

УДК 538.566

## ШИРОТНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИОНОСФЕРЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ МАКСИМАЛЬНО ПРИМЕНИМЫХ ЧАСТОТ ОБЛАСТИ $F$ НА ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ТРАССАХ

© 2012 г. Ю. К. Калинин, Е. Н. Хотенко

ФГБУ Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва

e-mail: madam.ermolova@gmail.com

Поступила в редакцию 29.09.2010 г.

После доработки 25.04.2011 г.

Приводятся результаты расчетов максимально применимой частоты (МПЧ) при отражении от ионосферы излучаемой под нулевым углом радиоволны на прямых и обратных трассах в условиях, когда существенную роль играет широтная изменчивость среды. В качестве примера выбрана трасса Новороссийск–Калифорния. Расчет производился методом “двух точек” с использованием данных Месячного прогноза МПЧ за май 1980 г. и май 1991 г. Приводится обоснование метода “двух точек” на основе нового способа приближенного представления интеграла Ватсона, являющегося точным решением эталонной задачи о поле точечного источника в сферически слоистой среде. Показано, что МПЧ обратной трассы на несколько Мегагерц выше МПЧ прямой трассы во все времена суток.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Широтная изменчивость ионосферы является существенным фактором при определении максимально применимых частот (МПЧ) области  $F$  для корреспондентов, находящихся в разных полушариях и использующих трансполярные трассы. При этом МПЧ- $F_2$ -4000 на прямых и обратных радиотрассах могут существенно различаться.

В качестве примера выбрана трасса Новороссийск–Западное побережье США. На рисунке приведен фрагмент карты Северного полушария. Трасса отмечена штрихпунктирной линией. Штриховой линией отмечена траектория регистрации кругосветного эха осенью 1971 г. ( $W=64$ ). Для трассы Новороссийск–Западное побережье США были проведены расчеты МПЧ- $F_2$ -4000 для прямой и обратной радиоволн с использованием данных [Месячный прогноз, 2003] за май 1980 г. ( $W=155$ ) и данных за сентябрь 1991 г. ( $W=111$ ) [Питина и др., 1980].

**Таблица 1.** Суточная изменчивость МПЧ для прямой и обратной трасс за май 1980 г.,  $W=155$

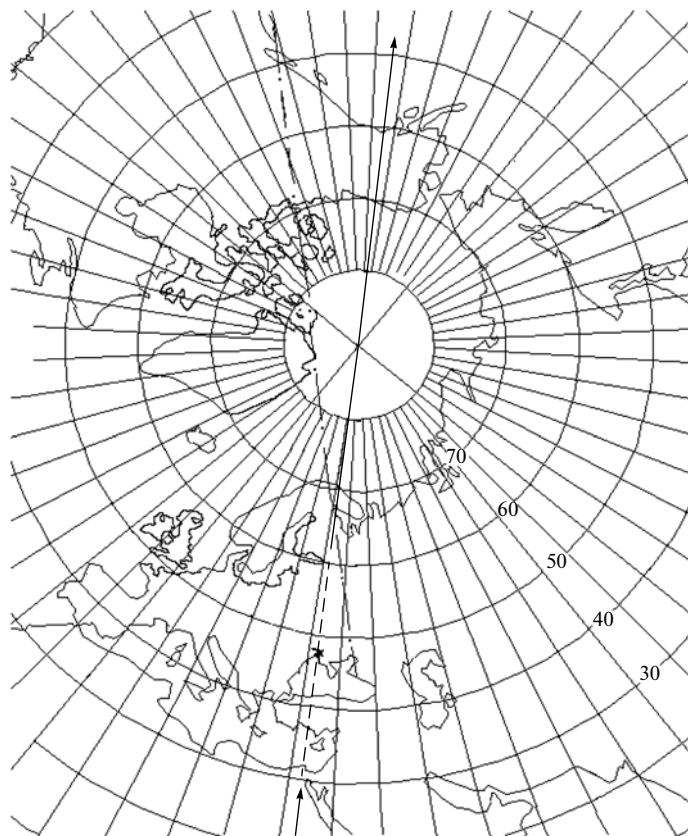
LT, ч	МПЧ <sub>1</sub>	МПЧ <sub>2</sub>
0	30	17
4	27	17
8	26	21
12	23	18
16	21	15
20	25	17

### 2. ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ТРАССЫ

Результаты, приведенные в табл. 1 (май 1980 г.) и табл. 2 (сентябрь 1991 г.), содержат соответствующие данные о суточной изменчивости МПЧ (в МГц) для обратной (МПЧ<sub>1</sub>) и прямой (МПЧ<sub>2</sub>) трасс. Из данных, приведенных в таблицах, следует, что МПЧ обратной трассы, проходящей через Южную Полярную область, существенно выше, чем МПЧ прямой трассы, проходящей через Северную Полярную область (см. рисунок).

