

УДК 621.396

**В. О. Пуляєв, О. В. Богомаз**

Інститут іоносфери Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України, Харків

## **ІМІТАЦІЯ СИГНАЛІВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ З УРАХУВАННЯМ ВИСОТНОГО РОЗПОДІЛУ ІОНОСФЕРНИХ ПАРАМЕТРІВ, ДИНАМІКИ ПЛАЗМИ ТА ЗАВАДОВИХ СКЛАДОВИХ**

---

*Представлено способи синтезу некогерентно розсіяних сигналів, що враховують висотний розподіл іоносферних параметрів (температури іонів та електронів, концентрацію електронів, відносний вміст іонів різних сортів), наявність динамічних процесів у плазмі (колективний рух і струми), а також наявність шумоподібних завад.*

---

### **ВСТУП**

Задача оцінювання похибок визначення параметрів іоносферної плазми при використанні методу некогерентного розсіяння (НР) [11] є досить складною. По-перше, НР-сигнал є випадковим, його прийом та обробка здійснюються в умовах потужних завад різного походження. По-друге, математичні моделі, що описують вимірювальний радіолокаційний канал, дуже громіздкі, а деякі їхні характеристики та параметри є випадковими та нестационарними. Внаслідок цього аналітичне дослідження похибок у загальному випадку є неможливим. Достовірні оцінки похибок можна отримати лише за допомогою статистичного моделювання. Тому задача розробки та вдосконалення способів формування контрольного сигналу — сигналу зі статистичними характеристиками, близькими до характеристик сигналу НР, — залишається дуже актуальною. До того ж бажано не лише моделювати контрольний сигнал за допомогою комп'ютерних програм, а і забезпечити можливість його синтезу у вигляді електричних сигналів.

Найпростішим з точки зору формування контрольного сигналу з потрібними характеристиками можна вважати спосіб [7], який базується на пропусканні шуму крізь вузькосмуговий фільтр. Також використовується спосіб, за яким

контрольний сигнал формується як сума гармонічних коливань. Апаратну реалізацію цього способу представлено у роботі [6], програмну — у роботі [1].

Недоліком першого способу є недостатня гнучкість. Спектральна густина потужності (СГП) вихідного сигналу визначається амплітудно-частотною характеристикою лінійного фільтра, крізь який пропускається сигнал типу «білий шум». Це означає, що за допомогою одного фільтра можна імітувати сигнал, що відповідає лише одному зі станів іоносфери (заданим значенням температур іонів та електронів та заданому іонному складу). Створення ж фільтра зі змінними параметрами є складною інженерною задачею.

Другий спосіб позбавлений описаного вище недоліку, проте є складнішим з точки зору його реалізації. Спосіб полягає у формуванні сигналу з потрібною СГП за допомогою  $N$  окремих незалежних синусоїдальних генераторів, які виробляють рівномірно розподілені вздовж осі частот гармонічні складові з керованою амплітудою. Число  $N$  визначається необхідною відстанню між частотами спектральних складових.

Сумарний сигнал у цьому випадку має вигляд

$$S^{\text{сигн}}(t) = \sum_{i=1}^N A_i^{\text{сигн}} \sin(\omega_i t + \theta_i), \quad (1)$$

де  $\omega_i$  — кругова частота,  $\theta_i$  — випадкова фаза,

рівномірно розподілена на інтервалі  $[-\pi; \pi]$ ,  $A_i^{\text{сигн}}$  — амплітуда  $i$ -го гармонічного коливання, що пов'язана із заданими значеннями  $W_i$  СГП НР-сигналу співвідношенням

$$A_i^{\text{сигн}} = \sqrt{W_i^{\text{сигн}}} . \quad (2)$$

Обидва варіанти не враховують наявність завод, які завжди мають місце в реальних умовах та додаються до корисного сигналу. Задачею досліджень є розробка способу синтезу суми сигналу НР та заводи з довільними СГП. Додатково передбачено можливість оперативної зміни СГП НР-сигналу відповідно до зміни значень параметрів плазми.

### ФОРМУВАННЯ СУМИ НР-СИГНАЛУ ТА СИГНАЛУ ЗАВАДИ

Спосіб синтезу суми сигналу НР та сигналу заводи полягає у наступному.

