

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 523.31

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОСВЯЗИ ПО ДАННЫМ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС/GPS

© 2019 г. В. М. Смирнов¹ *, Е. В. Смирнова¹, С. И. Тынянкин²

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 141190 Фрязино, пл. Введенского, 1

²Инновационный научно-технический центр,
Российская Федерация, 111394 Москва, ул. Перовская, 60

*E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 13.03.2019 г.

После доработки 03.04.2019 г.

Принята к публикации 05.04.2019 г.

Рассмотрена возможность прогнозирования коротковолновой (КВ) радиосвязи по данным навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. Проведен сравнительный анализ данных расчетов максимально применимых частот для коротких (100 км) и средних (800 км) трасс КВ-радиосвязи. Получено хорошее совпадение данных расчетов по результатам зондовых измерений и аппаратно-программного комплекса (АПК) мониторинга ионосферы. Показано, что контроль параметров ионосферы в реальном масштабе времени, осуществляемый АПК, позволяет успешно оценивать текущие условия распространения радиоволн КВ-диапазона.

DOI: 10.1134/S0033849419080151

ВВЕДЕНИЕ

Средства радиосвязи в зависимости от обеспечения ими дальности могут быть условно разделены на средства ближней (до 10...15 км) и дальней (более 50...100 км) связи. Для ближней радиосвязи, как правило, используют ультракоротковолновый диапазон частот (100...500 МГц); дальней — коротковолновый (3...30 МГц) или сверхвысокочастотный (свыше 1.5 ГГц) диапазоны частот.

Радиосвязь на большие расстояния может осуществляться отраженными от ионосферы радиоволнами в коротковолновом (КВ) диапазоне. Такая связь нужна подразделениям, занятым ликвидацией последствий катастроф и стихийных бедствий, а также научным экспедициям, находящимся на кораблях или удаленных территориях с отсутствующей инфраструктурой, например, в Арктике. Качество коротковолновой связи зависит от различных процессов в ионосфере, связанных с уровнем солнечной активности, сезоном и временем суток.

Сложный характер распространения радиоволн и значительный, резко меняющийся уровень радиопомех в КВ-диапазоне затрудняют выбор рабочих частот для осуществления надежной радиосвязи. Возникает необходимость оперативного определения оптимальных рабочих частот с целью постоянной адаптации к меняющимся условиям распространения радиоволн, которые сильно зависят от состояния ионосферы и, прежде всего, от параметров ионосферного слоя F2 — критической частоты f_0 и высоты H_0 .

Цель работы заключается в демонстрации необходимости и возможности определения параметров ионосферы в режиме реального времени аппаратно-программным комплексом, работающим по сигналам навигационных спутниковых систем.

1. ВАРИАЦИИ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ ИОНОСФЕРЫ

В настоящее время системы дальней КВ-связи обеспечивают передачу информации на большие расстояния за счет отражения радиоволн от ионосферы Земли на частотах, не превышающих критическую [1, 2]. Известно, что верхняя граница диапазона рабочих частот — максимально применимая частота (МПЧ) зависит от длины трассы и состояния ионосферы. Частота, при которой происходит отражение от ионосферы, определяется известным соотношением

$$f = \frac{\sqrt{80.8N(z)}}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \vartheta}{(1 + z/a)^2}}} = \frac{f_0(z)}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \vartheta}{(1 + z/a)^2}}},$$

где $f_0(z)$ — критическая частота слоя на высоте z , ϑ — зенитный угол направления траектории радиолуча в точке излучения, a — радиус Земли.

Если учесть, что частота f_0 слоя F2 является критической частотой для всей области ионосфе-

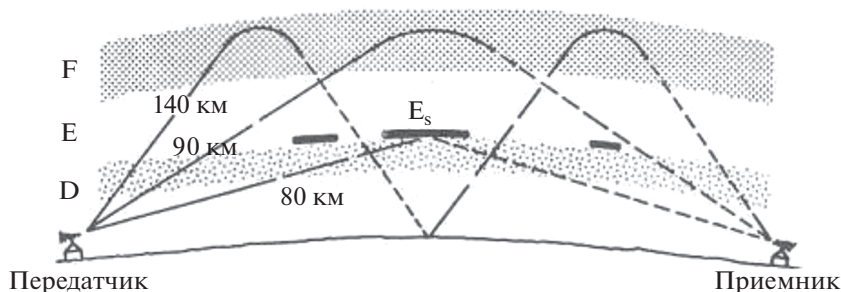


Рис. 1. Распространение радиоволн KB-диапазона.

