



УДК 550.388.1

ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТЫ ИОНОСФЕРНЫХ РАДИОЛИНИЙ В ПЕРЕХОДНЫХ ОБЛАСТЯХ СКАЧКОВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

И. В. Крашенинников¹, В. Н. Шубин¹*ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия*

Анализируется работа двух реальных радиолиний меридиональной направленности: односкачкового (~2600 км) и доминирующего двухскачкового (~5100 км) режимов прохождения радиоволн в частотном разрезе параметров передачи информации. Показано, что наличие в системе радиосвязи высокоэффективных приемно-передающих антенн, делает необходимым учитывать в задаче прогнозирования радиотрасс существование априори энергетически крайне слабых мод, формирующихся механизмом ионосферного распространения радиоволн по лучевым траекториям семейства верхних лучей в ионосферной плазме. В случае резонансного совпадения углов выхода и прихода таких мод и направлений главных лепестков диаграмм направленности антенн в терминальных точках соотношение сигнал/шум для волнового поля может достичь порогового значения и обеспечить успешную работу радиокommunikационной системы. Это обстоятельство расширяет верхнюю границу скачкового прохождения радиоволн в переходных областях и его следует учитывать в прогнозировании работы ионосферных радиолиний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, МОДОВАЯ СТРУКТУРА, ВОЛНОВОЕ ПОЛЕ, ИОНОСФЕРНАЯ РАДИОСВЯЗЬ

DOI 10.5425/2304-7380_2022_34_25

<https://elibrary.ru/lgjnqv>

1. ВВЕДЕНИЕ

Ключевым элементом прогнозирования работы радиолинии является расчет частотного диапазона прохождения радиоволн между ее терминальными точками: верхней границы – максимальной применимой частоты (МПЧ) и нижней – наименьшей применимой частоты (НПЧ). В подавляющем большинстве случаев МПЧ радиотрассы определяется МПЧ слоя F2 ионосферы – МПЧ F2. Для односкачкового режима прохождения радиоволн существует специальный параметр – МПЧ 1F2(3000) [1], т. е. дальность в 3000 км рассматривается как определенный стандарт распространения радиоволн при однократном отражении от ионосферы, для которого существует наибольшая возможная частота переноса волнового поля в двухточечной задаче. При этом, в классическом смысле теории ионосферного распространения радиоволн, под МПЧ ионосферного слоя понимается частота, соответствующая точке смыкания семейств нижних и верхних лучей [2] (низкоугловые и

Электронная почта авторов для переписки:

Крашенинников Игорь Васильевич, e-mail: krash@izmiran.ru
Шубин Валентин Николаевич, e-mail: shubin@izmiran.ruАдрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

высокоугловые лучи [3]). С увеличением дальности радиотрассы, вследствие кривизны земной поверхности, уменьшается частотный диапазон прохождения нижних лучей – его нижняя граница (НПЧ) растет быстрее, чем верхняя (МПЧ), и классическая МПЧ 1F2, как точка смыкания ветвей ионограммы НЗ, практически не формируется для расстояний, превышающих 4000 км из-за вырождения “нижнелучевого” механизма прохождения. Однако при этом “верхнелучевая” мода – 1F2+ физически существует, но с очень слабым значением напряженности волнового поля, вследствие фундаментальной особенности данного способа переноса излучения – высокой волновой расходимости в условиях малого показателя преломления вблизи ионосферного максимума.

Пример многочастотного наклонного радиозондирования ионосферы (НЗ) – регистрация ионограмм НЗ на дальности ~4200 км, где наблюдаются следы односкачкового прохождения, приведен на рис. 1. Расстояние в 4000 км рассматривается как определенный предел в практическом прогнозировании работы односкачковой радиолинии и отсутствие классически определяемой МПЧ 1F2 является критерием, когда радиотрасса переходит в статус двухскачковой (доминирующей двухскачковой) и основным способом переноса излучения становится мода 2F2. Однако в силу разнообразия ионосферных условий распространения радиоволн, односкачковое прохождение может реализоваться и для дальностей более 4000 км, осуществляемое уже, практически, только верхнелучевым механизмом распространения. В этом случае, как правило, считается, что напряженность волнового поля недостаточна для корректного функционирования системы радиосвязи в силу малой энергетики и большой вариативности данной моды. Ослабление волнового поля верхних лучей в большой степени зависит от продольной неоднородности электронной плотности на радиотрассе, в частности, плазменной частоты в максимуме слоя F2 – foF2. Данное свойство иллюстрируют результаты НЗ (рис. 1, трек 1F2+) на широтной радиотрассе Иркутск (ИСЗФ) – Москва (ИЗМИРАН). При переходе от дневных (практически однородного распределения электронной плотности) к вечерним (со значительным продольным градиентом) условиям распространения радиоволн наблюдается резкое ослабление напряженности волнового поля моды 1F2+ (рис. 1, правая панель). Следует отметить, что при таком режиме переноса излучения частотный диапазон прохождения может иметь глубокие энергетические провалы (рис. 1, левая панель), особенно в области сразу за МПЧ 2F2, что и определяет низкий уровень надежности работы радиокommunikационных систем на модах такого типа.