За відомими параметрами іоносферної плазми спочатку розраховується СГП НР-сигналу  $W_i^{\text{сигн}}$  [9]. Після цього у відповідності з (2) обчислюються  $N$  амплітуд гармонік  $A_i^{\text{сигн}}$ . Потужність цього сигналу прямо пропорційна сумі квадратів амплітуд:

$$P^{\text{сигн}} \propto \sum_{i=1}^N (A_i^{\text{сигн}})^2 . \quad (3)$$

Аналогічно за допомогою  $M$  амплітуд  $A_j^{\text{зав}}$ , які також пов'язані залежністю (2) з СГП заводи  $W_j^{\text{зав}}$ , задається потужність сигналу заводи:

$$P^{\text{зав}} \propto \sum_{j=1}^M (A_j^{\text{зав}})^2 . \quad (4)$$

Внаслідок того, що абсолютні значення складових СГП  $W_i^{\text{сигн}}$  та  $W_j^{\text{зав}}$  (а значить, і амплітуд  $A_i^{\text{сигн}}$  та  $A_j^{\text{зав}}$ ) задаються у довільному масштабі (це пов'язано з тим, що у більшості випадків при моделюванні відомі лише форми СГП сигналу та заводи), для виконання умови  $q = \frac{P^{\text{сигн}}}{P^{\text{зав}}}$  (де  $q$  — задане значення відношення сигнал/завада) необхідно вводити регулювальний коефіцієнт  $k$ , значення якого знаходять зі співвідношення

$$q = \frac{\sum_{i=1}^N (k \cdot A_i^{\text{сигн}})^2}{\sum_{j=1}^M (A_j^{\text{зав}})^2} ,$$

тобто

$$k = \sqrt{q} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M (A_j^{\text{зав}})^2}{\sum_{i=1}^N (A_i^{\text{сигн}})^2}} . \quad (5)$$

Тоді кінцева формула для миттєвих значень суми сигналу та сигналу заводи з довільними СГП для заданого значення  $q$  буде мати вигляд [3]

$$S^{\text{сигн+зав}}(t) = k \cdot \sum_{i=1}^N [A_i^{\text{сигн}} \sin(\omega_i t + \theta_i)] + \sum_{j=1}^M [A_j^{\text{зав}} \sin(\omega_j t + \theta_j)] . \quad (6)$$

### МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОТНОГО РОЗПОДІЛУ НР-СИГНАЛУ НА ФОНІ ЗАВАДИ

Очевидно, що формула (6) для забезпечення можливості оперативної зміни СГП НР-сигналу відповідно до зміни значень параметрів плазми з висотою потребує узагальнення. По-перше, амплітуди  $A_i^{\text{сигн}}$  мають бути функціями висоти. А по-друге, функцією висоти має бути коефіцієнт  $k$ , оскільки відношення сигнал/завада  $q$  теж залежить від параметрів плазми та відстані до об'єктів іоносфери, що досліджуються:

$$k(h) = \sqrt{q(h)} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M [A_j^{\text{зав}}(h)]^2}{\sum_{i=1}^N [A_i^{\text{сигн}}(h)]^2}} . \quad (7)$$

Таким чином, узагальнена формула набуває вигляду [4]

$$S^{\text{сигн+зав}}(t, h) = k(h) \cdot \sum_{i=1}^N [A_i^{\text{сигн}}(h) \sin(\omega_i t + \theta_i)] + \sum_{j=1}^M [A_j^{\text{зав}}(h) \sin(\omega_j t + \theta_j)] . \quad (8)$$

Для розрахунку  $A_i^{\text{сигн}}(h)$  залучаються висотні розподіли температур іонів  $T_i(h)$  і електронів  $T_e(h)$ , концентрація електронів  $N_e(h)$  та іонний склад  $[N(\text{NN}^+)/N_e](h)$ , де  $\text{NN}^+$  — загальне позначення іонної складової. Заводові складові  $A_j^{\text{зав}}(h)$  теж приймаються як функція висоти.

Висотні розподіли параметрів плазми можна отримати з реальних вимірювань, або з моделей іоносфери, наприклад IRI-2001. Для цього

їхні значення розраховуються для заданих геомагнітних або географічних координат згідно з вказаною датою. В результаті, залучаючи ще й інформацію про значення константи  $R$  радіолокатора [11], яка для конкретної радіолокаційної системи і дати вимірювань пов'язана з потужністю радіопередавача, ефективною поверхнею антени, чутливістю радіоприймального пристрою тощо, можна залучити для модельного сигналу реальну зміну вздовж висоти відношення сигнал/завада на вході антени.

