



УКРАЇНА

(19) UA (11) 14102 (13) U
(51) МПК (2006)
G01S 13/95 (2006.01)
G01S 13/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІВ У МАКСИМУМІ ІОНІЗАЦІЇ ІОНОСФЕРИ

1

2

(21) а200507667

(22) 01.08.2005

(24) 15.05.2006

(46) 15.05.2006, Бюл. № 5, 2006 р.

(72) Котов Дмитро Володимирович, Пуляев Валерій Олександрович, Рогожкін Євген Васильович

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

(57) Спосіб визначення електронної концентрації у максимумі іонізації іоносфери в імпульсних некогерентних РЛС зі спільною приймально-передавальною антеною, що включає періодичне випромінювання пари когерентних радіоімпульсів, перший з яких має заповнення у вигляді звичайної хвилі, а другий - у вигляді незвичайної хвилі, окремий прийом звичайної та незвичайної хвиль некогерентно розсіяного іоносферою сигналу, перенос сигналів звичайної та незвичайної хвиль на проміжну частоту, затримку сигналу звичайної хвилі на час, який дорівнює затримці між когерентними імпульсами, вимірювання квадратурних компонент взаємкореляційної функції між затриманим сигналом звичайної хвилі та сигналом незвичайної хвилі, який **відрізняється** тим, що додатково вимірюють автокореляційну функцію обвідної некогерентно розсіяного сигналу, обчислюють модуль коефіцієнта кореляції між звичайною та незвичайною хвилями та визначають середню

величину концентрації електронів N_e в імпульсному об'ємі на заданій висоті за номограмами, розрахованими у відповідності з виразом

$$\frac{\sin(k \cdot \tau_u \cdot N_e)}{k \cdot \tau_u \cdot N_e} = |\rho|, N_e \leq \frac{\pi}{k \cdot \tau_u},$$

де k - коефіцієнт, що враховує значення несучої частоти зонduючих імпульсів та подовжньої компоненти геомагнітного поля, τ_u - тривалість

зонduючого імпульсу, $|\rho|$ - модуль коефіцієнта кореляції між звичайною та незвичайною хвилями, який визначають на заданій висоті, використовуючи вираз

$$|\rho| = \frac{2 \cdot \sqrt{\gamma_{c1}^2 + \gamma_{c2}^2}}{|R(\tau)|},$$

в якому γ_{c1} , γ_{c2} - вимірні квадратурні компоненти взаємкореляційної функції між затриманим сигналом звичайної хвилі та сигналом незвичайної хвилі, $R(\tau)$ - виміряна автокореляційна функція обвідної некогерентно розсіяного сигналу, τ - затримка між когерентними зонduючими імпульсами.

Корисна модель відноситься до радіолокації, зокрема до радіотехнічних вимірів параметрів іоносфери за методом некогерентного розсіювання з використанням ефекту Фарадея, та може бути застосований для визначення концентрації електронів у максимумі іонізації іоносфери.

Відомо, що радіохвиля, яка розповсюджується в плазмі, у випадку, коли довжина хвилі значно перевищує дебаєвський радіус екранування, розсіюється на хаотично розподілених просторових флуктуаціях електронної

концентрації. Величина дебаєвського радіусу екранування для іоносферної плазми не перевищує кількох десятків сантиметрів. Просторові флуктуації електронної концентрації виникають внаслідок теплового руху електронів та іонів і завдяки ефекту дебаєвського екранування, викликаного кулонівською взаємодією іонів та електронів, є незалежними для різних об'ємів плазми, якщо відстань між об'ємами перевищує значення двох дебаєвських радіусів екранування. Внаслідок цього сигнали, некогерентно розсіяні такими об'ємами іоносферної плазми, є

