

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНО-ПРИМЕНИМЫХ ЧАСТОТ РАДИОЛИНИЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА СИГНАЛАМИ РЕПЕРНЫХ РАДИОСТАНЦИЙ

В.А. Голыгин, В.И. Сажин, В.Е. Унучков

APPRAISAL OF DETERMINATION ACCURACY OF THE MAXIMUM USABLE FREQUENCIES OF THE RADIO LINES AS BY OBSERVATION OF SUPPORTING RADIOSTATIONS SIGNALS

V.A. Golygin, V.I. Sazhin, V.E. Unuchkov

Работа радиосредств ВЧ-диапазона (3–30 МГц) во многом зависит от рефракционных свойств ионосферы на пути распространения сигнала. Эти свойства под влиянием различных факторов могут существенно изменяться, что приводит к флуктуациям параметров, описывающих состояние ионосферы, с широким спектром пространственно-временных масштабов. Учет таких изменений при анализе и прогнозировании работы радиосредств затруднен и в настоящее время не нашел приемлемого для практики решения. Удовлетворительно описывается лишь среднемесячное состояние ионосферы с пространственным разрешением в сотни–тысячи километров и с характерным временем изменения несколько часов, для чего разработан и применяется на практике ряд моделей. В конкретной ситуации, определяемой заданным временем и пространственным регионом, можно, используя среднемесячную модель ионосферы, уточнить, скорректировать ее параметры по какой-либо оперативной информации, полученной в близкие моменты времени. Конечно, уточненная таким образом модель не будет учитывать быстрые изменения параметров с пространственными масштабами единицы–десятки километров, обычно отождествляемыми со случайными неоднородностями и с перемещающимися ионосферными возмущениями, однако для многих практических задач использования ионосферного распространения такой подход оказывается приемлемым, поскольку позволяет оперативно определить основные режимы работы радиосистем (частотный диапазон, определяемый рефракцией; углы излучения и приема и т.д.).

В качестве корректирующей информации обычно используются данные геофизических измерений. Так, достаточно широко применяется в моделях уточнение солнечной и магнитной активности, дающее глобальную коррекцию модели (см., например, работу [1]). Для локальной коррекции модельных значений высотного профиля электронной концентрации $N(h)$ применяются данные вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы, получаемые в соответствующем пространственном регионе [2]. Однако регулярное ВЗ проводится лишь небольшой сетью ионозондов. Поэтому интенсивно развивается направление, в котором информация для коррекции получается на основе решения обратной задачи определения параметров модели по значениям характеристик наклонного распространения декаметровых радиоволн. В ряде работ (см., например, [3–5]) для этого использованы специализированные измерения с разделением модов распространения, когда

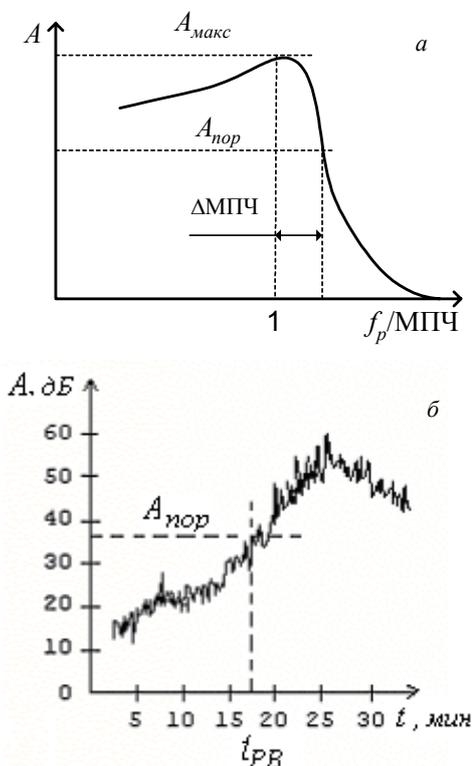
и передатчик и приемник должны обеспечивать определенные режимы работы. В некоторых случаях для получения корректирующей информации можно обойтись без выделения модов распространения и использовать наблюдения за сигналами радиостанций общего назначения (например, радиовещательных, связных, служб точного времени и т.д.). Такие радиостанции при условии, что известно их местоположение и частотно-временной режим работы, будем называть реперными радиостанциями (РРС). Они расположены во многих областях земной поверхности, наблюдения за их сигналами доступны в любом регионе и могут быть организованы сравнительно простыми средствами. В [6] рассмотрен способ, позволяющий определять значения максимально-применимых частот (МПЧ) реперных радиолоний и по этим данным выполнять коррекцию среднемесячной модели ионосферы для данного пространственного региона и определенных моментов времени.

