

УДК 621.396

Олексій Володимирович Станович
Володимир Сергійович Легкобит
Володимир Петрович Кучер
Євгеній Іванович Нартов

ВИЗНАЧЕННЯ ІОНОСФЕРНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Постановка проблеми

В останні роки з'явилися модеми декаметрового діапазону, що здатні передавати інформацію по радіоканалу зі швидкістю 9,6 кбіт/с та відносно невеликою (до 10^{-9}) ймовірністю помилки та відродили зацікавленість до короткохвильового радіозв'язку. Такі світові лідери як Harris, Codan, Motorola та деякі вітчизняні підприємства почали виробництво радіостанцій, що реалізують алгоритми (ALE – Automatic Link Establishment), що базуються на повторному запиті фрагментів повідомлень та виправленні помилок у масштабі реального часу з мінімальним втручанням людини в цей процес. Але актуальним залишилось питання вибору оптимальних робочих частот для конкретного сеансу радіозв'язку, тому що розповсюдження хвиль в даному діапазоні залежать від стану іоносфери, що суттєво впливає на якість і надійність радіозв'язку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Іоносфера – це іонізована частина атмосфери землі, що розташовується на висоті 60-70 км. Структура та властивості іоносфери залежать не тільки від висоти, а й від сонячної активності, і навіть від процесів, що відбуваються в магнітосфері (варіаціями магнітного поля землі). Існуючі системи дальнього короткохвильового радіозв'язку забезпечують передачу інформації за рахунок відбиття радіохвиль від іоносфери, що не перевищують критичної частоти. Граничні частоти (ГЧ) іоносферних радіоліній є важливими характеристиками іоносфери для різних груп користувачів, тому що ГЧ можуть бути не тільки індикатором стану космічного середовища в конкретному регіоні, що в свою чергу викликає зацікавленість радіо- та геофізиків, а й важливим значенням з практичної точки зору для організації ефективної роботи короткохвильових систем дальнього радіозв'язку і загоризонтної радіолокації. Для стійкої роботи таких радіоліній

потрібно в першу чергу знати ГЧ, при якій буде забезпечуватись максимально надійність радіозв'язку. Для радіолінії визначеної протяжності це буде максимальна частота, при якій буде відбуватися приймання сигналу на іншому кінці радіолінії. ГЧ залежить від відстані між точками прийому і передачі, від висоти відбиваючої поверхні, від висотного розподілу профілю електронної концентрації відбиваючої поверхні іоносфери. Існуючі іоносферні дані показують, що добова і сезонна зміна критичних частот та мінімальних діючих висот описуються досить просто з певною послідовністю, але не повторюються з дня в день. Мінливість середовища і механізмів розповсюдження визначають необхідність прогнозування ГЧ.

Виклад основного матеріалу

Методи прогнозування, що набули широкого практичного застосування, поділяються за тривалістю на: довгострокові; короткострокові і оперативні.

Довгостроковий прогноз являє собою залежність місячної максимально допустимої частоти, оптимальної частоти ($0,8 \cdot \text{ГЧ}$) та напруженості поля для цієї частоти від часу доби в конкретній системі часу. Найчастіше його використовують для визначення регулярних періодичних процесів при плануванні роботи системи зв'язку. Як наслідок він не враховує короткострокові зміни характеристик іоносфери пов'язані з випадковими явищами і має невисоку точність (50-60%).

Це не задовольняє вимогам оперативної роботи засобів радіозв'язку, тому застосовують оперативний прогноз. Оперативний прогноз надає більш детальну інформацію про модову структуру і параметрах поля, що приходить в точку прийому для заданого проміжку часу (1-4 години). Також в даному режимі для корекції базової іоносферної моделі використовується поточна іоносферна інформація, що враховує нерегулярні варіації іоносфери з характерним масштабом часу. Прогноз буде більш точним для радіоліній, в яких

кінцеві точки знаходяться на відстані не більше 1000 км від іонозонда. Слід звернути увагу, що похиле зондування значно ефективніше вертикального. Під час проведення експериментів над похилим зондуванням вимірюється саме ГЧ, яка визначається співвідношенням:

$$f = \frac{\sqrt{80.8N(z)}}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \vartheta}{(1 + z_m/a)^2}}} = \frac{f_{0(z)}}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \vartheta}{(1 + z_m/a)^2}}}$$

де $f_{0(z)}$ – гранична частота шару на висоті z_m ;

ϑ – zenітний кут напрямку траєкторії радіопроменя в точці випромінювання, a – радіус Землі.

