, коли положення радіоімпульсу зондування збігається з висотами від h_4 до h_7 (штрихове забарвлення).

Для цього моменту часу корелятор згідно з формулою (2) може миттєво видати значення ординат АКФ сигналу розсіяння, які пов'язані з елементами, що відображають характер, в основному, нижньої частини ділянки протяжністю h_4 … h_6. Це тому, що відповідно до теорії іоносферного розсіяння корелюють тільки розташовані на одній висоті складові, які входять до відліків від $U(t-3\tau)$ до $U(t)$. При цьому сигнали у вигляді складових від нижніх (з більш світлим фоном) елементів (h_1 … h_3) із-за того, що відстань до них більше дебаєвського [2] радіусу екранування (тобто більше десятка сантиметрів), після перемножування з сигналом $U(t)$, щ займає центральне положення, обов'язково дадуть тільки некорельований шум.

Пропозиція, як було сказано вище, зводиться до того, щоб одночасно використовувати ще й інші результати взаємного множення. Їх можна отримати, якщо додатково перемножувати $U(t)$ з відліками від $U(t+\tau)$ до $U(t+3\tau)$ згідно з виразом:

$$R_1(k\tau, h) = U(t)\cdot U(t+k\tau). \tag{3}$$

При цьому буде отримана корисна інформація від задіяної верхньої частини все тієї ж ділянки (висотні елементи h_5 … h_7) на фоні свого некорельованого (нульового) шуму – від висотних елементів (h_8 … h_{10}).

Цифровий корелятор, який за рахунок введення додаткових кореляційних каналів і схем складання результатів може виконувати такі дії, пропонується реалізувати у вигляді, зображеному на рис. 2.