В данной работе, на основе экспериментальных данных, анализируются особенности прогнозирования работы двух радиолиний, классических по критерию формирования МПЧ 1F2, односкачкового и двухскачкового прохождения радиоволн меридионального направления с дальностями ~ 2600 и ~ 5100 км, имеющих в своем составе высокоэффективные, но узконаправленные, приемные антенны.

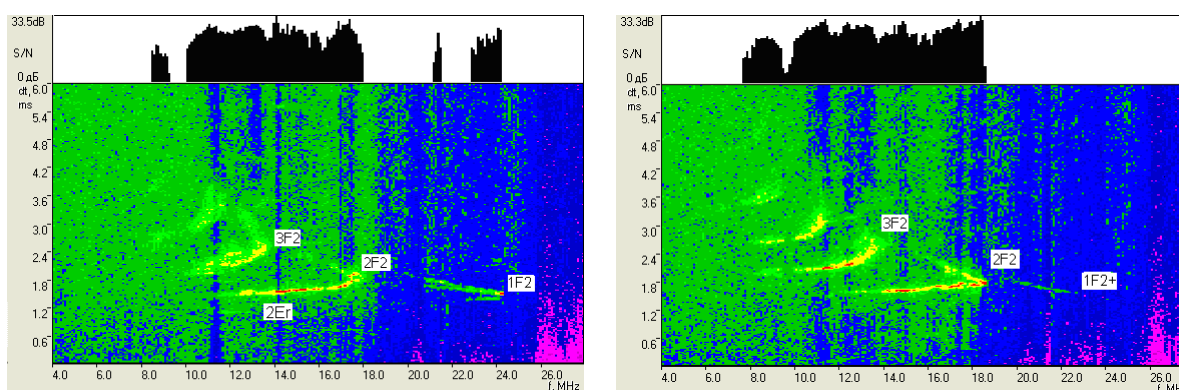


Рис. 1. Модовая структура волнового поля (ионограммы наклонного радиозондирования ионосферы с линейно-частотным модулированным сигналом) для дальности ~ 4200 км Иркутск(ИСЗФ)-Москва(ИЗМИРАН) 08.09.2011: 11:32 UT (левая панель) и 12:45 UT (правая панель) со слабонаправленными диапазонными антеннами

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 2 представлены результаты работы в исследовательском режиме двух ионосферных радиолиний меридиональной направленности с приемом в Москве со стандартной узкополосной системой радиосвязи, использующей информационный сигнал МЧТ (многопозиционная частотная телеграфия [4]). Азимуты обеих радиотрасс в точке приема близки. Мощность излучения корреспондентов в обоих случаях составляла 100 Вт. Приемные и передающие антенны радиотрасс сопряжены по азимутам. Излучающая антенна: для радиотрассы с дальностью 2500 км – горизонтальный диполь – ВГД (вибратор горизонтальный диапазонный) [5], а для дальности 5100 км – горизонтальная логопериодическая антенна [5]. Обе имеют сравнимый и относительно невысокий коэффициент усиления (~ 10 дБ) и, соответственно, достаточно широкую диаграмму направленности. Приемная антенна – СГДРА (синфазная горизонтальная диапазонная с аперриодическим рефлектором [5]), имеющая высокий коэффициент усиления (~ 20-30 дБ в зависимости от частоты – монотонно растет с частотой). Частотная полоса сигнала составляет 2.4 кГц. Пороговое значение сигнал/шум для штатного функционирования радиокommunikационной системы – 20 дБ. Система работала в тестовом режиме с перестройкой рабочей частоты. Скорость передачи стандартного информационного сообщения составляла 1200 бит/сек. Верхние панели рисунка 2 отражают линейное соотношение сигнал/помеха (radio-frequency interference – $RFI = A_m / \sqrt{A_N^2 + \sum_{k \neq m} A_k^2}$), где A_m – амплитуда максимальной моды из множества A_k , A_N – среднеквадратичная амплитуда фонового электромагнитного шума. RFI определяется не только классическим отношением сигнала к постороннему электромагнитному излучению, но и многомодовым характером самого волнового поля, и, в целом, отражает отношение амплитуды наиболее энергетически выгодной моды к суммарной энергетике остальных мод и фонового электромагнитного шума. В предельном случае одномодового (или преимущественно одномодового) прохождения отношение сигнал/помеха совпадает с отношением сигнал/шум – SNR (signal to noise ratio) $SNR \sim A_0 / A_N$.