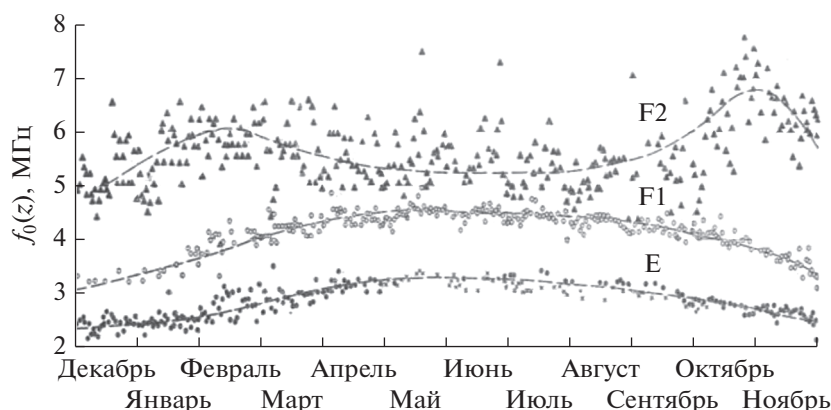


Рис. 2. Сезонный ход критических частот на средних широтах [3].

ры, то максимальные частоты отражения будут определяться по следующей формуле:

$$f_{\max}(\vartheta) = \frac{f_0}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \vartheta}{(1 + H_0/a)^2}}}.$$

Как видим, для прогноза максимально применимых частот необходимо знание критической частоты f_0 и высоты H_0 слоя F2, которые зависят от реального состояния ионосферы.

Наиболее жесткие условия дальней KB-радиосвязи имеют место летом, особенно в годы максимума солнечной активности, когда велико поглощение радиоволн в ионосфере. При увеличении длины трассы МПЧ смещается в область более высоких частот, а при уменьшении — в низкочастотную область KB-диапазона. Схема распространения радиоволн KB-диапазона показана на рис. 1. Здесь условно показано отражение от трех регулярных слоев ионосферы (D, E, F) и спорадического (нерегулярного) слоя E_s .

Существующие ионосферные данные показывают, что суточный и сезонный ход критических частот и минимальных действующих высот описываются достаточно хорошо повторяющейся зависимостью. Однако частоты и действующие высоты,

которые определяли в один и тот же час в течение нескольких подряд идущих дней, как правило, не повторяются. Сезонные значения полуденных критических частот для характерных областей ионосферы представлены на рис. 2 [3].

При выборе рабочих частот обычно стремятся к тому, чтобы, с одной стороны, они были как можно ближе к оптимальным, с другой — чтобы их было как можно меньше. Чаще всего, если это возможно, ограничиваются двумя рабочими частотами — дневной и ночной [4, 5]. Схематично такой прогноз представлен на рис. 3 для реального суточного хода МПЧ.

В режиме оперативного прогнозирования для коррекции базовой ионосферной модели может быть использована текущая ионосферная информация (параметры максимума слоя F2), учитывающая нерегулярные вариации ионосферы с характерными временными масштабами. Коррекция может проводиться как по f_0 , так и по f_0 и H_0 . При использовании операции коррекции прогноз более надежен и достоверен, особенно для трасс, конечные точки которых отстоят на расстояниях не более 1000 км от ионозонда [6]. В работе [7] предложена методика, позволяющая корректировать глобальную модель ионосферы по данным текущих измерений ее параметров. Некоторые под-

ходы в краткосрочном прогнозировании МПЧ рассмотрены в работе [8].