(13) U

(11) 14102

(19) UA

некорельованими. При використанні в якості зонduючого сигналу радіоімпульсу з лінійно поляризованим монохроматичним заповненням (що еквівалентно одночасному випромінюванню двох когерентних радіоімпульсів, один з яких має заповнення у вигляді звичайної хвилі - поляризованого по колу сигналу з обертанням вектора поля по годинниковій стрілці, а другий радіоімпульс має заповнення у вигляді незвичайної хвилі - поляризованого по колу сигналу з обертання вектора поля проти годинникової стрілки) за наявності компоненти геомагнітного поля, що співпадає з напрямом розповсюдження радіохвилі, завдяки ефекту Фарадея різниця фаз між звичайною та незвичайною хвилями у фіксований момент часу змінюється в межах імпульсного об'єму вздовж напрямку розповсюдження; відповідно в межах імпульсного об'єму вздовж напрямку розповсюдження змінюється кут площини поляризації розсіяного сигналу, який дорівнює половині різниці фаз між звичайною та незвичайною хвилями. Якщо вертикально в іоносферу імпульсно випромінюється лінійно поляризований сигнал, то в кожен момент часу вектор поля розсіяного сигналу є суперпозицією векторів поля сигналів, розсіяних усіма висотними елементами імпульсного об'єму. Внаслідок незалежності сигналів, розсіяних різними об'ємами плазми, кожний висотний елемент імпульсного об'єму розсіює лінійно поляризований сигнал з фазою та амплітудою, значення яких не залежать від значень фаз та амплітуд сигналів, розсіяних іншими висотними елементами. Якщо період випромінювання лінійно поляризованих імпульсів перевищує інтервал кореляції просторових флуктуацій електронної концентрації, то від розгортки до розгортки кут площини поляризації сигналу, некогерентно розсіяного імпульсним об'ємом іоносфери з центром на висоті h , коливається випадковим чином симетрично біля свого математичного очікування Ω . Значення Ω дорівнює куту площини поляризації сигналу, розсіяного висотним елементом, що знаходиться в центрі імпульсного об'єму. Величина середньоквадратичного відхилення виміряного кута площини поляризації від Ω пропорційна концентрації електронів N_e в імпульсному об'ємі іоносферної плазми та тривалості зонduючого імпульсу τ_u і характеризується коефіцієнтом кореляції ρ між звичайною та незвичайною хвилями. У випадку використання приймально-передавальної антени з вузькою циліндричною діаграмою направленості для зонduючого імпульсу з прямокутною формою обвідної значення коефіцієнта кореляції між звичайною та незвичайною хвилями визначається за виразом [1]:

$$\rho = \frac{\sin(k \cdot \tau_u \cdot N_e)}{k \cdot \tau_u \cdot N_e} \quad (1)$$

$$\text{Тут коефіцієнт } k = \frac{e^2 \cdot \omega_L}{2 \cdot m_e \cdot \varepsilon_0 \cdot (\omega_0^2 - \omega_L^2)},$$

де e - заряд електрона;
 m_e - маса електрона;

ε_0 - діелектрична проникливість вільного простору;

ω_0 - кругова частота несучої зонduючого імпульсу;

ω_L - проекція гіромагнітної частоти на напрям розповсюдження радіохвилі.

Величина N_e за умови лінійного висотного розподілу електронної концентрації у межах імпульсного об'єму є значенням електронної концентрації в центрі імпульсного об'єму.

Зазвичай концентрацію електронів визначають за зміною кута повороту $\Delta\Omega$ площини поляризації лінійно поляризованої хвилі на заданому інтервалі шляху хвилі Δh ; при цьому значення N_e є прямо

пропорційним величині похідної $\frac{d\Omega(h)}{dh}$.

Зменшення кореляції між звичайною та незвичайною хвилями може призвести до значних похибок при визначенні N_e за таким методом у максимумі іонізації іоносфери. Для запобігання цьому зазвичай електронна концентрація усереднюється між висотами, на яких потужності компонент лінійно поляризованого сигналу, прийняті на ортогональні антени з лінійною поляризацією (або взаємо кореляційна функція між прийнятими окремо звичайною та незвичайною хвилями), не залежать від значення ρ . Відстань між такими екстремальними висотами відповідає повороту Ω , на $\pi/2$, внаслідок чого розрізнявальна спроможність за дальністю є низькою та залежить від величини N_e .