### МОДЕЛЮВАННЯ НР-СИГНАЛУ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІКИ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ

Розглянемо ще один варіант моделювання [5], який дозволяє синтезувати сигнал, подібний до НР-сигналу, але вже з урахуванням динаміки іоносферної плазми. В цьому варіанті синтезу поставлено мету задати зсув СГП НР-сигналу, який виникає в результаті колективного руху (дрейфу) електронів та іонів, а також мати змогу вводити асиметрію СГП, імітуючи появу струму в плазмі.

Відомо, що коли електрони з іонами вздовж променя радіолокатора рухаються в плазмі як одне ціле зі швидкістю  $V_D(h)$ , СГП прийнятого сигналу набуває зсуву на величину частоти Допплера  $f_D$ :

$$f_D(h) = \frac{2f_0}{c} V_D(h), \quad (9)$$

де  $f_0$  — частота випромінювання радіолокатора,  $c$  — швидкість світла. Якщо ж у плазмі електрони рухаються незалежно від іонів зі швидкістю  $V_e(h)$ , то виникає струм, який при проекції на промінь радіолокатора має значення [2]

$$j(h) = e \cdot N_e(h) \cdot [V_D(h) - V_e(h)], \quad (10)$$

де  $e$  — заряд електрона.

СГП розсіяного сигналу при цьому відносно кожного висотного інтервалу набуває асиметрії, тобто в ньому починають різнитися ліва і права частини по відношенню до центральної частоти  $f_0$ . Ця розбіжність росте зі збільшенням відносної швидкості електронів, яку характеризує величина  $V_e(h)/\bar{V}_e(h) = 0, 0.1, 0.2, \dots$ , де  $\bar{V}_e(h) = \sqrt{2KT_e(h)/m_e}$  — середня теплова швидкість електронів,  $K$  — постійна Больцмана,  $m_e$  — маса електрона.

У роботі [11] приведено складні вирази, які демонструють, як величина  $V_e(h)/\bar{V}_e(h)$  впливає на асиметрію форми СГП НР-сигналу. Якщо поставити за мету створення спрощеного алгоритму, що забезпечує синтез контрольного сигналу з допустимою похибкою моделювання, можна використати підібрані експериментальним шляхом модульовальні множники. Наприклад, один із них має вигляд  $B_i(h) = 1 + \frac{10i}{N} \cdot \frac{V_e(h)}{\bar{V}_e(h)} \cdot \sin\left(\pi \frac{2i - N}{N}\right)$

[5], задача якого в тому, щоб одночасно з обчисленням амплітуд гармонік симетрично відносно центра СГП «піднімати» її праву частину та «опускати» ліву у відповідності до відносної швидкості електронів  $V_e(h)/\bar{V}_e(h)$  (ефект, приведений у роботі [11]).

Остаточна формула, що, як показала практика моделювання, з достатнім ступенем достовірності відображує динаміку іоносферної плазми, набуває вигляду

$$S^{\text{сигн}}(t, h) = \sum_{i=1}^N B_i(h) A_i^{\text{сигн}}(h) \sin \{2\pi [f_i + f_D(h)]t + \theta_i\}. \quad (11)$$

### РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

На рис. 1 показано висотний розподіл в іоносфері кінетичних температур  $T_i$  та  $T_e$ , електронної концентрації  $N_e$  та відносного вмісту основних іонів — кисню  $O^+$ , водню  $H^+$ , гелію  $He^+$  і важких іонів  $M^+$ . Ці параметри представляють собою результат аналізу [8] експериментальних даних, а саме — статистичних характеристик сигналу розсіяння у вигляді його кореляційних функцій  $r(\tau)$  та відповідного цим значенням СГП НР-сигналу  $W(f)$ , одержаних 28 травня 2003 р. о 12:00 за київським часом за допомогою радіолокатора НР обсерваторії Інституту іоносфери (м. Харків) [10], у складі якого є антена діаметром 100 м, орієнтована вертикально.

