

Исследование времени прихода различных мод ВЧ-сигнала в широкой полосе частот и влияния на него направленности используемых антенн

В.А. Иванов, Н.В. Рябова, В.В. Павлов, А.А. Чернов

Марийский государственный технический университет, 424000, РФ, респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3; andryche@yandex.ru

Представлена методика синтеза ионограмм наклонного зондирования для трасс протяженностью от 1000 км до 8000 км на основе модели сферической Земли и плоской ионосферы. Разработан алгоритм оценки диапазонов задержек принимаемых мод сигналов. Рассчитаны размеры «окна», необходимые для решения задачи синхронизации радиотехнических систем декаметрового диапазона. Установлено, что для обеспечения синхронизации систем декаметрового диапазона для трасс протяженностью от 1000 до 8000 км размер временного окна должен быть не менее 5 мс.

The synthesis method of ionograms of the oblique sounding for lines from 1000 km to 8000 km on the basis of the spherical Earth and flat ionosphere is presented. The algorithm of an estimation of ranges of delays of accepted models of signals is developed. The sizes of "window" necessary for the solving of a problem of synchronization of radio engineering systems of decametric range are calculated. It is established that for maintenance of synchronization of systems of decametric range for lines from 1000 km to 8000 km the size of a time window should be not less than 5 ms.

Введение

При синхронизации различных радиотехнических систем (РТС) ВЧ-диапазона существует проблема определения абсолютного времени распространения сигнала на ионосферной линии связи и диапазона задержек принимаемых мод сигналов во всем ВЧ-диапазоне, который занимает область частот от 3 МГц до 30 МГц. Поскольку РТС могут работать на произвольных частотах, то задача исследования задержек должна решаться с учетом широкого диапазона частот. Необходимо также учитывать влияние направленности используемых антенн, так как в широком диапазоне частот их диаграммы направленности (ДН) могут претерпевать существенные изменения. Такие изменения демонстрируют примеры сферической развертки верхней полуплоскости объемной диаграммы направленности трех антенн, представленных на рис. 1-3. На рис. 1 приведены частотные вариации ДН широкополосного горизонтального диполя АН-170, на рис. 2 - «морского» штыря, на рис. 3 - диполя Надененко. На всех рисунках случай (а) соответствует ДН на частоте 3МГц, (б)-15 МГц и (в) – 30 МГц.