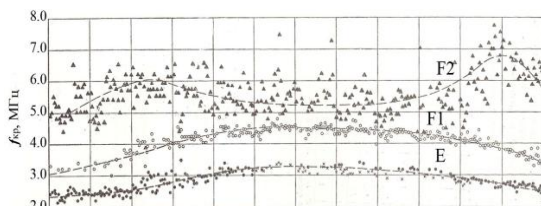


Рис. 1. Сезонний рух граничних частот для помірних широт

Враховуючи те, що гранична частота для шару F_2 є граничною частотою для всієї області

іоносфери, можна записати наступну формулу для визначення граничних частот відбиття:

$$f_{\max(\vartheta)} = \frac{f_0 F_2}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \vartheta}{(1 + \frac{HF_2}{a})^2}}}$$

де HF_2 – висота шару F_2 .

Таким чином, дана формула показує, що для визначення максимальних частот необхідно знати ГЧ і висоту шару F_2 , які залежать від стану іоносфери.

Короткостроковий прогноз складають, як правило, на місяць і ґрунтується він на медіанних значеннях МЗЧ спокійного стану іоносфери. Він також розроблений ІЗМІРАН. Його складають у вигляді іоносферних карт – ізоплетів. Він має спільні недоліки із довгостроковим прогнозом.

Порівняємо аналітично складений короткостроковий прогноз НЗЧ з урахуванням без та з урахуванням Т-фактора. Зведений графік кривих добового руху НЗЧ побудовано в Microsoft Excel 2002 за відомими значеннями [4] (див. рис. 2.). Вихідні дані взяті з табл. 1.

Графік НЗЧ без урахування Т-фактора має параболічну форму, але менш точно визначає границю НЗЧ, ніж з урахуванням технічного фактора – Т. Тому перший метод придатний лише для попереднього прогнозу НЗЧ при умові роботи передавача потужністю більше за 1 кВт.

Другий метод має спотворену параболічну

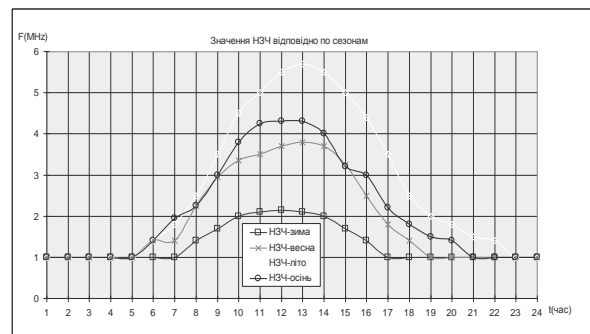


Рис. 2. Графік порівняння сезонних значень НЗЧ

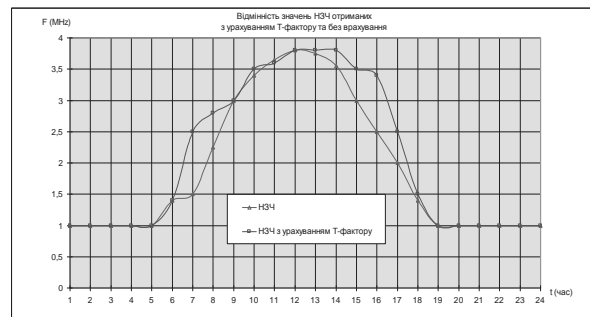


Рис. 3. Графік порівняння точності визначення НЗЧ з урахуванням і без урахування Т-фактору

форму, але точніше враховує технічні параметри радіоапаратури, яку використовують при визначенні реальних значень меж НЗЧ. Даний метод ІЗМІРАН рекомендує для розрахунку НЗЧ з використанням передавачів потужністю меншою за 1 кВт, оскільки при малих значеннях потужності робота на екстремальних частотах найбільш критична. В роботах [4] розглянуто вплив на короткостроковий прогноз точність визначення відносних чисел сонячних плям R , на даних яких ґрунтується складання прогнозу критичних частот. В роки малої і середньої сонячної активності середня похибка визначення становить +5 одиниць; у роки максимуму – точність падає і середня похибка досягає +10 – 15 одиниць. В окремі періоди вона буває більшою. Ці похибки прогнозу сонячної активності різко впливають на прогноз критичних частот в різний час доби і пори року. Похибка на 10 одиниць в R спричиняє за собою похибку в критичних частотах шару F_2 у 0,2 МГц вночі і понад 0,5 МГц вдень. Критичні частоти шарів E і F_1 менше залежать від сонячної активності, а тому при цій же похибці R вони не перевищують 0,1 МГц.