Разница в МПЧ между трассами 1 и 2, проходящими через Южный и Северный полюсы соответственно, образуется за счет того, что для трассы 1 локализация “входа” и “выхода” волн в ионосферу относится к участкам с более высокой критической частотой  $foF_2$ . Для трассы 1 эти участки расположены южнее, и различие между значениями МПЧ в табл. 1 и 2 обусловлено широтной изменчивостью ионосферы.

Сразу следует отметить немаловажное обстоятельство. Массовое использование долгосрочного прогноза МПЧ показало, что для ионосферных трасс протяженностью  $D < 4-5$  тыс. км прогноз дает несмещенную оценку значений МПЧ на среднеширотных трассах. Однако на более протяженных трассах систематически наблюдаются более высокие МПЧ по сравнению с прогнозируемыми, в особенности, когда вдоль таких трасс имеет место значительная изменчивость величины  $foF_2$ . Стандартные процедуры расчета МПЧ основываются на представлениях о симметричных скачках. Для скачка с номером  $m$  определяется МПЧ <sub>$m$</sub> , пропорциональная значению критиче-



Фрагмент карты Северного полушария с участками трансполярных трасс. Штриховая линия (индекс 1 в таблицах) – траектория регистрации кругосветного сигнала; штрихпунктирная линия (индекс 2 в таблицах) – прямая трасса.

ской частоты в вершине скачка. При этом  $m = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – полное число скачков на трассе. Если в качестве механизма распространения радиоволн выбирается  $n$ -скачковый, то в качестве МПЧ<sub>тр</sub> всей трассы выбирается минимальный элемент множества {МПЧ<sub>*m*</sub>} на отдельных скачках

$$\text{МПЧ}_{\text{тр}} = \inf \{ \text{МПЧ}_m \}. \quad (1)$$

Действительно, нарушение соотношения (1) означает, что выбор рабочей частоты  $f_p$  выше, чем МПЧ на каком-либо скачке, и именно на этом участке трассы волновой пакет выйдет за пределы ионосферы. Вместе с тем экспериментальные данные свидетельствуют о том, что на протяженных трассах ( $D > a$ , где  $a$  – радиус Земли), правило (1) несправедливо. В практике радиопрогнозирования давно [Жулина и др., 1969] известна альтернативная схема, согласно которой величина МПЧ<sub>тр</sub> выбирается как минимальная величина из МПЧ<sub>1</sub> – на первом скачке и МПЧ<sub>*n*</sub> – на последнем

$$\text{МПЧ}_{\text{тр}} = \inf \{ \text{МПЧ}_1, \text{МПЧ}_n \}. \quad (2)$$

Соотношение (2) называют “методом двух точек” или, что менее корректно, бесскачковым механизмом, без соотнесения к так называемому лучу

Педерсена. Правило (2) обобщалось в работе [Гитина и др., 1980], где предлагалось внутрь знака множества { } в формуле (2) ввести величину  $2\text{МПЧ}_{n/2}$ , т.е. удвоенное значение МПЧ для середины трассы – метод трех точек. Тем самым предлагалось ставить “защиту” от вырождения канала, оторванного от земной поверхности. Эффективность метода “двух и трех точек” была подтверждена многочисленными экспериментальными данными [Международный Союз Электросвязи,

Таблица 2. Суточная изменчивость МПЧ (в МГц) для прямой и обратной трасс за сентябрь 1991 г.,  $W = 111$

LT, ч	МПЧ <sub>1</sub>	МПЧ <sub>2</sub>
0	24	15
4	18	13
8	36	24
12	37	16
16	32	28
20	32	23

Примечание: значения максимально применимых частот на прямой (индекс 2) и обратной (индекс 1) трансполярных трассах, МГц – округленно.

1990]. Однако обоснование этих методов выходит за рамки геометрического приближения, используемого в изданиях [Месячный прогноз, 2003].