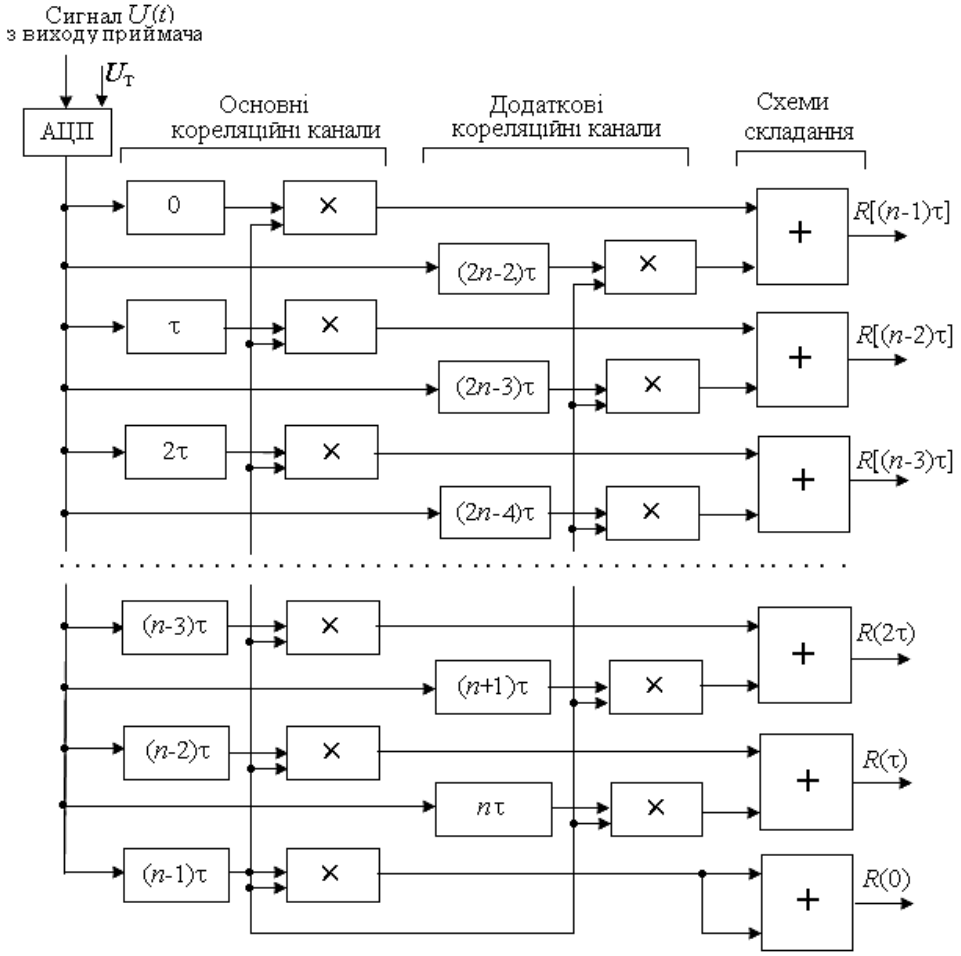

Рис. 2. Цифровий корелятор з додатковими кореляційними каналами

Таким чином, щоб реалізувати удосконалений спосіб розрахунку висотного розподілу автокореляційних функцій сигналу НР за допомогою обчислювального пристрою, що здійснює паралельний кореляційний аналіз у реальному часі, необхідно проводити зондування іоносфери радіоімпульсом з прямокутною обвідною та довжиною $T \geq n\tau$. При цьому на виході всіх *n* паралельних каналів пристрою відносно поточних висотних ділянок протяжністю $\Delta H = cT/2$, що мають центри на дальностях (висотах) $h = ct/2$, будуть одночасно присутні значення ненормованих ординат автокореляційної функції, які пристрій розраховує згідно з виразом:

$$R_1(k\tau, h) = U(t) \cdot U(t - k\tau); \quad k = 0, 1, 2, ..., n-1, \tag{4}$$

де $U(t)$ – квантовані (цифрові) значення сигналу розсіяння, що надходять з АЦП з кроком τ, величину якого задає тактова серія U_T.

В той же час цей багатоканальний пристрій для тих же ділянок з центрами на висотах h має змогу розраховувати ще й допоміжні значення ординат АКФ згідно з виразом:

$$R_2(k\tau, h) = U(t) \cdot U(t + k\tau) \tag{5}$$

за рахунок вводу в нього *n* додаткових кореляційних каналів. Значення отриманих однойменних ординат АКФ поступають на схеми складання, тобто вихідний результат в новій структурі корелятора формується як значення:

$$R(k\tau, h) = R_1(k\tau, h) + R_2(k\tau, h). \tag{6}$$

ВИСНОВКИ

В статті приведено опис структурної схеми корелятора, використання якого в процесі розрахунку висотного розподілу ординат АКФ сигналу, який отримується як відбиття від іоносферної плазми, дає можливість уточнити результати дистанційних вимірювань. При цьому береться до уваги та особливість, що цей шумоподібний сигнал відображує характер нестаціонарного процесу. В результаті значення двох перемножувань непарних відліків сигналу хоч і є дзеркальними, проте вони різні по суті, то їх складання призведе до поліпшення до $\sqrt{2}$ раз статистичної точності обчислень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пуляєв В. О. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн : монография / В. О. Пуляєв, Д. А. Дзюбанов, И. Ф. Домнин. – Х. : НТУ «ХПИ», 2011. – 240 с.

2. Пуляєв В. О. Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі : монографія / В. О. Пуляєв, Є. В. Рогожкін, О. В. Богомаз. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – 272 с.

3. Рогожкин Е. В. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР : монография / Е. В. Рогожкин, В. А. Пуляев, В. Н. Лысенко. – Х. : НТУ «ХПИ», 2008. – 256 с.

4. Жовинский В. Н. Корреляционные устройства / В. Н. Жовинский, В. Ф. Арховский. – М. : Энергия, 1974. – 248 с.

5. Farley D. T. Incoherent scatter correlation function measurements / D. T. Farley. – Radio Science, 1969, V. 4, №. 10 – P. 935–953.

6. Лысенко В. Н. Корреляционная обработка сигнала НР / В. Н. Лысенко, А. Ф. Кононенко, Ю. В. Черняк // Вестн. НТУ «ХПИ». – Х. : НТУ «ХПИ», 2006.– № 31. – С. 77–83.

7. Пат. 120837, МПК G01S 13/95 (2006.01). Спосіб обчислення автокореляційної функції сигналу НР за допомогою багатоканального пристрою / В. О. Пуляєв, Є. В. Рогожкін, Л. Я. Ємельянов ; заявник та патентовласник Інститут іоносфери НАН і МОН України. – № и201703258 ; заявл. 05.04. 2017 ; опубл. 27.11.2017, Бюл. 22.

Стаття надійшла до редакції 09.10.2017 р.