Известно, что МПЧ определяется как наибольшая частота, при которой еще возможна связь на данной радиолонии посредством отражения радиоволн от ионосферы. Если в формировании сигнала участвуют несколько отражающих слоев и существует несколько модов распространения, то под МПЧ понимается наибольшая МПЧ всех модов. МПЧ является главным параметром радиотрасс и измеряется специальными ионозондами при работе на скользкой частоте как точка смыкания на ионограмме верхнего и нижнего лучей данного мода. В настоящей работе выполнено развитие методики получения информации об МПЧ по наблюдениям за сигналами РРС и проведена проверка точности этой информации.

Для простоты примем, что рабочая частота РРС f_p остается постоянной. В силу естественных суточных вариаций состояния ионосферы вдоль трассы распространения, изменяется МПЧ и в некоторый момент t_0 возникают условия, когда $f_p = \text{МПЧ}$. Будем считать, что определенное из этого равенства значение МПЧ для момента t_0 и есть измеренная величина МПЧ_i , которую можно использовать в качестве корректирующих данных при уточнении модели.

Основная проблема в измерении МПЧ_i с использованием РРС заключается в определении моментов времени t_0 . Как известно, во время смыкания верхнего и нижнего лучей происходит фокусировка поля и средняя амплитуда A сигнала должна увеличиться. Хотя этот эффект искажается интерференцией лучей на крупномасштабных ионосферных неоднородно-

стях с размерами в сотни километров, он хорошо наблюдается даже на двухскачковых трассах [7]. В области высоких частот $f_p > \text{МПЧ}$ амплитуда поля в обычных условиях резко падает, хотя случайные неоднородности ионосферы размерами 1–10 км могут вносить заметный вклад в принимаемый сигнал и уменьшить скорость этого спада [8]. На рисунке *а* показан качественный ход A при изменении отношения $f_p/\text{МПЧ}$, получаемый из приведенного теоретического рассмотрения со сглаженной интерференцией верхнего и нижнего лучей. Скорость падения амплитуды в области $f_p > \text{МПЧ}$ определяется интенсивностью рассеивающих неоднородностей, поэтому из рассмотрения по известным признакам (особые суточные периоды, определенные географические регионы, геомагнитная возмущенность) исключены ситуации с развитой неоднородной структурой ионосферы. В этих условиях, как видно из рисунка *а*, определяя момент достижения максимальной амплитуды сигнала при переходе f_p через МПЧ, можно найти значение МПЧ_n . К сожалению, определение максимальной амплитуды в эксперименте затруднено из-за отмеченных эффектов интерференции лучей в области $f_p \leq \text{МПЧ}$ и из-за сложностей регистрации малых изменений амплитуды вблизи максимума, поэтому в измерениях используется область значительного уменьшения амплитуды при $f_p \geq \text{МПЧ}$. Для этого введено пороговое значение амплитуды $A_{\text{пор}}$ (см. рисунок *а*), которое и служит критерием для определения МПЧ_n из условия $\text{МПЧ}_n = f_p$ при $A = A_{\text{пор}}$. Таким образом, наблюдая за ходом изменения амплитуды сигнала РРС с течением времени можно определить момент, когда $A(t) = A_{\text{пор}}$, а, следовательно, $\text{МПЧ}_n = f_p$.