Для подальшого моделювання сигналу НР з використанням цих даних було взято параметри іоносферної плазми з висоти  $h = 511$  км:  $T_i = 1050$  К,  $T_e = 2400$  К,  $q = 2.05$  і  $N(O^+)/N_e = 100$  %. За цими даними шляхом розв'язання прямої радіофізичної задачі було отримано відповідну

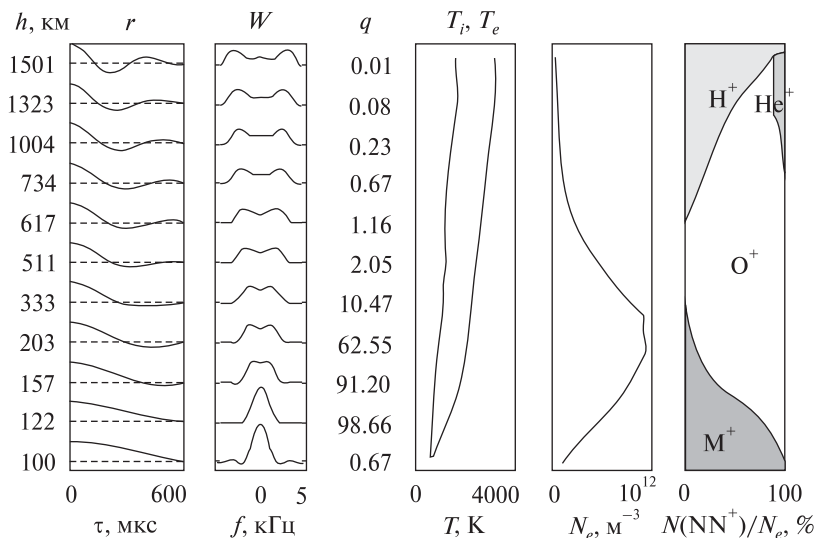


Рис. 1. Висотний розподіл статистичних характеристик сигналу НР та відповідних їм іоносферних параметрів

СГП НР-сигналу. На базі цієї СГП згідно з (2) були розраховані значення амплітуд НР-сигналу  $A_i^{\text{сигн}}$ . У відповідності до (7), вважаючи заваду білим шумом (що виконується в умовах даного експерименту), обчислено регульовальний коефіцієнт  $k$ . За формулою (8) отримано миттєві значення суми НР-сигналу та завади  $S^{\text{сигн+зав}}$ .

Для оцінювання достовірності результатів, які дає запропонований спосіб моделювання, було проведено порівняння СГП змодельованої суми НР-сигналу та завади  $W^{\text{сигн+зав}}$  (СГП була обчислена за допомогою спектрального аналізу функції  $S^{\text{сигн+зав}}(t)$ ) з сумою СГП НР-сигналу  $W^{\text{сигн}}$ , отриманого за результатами розв'язання прямої радіофізичної задачі, та СГП білого шуму  $W^{\text{зав}}$  (інтенсивність спектральних складових якого підібрана таким чином, щоб задовольняти задане значення відношення сигнал/завада  $q$ ). Функції  $W^{\text{сигн+зав}}$ ,  $W^{\text{сигн}}$  та  $W^{\text{зав}}$  показано на рис. 2. Видно, що сума залежностей для  $W^{\text{сигн}}$  та  $W^{\text{зав}}$  добре узгоджується із залежністю для  $W^{\text{сигн+зав}}$ .

Очевидно, що застосування алгоритму (2), (7), (8) для будь-якої іншої висоти  $h$  дозволяє моделювати висотний розподіл НР-сигналу.

Наступне моделювання сигналу НР було проведено для значень іоносферних параметрів на висоті  $h = 203$  км, тобто  $T_i = 930$  К,  $T_e = 1900$  К,  $q = 62.55$  і  $N(M^+)/N_e = 5\%$ ,  $N(O^+)/N_e = 95\%$ . При цьому додатково імітувався випадок наявності доплерівської добавки  $f_D = 0.1$  кГц та струму