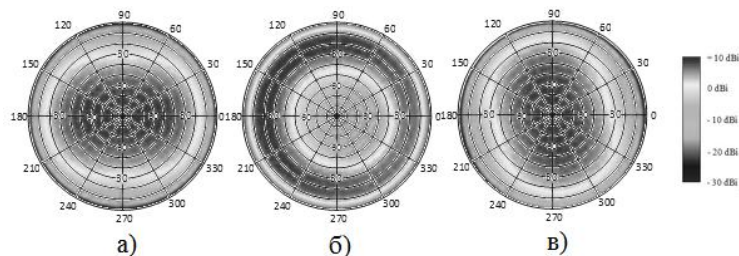


Рис. 1. Частотные вариации ДН широкополосного диполя АН-170

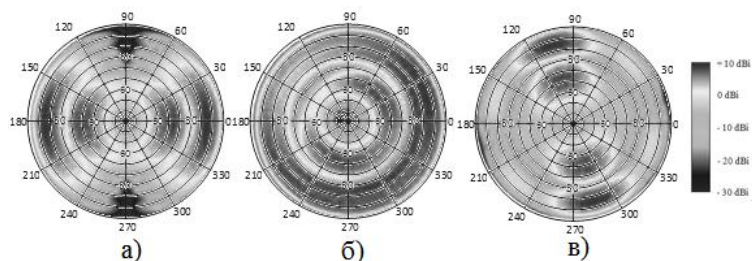


Рис. 2. Частотные вариации ДН «морского» штюра

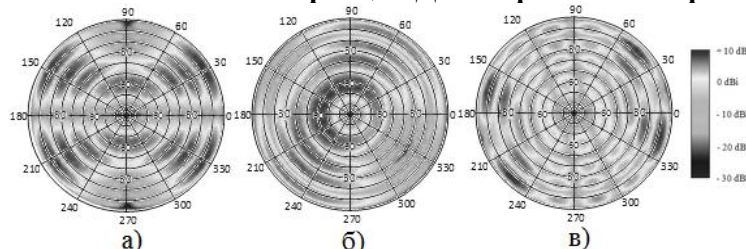


Рис. 3. Частотные вариации ДН диполя Надененко

Кроме того, на время прихода и диапазон задержек принимаемых лучей существенно влияет модовая структура сигнала, которая меняется в зависимости от протяженности линии связи (D). Зависимости модовой структуры от протяженности трассы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Преобладающие моды для трасс различной протяженности

Протяженность трассы, км	Преобладающие моды
1000-2000	1E, 1F2, 2F2
2000-4000	2E, 1F2, 2F2
4000-7000	2F2, 3F2
7000-8000	3F2

Изменение от D модовой структуры свидетельствует об изменении от D угловой структуры лучей в точке приема. Геофизические условия также будут оказывать влияние на время прихода и диапазон задержек принимаемых сигналов.

Цель работы: исследование влияния модовой структуры, геофизических условий и направленности антенн на время прихода сигналов на ионосферных линиях связи протяженностью от 1000км до 8000км.

Используемые модели. В работе ионосфера рассматривалась как двухслойная среда с параболическими слоями E и F. Для такого слоя основными параметрами являются: высота максимума (h_o), полутолщина (y_m), критическая частота ($f_{кр}$), которые брались из международной модели IRI [1]. В качестве геофизических условий распространения сигналов брались дневные и ночные, зимние и летние состояния среднеширотной ионосферы и средняя солнечная активность.

Характеристики распространения сигналов рассматривались для преобладающих лучей на основе теорем эквивалентности с учетом кривизны Земной поверхности (рис. 4) [2].

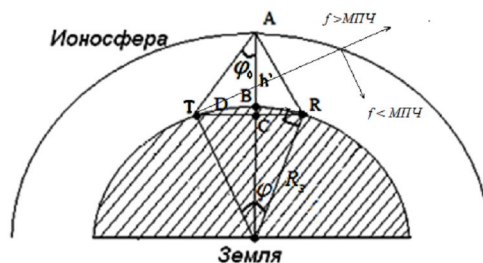


Рис. 4. Модель сферическая Земля – плоская ионосфера

В рамках принятой модели время группового запаздывания может быть вычислено по формуле [3]:

$$\tau = \left(\tau_a + \frac{2 \cdot R_s}{c} \left(1 - \cos \frac{D}{2 \cdot R_s} \right) \right) \sqrt{1 + \frac{2 R_s \sin \frac{D}{2 R_s}}{c \tau_a + 2 R_s \left(1 - \cos \frac{D}{2 R_s} \right)}} \quad (1)$$

$$f = f_a \sqrt{1 + \frac{2 R_s \sin \frac{D}{2 R_s}}{c \tau_a + 2 R_s \left(1 - \cos \frac{D}{2 R_s} \right)}} \quad (2)$$

где τ_a - задержка для вертикального распространения, R_s – средний радиус Земли, f_a - частота для вертикального распространения.