Похибка прогнозу критичних частот виникає так само через те, що використовується при цьому залежність $f_0 F_2$ від R не є цілком лінійною [5, 6]. Відхилення, що спостерігаються, від лінійного закону не можуть бути наперед передбачені. У результаті для шару F_2 похибки досягають 0,3 МГц в роки мінімуму сонячної активності і 0,5 – 0,7 МГц в роки максимуму.

Таким чином, сумарна похибка від цих двох причин може коливатися від 0,35 до 0,8 МГц. Якщо ж в тій області, для якої бажано набути прогнозованого значення f_0F_2 , немає іоносферної станції, то доводиться вдаватися до інтерполяції між значеннями, одержаними з найближчих іоносферних станцій або представляти прогноз у вигляді карт. Тоді слід враховувати ще похибки довготної і широтної інтерполяцій, які для середніх широт становлять близько 0,3 – 0,4 МГц. Отже, середня сумарна похибка прогнозу f_0F_2 становить від 0,3 до 0,9 МГц. Похибка прогнозу f_0F_1 не перевищує 0,3 МГц, а f_0E – 0,2 МГц. Для регулярних шарів похибки в середньому складають + 10%. Для шару E_s похибка може бути понад 20%. Слід врахувати, що при перерахунку критичних частот в МЗЧ похибки дещо збільшуються за рахунок недостатньої точності прогнозу коефіцієнтів передачі. Якщо для шарів E і F_1 прогноз МЗЧ можна вважати не менш точним, ніж прогноз критичних частот, тобто похибки в межах +10%, то для МЗЧ шару F_2 похибки можуть досягати $\pm 15\%$.

Оскільки методи ґрунтуються на значеннях сонячної активності, а саме числі Вольфа, то оцінимо довгостроковий та короткостроковий метод за кількістю можливих варіантів прогнозів. Період зміни сонячної активності в середньому становить 11 років [7]. За цей час середньорічне коливання значення чисел Вольфа, усереднених за 24 цикли, становить $\Delta W = W_{\text{MAX}} - W_{\text{MIN}} = 185 - 11 = 174$. Підрахуємо число варіантів прогнозів, які необхідно мати на стаціонарному або мобільному вузлах зв'язку. Довгострокових прогнозів потрібно: з урахуванням 4 сезонів $174 \cdot 4 = 696$ варіантів, з урахуванням 11 річного періоду $174 \cdot 4 \cdot 11 = 7656$ варіантів. Як бачимо, число варіантів прогнозів дуже багато.

Аналогічно для короткострокових (місячних) прогнозів: з урахуванням року $174 \cdot 12 = 2088$ варіантів, з урахуванням 11 річного періоду $174 \cdot 12 \cdot 11 = 22968$ варіантів. При такому числі варіантів не може мова йти про неавтоматизоване складання прогнозу значень МЗЧ, ОРЧ та НЗЧ.

Вибір частот за критерієм мінімального рівня шумів (вибір ЙОЧ). Вибір ЙОЧ здійснюють з використанням апаратури аналізу завадової обстановки візуальним спостереженням або простим прослуховуванням частот приймачем. Сутність методу полягає у виборі групи частот та розподілу їх між кореспондентами. Періодично вимірюється рівень завад і від їх рівня приймається рішення на заміну непридатної частоти на резервну. Результати вимірювань частот з найменшим рівнем завад передаються на робочі місця радистів-операторів. Лише на

частотах ведення найбільш важливого радіозв'язку передбачається на ЧДС реєстрація рівнів сигналів кореспондентів і документування, що потребує мати наявності апаратури аналізу завадової обстановки і розрахунку порогового рівня [8].

На даний час цей метод є базовим у військах зв'язку ЗС, оскільки це пов'язано з відсутністю вітчизняної методики складання довгострокового і короткострокового прогнозу.

Основним елементом системи моніторингу є модуль іоносферного забезпечення, заснований на реалізації метода радіо просвітлення іоносфери. Він повинен виконувати наступні функції:

1. Прийом та накопичення вихідних навігаційних даних від навігаційних супутників для двох діапазонів частот L_1 та L_2 .
2. Обробка даних навігаційних вимірювань та при необхідності зведення до стандартної форми RINEX.
3. Створення файлів даних навігаційних вимірювань по кожному супутнику окремо.
4. Визначення висотних профілів електронної концентрації іоносфери вздовж траєкторії під іоносферних точок для всіх супутників в зоні видимості приймача.
5. Визначення координат для під іоносферних точок для відновлених параметрів максимуму шару F_2 .
6. Формування масиву даних, що містить координати точки максимуму шару F_2 , значення граничної частоти шару і його висоти в залежності від часу спостереження.
7. Відтворення поля параметрів максимуму шару F_2 для всієї зони видимості наземного пункту.