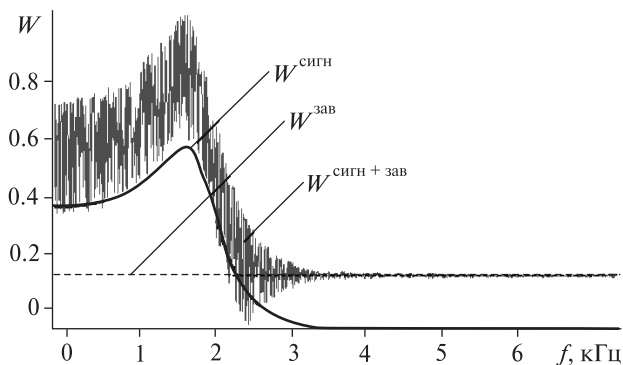


Рис. 2. Результати моделювання НР-сигналу за наявності завадових складових

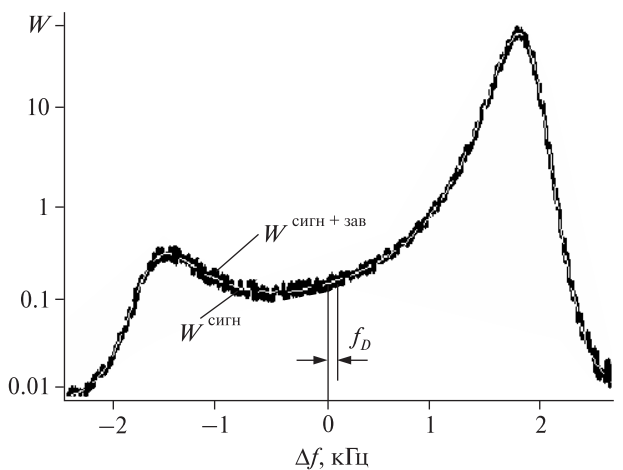


Рис. 3. Результати моделювання НР-сигналу з урахуванням динаміки іоносферної плазми

у плазмі, який відповідає  $V_e(h)/\overline{V_e}(h) = 0.4$ . За допомогою методики (11) було отримано миттєві значення вибірки змодельованого сигналу  $S^{\text{сигн+зав}}$ . Перевірка результатів моделювання показала добре узгодження форм теоретичної та експериментальної СГП НР-сигналу (рис. 3).

## ВИСНОВКИ

Розглянуто реалізацію ряду способів формування НР-сигналу з заданою формою СГП, який призначено для контрольної перевірки правильності функціонування апаратури обробки радіолокаторів НР. При синтезі такого сигналу враховуються такі особливості обробки прийнятого сигналу.

1. Наявність завод з різною формою СГП під час прийому НР-сигналу.

2. Зміну характеру НР-сигналу та завади вздовж радіолокаційної розгортки дальності.

3. Динаміку плазми, а саме колективний рух заряджених частинок та струм у плазмі.

1. *Богомаз А. В.* Моделирование случайного сигнала с заданной спектральной плотностью мощности // Вестник НТУ «ХПИ»: Автоматика и приборостроение. — 2009. — № 23. — С. 29—32.
2. *Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А.* Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 521 с.
3. *Деклараційний патент України на корисну модель UA № 42311.* Спосіб імітації суміші шумоподібного сигналу та завади із заданими спектрами / В. О. Пуляев, О. В. Богомаз, Д. В. Котов. — 2009. — Бюл. № 12.
4. *Деклараційний патент України на корисну модель UA № 45547.* Спосіб імітації висотного розподілу сигналу некогерентного розсіяння та завади / О. В. Богомаз. — 2009. — Бюл. № 21.
5. *Деклараційний патент України на корисну модель UA № 58665.* Спосіб імітації сигналу некогерентного розсіяння згідно до стану та динаміки іоносферної

плазми / В. О. Пуляев, А. Є. Мірошніков, Л. Я. Ємельянов и др. — 2011. — Бюл. № 8.

6. *Лысенко В. Н.* Синтез модели НР-сигнала // Вестник ХПИ: Исследование ионосферы методом НР. — 1987. — № 248, вып. 5. — С. 21—22.
7. *Лысенко В. Н., Капустян А. А., Бруско А. В.* Имитация НР-сигнала // Вестник ХПИ: Исследование ионосферы методом НР. — 1986. — № 234, вып. 4. — С. 60—64.
8. *Пуляев В. А., Дзюбанов Д. А., Домнин И. Ф.* Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. — 240 с.
9. *Пуляев В. А., Сокол Е. И., Богомаз А. В. и др.* Особенности функционирования прямой задачи рассеяния при расчете параметров ионосферной плазмы // Радиотехника. — 2010. — № 160. — С. 280—285.
10. *Рогожкин Е. В., Пуляев В. А., Лысенко В. Н.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. — 256 с.
11. *Эванс Дж. В.* Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. — 1969. — 57, № 4. — С. 139—175.

Надійшла до редакції 12.03.11

V. O. Puliaiev, O. V. Bohomaz

## IMITATION OF INCOHERENT SCATTER SIGNALS WITH CONSIDERATION FOR ALTITUDINAL DISTRIBUTION OF IONOSPHERE PARAMETERS, PLASMA DYNAMICS AND NOISE COMPONENTS

Some methods for the synthesis of incoherent scattering signals which take into account several factors are described. These factors are the following: the altitudinal distribution of ionosphere parameters (temperature variation of ions and electrons, electron density, change in the relative composition of ions of different varieties), the ionosphere plasma dynamics (the movement of electrons and ions as a whole and with the creation of plasma currents), and the presence of noise during the operation of a radar station