Задача виміру концентрації електронів з поліпшеною точністю на заданій висоті виникає, наприклад, при нормуванні висотного профілю потужності некогерентно розсіяного сигналу. Для цього визначають максимальну величину електронної концентрації та висоту максимуму h_{max} , а також відношення електронної та іонної температур $T_e(h_{max})/T_i(h_{max})$. За цими параметрами обчислюють коефіцієнт, на який нормується профіль потужності прийнятого сигналу для отримання висотного профілю диференціального перерізу розсіяння. За цим профілем при відомій висотній залежності $T_e(h)/T_i(h)$ можна отримати висотний профіль електронної концентрації $N_e(h)$.

Відомий спосіб визначення концентрації електронів описано в [2]. За цим способом імпульсно випромінюється лінійно поляризована хвиля, а прийнятий сигнал розділяється на сигнали звичайної та незвичайної хвиль з наступною подачею цих сигналів на перемножувач, в якості якого використовується фазовий детектор або корелометр. Значення сигналу на виході перемножувача пропорційно величині $\rho \cdot \cos \varphi$, де φ - різниця фаз між сигналами звичайної та незвичайної хвиль. Особливістю рішення є ввід каліброваного фазового зсуву між сигналами, що перемножуються, задля отримання нульового сигналу на виході перемножувача для конкретної висоти h . Після цього для суміжної висоти $h+\Delta h$ також отримується нульове значення сигналу на виході перемножувача шляхом вводу додаткового відомого фазового зсуву $\Delta\varphi$ між сигналами звичайної та незвичайної хвиль. Концентрація електронів, усереднена між

висотами h та $h+\Delta h$, пропорційна величині $\frac{\Delta\varphi}{\Delta h}$.

Недолік цього способу полягає в тому, що похибка визначення електронної концентрації пов'язана з похибкою визначення висот, для яких сигнал на виході перемножувача дорівнює нулю

саме завдяки тому, що $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$. Ця похибка

досягає максимального значення в максимумі іонізації іоносфери внаслідок послаблення кореляції між звичайною та незвичайною хвилями, і у випадку $\rho \rightarrow 0$ визначення електронної концентрації за даним способом фактично стає неможливим.

Також відомий спосіб визначення концентрації електронів, який описано в [3]. За цим способом випромінюється два когерентних радіоімпульси. Перший імпульс, наприклад, має заповнення у вигляді звичайної хвилі; тоді другий імпульс має заповнення у вигляді незвичайної хвилі. Затримка між імпульсами дорівнює τ , причому величина τ повинна бути меншою за інтервал кореляції флуктуацій електронної концентрації. Звичайна та незвичайна хвилі некогерентно розсіяного іоносферою сигналу приймаються окремо та підсилюються у приймачах звичайної та незвичайної хвиль відповідно. Сигнал x_1 звичайної хвилі затримується в лінії затримки на час τ та подається на синхронний детектор з квадратурними каналами; сигнал x_2 незвичайної хвилі без затримки подається на другий синхронний детектор з квадратурними каналами. Якщо обидва імпульси випромінюються одночасно, утворюючи імпульс з лінійно поляризованим заповненням, то лінія затримки не потрібна й сигнали звичайної та незвичайної хвиль безпосередньо подаються на синхронні детектори. На квадратурних виходах детектора сигналу звичайної хвилі утворюються сигнали x_{1c} та x_{1s} ; на квадратурних виходах детектора сигналу незвичайної хвилі - сигнали x_{2c} та x_{2s} . Під час сеансу вимірювань обчислюються оцінки квадратурних компонент взаємо кореляційної функції (ВКФ) сигналів на виходах приймачів звичайної та незвичайної хвиль згідно з виразом:

$$\gamma_1 = x_{1c} \cdot x_{2s} - x_{1s} \cdot x_{2c}, \quad \gamma_2 = x_{1c} \cdot x_{2c} + x_{1s} \cdot x_{2s}. \quad (2)$$