Створення модуля іоносферного забезпечення не потребує значних фінансових затрат. За умов наявності двочастотного навігаційного приймача та ПЕОМ з встановленим на ній спеціалізованим програмним забезпеченням можливе рішення оберненої задачі.

За допомогою засобів КХ радіозв'язку є можливість проводити експериментальні випробування по використанню апаратно-програмного комплексу для вирішення задач умов розповсюдження радіохвиль по КХ радіолінії. Він включає в себе двочастотний навігаційний приймач, що працює по сигналам GPS, і програмне забезпечення, що реалізує рішення оберненої задачі радіо просвітлення іоносфери землі на основі методу спряжених градієнтів. Результати експериментальних досліджень показали, що відносна похибка визначення ГЧ складала не більше 5% для денних і 11% для нічних умов спостереження.

Порівняння з даними іонозонда вертикального зондування і розрахунками по моделі IRІz вхідними параметрами, що були отримані в результаті вирішення оберненої задачі радіо просвітлення. Слід зауважити що данні отримані методом радіо просвітлення відносяться до

території, радіус якої складає 150 км відносно місця розташування іонозонда.

Висновки

На основі результатів лінійного зондування показано, що метод радіопросвітлення дозволяє визначити параметри іоносфери в масштабі реального часу. Це дає можливість створювати карти розподілу критичної частоти шару F_2 , а в подальшому, ще й карти прогнозу граничної частоти використовуючи адаптивні моделі іоносфери.

Використання комплексної методики, що поєднує в собі вимірювання і коректуючу модель,

дозволяє компенсувати недоліки кожного з вищезгаданих методів. В якості нульового наближення, яке необхідно для статистичної оцінки систематичних помилок, немінучих при вимірюваннях абсолютних значень повного електронного змісту іоносфери, використовується модель NeQuick. Моніторинг локальних збурень здійснюється з використанням різницевих методів, а проєкційна функція обчислюється безпосередньо із скоригованої моделі, що дозволяє досягти точності визначення відносного повного електронного змісту іоносфери.

Література

1. Рябова Н.В. Современные подходы в краткосрочном прогнозировании МПЧ – индикаторе состояния космической погоды. Лекции БШФФ-2006 С. 47-33.
2. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Журнал Радиоэлектроники, 2010, №6.
3. Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Секистов В.Н., Мальковский А.П., Тьянкин С.И. распространение радиоволн коротковолнового диапазона и возможности метода радио просвечивания ионосферы земли для расчета максимально применимых частот. Радиоэлектроника и электроника 2008, Т.53.№9. С.1112-1120.
4. Прогноз наименьших применимых частот для лет высокой солнечной активности / Под ред. Т.С. Керблей – М.: Наука, 1968. – 106 с.
5. Кулешова В.П. О количественном прогнозе магнитной активности // Ионосферные возмущения и методы их прогноза. – М.:

Наука, 1977. – С. 185 – 189.
6. Кулешова В.П., Лаврова Е.В., Ляхов Л.Н. Карты регулярных вариаций критических частот слоя F_2 для разных типов ионосферных возмущений // Тракторные характеристики коротких радиоволн. – М.: ИЗМИРАН, 1978. – С. 153 – 159.
7. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. – М.: Наука, 1966. – 528 с.
8. Гряник М.В., Ломан В.И. Распространение радиоволн: Учебное пособие. – К.: КВИДКУС, 1989. – 382 с.
9. Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / Под ред. профессора О.В. Головина. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 598 с.
10. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа: Пер. с англ. С.М. Скольского / Под редакцией Ю.А. Гребенко – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 224 с.

С целью эффективного функционирования систем управления, связи и навигации в статье были рассмотрены методы прогнозирования параметров ионосферы и предложен аппаратно-программный комплекс с использованием данных радионавигационных систем.

Ключевые слова: ионосфера, метод прогнозирования, КВ радиосвязь.

With a view to the effective functioning of control systems, and navigation in the article were the methods of prediction of ionospheric parameters and propose a hardware-software system using data from navigation systems.

Key words: ionosphere, a forecasting method, HF radio communications.