

ТОЧНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНО ПРИМЕНИМОЙ ЧАСТОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ IRI ПРИ МАКСИМАЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЛЧМ ЗОНДИРОВАНИЯ НА ТРАССАХ СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

Г.Г. Вертоградов, В.Д. Черных

Южный федеральный университет, 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42

E-mail: vertogradovgg@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований вариаций максимально наблюдаемой частоты с ноября 2024 по февраль 2025 г. на трассах Кипр – Ростов-на-Дону и Элис-Спрингс – Ростов-на-Дону. Оценена точность прогнозирования МПЧ при задании состояния ионосфера с помощью модели IRI-2021. Показано, что в спокойных геофизических условиях на первой трассе значение относительной погрешности прогнозирования МПЧ достигают 9%. На трассе большой протяженности Элис-Спрингс – Ростов-на-Дону средняя относительная ошибка прогнозирования МПЧ с использованием модели IRI-2021 составляет 11%.

Ключевые слова: максимально наблюдаемая частота, максимально применимая частота, наклонное ЛЧМ-зондирование, ионосферное распространение.

THE ACCURACY OF FORECASTING THE MAXIMUM USEABLE FREQUENCY USING THE IRI MODEL AT MAXIMUM SOLAR ACTIVITY BASED ON THE DATA OF INCLINED LFM SOUNDING ON MEDIUM AND LONG PATH

G.G. Vertogradov, V.D. Chernykh

Abstract. The results of experimental studies of variations of the maximum observable frequency (OF) for paths Cyprus- and Alice Springs-Rostov from November 2024 to February 2025 are presented. The accuracy of the MUF forecast for the ionosphere used the International Reference Ionosphere IRI-2021 model is estimated. It is shown that in undisturbed geophysical conditions typical values the relative error in predicting the MUF reaches 9% on firth path and on the long propagation path Alice Springs-Rostov-on-Don the average relative error in predicting the MUF using the IRI-2021 model is 11%.

Keywords: maximum usable frequency, maximum observable frequency, International Reference Ionosphere, ionospheric propagation.

Введение

В ионосферных исследованиях и практике радиосвязи большое распространение получил метод диагностики ионосферы с излучением сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), так называемый chirp sounder [1]. На основе методов зондирования с использованием непрерывных широкополосных сигналов при значительно меньшей мощности излучения можно измерять не только традиционные параметры (модовая структура, относительные задержки, соотношение амплитуд лучей, отношение сигнал-шум и т. д.), но и квазимгновенные угловые, передаточные и импульсные характеристики ионосферного радиоканала [2]. С другой стороны, использование маломощных широкополосных сигналов при непрерывном зондировании накладывает повышенные требования, как при построении аппаратуры зондирования, так и в выборе и разработке средств и методов обработки получаемой информации. Роль последних особенно возрастает, если к средствам диагностики предъявляется требование работы в автоматическом режиме без участия оператора.

В работе представлены результаты регулярных наблюдений условий ионосферного распространения КВ на двух радиолиниях при приеме в г. Ростове-на-Дону с ноября 2024 г. по февраль 2025 г. Получены многомесячные непрерывные данные о дистанционно-частотных и амплитудно-частотных характеристиках ионосферного КВ канала, регистрация и обработка которых проводилась в автоматическом режиме с выделением на каждой трассе максимально наблюдаемой частоты (МНЧ). Цель исследований состояла в оценки точности прогнозирования МНЧ с помощью модели IRI [3] в условиях максимальной солнечной активности.

Аппаратура и методика обработки данных

Измерения проводились на радиотрассах ЛЧМ зондирования Кипр (35.1°N , 33.9°E) – Ростов-на-Дону (47.2°N , 39.6°E) (протяженность трассы 1433 км, азимут из Ростова-на-Дону 201.5°), Элис-Спрингс (Австралия, 22.967°S , 134.448°W) – Ростов-на-Дону (12210 км, 102.8°). На первой трассе измерения выполнялись круглосуточно с интервалом съёма одной ионограммы каждые 5 минут, скорость перестройки частоты 100 кГц/с. На второй трассе из-за особого режима работы передатчика периодичность съёма ионограмм постоянно изменялась, но в среднем составляла 4 минуты, скорость перестройки частоты 125 кГц/с. Оба передатчика принадлежат системам загоризонтной радиолокации.