Задержка по лучам может быть пересчитана в углы по формуле [4]:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \frac{D}{2 \cdot R_s} - \arcsin \frac{2 \cdot R_s \cdot \sin\left(\frac{D}{2 \cdot R_s}\right)}{c \cdot \tau} \quad (3)$$

По данной методике для трасс протяженностью 1000 км, 3000 км, 5000 км и 8000 км с учетом преобладающих мод (таблица 1) при различных ионосферных условиях были синтезированы ионограммы наклонного зондирования. По ним проводились расчеты абсолютного времени распространения (время распространения первой принимаемой моды). Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчетов абсолютного времени распространения

Протяженность трассы, км	Абсолютное время распространения, мс			
	Зима		Лето	
	День	Ночь	День	Ночь
1000	3,363	3,3846	3,362	3,3844
3000	10,058	10,1	10,056	10,058
5000	16,96	17,126	16,89	17,122
8000	23,776	24,205	23,669	24,201

Видно, что увеличение протяженности трассы приводит к изменению времени распространения для нижнего луча в диапазоне от 3 мс до 24 мс.

На основе синтезированных ионограмм были построены зависимости вероятностей распространения сигнала от задержки. Для оценки частотный диапазон был разбит на интервалы по 100 кГц, в каждом из которых фиксировалось значение задержки, соответствующее импульсу единичной длины. Отобранные значения были использованы для построения гистограмм. На рис. 5 представлен пример полученных гистограмм для трассы протяженностью 1000 км для дневного времени суток.

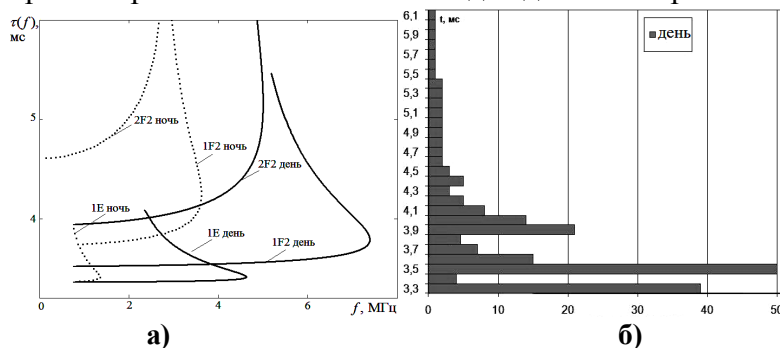


Рис. 5. Синтезированная ионограмма наклонного зондирования и соответствующая ей гистограмма задержек для дневного времени суток

Полученные таким образом диапазоны задержек для трасс различной протяженности при различных условиях распространения представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчетов диапазонов задержек

Протяженность трассы, км	Диапазон задержек, мс			
	Зима		Лето	
	День	Ночь	День	Ночь
1000	3,2	3,7	3,2	3,9
3000	2,2	2,8	2,9	3,3
5000	4,2	4,8	4,4	4,9
8000	3,7	4,3	3,8	4,5

Установлено, что диапазоны задержек изменяются в пределах от 2 мс до 5 мс, а наибольшее влияние оказывают суточные вариации параметров ионосферы.

Таким образом, для обеспечения синхронизации систем декаметрового диапазона для трасс протяженностью от 1000 до 9000 км размер окна должен составлять не менее 5мс.

Далее исследовалось влияние на диапазон задержек угловой структуры принимаемых сигналов, которая меняется от D. В этой связи были получены угловые-частотные характеристики (УЧХ), построенные с использованием формулы (3). В таблице 4 представлены УЧХ для нижних лучей преобладающих мод при различных ионосферных условиях и условиях средней солнечной активности.

Таблица 4. Результаты расчетов преобладающих углов

Протяженность трассы, км	Преобладающие моды	Преобладающие углы, град			
		Зима		Лето	
		День	Ночь	День	Ночь
1000	1E; 1F2; 2F2	3;14;63	-;23;67	3;12;62	-;22;67
3000	2E; 1F2; 2F2	53;1;54	-;1;55	53;1;54	-;1;55
5000	2F2; 3F2	48;62	49;63	48;62	49;63;
8000	3F2	59	59	59	59

Пример полученной УЧХ и зависимости коэффициента направленного действия (КНД) антенны АН-170 от частоты представлен на рис.6. Видно, что ослабление АЧХ антенн в диапазоне 10 МГц будут подавлять сигнал верхнего луча, уменьшая для него диапазон задержек.