При цьому при використанні "миттєвої" вибірки сигналів за умови, що смуги прозорості амплітудно-частотних характеристик приймальних пристроїв є значно ширшими за смугу частот, яку займає прийнятий сигнал, при відсутності повністю або частково поляризованого шуму можна вважати, що

$$\overline{\gamma_1} = R(\tau) \cdot \rho \cdot \sin \varphi, \quad \overline{\gamma_2} = R(\tau) \cdot \rho \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

де $R(t)$ - автокореляційна функція (АКФ) обвідної некогерентно розсіяного сигналу.

Алгоритм обробки (2) дозволяє врахувати флуктуації амплітуд і фаз прийнятих сигналів. Після закінчення сеансу вимірювань величина фазового зсуву φ між звичайною та незвичайною хвилями для заданої висоти визначається за виразом:

$$\varphi = \arctg \frac{\overline{\gamma_1}}{\overline{\gamma_2}}. \quad (4)$$

Електронна концентрація, усереднена між висотами h та $h + \Delta h$, на які вимірюються значення φ , прямо пропорційна величині

$$\frac{\varphi(h + \Delta h) - \varphi(h)}{\Delta h}.$$

Суттєвий недолік цього способу полягає в тому, що величина дисперсії вимірної величини φ пропорційна величині ρ^{-2} . Наприклад, для тривалості зондуючого імпульсу 100мкс, частоти несучої 150МГц та для геомагнітного поля на середніх широтах при $N_e = 1.6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ маємо, згідно з формулою (1), $\rho \approx 0.5$; при цьому дисперсія вимірної величини φ збільшується в чотири рази в порівнянні з дисперсією при $N_e = 1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ($\rho \approx 0.999$), а дисперсія різниці $\varphi(h + \Delta h) - \varphi(h)$ відповідно збільшується у вісім разів.

Через це при зменшенні значення ρ для отримання задовільної точності вимірів потрібно збільшувати тривалість сеансу вимірювань, що призводить до погіршення розрізняльної спроможності за часом. Тому у випадку $\rho \ll 1$ визначення електронної концентрації за цим способом стає недоцільним. Крім цього, відсутня сама можливість оцінити величину статистичної похибки результатів вимірів через те, що значення ρ є невідомим.

Найбільш близьким до способу, що пропонується - найближчим аналогом - є спосіб, який описано в [4]. Він заснований на обчисленні значення електронної концентрації за результатами вимірювань глибини модуляції висотного профілю фарадеевських завмирань. За цим способом імпульсно випромінюється лінійно поляризований сигнал; некогерентно розсіяний іоносферою сигнал приймається на дві ортогональні антени (X та Y) з лінійною поляризацією. На висотах, де потужності прийнятих антенами сигналів (P_x та P_y) досягають екстремальних величин, визначається глибина модуляції висотного профілю фарадеевських завмирань

$$m = \left(\frac{P_x - P_y}{P_x + P_y} \right)^n,$$

де $n=0,1,2,\dots$ У випадку, коли використовується "миттєва" вибірка сигналів (тривалість вибірки $\tau_b \rightarrow 0$), а смуги прозорості амплітудно-частотних характеристик приймальних пристроїв є значно ширшими за смугу частот, яку займає прийнятий сигнал, глибина модуляції m має фізичний смисл коефіцієнта кореляції між звичайною та незвичайною хвилями ρ . У загальному випадку при заданій формі обвідної зондуючого імпульсу, тривалості імпульсу τ_u , тривалості вибірки сигналів τ_b для можливих значень подовжньої компоненти геомагнітного поля H , що визначає величину ω_L , та заданих амплітудно-частотних характеристик приймальних пристроїв розраховуються номограми залежності глибини модуляції m від значення електронної концентрації, за якими після закінчення сеансу вимірів визначається величина N_e . При $\tau_b \rightarrow 0$ електронна концентрація

усереднюється безпосередньо на висотному інтервалі, що дорівнює $(c \cdot \tau_u)/2$, де c - швидкість світла в вакуумі.