В измерениях использовались программно-аппаратные комплексы приема ионограмм наклонного ЛЧМ зондирования, разработанные на основе широко распространенных SDR приемников RSP1, RSP1A, RSPdx (<https://www.sdrplay.com/>). Все перечисленные SDR приемники подключаются к компьютеру по интерфейсу USB-2.0 и в полосе 2 МГц обеспечивают непрерывный 14-битный поток цифрового комплексного сигнала с частотой дискретизации 2 МГц. Полное управление приемниками обеспечивается с помощью мультиплатформенной библиотеки SDRPlay. Временная синхронизация приёмного комплекса достигается использованием GPS приемников с сигналом секундной метки PPS.

Результаты наклонного ЛЧМ зондирования и моделирование

Вопрос о применимости модели IRI-2021 для достоверного прогнозирования максимальной применимой частоты (МПЧ) решался на основе сравнения рассчитанных среднемесячных суточных значений МПЧ с аналогичными экспериментальными зависимостями МНЧ. При этом выполнялась процедура идентификации и формирования мод распространения, а значения МНЧ и наименьшей наблюдаемой частоты (ННЧ) по каждому сеансу определялись автоматически в реальном масштабе времени на основе алгоритма, предложенного в работах [4,5]. ННЧ находилась как минимальная, а МНЧ – как максимальная частота из всех существовавших в сеансе зондирования частотно-временных ветвей. Одновременно также определялись суточные вариации МНЧ.

Отметим, что на аналогичных двух трассах были выполнены измерения МНЧ в условиях минимальной солнечной активности [6]. При этом основной вывод заключалась в том, что на трассе большой протяженности Лавerton – Ростов-на-Дону модель IRI дает существенно заниженные значения прогностической МПЧ, и ситуация не может быть исправлена коррекцией модели IRI по индексу солнечной активности.

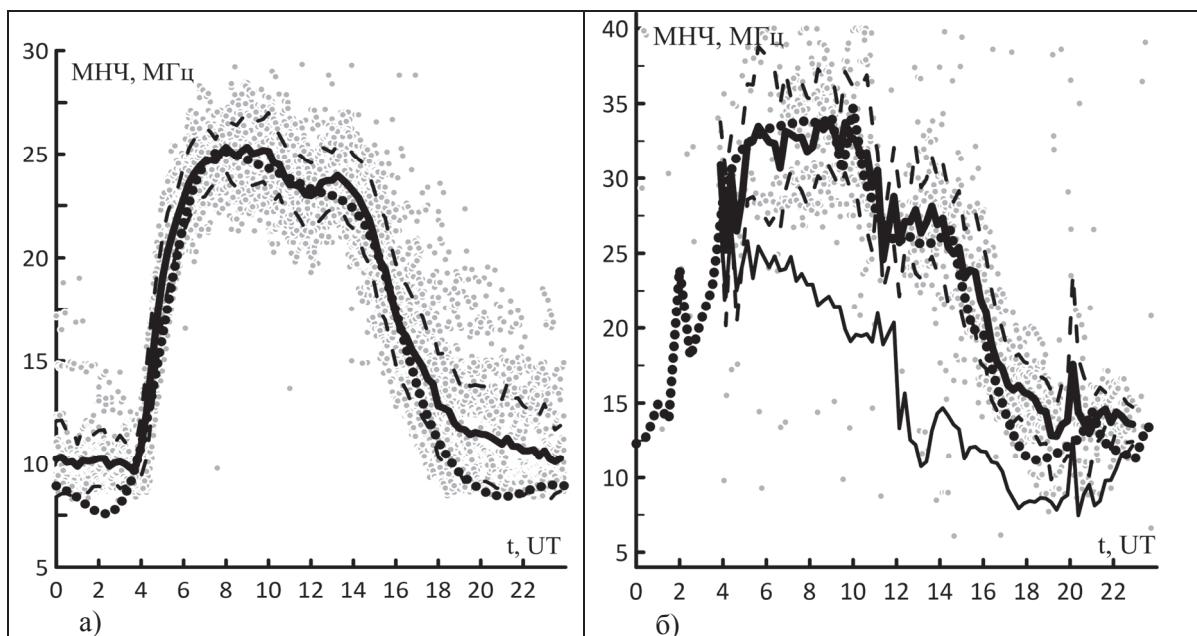


Рис. 1. Зависимость среднемесячных значений МНЧ на трассе а) Кипр – Ростов-на-Дону и б) Элис-Спрингс – Ростов-на-Дону, февраль 2025 г.