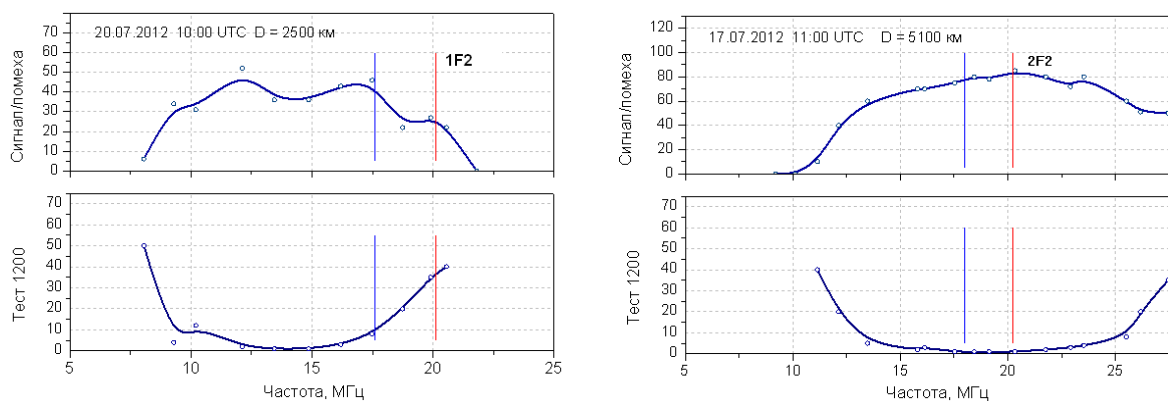


Рис. 2. Результаты тестовой работы двух радиолиний в частотном разрезе параметров передачи информации: односкачковая (~ 2600 км) 20.07.2012 10:00 UT (левая панель) и двухскачковая (~ 5100 км) 17.07.2012 11:00 UT. Верхняя часть рисунков отражает соотношение сигнал/помеха (RFI), а нижняя – достоверность передачи (уровень ошибочных символов на тысячу знаков) в тестовом сообщении

На рисунке 2 хорошо проявляются факторы, формирующие частотный диапазон работы радиокommunikационной системы – нижняя граница определяется слабым значением SNR, ввиду роста поглощения радиоволн ионосферной плазмой с уменьшением частоты, а в верхней части – качество передачи информации ограничивается интерференцией мод – верхних и нижних лучей вблизи МПЧ, имеющих сравнимые амплитуды волнового поля. Надежность передачи информации отображается в нижней части рисунка и отражает уровень погрешности в принятом тестовом символьном сообщении. Красными вертикальными линиями отмечены расчетные значения МПЧ доминирующих скачковых мод, а синими – оптимальные рабочие частот (ОРЧ), рассчитанные с

прогнозными параметрами модели ионосферы на момент сеансов радиосвязи. Из частотной зависимости качества работы радиолинии видно, что в обоих случаях существует оптимальный интервал рабочих частот, на которых имеет место наиболее эффективный режим передачи информации через ионосферный радиоканал.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Год 2012, время проведения экспериментальных исследований, характеризуется средним уровнем солнечной активности. Для июля 2012 г. сглаженные среднемесячные значения числа солнечных пятен – Rms и потока солнечного радиоизлучения – Fms составляют 85 и 120 соответственно. Оптимизированные среднемесячные значения, как входные параметры для работы с медианными ионосферными моделями с учетом реформы калибровки SSN (Sunspot Number), в частности, с IRI [6]: 72.9 и 123. День 20.07.2012 – геомагнитно спокойный ($A_p \sim 10$), а 17.07.2012 – слабовозмущенный ($A_p \sim 14$), с суббури в интервале 00-06 UT.