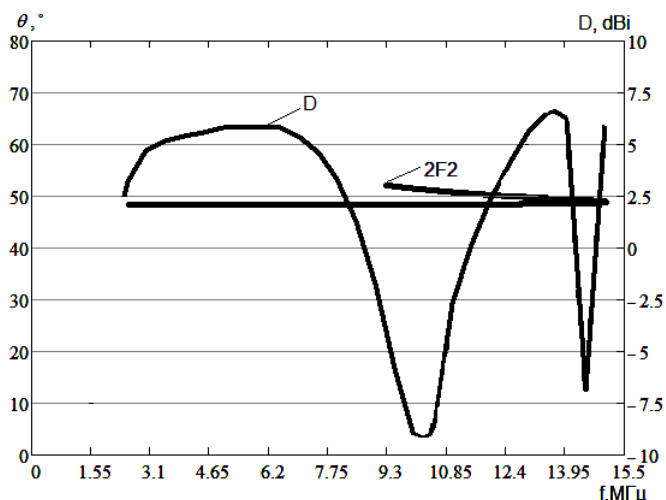


Рис. 6. Пример для трассы протяженностью 5000 км

Для масштабной оценки влияния КНД антенн было проведено исследование с использованием экспериментальных данных из Банка данных МарГТУ, полученных при наклонном зондировании 10-12 августа 2008 года на радиолинии о. Кипр(35°N34°E) – г. Йошкар-Ола (56,6°N48°E), протяженностью 2600 км. АЧХ антенн были получены путем расчетов с использованием программы MMANA.

В результате обработки получены зависимости усредненных за период эксперимента значений отношения сигнал-шум на входе приемника от частоты в диапазоне от 8 до 29 МГц, представленные на рис.7 точками. Сплошной линией обозначена АЧХ антенны.

Видно, что частотная зависимость отношения сигнал/шум в целом повторяет АЧХ антенны. Это свидетельствует об адекватности расчетов по модели MMANA.

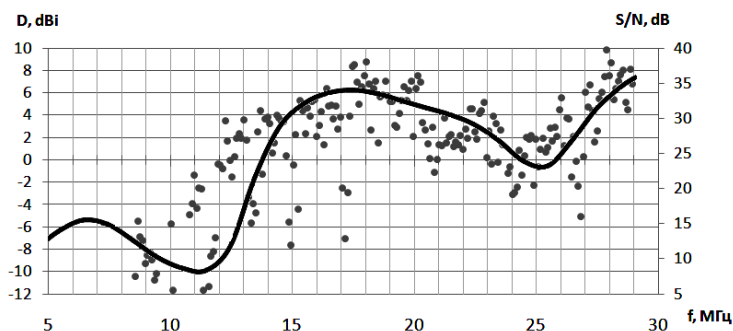


Рис. 7. Пример сравнительного анализа экспериментальных данных наклонного зондирования с результатами моделирования в программе MMANA для диполя Надененко

Выводы: Разработан алгоритм оценки абсолютного времени распространения сигнала на ионосферной линии связи. Установлено, что для обеспечения синхронизации систем декаметрового диапазона на трассах протяженностью от 1000 до 8000 км размер временного окна должен быть не менее 5 мс.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 08-02-12081-офи; 09-07-00331-а; Федеральных целевых программ: "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы (ГК № 02.740.11.0233); "Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)" (проект № 2.1.1/3896).

Литература

1. <http://modelweb.gsfc.nasa.gov/models/iri.html>
2. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. - М.: Мир, 1973. - 502 с.
3. Иванов, В.А. Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, В.В. Шумаев. - Йошкар-Ола, 1998.- 204 с.
4. Вертоградов, Г.Г. Оценка угловых характеристик декаметровых волн по результатам ЛЧМ зондирования ионосферы / Г.Г. Вертоградов, О.С. Хоружий // XXI Всероссийская научная конференция Распространение радиоволн. – 2005. – Т.2, С.307-311.