Недоліком способу - найближчого аналога є те, що відстань між висотами, на яких можливі вимірювання за таким способом, при використанні симетричних відносно своєї середини зондуєчих імпульсів відповідає повороту Ω на величину $\pi/2$, а тому залежить від величини N_e і може досягати неприпустимо великих значень при малому інтегральному вмісті електронів. Можливість вимірювань безпосередньо на заданій висоті, зокрема на висоті максимуму іонізації h_{\max} , відсутня.

В основу корисної моделі, що пропонується, поставлена задача збільшення точності визначення електронної концентрації в максимумі іонізації іоносфери без погіршення розрізняювальної спроможності за часом (без збільшення тривалості сеансу вимірювань).

Вирішення цієї задачі досягається тим, що при використанні в якості зондуєчого сигналу пари когерентних радіоімпульсів з заповненням у вигляді звичайної та незвичайної хвиль електронна концентрація визначається за вимірним безпосередньо в максимумі іонізації іоносфери значенням модулю коефіцієнта кореляції ρ між звичайною та незвичайною

хвилями. Величина $|\rho|$ визначається за вимірними величинами квадратурних компонент взаємокореляційної функції між затриманим сигналом звичайної хвилі та сигналом незвичайної хвилі з використанням додатково вимірюваного значення автокореляційної функції обвідної некогерентно розсіяного сигналу. Для кожного з можливих значень тривалості імпульсу τ_u із заданою дискретністю $\Delta\rho$ заздалегідь

розраховуються номограми залежності $|\rho|$ від величини електронної концентрації. За цими номограмами після закінчення сеансу вимірів визначається величина середньої концентрації електронів в імпульсному об'ємі іоносферної плазми.

Сутність способу, що пропонується, є такою.

Пристрій-передавач послідовно випромінює два когерентні радіоімпульси. Перший імпульс, наприклад, має заповнення у вигляді звичайної хвилі; тоді другий імпульс має заповнення у

вигляді незвичайної хвилі. Затримка між імпульсами τ не повинна перевищувати значення інтервалу кореляції флуктуацій електронної концентрації. Некогерентно розсіяні іоносферою сигнали від кожного імпульсу приймаються окремо. Сигнали звичайної та незвичайної хвиль x_1 та x_2 відповідно переносяться на проміжну частоту з періодом коливань τ_0 . З виходу приймача звичайної хвилі сигнал подається на лінію затримки з часом затримки τ . Коли на заданій висоті опиняється імпульс з заповненням у вигляді незвичайної хвилі, що був випромінений другим, сигнали на виходах лінії затримки та приймача незвичайної хвилі квантуються за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), принциповою особливістю яких, згідно з [5,6], є робота за парними опитними імпульсами; затримка між опитними

імпульсами в парі дорівнює $t_q = \frac{4 \cdot m + 1}{4} \cdot \tau_0$, де

$m = 0, 1, 2, \dots$ Якщо $t_q \ll t$, то можна вважати, що $x^2(t) + x^2(t+t_q) \cong U^2(t)$, де $U(t)$ - значення обвідної сигналу $x(t)$. Тому відліки $x(t)$ та $x(t+t_q)$ є квадратурними складовими сигналу, що квантується. Тривалість кожного опитного імпульсу τ_{on} в парі повинна задовольняти вимозі $\tau_{on} \ll \tau_0$. Якщо виконується умова $t_q \ll \tau_u$, то можна вважати, що здійснюється "миттєва" вибірка сигналів, тобто час вибірки $\tau_B \rightarrow 0$. Парні опитні імпульси формуються з опорного гармонічного