Информация для коррекции может быть получена путем решения обратной задачи определения параметров ионосферы по значениям характеристик как наклонного распространения декаметровых радиоволн [9, 10], так и использования спутниковых навигационных и геодезических систем, предназначенных для решения задач координатно-временного обеспечения [11, 12]. Эти системы содержат десятки спутников на почти круговых орбитах с высотой ~20 тыс. км, периодом обращения ~12 ч и скоростью движения ~4 км/с [13, 14].

В работе [15] разработан метод определения высотного распределения электронной концентрации ионосферы, основанный на использовании измерений параметров радиосигналов существующих навигационных систем. Он позволяет определять распределение электронной концентрации ионосферы в квазиреальном режиме времени по наблюдениям с одного наземного пункта, что весьма важно для удаленных и труднодоступных регионов. Дальнейшее развитие метода было осуществлено в работах [16–19].

2. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ

Возможность определения в реальном масштабе времени пространственного распределения параметров ионосферы по данным навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС основана на частотной зависимости времени распространения излучаемых сигналов на двух разнесенных частотах. Необходимые для расчета МПЧ параметры ионосферы $-f_0$ и H могут быть получены из решения обратной задачи радиопросвечивания [15, 16].

Для ионосферы Земли в диапазоне частот более 1 ГГц коэффициент преломления ионосферы может быть представлен в виде простой формулы

$$n = 1 - 40.4 \times 10^6 N / f^2,$$

где N – значение электронной концентрации, эл/см³, f – частота, Гц.

При проведении измерений на двух частотах f_1 и f_2 можно сформировать разность псевдодальностей $R(f_1) \equiv R(f_1, t)$ и $R(f_2) \equiv R(f_2, t)$:

$$\Delta R(f_1, f_2) = R_f(f_1) - R_f(f_2) + \delta,$$

где δ – неустранимая погрешность измерений, обусловленная зависимостью от частоты, $R_f(f)$ можно определить по формуле [17]

$$R_f(f) = \frac{40.4 \times 10^6}{f^2} \int_L N(l) dl,$$

где dl – элемент пути распространения, $N(l)$ – распределение электронной концентрации ионосферы вдоль траектории распространения, эл/см³.

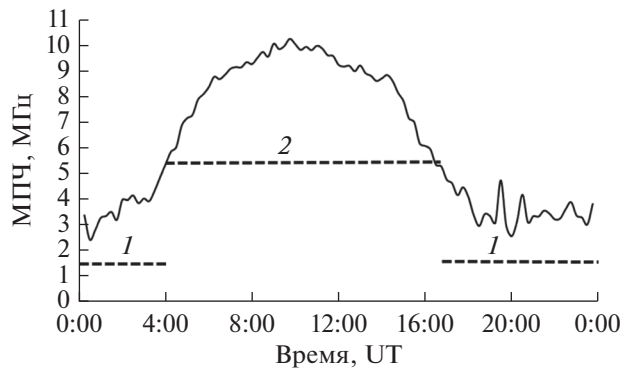


Рис. 3. Реальный суточный ход МПЧ для короткой трассы связи и варианты прогноза (1 – ночь, 2 – день).

Учитывая это, можно записать, что

$$\Delta R(f_1, f_2) = 40.4 \times 10^6 \frac{k}{f_1^2} \int_L N(l) dl + \delta,$$

где $k = 1 - f_1^2 / f_2^2$.

Полученное в предположении локальной сферической слоиистой среды интегральное уравнение (уравнение радиопросвечивания) связывает измеренную радиотехническим способом разность псевдодальностей с функцией высотного распределения электронной концентрации $N(z)$ следующим образом [16]:

$$\int_{z_1}^{z_2} N(z) \frac{(a+z) dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 \vartheta]^{1/2}} = 2.475 \times 10^{-8} \frac{f_1^2}{k} [\Delta R(f_1, f_2) - \delta], \quad (1)$$

где z_1 и z_2 – предполагаемые нижняя и верхняя границы ионосферы соответственно, ϑ – зенитный угол наблюдения спутника с пункта измерений, a – радиус Земли, z – текущая высота от поверхности Земли.