На рис. 1 показаны результаты обработки ионограмм наклонного зондирования, полученные на двух трассах в феврале 2025 г. Серыми точками на рисунках показаны квазигновенные значения МНЧ. Толстая непрерывная линия на рисунках – результат месячного статистического усреднения МНЧ. Одновременно с математическим ожиданием находилась оценка среднеквадратичного отклонения (СКО) – σ , которое связано с суточными вариациями МНЧ. Тонкие штриховые линии на рисунках ограничивают полосу в окрестности математического ожидания, ширина которой равна удвоенному среднеквадратичному отклонению – 2σ . Тонкая непрерывная линия на рис. 1б, показывает среднемесячную зависимость ННЧ от времени суток. Для середины каждого месяца с использованием модели IRI рассчитывалось прогностическое значение МПЧ соответствующей трассы. Полученные таким образом МПЧ соответствующих трасс изображены на рисунках точечными линиями.

На трассе Элис-Спрингс – Ростов-на-Дону, как видно из рис.1б отсутствуют данные для значений МНЧ и ННЧ в период времени от ~ 2 до ~ 4 UT. Это связано с тем, что в указанном временном интервале уровень принимаемого сигнала становился меньше чувствительности аппаратуры. Моделирование этой многоскаковой трассы также показало, что в указанный период времени мощность на входе приемного устройства должна уменьшаться не менее чем на ~ 50 - 80 dB относительно максимальных уровней принимаемого ЛЧМ сигнала в интервале времени 10-11 UT.

Интерпретация полученных экспериментальных результатов выполнена путём моделирования на основе траекторных расчетов с использованием имитационной модели широкополосного ионосферного радиоканала [8]. В основе моделирования лежит решение расширенной системы характеристических уравнений в ионосфере, заданной Международной справочной моделью IRI-2021. При этом ионосферные столкновительные потери рассчитывались на основе приближения Эпплтона с эффективной частотой соударений, найденной по прогнозируемым IRI-2021 значениям концентрации ионов и электронов с привлечением модели нейтральной атмосферы MSIS-90.

Прежде всего следует указать, что в условиях максимальной солнечной активности прогностические значения МПЧ, вычисленные с использованием модели IRI, хорошо следуют за измеренными значениями МНЧ. На трассе средней протяженности Кипр – Ростов-на-Дону прогностические значения МПЧ практически накладываются на измеренные среднемесячные величины МНЧ, рис.1а. Небольшие расхождения можно зафиксировать только вочных условиях. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что ЛЧМ передатчик на Кипре начинает работать с частоты 8 МГц, в то время как прогностические МПЧ могут быть меньше указанной величины. Тем не менее, даже с учетом сказанного, суточный ход МПЧ практически никогда не отклоняется от измеренных значений МНЧ более чем на СКО. Отметим, что в условиях минимальной солнечной активности [6], отклонения были существенно больше.

На трассе большой протяженности Элис-Спрингс – Ростов-на-Дону суточные вариации МНЧ значительно больше, чем на трассе средней протяженности. Это обусловлено сложной модовой структурой распространения на столь протяженной радиотрассе. Отметим, что на трассе Кипр–Ростов-на-Дону МПЧ всегда обусловлена модой 1F2. На трассе Элис-Спрингс – Ростов-на-Дону модовая структура, определяющая МНЧ, меняется с течением суток. Как показали результаты моделирования, на отрезках времени 23-24 UT и 01-04 UT МНЧ формируется пятискаковыми модами 5F2, на интервале 04-05 UT – шестискаковыми модами 6F2, на отрезке 06-16 UT - в основном трех- 3F2 и иногда двухскаковыми модами 2F2. Причем в случае, когда 2F2 мода ответственна за значение МНЧ, всегда на одном из скачков она имеет характер M-моды. В связи с этим, небольшие вариации ионосферных условий распространения приводят к быстрому изменению модовой структуры поля в зоне приема и значительным скачкам величины МНЧ трассы. Снова в отличие от условий минимальной солнечной активности, прогностические значения МПЧ отличаются от среднемесячных величин МНЧ не более, чем на σ .