Качественный ход амплитуды сигнала при изменении отношения $f_p/\text{МПЧ}$ (*а*); пример измерений амплитуды сигнала во время радиовосхода (*б*).

Возникающая ошибка $\Delta\text{МПЧ}$ при таком способе определения МПЧ зависит от скорости спада A с ростом частоты в области $f_p > \text{МПЧ}$ и от величины «защитного» интервала $A_{\text{макс}} - A_{\text{пор}}$. Как показали результаты предварительных наблюдений, значение $A_{\text{пор}}$, отстоящее на -20 дБ от $A_{\text{макс}}$, с одной стороны, надежно отсекает уменьшение сигнала из-за его флуктуаций в области $f_p \leq \text{МПЧ}$. С другой стороны, при выборе f_p значительно ниже максимальных, «дневных» значений МПЧ трассы, когда скорость изменения A со временем при переходе через МПЧ составляет в среднем около 5 дБ/мин, указанное значение $A_{\text{пор}}$ дает ошибку в определении момента равенства $f_p = \text{МПЧ}$, не превышающую нескольких минут. Величина $A_{\text{макс}}$ определяется за предыдущие дни наблюдений.

На рисунке *б* показаны относительные изменения амплитуды сигнала, полученные нами во время радиовосхода в один из дней наблюдений на односкачковой трассе Новосибирск – Иркутск для радиовещательного передатчика, работающего на частоте 15.625 МГц. В дальнейшем во время измерений для получения корректирующей информации в качестве РРС был задействован один из 18 маяков системы контроля декаметровых каналов, описанной в работе [9]. Для приема применялась установка [10], включающая широкополосный вертикальный вибратор, радиоприемник Р-160П и персональный компьютер с программой обработки данных. С выхода радиоприемника принимаемый сигнал через аналоговый фильтр нижних частот подавался на звуковую карту. Для обработки данных использовалась программа BeaconSee [11], синхронизированная по времени с режимом работы маяков и выполняющая цифровую фильтрацию сигнала на основе алгоритма БПФ. Такая фильтрация позволяла выделить слабые сигналы из помех и иметь широкий динамический диапазон наблюдений. Выбор порога $A_{\text{пор}}$ осуществлялся в программе BeaconSee изменением соответствующих настроек. При достижении величины $A_{\text{пор}}$ спектрограмма на экране компьютера изменяла свой цвет, и по этому признаку фиксировался момент перехода через МПЧ. Для радиовосхода на трассе определялся параметр $t_0 = t_{PB}$, а для радиозахода $t_0 = t_{PЗ}$. Как показывают наши оценки, ошибки определения этих моментов времени при наблюдениях на односкачковых среднеширотных трассах длиной 1000–2000 км в среднем не превышают 5 мин для спокойных ионосферных условий.

Для оценки точности рассматриваемой методики определения МПЧ был проведен анализ суточных изменений МПЧ на системе среднеширотных радиолиний. Данные о МПЧ получены при наклонном зондировании (НЗ) ионосферы на скользящей частоте и представлены в виде базы данных [12]. При анализе отобраны значения МПЧ для односкачковых мод на различных трассах в спокойных ионосферных условиях, построены графики суточных изменений (измерения выполнялись с дискретом по времени порядка получаса) и по ним определены величины изменения МПЧ за пятиминутные интервалы. Далее находились средние значения для всего набора трасс и различных геофизических сезонов. В