Выражение слева в формуле (1) представляет собой полную интегральную концентрацию ионосферы (Total Electron Content, TEC) вдоль пути распространения навигационного сигнала:

$$\text{TEC} = 2.475 \times 10^{-8} \frac{f_1^2}{k} [\Delta R(f_1, f_2) - \delta].$$

Таким образом, формирование разности псевдодальностей, измеренных на двух частотах, фактически эквивалентно определению полной интегральной концентрации ионосферы. Кроме того, полученное уравнение радиопросвечивания является интегральным уравнением 1-го рода типа Фредгольма. Решение его относительно неизвестной функции $N(z)$ сводится к решению некорректно поставленной задачи. Методические аспекты его решения подробно изложены в [20]. Высотные профили распределения электронной

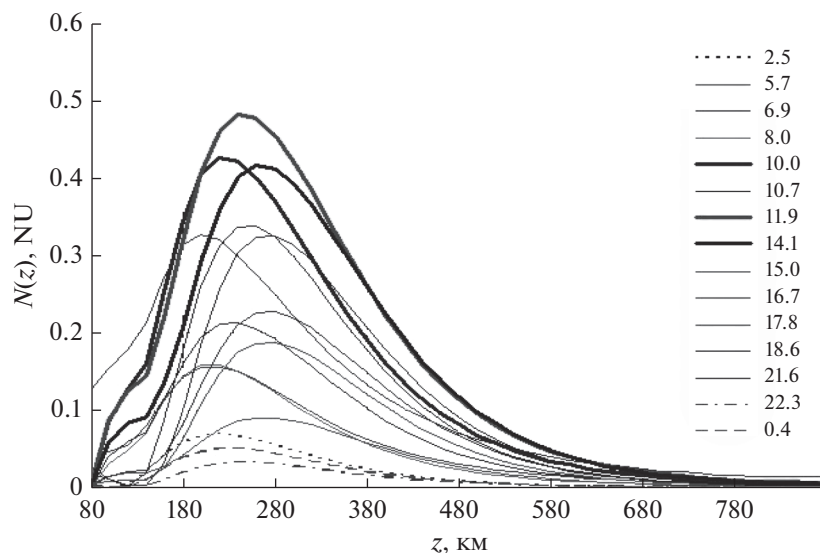


Рис. 4. Высотные профили распределения электронной концентрации в течение суток, $1\text{NU} = 10^6 \text{эл/см}^3$.

концентрации, полученные в результате решения обратной задачи радиопросвечивания ионосферы, представлены на рис. 4.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Предлагаемый подход к мониторингу ионосферы был реализован в малогабаритном аппаратно-программном комплексе определения максимально применимых частот (изделие АПК-МПЧ), обеспечивающим определение в реальном масштабе времени параметров ионосферного слоя F2 и расчет максимально применимых частот для задаваемых оператором односкачковых (до 1500...2000 км) радиотрасс КВ-диапазона по результатам обработки принимаемых радиосигналов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS [18, 19]. Результаты его апробации и сравнения с данными ионозонда представлены на рис. 5а–5г для четырех месяцев года: июль, август, сентябрь, октябрь соответственно.

Принцип работы изделия и его возможности подробно изложены в работах [18, 19]. Данные, полученные в сопоставимых условиях для Европейской части РФ с помощью изделия АПК-МПЧ и ионозонда DPS-4, показаны на рис. 6 для двух трасс КВ-радиосвязи: 100 и 800 км. Для короткой (100 км) трассы результаты расчетов достаточно близки. Для более длинной (800 км) трассы уже имеются расхождения в значениях МПЧ. Это можно объяснить тем, что данные ионозонда, используемые для расчета, справедливы для областей, удаленных от него на расстояния не более 300 км, в то время как расчет МПЧ по данным АПК проводили по наблюдениям спутника, под-

ионосферная точка которого находилась на наиболее близком расстоянии от точки отражения.

Сравнительный анализ представленных на рис. 6 данных показывает, что изменение хода максимума электронной концентрации ионосферы в целом соответствуют данным ионозонда. Возможности метода радиопросвечивания ионосферы Земли для расчета максимально применимых частот продемонстрированы в работах [21, 22].