Базовой моделью ионосферы в комплексе прогнозирования и планирования радиотрасс – “Прогноз-ИЗМИРАН” является модель GDMI [7] (Global Dynamic Model of the Ionosphere) с базовым суточным временным рабочим интервалом и имеющая в качестве управляющих параметров: обобщенный индикатор солнечной активности – параметр F (на основе данных о потоке солнечного радиоизлучения F10.7) и геомагнитной – 3-х часовые индексы Kp в текущем (прогнозные) и двух предшествующих днях. Альтернативной моделью является международная модель IRI, как стандарт URSI [8]. Система “Прогноз-ИЗМИРАН” имеет три режима прогнозирования: долгосрочный (среднемесячный), краткосрочный (на модели GDMI с данными текущего дня, двух предшествующих дней и двух дней вперед) и оперативный (текущий час и два вперед с дополнительными данными радиозондирования ионосферы за три предшествующих часа). В режиме долгосрочного прогнозирования модель GDMI используется в медианном режиме с оптимизированными среднемесячными индексами солнечной активности и фиксированным (медианным) уровнем геомагнитной активности ($K_p \sim 2$). В основе всех видов прогнозирования лежит расчет модовой структуры волнового поля в адаптированном виде для заданного момента времени, на основе решения краевой задачи в геометрооптическом приближении распространения радиоволн в неоднородной ионосфере [8,9].

Однокачковая радиотрасса. Синтезированная модовая структура волнового поля (“Прогноз-ИЗМИРАН”) для 20.07.2012 10:00 UT в моделях ионосферы GDMI (медианный режим) и IRI с оптимизированными среднемесячными параметрами солнечной активности представлена на рис. 3 и отражает зависимость как парциального (по модам), так и общего отношения сигнал/шум в

логарифмической шкале – $SNR = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{\sum_k A_k^2}}{A_N} \right)$, где под амплитудой сигнала понимается

суммарная амплитуда волнового поля. Для однокачковой радиолинии степень общего соответствия расчетных и экспериментальных результатов достаточно высокая, как и принципиальная близость результатов для обеих ионосферных моделей. Так, МПЧ 1F2 в обоих случаях практически одинаковы (~ 20.5 МГц, экспериментальное значение в форме максимально наблюдаемой частоты радиосвязи – МНЧ ~ 21 МГц), минимальные частоты срабатывания системы радиосвязи также близки (экспериментальное значение ~ 8 МГц и модельные расчетные $\sim 8-9$ МГц). Можно отметить даже общее наличие выраженного провала в частотном разрезе параметра работы радиолинии: интервал 13 – 16 МГц в экспериментальных данных и 13–15 МГц в общем значении рассчитанного SNR (рис. 3). Однако в модельном представлении энергетический провал выражен существенно более значимо, чем в экспериментальных результатах. Имеется определенное соответствие по пороговому значению штатной работы радиокommunikационной системы (отмечена горизонтальной линией на рис. 3), то расчетное минимальное значение, когда радиолиния входит в штатный режим, составляет ~ 10 МГц, как в эксперименте, так и в модельном расчете. Причем, в данном случае, физическим носителем является мода 2F2 (рис. 3). Выбор оптимальной рабочей частоты – ОРЧ достаточно неплохо соответствует своему статусу, хотя и не является наилучшим выбором рабочей частоты в диапазоне прохождения МНЧ - МПЧ с точки зрения эффективности передачи информации – наибольшая надежность работы системы связи наблюдается в интервале 13-15 МГц (рис. 2).

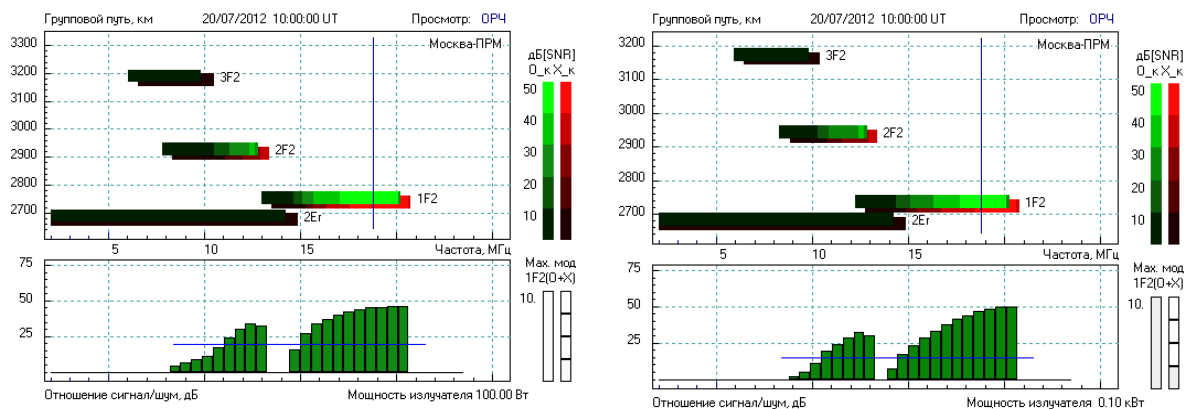


Рис. 3. Расчетная модовая структура волнового поля на дальности ~2600 км 20.07.2012 10:00 UT: модель GDM1 (левая панель) и модель IRI (правая панель)