### 3. СКАЧКОВЫЕ И СКОЛЬЗЯЩИЕ ВОЛНЫ

Еще в работах [Иванов-Холодный и Калинин, 1984] и [Ионосферно-магнитная служба, 1987] была выдвинута важная гипотеза, а именно: геометрическую формулу для описания поля на протяженных ионосферных трассах в виде сферически расходящихся “скачковых” пучков радиоволн следует дополнить еще одним слагаемым, которое “отвечало” бы за заполнение энергией соответствующих мертвых зон и обладало бы погонным затуханием, характерным для кругосветных сигналов (КС). Это дифракционное слагаемое, которое можно было бы назвать дифракционной волной  $E_d$ , было предложено в виде

$$E_d = E_{1/2} k(f) \frac{e^{j\varphi D}}{\sqrt[4]{\sin^2 \frac{D}{a} + \alpha}} G(h, D). \quad (3)$$

Здесь  $E_{1/2}$  – напряженность поля в вершине первого скачка, рассчитанная по методу геометрической оптики; функция  $k(f)$  – коэффициент трансформации первичной сферической волны в коническую волну Лежандра; величина  $\alpha$  – феноменологическое слагаемое порядка  $10^{-4}$ , обеспечивающее конечное значение  $E_{КС}$  на антиподных и кругосветных трассах; функция  $G(h, D)$  – высотный множитель, являющийся медленной функцией  $D$ .

Комплексная фаза  $\varphi(D)$  определяется интегралом по  $D$  от приведенного показателя преломления  $\bar{n}$ , равного реальной части от квадратного корня из комплексной приведенной диэлектрической проницаемости  $\bar{\epsilon}$  на высоте ионосферного канала  $h_k$  [Иванов-Холодный и Калинин, 1984]. Мнимая часть  $\bar{n}$  определяет погонное затухание на протяженных трассах. Вклад в  $E_d$  “многоскачковых” полей существенно ниже ( $-20$  дБ), чем  $E_{1/2}$ . На протяженных трассах, таким образом, полное поле представлялось в виде

$$E_t = E_h + E_d, \quad (4)$$

где первое слагаемое рассчитывается по методу геометрической оптики, а второе слагаемое – по формуле (3). Картина, представленная формулами (3), (4), позднее получила определенное теоретическое обоснование. В качестве модельной теоретической структуры обычно рассматривалось решение задачи о поле наземного источника в сферически слоистой среде. Одним из таких решений являлся ряд зональных гармоник, в котором функцией  $\vartheta = D/a$  являлись полиномы Лежандра. Ватсон в своей знаменитой работе

[Watson, 1919] показал, что от ряда зональных гармоник можно перейти к ряду нормальных волн путем вычисления соответствующих вычетов на комплексной плоскости значений константы разделения переменных. Метод нормальных волн получил свое развитие в работах Бреммера [Bremmer, 1949] и ряда других исследователей. В качестве промежуточного результата в них использовалась формула в виде контурного интеграла для главной компоненты поля

$$E = \int_c a(\nu) \theta(\vartheta, \nu) G(r, \nu) d\nu. \quad (5)$$

Здесь  $a(\nu)$  – спектр волн;  $\theta$  – функция ослабления по дальности;  $G$  – высотный множитель. В работе [Макаров и Федорова, 1982] подробно проанализированы различия и преимущества метода зональных гармоник и метода нормальных волн, дающих различные приближенные представления. Вместе с тем имелась еще одна возможность приближенного представления интеграла (5). Предлагается вычислять интеграл с помощью теоремы о среднем. Согласно этой теореме интеграл (5) представляется в виде

$$E \approx A(\vartheta, r, \bar{\nu}) a(\bar{\nu}) \theta(\vartheta, \bar{\nu}) G(r, \bar{\nu}). \quad (6)$$

Здесь  $\bar{\nu}$  – среднее значение в соответствии с теоремой;  $A(\vartheta, r, \bar{\nu})$  – та окрестность  $\bar{\nu}$  на контуре  $c$  в формуле (5), которая опять-таки требуется теоремой.