итоге получено, что средние изменения МПЧ за пятиминутный период не превосходят 0.2 МГц в дневные и ночные периоды на трассах и 0.6 МГц в утренние и вечерние периоды. С учетом того, что погрешность измерения МПЧ при НЗ оценивается на уровне 1.5–2 % [13], можно заключить, что в дневной и ночной периоды дополнительная ошибка определения МПЧ по наблюдениям за сигналами PPS сопоставима по величине с ошибкой метода НЗ, рассматриваемого в качестве опорного, а для утренних и вечерних периодов примерно вдвое больше ошибки метода НЗ. Общая ошибка для предлагаемой методики определения МПЧ по наблюдениям за сигналами реперных радиостанций может быть оценена как величина, составляющая от 3 % до 5 % значения МПЧ. Следует еще раз подчеркнуть, что эти оценки соответствуют невозмущенной ионосфере без учета наличия в ней случайных неоднородностей и перемещающихся возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесник А.Г., Колесник С.А., Нагорский П.М. Влияние ионосферной плазмы на распределение уровня космического радиоизлучения КВ-диапазона // Радиофизика и электроника: проблемы науки и обучения. Иркутск, 1995. С. 3–7.
2. Кринберг И.А., Выборов В.И., Кошелев В.В. и др. Адаптивная модель ионосферы. М.: Наука, 1986. 132 с.
3. Зимнюхова Т.П., Ивельская М.К., Сажин В.И. и др. Уточнение полуэмпирической модели ионосферы по энергетическим характеристикам сигналов НЗ // Геомагнетизм и аэрномия. 1989. Вып. 5, т. 29. С. 790–798.
4. Барабашов Б.Г., Ветроградов Г.Г. Динамическая адаптивная модель связного декаметрового канала // Радиотехника. 1995. № 12. С. 29–32.
5. Зимнюхова Т.П., Ивельская М.К., Сажин В.И. и др. Адаптация ионосферной модели на текущие условия // Исследования по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. Иркутск: Изд-во СОРАН, 1999. Вып. 109. С. 117–122.
6. Голыгин В.А., Грозов В.П., Сажин В.А., Унучков В.Е. Адаптация модели ионосферы к текущим условиям по критическим частотам без привлечения специализированных измерений // Труды VI сессии молодых ученых «Волновые процессы в проблеме космической погоды», Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2003. С. 200–201.
7. Паньков Л.В., Унучков В.Е. Определение максимально-применимых частот по измерениям статистических характеристик сигналов // Тезисы докладов XIV Всеобщей конференции по распространению радиоволн. М.: Наука, 1984. С. 161–162.
8. Афанасьев Н.Т., Грозов В.П., Тинин М.В. Эффекты ионосферных неоднородностей при наклонном распространении декаметровых радиоволн вблизи и выше МПЧ // Исследования по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. М.: Наука, 1987. Вып. 78. С. 190–197.
9. Troster J.G., Fabry R.S. The NCDXF/IARU International beacon network // QST. 1994. Pt. 1, N 10. P. 31–37; part 2, N 11, P. 49–51.
10. Голыгин В.А., Грозов В.П., Сажин В.И., Унучков В.Е. Региональный контроль ионосферной обстановки без организации специализированных измерений // Труды 7 конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2004. С. 140–142.
11. <http://sapp.telepac.pt/coaa/beaconsee.htm>
12. Карякин В.И., Литвинцев О.Г., Сажин В.И. База данных радиозондирования ионосферы: реализация и некоторые применения // Радиофизика и электроника - проблемы науки и обучения. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1995. С. 178–182.
11. Сажин В.И. Моделирование на ЭВМ распространения радиоволн в регулярной ионосфере. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1993. 40 с.
12. Поляков В.М., Суходольская В.Е., Ивельская М.К. и др. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий. М.: МЦД-Б, 1986. 136 с.
13. Алтынцева В.И., Брынько И.Г., Галкин А.И. и др. Автоматизированный комплекс средств прогнозирования условий распространения декаметровых радиоволн на базе ионозонда с ЛЧМ // Исследования по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. М.: Наука, 1990. Вып. 92. С. 141–152.

ИГУ, кафедра радиофизики, stealth1024@yahoo.com