

УДК 530.1.537.86 + 621.396.96

В.Д. Карлов¹, М.М. Журавський², Д.В. Карлов¹, А.М. Чорний³¹Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків²Національний університет цивільного захисту України, Харків³Південний центр радіотехнічних спостережень, Севастополь

ДО ПИТАННЯ ПРО ВИМІР ШВИДКОСТІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ РАДІОХВИЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ СПЕКТРАЛЬНОГО СПОСОБУ

У статті проаналізовані можливості виміру швидкості переміщення збурень іоносфери методом некогерентного розсіяння радіохвиль із застосуванням спектрального способу виміру швидкості дрейфу іоносферної плазми на високопотенційних РЛС метрового діапазону хвиль.

Ключові слова: некогерентне розсіювання, іоносферні збурення, іоносферна плазма, спектральний спосіб, вимір швидкості дрейфу.

Вступ

Постановка проблеми: Рухомі іоносферні збурення (РІЗ) були вперше виявлені в 1940 році [1, 2] і з тих пір інтенсивно вивчаються. Встановлено, що РІЗ виникають під впливом чинників як природного (землетруси [3], магнітні бурі і полярні сяяння [4], грози [5], рух сонячного термінатора [6]), так і штучного (ядерні вибухи [1], запуски космічних об'єктів [7]) походження. Обґрунтовано [1, 2, 7], що РІЗ як природного, так і штучного походження можна розглядати як дрейф іоносферної плазми. Найбільш ефективним методом дослідження іоносферної плазми, як показано в [2], є метод некогерентного розсіяння. В рамках цього методу, як показано в [2], вимір швидкості дрейфу V_{gp} іоносферної плазми можливо спектральним і кореляційним способами. Проте особливості реалізації цих способів на РЛС розглянуті недостатньо повно.

Мета статті: проаналізувати можливості виміру швидкості переміщення штучних збурень іоносфери методом некогерентного розсіяння радіохвиль із застосуванням спектрального способу виміру швидкості дрейфу іоносферної плазми на високопотенційних РЛС метрового діапазону хвиль.

Основна частина

Спектральний спосіб виміру швидкості дрейфу V_{gp} іоносферної плазми передбачає вимір зрушення Δf центральної частоти енергетичного спектру некогерентного розсіяного (НР) сигналу відносно робочої частоти, який і характеризує величину швидкості дрейфу: $V_{gp} = \frac{\lambda}{2} \Delta f$, де λ – робоча довжина хвилі РЛС. Величину Δf при цьому визначають [2] по різниці потужностей ΔP_s сигналу в двох ідентичних фільтрах (рис. 1):

$$\Delta f = \Delta P_s / 2 \left(\frac{\partial P_s}{\partial f} \right)_{f=f_0+f_1},$$

де величина $\left(\frac{\partial P_s}{\partial f} \right)_{f=f_0+f_1}$ характеризує нахил кривої $P_s(f)$ в точці $f = f_0 + f_1$.

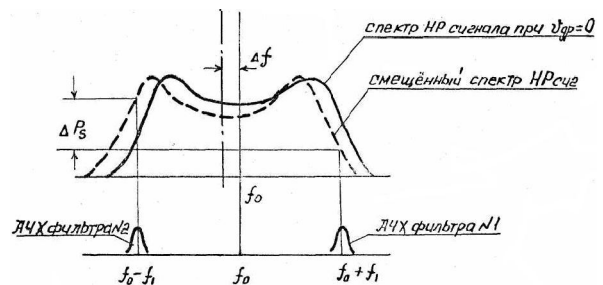


Рис. 1. Принцип спектрального способу виміру V_{gp}

Спектр $P_s(f)$ при $V_{gp}=0$ вважається симетричним відносно робочої частоти f_0 .

Розглянемо можливості реалізації спектрального способу виміру швидкості дрейфу V_{gp} іоносферної плазми на високопотенційних РЛС [2] метрового діапазону хвиль. РЛС [9], що розглядається, має в своєму складі апаратуру для "грубої" та "точної" оцінок доплеровського зсуву частоти сигналу, відбитого від цілі.