В отличие от ионозондов вертикального зондирования, осуществляющих локальный мониторинг параметров ионосферы и реперных станций трассового зондирования вдоль фиксированных трасс распространения, наблюдение за навигационными спутниками с одного пункта обеспечивает возможность определения указанных параметров на географической сетке размером примерно $15^\circ \dots 20^\circ$ с.ш. и $20^\circ \dots 30^\circ$ в.д. В течение суток только по данным наблюдений с одного приемника над этой территорией можно получить свыше 10000 профилей распределения электронной концентрации. За 15 мин работы (что соответствует штатному режиму работы ионозонда) по данным навигационных спутниковых систем, работающих в штатном режиме, можно получить от 120 до 200 профилей высотного распределения электронной концентрации. Уменьшение дискретности проведения измерений до 1 с (существующие двухчастотные приемники позволяют проводить измерения с такой дискретностью) и одновременное использование навигационных систем GPS, GALILEO и ГЛОНАСС позволит в дальнейшем многократно увеличить количество получаемых профилей. Это означает, что с помощью одного приемника, обеспечивающего наблюдение над территорией не менее 3 млн км², ежесекундно можно будет получать не только

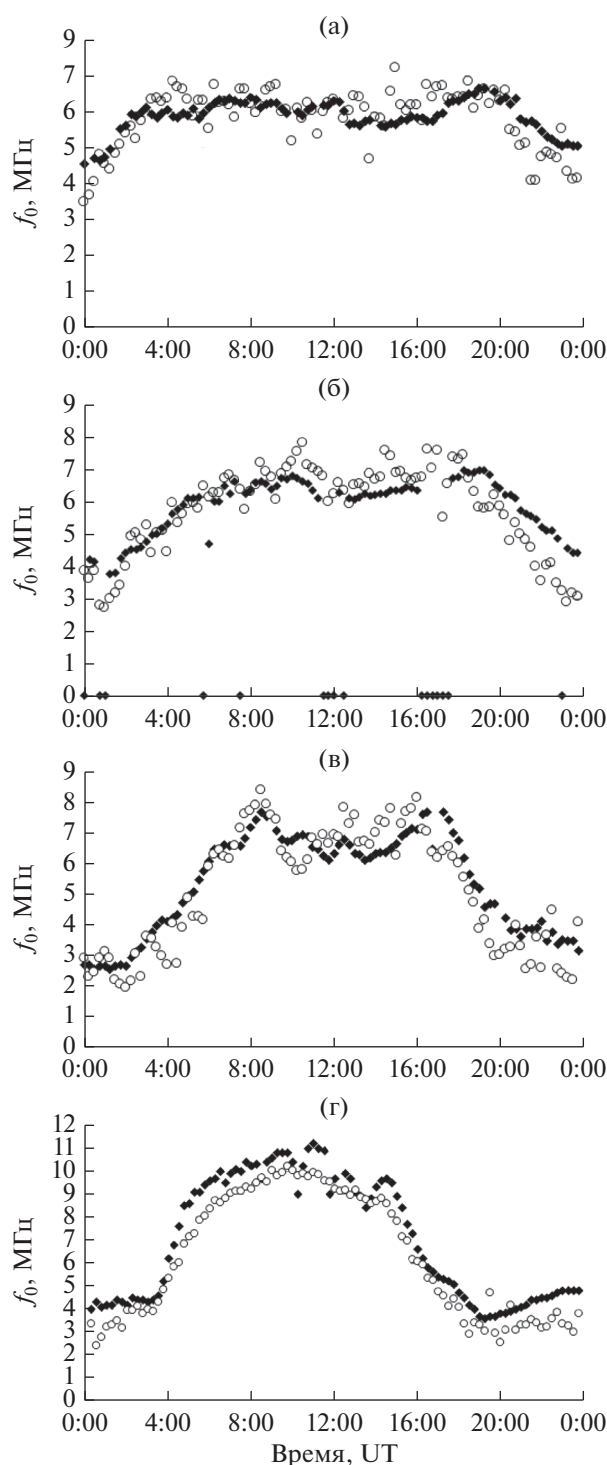


Рис. 5. Результаты сравнения данных АПК (светлые кружки) и ионозонда DPS-4 (темные ромбы) для июля (а), августа (б), сентября (в) и октября (г).