Для частоты 15 МГц, лежащей в области оптимальной работы односкачковой радиолинии очевидно, что реализуется доминирующий одномодовый режим прохождения – верхние лучи 1F2 практически отсутствуют (рис. 3). Теоретически они существуют, но в силу почти экспоненциального спада амплитуды волнового поля верхних лучей по частоте от МПЧ 1F2 их вклад в суммарное поле крайне незначителен. Также очень мал возможный вклад моды 2Eg из-за поглощения в D и E слоях ионосферы при двукратном отражении и перенос излучения осуществляется, главным образом, только нижними лучами моды 1F2, и в этих условиях расчетное SNR превосходит пороговое значение радиолинии. Как отмечалось выше, для одномодового (преимущественно одномодового характера волнового поля) коэффициенты RSI и SNR эквивалентны. Это свойство хорошо проявляется на рис. 2 и 3 – величины экспериментальной RFI и расчетного SNR достаточно близки для данной частоты (15 МГц): RSI~31 дБ и SNR~30 дБ, что и обуславливает качественную работу радиолинии. На верхней границе частотного диапазона проявляется эффект интерференции верхних и нижних лучей со сравнимыми энергетическими параметрами, что снижает радиотехническое отношение сигнал/помеха и приводит к повышению уровня ошибки передачи информации. Т.е., несмотря на высокий суммарный уровень превышения волнового поля над фоновым электромагнитным шумом качество работы радиолинии невысокое из-за взаимного мешающего действия парциальных полей многомодового сигнала.

Двухскачковая радиотрасса. Для более протяженной радиотрассы в 5100 км, классифицируемой как двухскачковая по доминирующему регулярному способу переноса излучения, расхождение между экспериментальным результатом – МНЧ радиосвязи и расчетным – МПЧ 2F2 прогнозом гораздо больше – рис. 2 и рис. 4 (левая панель). Разность между зарегистрированной верхней частотой успешной работы радиолинии и расчетной МПЧ 2F2 составляет ~ 7 МГц (~ 27 МГц – рис. 2 и ~ 20 МГц – рис. 4, левая панель). Такое большое расхождение невозможно объяснить несоответствием модели реальному распределению электронной плотности по радиотрассе, хотя прохождение радиоволн и происходит частично в проблемной, с точки зрения глобальных моделей ионосферы, зоне – северном гребне приэкваториальной аномалии. Так же, как и в предыдущем случае, расчетная ОРЧ достаточно качественно реализует потенциал радиолинии.

На рисунке 4, правая панель, приведена синтезированная ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы с включением следа, сформированного верхними лучами моды 1F2. – 1F2+ Следы кратных мод даны в изотропном представлении, а следы верхних лучей односкачкового прохождения 1F2+ - в магниторасщепленном виде. Красным цветом отображается обыкновенная (O-), а зеленым цветом – необыкновенная (X-) компоненты волнового поля. Наличие ветви ионограммы 1F2+ принципиально расширяет потенциально возможный частотный интервал прохождения радиоволн на данной радиотрассе до, практически, зарегистрированного экспериментального значения в 27 МГц. Вертикальными линиями отмечены фиксированные частоты: 19, 22 и 25 МГц с вертикальными углами прихода в терминальных точках радиотрассы. Хорошо видна асимметрия в углах возвышения – так для X-компоненты на частоте 19 МГц их значения составляют 22° и 14°, что отражает весьма существенную продольную неоднородность электронной плотности. В квадратных скобках приведены значения вертикального угла для максимума диаграммы направленности приемной антенны, имеющей высокий коэффициент усиления. Для необыкновенной компоненты на частоте 22

МГц имеет место практически полное совпадение между углом прихода и направлением диаграммы направленности; для 19 МГц – разность положительная (+2°), а для 25 МГц – отрицательная (-2°). Для О-компоненты на данных частотах углы возвышения несколько меньше (~ 1-2°), чем для Х-компоненты. Тем не менее, учитывая, что ширина диаграммы направленности на 22 МГц по половинному уровню составляет 10° (±5°), она также принимается антенной достаточно эффективно. А поскольку ее интенсивность в данном способе переноса излучения существенно выше на фиксированной частоте, чем у необыкновенной компоненты (по амплитуде соотношение АО/АХ ~ 2), она и является по факту доминирующей составляющей волнового поля. В передающем пункте для частоты 22 МГц направление главного лепестка ДН антенны составляет 15° с шириной по половинному уровню в 30°, что также практически совпадает с углами возвышения: 15° для Х- и 13° для О-компоненты (рис. 4). Таким образом, имеет место резонансное совпадение угловых параметров волнового поля с направлениями главного лепестка диаграмм направленности как приемной, так и передающей антенн в вертикальной плоскости, т.е. обе антенны работают, практически, в максимуме своей эффективности и, следовательно, реализуется максимальный потенциал выделения сигнала из фоновых электромагнитных шумов.