### 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ О КРУГОСВЕТНОЙ ВОЛНЕ

Основная идея, высказанная авторами работы [Иванов-Холодный и Калинин, 1984], состояла в том, чтобы определить  $\text{Re} \bar{\nu}$  и  $\text{Im} \bar{\nu}$  по результатам измерений задержки кругосветного сигнала (КС) как функции частоты  $\tau_{КС}(f)$  и погонного затухания  $\Gamma_{КС}$ . Для того, чтобы это стало возможно, требовалось провести в формуле (5) тот же ряд преобразований, который приводится в методе нормальных волн. А именно, в формулах (5) и соответственно (6) решения  $\theta$  и  $G$  представляют собой стоячие волны. Обычно  $\theta(\vartheta)$  приводит к сумме волн, бегущих в разные стороны от источника. Для аксиально-симметричного источника эти волны в случае КС были бы равноправны в случае сферически симметричной среды. Для других источников (с ярко выраженной диаграммой направленности) возможен выбор только одной из таких волн, как и в случае разнесенных точек излучения и точек регистрации (самолетные измерения). Требуется переход к бегущей волне и по координате  $r$ . И здесь главной частью функции  $g(r, \nu)$  может служить волна, бегущая сверху вниз. Геометрооптическим аналогом такого представления (6) является односкачко-

вое распространение радиоволн на любые дальности. Однако одному лучу соответствует нулевая энергия. Поэтому понадобилась новая трактовка экспериментальных данных о поле наземного излучателя на протяженных трассах [Акимов и др., 2008], чтобы обосновать необходимость построения нового объекта – выходящего из вершины первого скачка “русла” энергии, параллельного вогнутой поверхности ионосферы.

Переход от формулы (6) к формуле (4) достаточно очевиден. Собственно, речь здесь идет о ВКБ приближении для функции Лежандра [Bremmer, 1949] и о введении феноменологической величины  $\alpha$ , определяемой “подгонкой” к размерам антиподной области. Входящую в формулу (4) фазу компоненты  $E_d$  можно определить в модельной задаче для случая сферически слоистой ионосферы [Акимов и др., 2008].

## 5. ВЫВОДЫ

Таким образом, выше обосновано применение метода “двух точек” для расчета МПЧ области  $F$  радиоволны, излучаемой под нулевым углом (расчеты показывают, что эта величина равна МПЧ– $F_2$  при длине “скачка” 4000 км). С помощью метода “двух точек” для выбранной в качестве примера трассы Новороссийск–Калифорния было показано, что МПЧ обратной трассы на несколько Меггерц выше МПЧ прямой трассы в течение всего времени суток. При таком превышении передача сигналов происходит в области существенно более низкого уровня помех от других радиосредств. В результате отношение “сигнал/шум” на более протяженной обратной трассе может оказаться выше, чем на более короткой – прямой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов В.Ф., Васькин А.А., Дзвонковская А.Л., Калинин Ю.К. Дифракционная радиоволна на протяженных трассах декаметрового диапазона волн вблизи МПЧ– $F_2$ –4000 // Электромагнитные волны и электронные системы. № 4. С. 47–54. 2008.
- Гитина Г.М., Калинин Ю.К., Ушакова Л.К. и др. К расчету максимально применимых частот декаметровых радиосигналов на протяженных ионосферных трассах методом трех точек / Распространение декаметровых радиоволн. М.: АН СССР. 173 с. 1980.
- Жулина Е.М., Керблай Т.С., Ковалевская Е.М. и др. Основы долгосрочного прогнозирования. М.: Наука, 68 с. 1969.
- Иванов-Холодный Г.С., Калинин Ю.К. Геофизическая инвариантность области  $F$  ионосферы – причина стабильности кругосветных радиосигналов // ДАН. Т. 279. С. 339–341. 1984.
- Ионосферно-магнитная служба. Ред. С.И. Авдюшин, А.Д. Данилов. Л.: Гидрометеоиздат, 243 с. 1987.
- Макаров Г.И., Федорова Л.А. Метод многократно отраженных волн в задаче о распространении электромагнитных волн в регулярных волноводах // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 25. № 12. С. 1384–1409. 1982.
- Международный Союз Электросвязи. Генеральный Секретариат. Регламент радиосвязи. Т. 1, ISBN 92-61-04144-2. 1990.
- Месячный прогноз максимально применимых частот (МПЧ). М.: Гидрометеоиздат. Периодическое издание. Март. 2003.
- Bremmer H. Terrestrial radiowaves. New York: Elsevier. 343 p. 1949.
- Watson G.N. The transmission of electric waves by the earth // Proc. Roy. Soc. V. A95. № 673 P. 83–87. 1919.