Апаратура "грубої" оцінки доплеровського зсуву частоти складається з системи фільтрів, погоджених по смузі пропускання із спектром "гладкого" зонduючого імпульсу РЛС. Спрощена схема цієї апаратури приведена на рис. 2, кожен з каналів апаратури містить погоджений фільтр, лінійний детектор і порогову схему.

Доповнивши кожен з каналів даної апаратури накопичувачами, ми отримуємо пристрій для виміру енергетичного частотного спектру НР сигналу. Відмітимо при цьому, що в якості накопичувачів інформації може бути використана штатна ЦОМ РЛС [9].

Для здобуття оцінки швидкості дрейфу необхідно, щоб фільтри були ідентичними, а розставля-

ня фільтрів по частоті має бути симетричним відносно центральної проміжної частоти. Знайдемо алгоритм оцінки V_{gp} і оцінимо точність виміру V_{gp} .

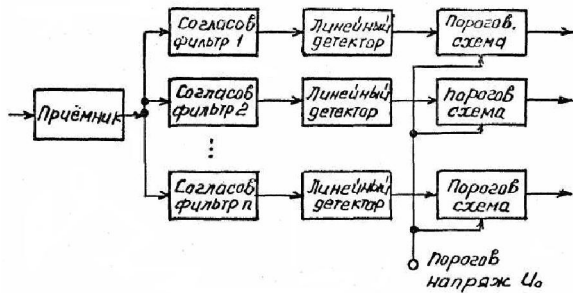


Рис. 2. Прилад виміру V_{gp} спектральним способом

У [2] показано, що число γ перевищень суміші сигналу з шумом над пороговою напругою U_0 , тобто величина, отримана на виході каналу з накопичувачем, пов'язана з потужністю сигналу і потужністю шуму $P_{ш}$ в каналі наступним співвідношенням:

$$\gamma_{ji} = m \cdot \exp \left\{ - \frac{U_0^2}{P_{sjj} + P_{mj}} \right\}, \quad (1)$$

де m – число накопичень; i – номер ділянки дальності; j – номер частотного каналу (канали пронумеровані наступним чином $j=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m$).

$$P_{sjj} = K_j^2 \Delta w_j N_{sjj}; \quad P_{mj} = K_j^2 \Delta w_j N_{\sigma},$$

де K_j , Δw_j – коефіцієнт посилення і смуга пропускання j -го частотного каналу відповідно; N_{sjj} – спектральна щільність сигналу в смузі частот j -го каналу на i -й ділянці дальності; $N_{ш}$ – спектральна щільність шуму.

З (1) витікає, що для здобуття різниці потужностей $P_{s/j,i}$ сигналу в симетричних фільтрах необхідно виконати наступні операції:

$$\Delta P_{s/j,i} = x_{+ji} - x_{-ji}; \quad (2)$$

$$\chi_{ji} = \left(\frac{\ln(\bar{a}_i / m)}{\ln(\gamma_i / m)} - 1 \right) * \left(\frac{\ln(\alpha_0 / m)}{\ln(\gamma_{0i} / m)} - 1 \right); \quad (3)$$

$$\bar{a}_j = \frac{1}{K} \sum_{i=p}^{p+k} \gamma_{ji}, \quad (4)$$

де p – номер ділянки дальності, починаючи з якої можна нехтувати розсіяним сигналом; k – число ділянок усереднювання шуму.

З (1) – (4) видно, що при реалізації цього алгоритму автоматично враховується розкид каналів по смузі пропускання і по коефіцієнтах посилення. Різниця потужностей $\Delta P_{s/j,i}$ при цьому виявляється нормованою відносно потужності сигналу в центральному фільтрі.

Для оцінки можливості виміру V_{gp} даним способом проводився розрахунок градієнта $\frac{\partial P_s}{\partial f}$.