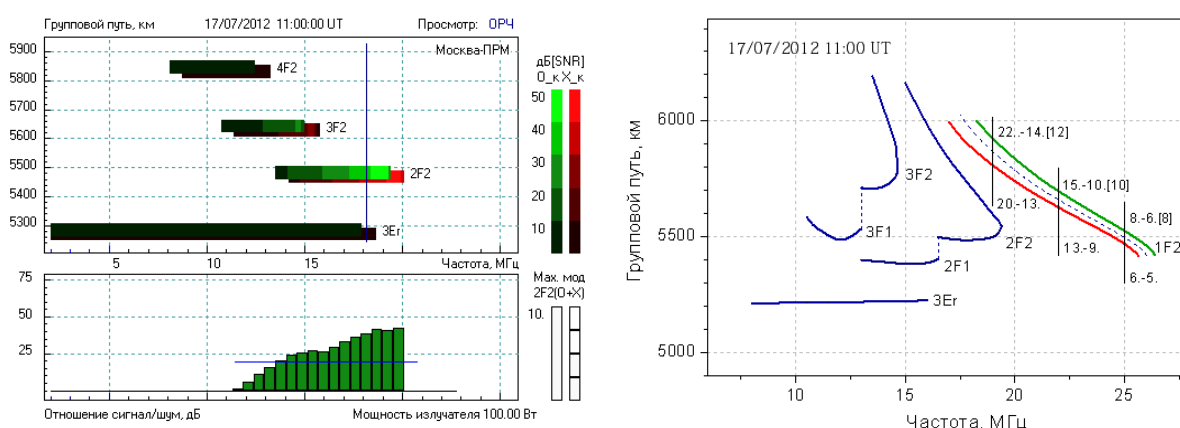


Рис. 4. Синтезированные в модели GDMI для радиотрассы 5100 км на 17.07.2012 11:00 UT: апостериорный прогноз работы радиокommunikационной системы и ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы. О-компонента моды 1F2 отображена красным цветом, а Х-компонента – зеленым

Оценим соотношение SNR на частоте 22 МГц. В базовой постановке задачи (фундаментальное решение): 1кВт излучение и изотропные антенны амплитуда волнового поля в модели GDMI (с учетом поглощения через частоту столкновений электронов [9]) составляет $A_b \sim 0.3$ мкВ/м. Для 100 Вт амплитуда поля соответственно уменьшается на $\sqrt{10} \approx 3$ до $A_0 \sim 0.1$ мкВ/м. С учетом коэффициентов усиления антенн [10,11]

$$E_s = \sqrt{G_t G_r} A_0 = \sqrt{10 \times 400} \times 0.1 \approx 6 \text{ мкВ/м},$$

где G_t и G_r – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн. В принципе, напряженность волнового поля небольшая, но для работы радиотехнических устройств важно не столько само значение напряженности поля, сколько соотношение сигнал/шум. Значение фонового уровня электромагнитного шума можно получить из глобальной модели шумов по методике [11]. Для данного приемного пункта и следующих его свойств: удаленная область относительно антропогенного фактора, лето, интервал локального времени 08:00 – 12:00, номинал частоты 22 МГц и для полосы 2.4 кГц среднеквадратичная напряженность электромагнитного шума составляет $E_N \sim 0.22$ мкВ/м. Т. е. без усилительных свойств антенн сигнал был бы ниже уровня шумов. Нужно отметить, что рассматриваемая ситуация, с точки зрения энергетических параметров верхних лучей, значительно хуже, чем для случая на рис.1, правая