коливання з частотою, що дорівнює $f_0 = 1/\tau_0$. Першому опитному імпульсу з пари буде відповідати, наприклад, квадратурна компонента сигналу x_c ; тоді другому опитному імпульсу буде відповідати квадратурна компонента x_s . Для заданої затримки на розгортці дальності за парним опитним імпульсом АЦП роблять відліки x_{1c} , x_{2c} та x_{1s} , x_{2s} . Крім цього, у кінці розгортки дальності, де можна вважати, що корисний сигнал відсутній, АЦП роблять миттєві відліки шуму $x_{1шc}$, $x_{2шc}$ та $x_{1шs}$, $x_{2шs}$. З використанням всіх отриманих відліків обраховують, згідно з [6], значення обвідних сигналів на виходах приймачів звичайної та незвичайної хвилі $U_1(t)$ та $U_2(t)$ відповідно а також значення обвідних шуму $U_{1ш}(t_{кр})$ та $U_{2ш}(t_{кр})$ за виразами:

$$U_1(t) = \text{sign}(x_{1c}) \sqrt{x_{1c}^2 + x_{1s}^2}, U_2(t) = \text{sign}(x_{2c}) \sqrt{x_{2c}^2 + x_{2s}^2}; \quad (5)$$

$$U_{1ш}(t_{кр}) = \text{sign}(x_{1шc}) \sqrt{x_{1шc}^2 + x_{1шs}^2}, U_{2ш}(t_{кр}) = \text{sign}(x_{2шc}) \sqrt{x_{2шc}^2 + x_{2шs}^2}.$$

Тут t - затримка на розгортці дальності, яка відповідає заданій висоті;

$t_{кр}$ - затримка, що відповідає кінцю розгортки дальності, де корисний сигнал вважається відсутнім.

Після цього обчислюють АКФ обвідної суміші некогерентно розсіяного сигналу й шуму $R_{c+ш}(\tau)$ та АКФ шуму $R_{ш}(\tau)$ у відповідності з алгоритмами

$$R_{c+ш}(t) = \overline{U_1(t) \cdot U_2(t)}, R_{ш}(t) = \overline{U_{1ш}(t_{кр}) \cdot U_{2ш}(t_{кр})} \quad (6)$$

Крім цього обчислюють квадратурні

компоненти γ_1 та γ_2 ВКФ сигналів на виходах лінії затримки та приймача незвичайної хвилі. Внаслідок того, що амплітуда прийнятого сигналу відслідковується за рахунок розташованих поряд парних відліків, алгоритм обробки може бути спрощений у порівнянні з (2) і має такий вигляд:

$$\gamma_1 = x_{1c} \cdot x_{2s}, \gamma_2 = x_{1c} \cdot x_{2c}. \quad (7)$$

Також аналогічним чином обраховуються квадратурні компоненти ВКФ шуму:

$$\overline{\gamma_{1ш}} = \overline{x_{1шс}} \cdot \overline{x_{2шс}}, \quad \overline{\gamma_{2ш}} = \overline{x_{1шс}} \cdot \overline{x_{2шс}}. \quad (8)$$

Якщо $\tau_b \rightarrow 0$, а смуги прозорості амплітудно-частотних характеристик приймальних пристроїв є значно ширшими за смугу частот, яку займає

$$\overline{\gamma_1} = \frac{1}{2} \cdot R(\tau) \cdot \rho \cdot \sin \varphi + \overline{\gamma_{1ш}}, \quad \overline{\gamma_2} = \frac{1}{2} \cdot R(\tau) \cdot \rho \cdot \cos \varphi + \overline{\gamma_{2ш}}. \quad (9)$$

Після закінчення сеансу обчислюють квадратурні компоненти ВКФ корисних сигналів на виходах лінії затримки та приймача незвичайної хвилі за виразами

$$\overline{\gamma_{c1}} = \overline{\gamma_1} - \overline{\gamma_{1ш}}, \quad \overline{\gamma_{c2}} = \overline{\gamma_2} - \overline{\gamma_{2ш}}, \quad (10)$$