значения f_0 и H_0 , но и высотные профили распределения электронной концентрации ионосферы $N(z)$ в диапазоне высот 80...1000 км и ее полное электронное содержание.

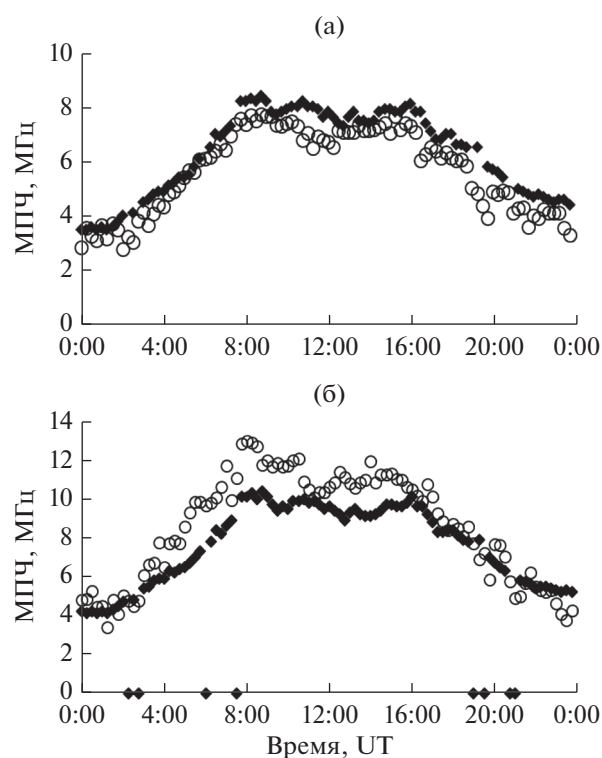


Рис. 6. Результаты расчета МПЧ по данным АПК-МПЧ (светлые кружки) и ионозонда (темные ромбы) для трассы 100 (а) и 800 км (б).

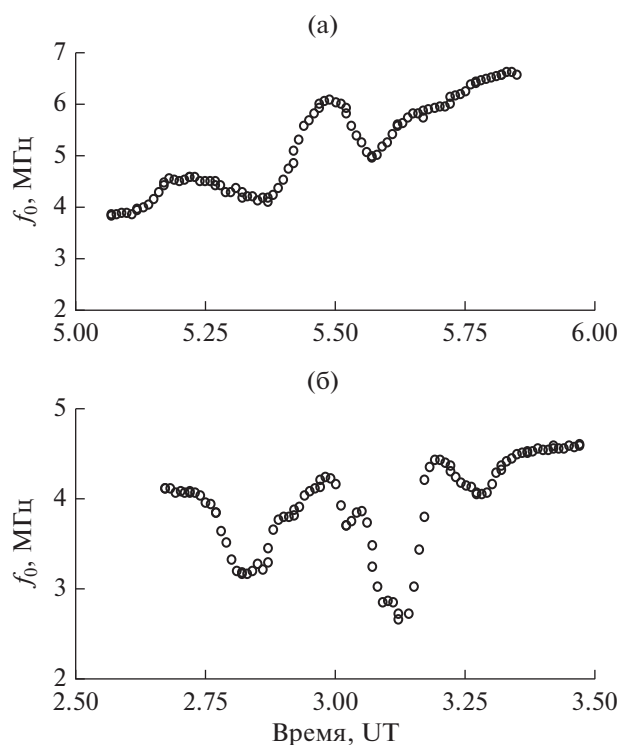


Рис. 7. Вариации значений максимума электронной концентрации по данным двух навигационных спутников с одного пункта наблюдения.