панель. Во-первых, расстояние больше почти на 1000 км, во-вторых, значительно выше продольная неоднородность радиотрассы; в $foF2$, практически, в 4 раза (0.41 и 0.12 МГц на 1000 км). С учетом усиления антенн в логарифмическом масштабе $SNR = 20 \lg E_s / E_N \approx 20 \lg 30 \approx 30 \text{ дБ}$, что превышает пороговое значение штатной работы системы связи (20 дБ). Для сравнения, оно сопоставимо со значением SNR на 15 МГц (рис. 5 и рис. 2, правая панель), и также имеет место близкое качество работы радиолинии. Такое высокое значение SNR объясняет отсутствие скачка в качестве работе радиолинии при переходе с моды 2F2 на моду 1F2+, хотя разность в напряженности волнового поля мод 2F2 и 1F2+ довольно большая.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты данного эксперимента являются обобщением нескольких факторов, определяющих перенос излучения через ионосферу: модель ионосферы, описание технических средств (антенн), расчет напряженности волнового поля в задаче с граничными условиями и наличие электромагнитных шумов. Для модели GDM1 рассчитанные величины углов выхода и прихода в условиях сильного продольного градиента $foF2$ существенно различаются по величине (рис. 4) и. разность может достигать до 8° . Антенны в анализе данных описывались аналитически для типов СГДРА и ВГД [5] и численно для логопериодического типа (нет аналитического представления). Полуширина диаграммы направленности антенны СГДРА, например, для частоты 25 МГц составляет всего $\sim 4^\circ$. Т.е., если гипотетически поменять местами антенные системы в конечных пунктах, то энергетика радиолинии снизится настолько, что система связи функционировать не будет, несмотря на общие высокие показатели эффективности антенн. Т.е., в данном случае имеет место резонансное совпадение антенн и пространственного распределения электронной плотности на радиотрассе.

Комплекс прогнозирования работы радиотрасс “Прогноз-ИЗМИРАН” в принципе анализирует возможность прохождения радиоволн при отсутствии классической МПЧ 1F2, т.е. только верхними лучами (рис. 1) и отмечает такой механизм переноса излучения как вероятностную моду. Критерием ее существования является небольшая высота прохождения рикошетирующих лучевых траекторий в расчете МПЧ для верхних лучей над приемным концом радиотрассы. В этом случае напряженность волнового поля не может быть рассчитана прямым вариационным методом [9], в силу отсутствия базового решения в двухточечной задаче. Но в реальных условиях относительно небольшие изменения в текущем распределении электронной плотности могут привести к физическому формированию данной моды. Так увеличение продольной неоднородности в приведенном примере данных наклонного радиозондирования (рис. 1) в 12:45 UT является стимулирующим фактором для появления вероятностной моды *1F2. (рис. 5, правая панель).

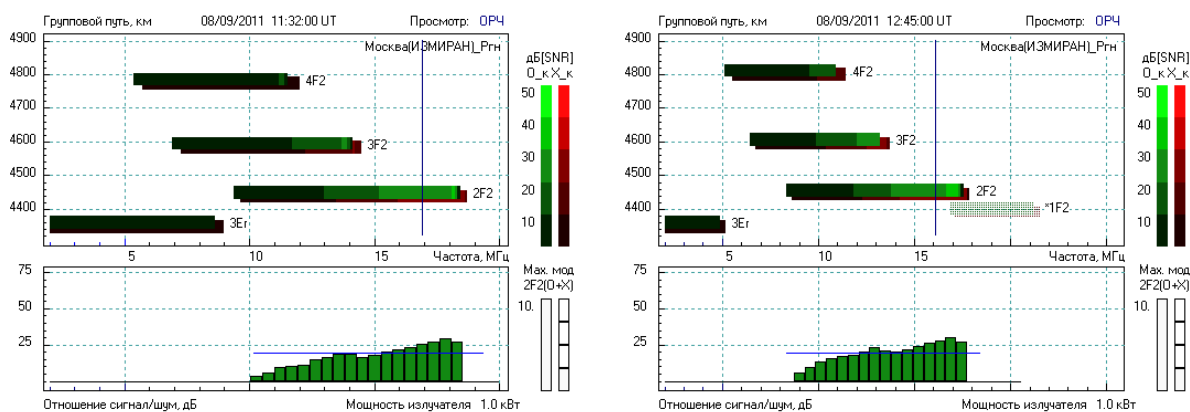


Рис. 5. Синтезированные в модели GDM1 для радиотрассы Иркутск(ИСЗФ) – Москва(ИЗМИРАН) на 08.09.2011 11:32 UT и 12:45 UT: апостериорный прогноз работы радиокommunikационной системы (слева) и ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы (справа)