а також обчислюють АКФ обвідної корисного сигналу:

$$R(\tau) = R_{c+ш}(\tau) \cdot R_{ш}(\tau). \quad (11)$$

Після цього обраховується значення модулю коефіцієнта кореляції між звичайною та незвичайною хвилями за виразом, отриманим зі співвідношень (9, 10):

$$|\rho| = \frac{2 \cdot \sqrt{\overline{\gamma_{c1}^2} + \overline{\gamma_{c2}^2}}}{R(\tau)}. \quad (12)$$

Середня величина концентрації електронів в імпульсному об'ємі знаходиться по відповідній заздалегідь розрахованій номограмі залежності

значення $|\rho|$ від величини електронної концентрації. В найпростішому випадку, коли використовується приймально-передавальна антена з вузькою циліндричною діаграмою направленості, приймальні пристрої зі смугами прозорості амплітудно-частотних характеристик, що значно перевищують смугу частот прийнятого сигналу, для зонduючого імпульсу з прямокутною формою обвідної номограми розраховуються у відповідності з формулою (1). В інтервалі висот, на яких можливе розташування максимуму іонізації, значення подовжньої компоненти геомагнітного поля для заданих геомагнітних координат та напряму розповсюдження радіохвилі може вважатися постійною величиною та входить до складу коефіцієнта k формули (1) як стала. В діапазоні значень $1 \geq |\rho| \geq 0$ із заданою дискретністю $\Delta\rho$ для можливих значень τ_u

розраховуються номограми залежності $|\rho|$ від величини концентрації електронів.

Розрізнявальна спроможність за дальністю при використанні "миттєвої" вибірки дорівнює $(c \cdot \tau_u)/2$. При цьому принципово важливим є використання зонduючих імпульсів з тривалістю τ_u , за якої при максимально можливих значеннях концентрації електронів величина ρ ще не приймає мінусових значень, тобто виконується умова $N_e \leq \frac{\pi}{k \cdot \tau_u}$. Це необхідно для уникання

неоднозначності визначення електронної концентрації. Крім цього, виміряна величина $R(\tau)$ не повинна дорівнювати нулю, тому затримку між зонduючими імпульсами τ бажано обирати суттєво меншою за інтервал кореляції флуктуацій

прийнятий сигнал, то з урахуванням можливої наявності повністю або частково поляризованого шуму маємо:

електронної концентрації.

Слід зазначити, що при малих значеннях електронної концентрації, коли $\rho \rightarrow 1$, похибка визначення концентрації електронів за запропонованим способом може стати неприпустимо великою внаслідок того, що при

цьому $\left| \frac{\partial \rho}{\partial N_e} \right| \rightarrow 0$. Тому при малих величинах N_e краще користуватися способом [3].

В загальному випадку для заданих висот з використанням виміряного значення $|\rho|$ обраховуються відносні похибки визначення електронної концентрації за запропонованим способом та за способом, що реалізовано в [3]. Визначення електронної концентрації проводиться за способом, що дає меншу похибку.

Робота за способом, що пропонується, полягає в наступному.