Для получения количественных оценок погрешности прогнозирования МПЧ, на обоих трассах вычислены среднее абсолютное – $|\Delta|$ и среднеквадратичное – σ_2 отклонение

среднемесячных МПЧ от измеренных значений МНЧ, а также среднее относительное отклонение $\langle \Delta/MNCH \rangle$. Результаты оценок приведены по месяцам в таблице 1.

Таблица 1. Погрешности прогнозирования МПЧ на двух трассах ЛЧМ зондирования.

	Кипр–Ростов-на-Дону				Элис-Спрингс –Ростов-на-Дону			
	ноябрь	декабрь	январь	февраль	ноябрь	декабрь	январь	февраль
σ_2 , МГц	1,1	1,7	1,4	1,2	3,1	2,4	1,8	1,8
$ \Delta $, МГц	1,6	2,1	1,9	1,5	3,7	2,9	2,2	2,2
$\langle \Delta/MNCH \rangle$, %	7,1	11,0	9,3	8,8	13,0	12,2	8,9	9,0

Заключение

Результаты исследований на двух трассах могут быть представлены следующим образом:

Значения МНЧ отдельных мод распространения на трассе Кипр–Ростов-на-Дону испытывают коротко периодические вариации с квазипериодами ~30 мин – 2 часа. В спокойных ионосферных условиях в полуденные часы суток амплитуда флюктуаций может достигать 2 МГц; в восходно-заходные часы суток при прохождении терминатора флюктуации на трассе Кипр–Ростов-на-Дону могут значительно увеличиваться до 4–5 МГц. Подобные вариации сопровождаются появлением z-образований на следах верхних лучей, которые спускаются от больших задержек в область меньших, приводя к увеличению значений МНЧ. В свою очередь, z-образования связаны с движением среднемасштабных ПИВ в ионосфере. [4,5].

В условиях максимальной солнечной активности использование модели IRI для решения задач прогнозирования МПЧ как на трассах средней, так и на трассах большой протяженности обеспечивает приемлемые результаты, отличающиеся от среднемесячных значений не более чем на СКО, связанное с суточными вариациями МНЧ.

Использование модели IRI для прогнозирования среднемесячных значений МПЧ на трассе средней протяженности приводит к среднеквадратичной погрешности ~1,3 МГц и относительной погрешности 9%. На трассе большой протяженности Элис-Спрингс – Ростов-на-Дону погрешности несколько возрастают, соответственно среднеквадратичная погрешность составляет 2,3 МГц, а средняя относительная ошибка не превышает 11%.

Список литературы

1. Fenwick, R. B. Oblique chirpsounders: The HF communications test set // Communications News, 1974, February. – P. 32–33.
2. Uryadov V.P., Vertogradov G.G., Vertogradova E.G., Vertogradov V.G. A New Tool for Investigating Complex Ionospheric Structures: Over-the-horizon high-frequency sounding of ionospheric irregularities with a chirp ionosonde-direction finder // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2017. – Vol. 59. – No. 6. – P. 62–76.
3. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., et al., 2014. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration // J. Space Weather Space Clim. – 2014. – Vol. 4(A07). DOI:10.1051/swsc/2014004.
4. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. Наклонное зондирование и моделирование ионосферного коротко волнового канала// Изв. вузов. Радиофизика. – 2005. – Т. 48. – № 6. – С. 455–471.
5. Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Uryadov V.P. Oblique chirp sounding and modeling of ionospheric HF channel at paths of different length and orientation// Int. J. Geomagn. Aeron, 2007(GI2002). – P. 1–18. <http://dx.doi.org/10.1029/2006GI000143/>
6. Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. Наклонное ЛЧМ-зондирование и прогнозирование максимальной применимой частоты на трассах со средней и большой протяжённостью // Изв. вузов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64. – № 8-9. – С. 644–654.
7. Вертоградов Г.Г. Имитатор широкополосного ионосферного радиоканала // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48. – № 11. – С. 1322–1329.