Результати розрахунку наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результат розрахунку градієнта

$$\frac{\partial P_s}{\partial f} \cdot 10^4, \text{ } \tilde{\text{Аб}}^{-1}$$

| $V_{gp}, \text{ км/с}$ | $T_i = 1000^\circ \text{ К}$ | | | |
|------------------------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | $T_e/T_i=1$ | $T_e/T_i=2$ | $T_e/T_i=3$ | $T_e/T_i=4$ |
| 0,2 | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 2,5 |
| 0,4 | 3,12 | 3,00 | 2,62 | 2,00 |
| 0,6 | 3,58 | 3,08 | 2,50 | 1,83 |
| 0,8 | 3,62 | 3,06 | 2,37 | 1,68 |
| 1,0 | 3,6 | 3,00 | 2,20 | 1,55 |
| 1,2 | 3,45 | 2,79 | 2,04 | 1,41 |
| 1,4 | 3,32 | 2,60 | 1,85 | 1,28 |

| $V_{gp}, \text{ км/с}$ | $T_i = 2000^\circ \text{ К}$ | | | |
|------------------------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | $T_e/T_i=1$ | $T_e/T_i=2$ | $T_e/T_i=3$ | $T_e/T_i=4$ |
| 0,2 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 1,50 |
| 0,4 | 2,00 | 2,00 | 1,75 | 1,50 |
| 0,6 | 2,25 | 2,08 | 1,83 | 1,41 |
| 0,8 | 2,43 | 2,12 | 1,75 | 1,31 |
| 1,0 | 2,50 | 2,10 | 1,70 | 1,25 |
| 1,2 | 2,50 | 2,16 | 1,66 | 1,16 |
| 1,4 | 2,50 | 2,42 | 1,57 | 1,10 |

При розрахунку вважалося, що робоча довжина хвилі λ рівна 2м, а досліджувана область іоносфери розташована на висоті шару F іоносфери, де основним типом іонів є іони атомарного кисню O^+ . Фільтри, за допомогою яких проводяться виміри різниці потужності $\Delta P_{s/j,i}$, вважалися налаштованими на частоти $f_0 \pm 2000$ Гц. Як вихідні дані для розрахунку

величини $\frac{\partial P_s}{\partial f}$ використовувалися спектри НР сигналу, обчислені з врахуванням немонохроматичності первинного випромінювання. Вважалося, що випромінюється "гладкий" прямокутний імпульс тривалістю 800 мкс. Розрахунок $\frac{\partial P_s}{\partial f}$ проведений для двох значень температури іонів $T_i = 1000^\circ \text{ К}$ і 2000° К та для чотирьох можливих значень відносної температури електронів T_e до температури іонів T_i . Швидкість дрейфу V_{gp} іоносферної плазми варіювалася в межах від 0,2 км/с до 1,4 км/с.

З даних, приведених в табл. 1 і 2, витікає, що градієнт $\frac{\partial P_s}{\partial f}$ істотним чином залежить від невимірюваних параметрів T_i і T_e/T_i . Невизначеність в оцінці V_{gp} із-за незнання T_e/T_i і T_i може досягати $\pm 100\%$.

Тому спосіб виміру V_{gp} , заснований на вимірі лише потужності сигналу за допомогою двох фільтрів симетрично розташованих відносно f_0 , не можна рекомендувати до використання для виявлення рухомих іоносферних збурень.

На наш погляд, для оцінки V_{gp} необхідно виміряти спектр НР сигналу χ_j , який відповідає максимуму «слоя» F2 іоносфери, а обробку результатів

виміру χ_j потрібно проводити так, щоб одночасно визначалося не лише швидкість дрейфу V_{gp} , а і температура електронів T_e і температура іонів T_i . Залежність спектру НР сигналу від невідомих (шуканих) параметрів (V_{gp} , T_e , T_i) – нелінійна. Алгоритм обробки результатів виміру функції нелінійним чином, залежною від шуканих параметрів, описано в [2]. Погрішності оцінок компонентів спектру НР сигналу в силу центральної граничної теореми підкоряються нормальному розподілу. Тому, як показано в [2] алгоритм обробки результатів виміру χ_j зводиться до методу найменших квадратів. При реалізації методу найменших квадратів виникає необхідність обчислення і звернення, так званої конструкційної матриці $A \equiv \{a_{lp}\}$, де $l=1,2,\dots,L$, $p=1,2,\dots,L$. L – число шуканих параметрів (у нашому випадку L рівне трьом), а $2m+1$ – число каналів в схемі на рис. 2.