Періодично в іоносферу випромінюють два когерентні радіоімпульси. Перший імпульс, наприклад, має заповнення у вигляді звичайної хвилі; тоді другий імпульс має заповнення у вигляді незвичайної хвилі. Затримка між імпульсами τ не повинна перевищувати значення інтервалу кореляції флуктуацій електронної концентрації. Некогерентно розсіяні іоносферою сигнали звичайної та незвичайної хвиль приймають окремо. Сигнали цих хвиль переносять на проміжну частоту. З виходу приймача звичайної хвилі сигнал подається на лінію затримки з часом затримки τ . Коли на заданій висоті опиняється імпульс, що був випромінений другим, за допомогою АЦП на виходах лінії затримки та приймача незвичайної хвилі робиться два квантованих відліки сигналів з відомою затримкою між ними. Аналогічні відліки робляться у кінці розгортки дальності, де можна вважати, що корисний сигнал відсутній. Отримані відліки обробляються згідно з алгоритмами (5, 6, 7, 8). Після закінчення сеансу вимірів за виразами (10) визначаються квадратурні компоненти ВКФ корисних сигналів на виходах лінії затримки та приймача незвичайної хвилі а також, згідно з виразом (11), обчислюється АКФ обвідної корисного сигналу. Після цього за виразом (12) обраховується модуль коефіцієнта кореляції між звичайною та незвичайною хвилями. Після цього середня величина концентрації електронів в імпульсному об'ємі знаходиться по відповідній номограмі, розрахованій в найпростішому випадку згідно з формулою (1).

Таким чином, точність вимірів електронної концентрації в максимумі іонізації іоносфери може бути істотно збільшена за рахунок запропонованого способу обробки некогерентно розсіяних сигналів. Як впливає з формули (1),

найбільша точності вимірів електронної концентрації за запропонованим способом досягається саме в максимумі іонізації іоносфери, де величина $\left| \frac{\partial p}{\partial N_e} \right|$ має найбільше значення.

Важливо відзначити, що, у протилежність від способу - найближчого аналога, існує можливість вимірів на заданій висоті при збереженні усереднення концентрації електронів у межах імпульсного об'єму; також, на відміну від інших відомих способів, при зменшенні кореляції між звичайною та незвичайною хвилями розсіяних іоносферою сигналів не погіршується розрізнявальна спроможність за часом. Звідси випливає, що в способі, що пропонується, точність вимірів концентрації електронів у максимумі іонізації іоносфери принципово вища, ніж у відомих способах. Цим визначається корисність способу, що пропонується.

У порівнянні зі способом - найближчим аналогом спосіб, що пропонується, окрім зазначених вище відзнак і переваг, володіє ще рядом інших. Запропоноване рішення дозволяє проводити аналіз похибок визначення електронної концентрації за двома способами та обирати спосіб, що забезпечує найменшу похибку. Спосіб обробки сигналів також дозволяє уникнути похибок, пов'язаних з наявністю повністю або частково поляризованого шуму.

Джерела інформації

1. Головин В.И. Влияние некоторых аппаратурных факторов на поляризацию некогерентно рассеянного сигнала. / Вестник Харьковского политехнического института, №170. Исследование ионосферы методом

некогерентного рассеяния. Выпуск 2, г.Харьков, 1980, с. 13-23.

2. Патент на изобретение №2018872 (Российская Федерация). Способ определения электронной концентрации в заданной области ионосферы и устройство для его осуществления / Е.В. Рогожкин, В.И. Таран, В.П. Гетман и др.

3. Ткачев Г.Н. Карлов В.Д. Измерение разности фаз между обыкновенными и необыкновенными компонентами сигнала, рассеянного на тепловых флуктуациях электронной концентрации ионосферы. / Вестник Харьковского политехнического института, №183. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. Выпуск 3, г.Харьков, 1981, с. 18-27.

4. Головин В.И. Определение концентрации электронов по измерению глубины фарадеевской модуляции. / Вестник Харьковского политехнического института, №183. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. Выпуск 3, г.Харьков, 1981, с. 12-17.

5. Патент на винахід №54301А (Україна). Спосіб визначення малих радіальних швидкостей в когерентних РЛС та пристрій для його здійснення. / Є.В.Рогожкін, В.О.Пуляєв, В.В.Лізогуб.

6. Е.В. Рогожкин, Д.П. Белозеров, А.Н. Ерёмин. Информационные возможности цифровой обработки радиосигналов с известной несущей частотой. / Вестник Национального технического университета "ХПИ", №7, т.4, тематический выпуск "Радиофизика и ионосфера", г.Харьков, 2003, с.81-88.