Результаты обработки данных навигационных спутниковых измерений показывают, что параметры F2-слоя ионосферы могут весьма существенно отличаться даже для достаточно близких временных интервалов, что может быть связано с наличием перемещающихся ионосферных неоднородностей большого масштаба либо существованием локальных особенностей распределения электронной концентрации. Представленные на рис. 7 реальные данные об ионосфере хорошо демонстрируют пространственно-временные вариации, которые могут иметь место в ионосфере. Наличие таких сильных вариаций в значении критической частоты F2-слоя можно зарегистрировать только при проведении зондирования вдоль траассы подионосферной точки. Ионозонды вертикального зондирования не позволяют получить детальную картину распределения электронной концентрации в области точки отражения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты спутникового мониторинга, основанного на использовании данных навигационных спутниковых систем, свидетельствуют о сильной изменчивости параметров ионосферы вдоль траектории движения подионосферных точек, осуществляемых одновременно в разных азимутальных направлениях. Это следует учитывать при проведении сеансов КВ-радиосвязи по заданной радиолинии. Для прогноза МПЧ по требуемым радиолиниям целесообразно использовать аппаратно-программный комплекс АПК-МПЧ, позволяющий в беззапросном режиме определять близкие к реальным значениям параметры ионосферы. Это дает возможность строить карты распределения f_0 и H_0 и в дальнейшем создавать карты прогноза МПЧ.

Контроль параметров ионосферы в реальном масштабе времени, осуществляемый изделием АПК-МПЧ с использованием радиосигналов СНС ГЛОНАСС/GPS, позволяет успешно оценивать текущие условия распространения радиоволн КВ-диапазона и, на этой основе, обеспечивать корректный выбор рабочих частот для проведения сеансов КВ-радиосвязи для задаваемых оператором радиолиний.

В свою очередь, оптимальный выбор рабочих частот для сеансов КВ-радиосвязи позволяет ограничиваться маломощными передатчиками, уменьшать габариты приемо-передающей аппаратуры, облегчать конструкции антенн и, как следствие, снижать стоимость эксплуатации радиосредств при одновременном повышении оперативности и надежности КВ-радиосвязи.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1972.
2. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. М.: Связь, 1971.
3. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн и ионосфера. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
4. Ладанов М.В., Ведищев А.М., Кизима С.В., Лавров Г.В. // Электросвязь. 2012. № 9. С. 3.
5. Кизима С.В., Ладанов М.В. // Радиочастотный спектр. 2012. № 2. С. 32.
6. HFPRO – комплекс прогнозирования ионосферного прохождения КВ радиоволн для системы радиотрасс, версия 3.0. ИЗМИРАН, Троицк.
7. Арефьев В.И., Кочерова М.К., Талалаев А.Б., Тихонов В.В. // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2016. № 1. С. 33.
8. Рябова Н.В. // Труды Междун. Байкальской молодеж. научн. школы по фундам. физике (БШФФ-2006). Иркутск. 11–16 сентября 2006. С. 47.
9. Голыгин В.А., Сажин В.И., Унучков В.Е. // Электрон. науч. журн. “Исследовано в России”. 2006. С. 2463. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/255.pdf>.
10. Зимнюхова Т.П., Ивельская М.К., Сажин В.И. и др. // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Иркутск: СО РАН, 1999. Вып. 109. С. 117.
11. Davies K., Hartmann G.K. // Rad. Sci. 1997. V. 32. № 4. P. 1695.
12. Андрианов В.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М. // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 1. С. 15.
13. Hofmann-Wellenhof B. Global Positioning System. Theory and Practice. N.Y.: Springer Verlag, 1993.
14. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. М.: Горячая линия-Телеком, 2005.
15. Смирнов В.М. // РЭ. 2001. Т. 46. № 1. С. 47.
16. Смирнов В.М. Метод мониторинга ионосферы Земли на основе использования навигационных спутниковых систем. Дис. д-ра физ.-мат. наук. М.: ИРЭ РАН, 2007. 299 с.
17. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun10/3/text.pdf>.
18. Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Тынянкин С.И. и др. // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 32.
19. Smirnov V.M., Smirnova E.V., Ruzhin Yu.Ya. et al. // XXXI URSI General Assembly and Scientific Symposium. Beijing, 16–23 August 2014. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929799>
20. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В. и др. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983.
21. Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Секистов В.Н. и др. // РЭ. 2008. Т. 53. № 9. С. 1112.
22. Гузенко О.Б., Смирнов В.М., Тынянкин С.И. // Морской сборник. 2015. № 2. С. 60.