Но в случае с радиотрассами, дальность которых превышает 4500 км, предполагается, что такой возможности уже нет (рис. 4, левая панель). Однако в данном случае семейство верхних лучей для моды 1F2 все же формируется – рис. 4 (правая панель, мода 1F2+), что, по-видимому, и дает принципиальную возможность существования физического носителя волнового поля на частотах выше классической МПЧ 2F2. Близость верхних границ частотных диапазонов прохождения в эксперименте (~ 27 МГц) и в модельном расчете (~ 26.5 МГц для необыкновенной компоненты поля) дает основание считать, что именно этот механизм и реализуется в рассматриваемом примере успешной работы радиолинии. В данном случае в энергетике радиолинии большое значение имеют антенны, особенно приемная антенна с высоким коэффициентом усиления. В анализируемом случае для верхних лучей моды 1F2 антенны дают практически максимально возможный выигрыш, что в значительной степени компенсирует энергетические потери “верхнелучевой” волны в ионосферной плазме и обеспечивает качественную работу радиолинии даже, казалось бы, на энергетически слабом механизме переноса излучения. Высокий уровень достоверности передачи информации обеспечивается фактическим одномодовым характером волнового поля – имеются лишь магнитоионные компоненты моды с доминированием обыкновенной составляющей. Лишь по мере приближения рабочей частоты к максимальной частоте моды 1F2+ начинает сказываться сближение амплитуд парциальных компонент, т.е. происходит усиление интерференции магнитоионных мод и, как следствие, ухудшение параметров радиолинии. Но, как и следовало ожидать, оно не имеет такого кардинального значения как в случае односкачковой радиотрассы (рис. 2), где сильно интерферируют близкие по энергетике нижние и верхние лучи моды 1F2 при приближении к МПЧ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ работы радиотрасс односкачковой и доминирующей двухскачковой (переходной) дальности показывает, что в реальных условиях, с наличием высокоэффективных антенн, необходимо учитывать в задаче прогнозирования работы радиокommunikационных систем существование энергетически слабых мод, формирующихся механизмом переноса излучения исключительно верхними геометрооптическими лучами в ионосферной плазме. То обстоятельство, что удалось, не только качественно (по максимальной возможной частоте прохождения), но и количественно, в терминах энергетических соотношений, объяснить экспериментальные данные, позволяет сделать вывод о корректности аналитического представления сложных антенн в функционировании ионосферных радиокommunikационных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Перевод с англ. второго издания “URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction” под ред. Н.В. Медниковой. М.: Наука. 342 с. 1978.
2. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
3. *Verhulst T., Altadill D. et al.* Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronized ionosondes // *Advances in Space Research*, 2017. V. 60. I. 8. P. 1644-1656.
4. *Маковий В.А., Чупеев С.А.* Сигналы с перестановочной модуляцией и их свойства // Теория и техника радиосвязи, изд. ОАО «Концерн «Созвездие», № 1, 2010, 13-24.
5. *Айзенберг Г.З.* Коротковолновые антенны. М.: “Радио и связь”, 1962. 815 с.
6. *Крашенинников И. В., Павлова Н. М., Ситнов Ю. С.* Модель IRI в задаче прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн в условиях высокой солнечной активности // *Геомагнетизм и аэрoномия*. Т. 57. № 6. С. 774-782. 2017.
7. *Шубин В. Н., Деминов М.Г.* Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы // *Геомагнетизм и аэрoномия*. Т. 59. № 4. С. 461-473. 2019.
8. *Крашенинников И.В.* Особенности частотной зависимости в задаче переноса излучения для радиотрасс с предельной дальностью односкачкового распространения в условиях низкой солнечной активности // *Гелиогеофизические исследования*, Изд-во: ИПГ, Москва, 2019. С.

9. Крашенинников И.В., Шубин В.Н. Частотная зависимость энергетических параметров волнового поля на предельной дальности односкачкового распространения радиоволн в условиях низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия, 2020. Т. 60 № 2. С. 220-228.
10. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред, М., “Наука”, 304 с., 1980.
11. Maslin N.M. HF Communication: A System Approach. Pitman Publishing. 240 p. 1987.

FEATURES IN FORECASTING IONOSPHERIC RADIO LINKS OPERATION IN TRANSIENT AREAS FOR HOP PROPAGATION OF RADIO WAVES

Krasheninnikov I.V. and Shubin V.N.

The work of two meridional directed radio links is analyzed in the frequency section of the information transmission quality: single-hop (~2600 km) and dominant double-hop (~5100 km) basic modes of radio waves propagation. It is shown that presenting in the radio communication system of highly effective receiving and transmitting antennas, makes it necessary to take into account existing of a priori energetically extremely weak modes, exclusively formed by the high-angled mechanism of ionospheric radio waves propagation. In the case of the resonant coincidence for the mode elevation angles with used antennas main loops directions in terminal points the signal/noise ratio (SNR) can reach enough values and provide successful operation of the explored radio communication system. This circumstance extends potential upper boundary in transition regions of the hop mechanism in radio wave propagation and it should be taken into consideration in predicting service of ionospheric radio links.

KEYWORDS: IONOSPHERE, RADIO WAVE PROPAGATION, MODE STRUCTURE, WAVE FIELD, IONOSPHERIC RADIO COMMUNICATION