Операція обчислення елементів матриці A та операція звернення матриці A є трудомісткими. Тому на практиці нерідко йдуть по шляху підбору теоретичного спектру, щонайкраще співпадаючого з вимірним.

Теоретичні спектри заздалегідь розраховують і зберігають в пам'яті ЦОМ. У нашому випадку цей шлях є прийнятним, оскільки він дозволяє скоротити витрати часу на вторинну обробку.

Висновки

Застосування спектрального способу виміру швидкості дрейфу іоносферної плазми в РЛС метрового діапазону радіохвиль пов'язано з необхідністю проведення попередніх розрахунків спектрів для можливих значень температур T_e і T_i та порівняння їх з вимірними спектрами.

Список літератури

1. Адушкин В.В. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду / В.В. Адушкин, С.И. Козлов, А.В. Петров // Справочное пособие. – М. Изд. Анкил. 2000. – 638 с.
2. Карлов В.Д. Метод некогерентного рассеяния радиоволн / В.Д. Карлов, Г.Н. Ткачев // Конспект лекций. – Х. ВИРТА ПВО. 1984. – 60 с.
3. Голицин Г.С. Акустико-гравитационные волны в атмосфере / Г.С. Голицин, Е.П. Чунгудов // Сборник статей «Полярные сияния и свечения ночного неба». – 1975. – Москва, Наука. – № 23. – С. 5-21.
4. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы / Л.Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т8, №1. – С. 54-104.
5. Пазюра С.А. Физические процессы в ионосферной плазме, сопутствующие сильнейшим геокосмическим бурям: дис. ... канд. техн. наук. – 2009. – Х.: Институт ионосферы – 158 с.
6. Семенков В.М. Генераторы возмущений в атмосфере при прохождении через нее солнечного терминатора / В.М. Семенков, Б.В. Троицкий // Геомагнетизм и аерономия. – 1975. – Т. 15, №5. – С. 856-860.
7. Ткачев Г.Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем / Г.Н. Ткачев, В.Д. Карлов, С.И. Козлов // Космические исследования. – 1980. – Т. 2, вып. 2. – С. 266-277.
8. Рогожкин Е.В. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: монограф. / Е.В. Рогожкин, В.А. Пуляев, В.Н. Лысенко // – Х.: НТУ ХПИю 2008. – 254 с.
9. Карлов В.Д. Перспективі використання та модернізації південного центру радіотехнічного спостереження / В.Д. Карлов, С.О. Корняков, Д.В. Карлов / Тези доповідей 9 наук.-техн. конф. «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах». – Феодосія, 2009. – С. 131-132.

Надійшла до редколегії 19.05. 2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

К ВОПРОСУ О ИЗМЕРЕНИИ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРАЛЬНОГО СПОСОБА

В.Д. Карлов, М.Н. Журавский, Д.В. Карлов, А.Н. Чёрный

В статье проанализированы возможности измерения скорости перемещения возмущений ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн с применением спектрального способа измерения скорости дрейфа ионосферной плазмы на высокопотенциальных РЛС метрового диапазона волн.

Ключевые слова: некогерентное рассеивание, ионосферные возмущения, ионосферная плазма, спектральный способ, измерение скорости дрейфа.

TO A QUESTION ON MEASUREMENT OF SPEED OF MOVING IONOSPHERE INDIGNATIONS OF A METHOD OF NOT COHERENT DISPERSION OF RADIO-WAVES WITH APPLICATION OF A SPECTRAL WAY

V.D. Karlov, M.N. Zhuravsky, D.V. Karlov, A.N. Chorny

In article possibilities of measurement of speed of moving of artificial indignations of an ionosphere by a method of not coherent dispersion of radio-waves with application of a spectral way of measurement of speed of drift ionosphere plasma on high power radiolocation station of a metre wave band are analysed.

Keywords: not coherent dispersion, ionosphere indignations, ionosphere plasma, a spectral way, measurement of speed of drift.