Исследование полиномиальных моделей дифференциальных NVIS ионограмм для радиоканалов с полосой частот 1 МГц

Д.В. Иванов, М.И. Рябова

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

Разработана методика синтеза дифференциальных NVIS ионограмм. Получены зависимости наклонов дисперсионных характеристик от высоты, полутолщины и критической частоты ионосферного слоя. Получены полиномиальные модели дифференциальных NVIS ионограмм для случаев однослойной и двухслойной ионосферы и значения их коэффициентов для различных геофизических условий. Представлены результаты расчетов коэффициентов полиномов.

The synthesis method of differential NVIS ionograms is developed. The dependences of inclinations of dispersive testimonials from height, half-thickness and critical frequency of the ionospheric layer are received. The polynomial model of differential NVIS ionograms for the cases of a single-layered and two-layer ionosphere and value of their factors for various geophysical conditions are received. The results of calculations of factors of polynoms are presented.

Введение

В настоящее время проводятся исследования по применению высоких частот (ВЧ) для осуществления связи на расстояния 40-400 км. Такой способ связи получил название NVIS – Near Vertical Incidence Skywave [1]. Преимущество NVIS систем заключается в уменьшенном влиянии на связь рельефа местности.

Обычно для ВЧ связи используются узкополосные ионосферные каналы, у которых полоса канала занимает один (или несколько) телефонных каналов. Скорость передачи информации по ним не превышает нескольких Кбит/с. Для коммерческого и военного применения необходимо решение проблемы повышения скорости и скрытности передачи информации, и как следствие, расширения полосы канала. В данной работе рассматриваются радиоканалы с полосой частот равной 1 МГц, которая более чем на порядок превышает полосу когерентного распространения декаметровых радиоволн. Следовательно, такие каналы всегда будут дисперсными. Исследование дисперсности широкополосных каналов для NVIS метода является актуальной, малоизученной проблемой.

Дифференциальная ионограмма (ДХ) характеризует дисперсию временной задержки вследствие регулярной неоднородности ионосферы [2].

Цель работы: разработка методики синтеза дифференциальных NVIS ионограмм и построения их полиномиальных моделей для радиоканалов с полосой 1 МГц при различных геофизических условиях.

При моделировании рассматривалась двухслойная ионосфера, содержащая E и F слои. Для их описания использовалась параболическая модель, параметрами которой являются: высота максимума электронной концентрации h_m , полутолщина y_m и критическая частота $f_{\kappa p}$. Учитывалось, что критическая частота связана с электронной концентрацией в максимуме слоя формулой:

$$f_{\kappa p}^{2} = 80, 8 N, \tag{1}$$

где N – число электронов в 1 м³, $f_{\kappa p}$ – частота в кГц.

Исследования проводились в лучевом приближении. В этом случае характеристики сигнала связаны с лучевой траекторией и поэтому называются лучевыми. Одной из них является время группового запаздывания (задержка), которое выражается криволинейным интегралом по длине луча *L* следующей формулой:

$$\tau = \int_{L} \frac{dl}{v_{ep}} = \frac{1}{c} \int_{L} dl \left[1 - \frac{f_{0}^{2}}{f^{2}} \right]^{-\frac{1}{2}}.$$
 (2)

Второе равенство в формуле (2) справедливо для обыкновенной компоненты и среднеширотных NVIS радиолиний.

В случае распространения в ионосфере задержка сигнала связана с действующим путем соотношением:

$$P_{\partial}(f) = \frac{c\tau(f)}{2}.$$
(3)

Зависимости $P_{\partial}(f)$ и $\tau(f)$ называются ионограммами линии связи. Известно [3], что если длина трассы D не превышает 500 км, то эффект кривизны земной поверхности на рассчитанной ионограмме не существенен. Поэтому для синтеза зависимостей $\tau(f)$ для NVIS метода использовалась модель: плоская Земля – плоская ионосфера.

Отношение М=МПЧ/*f_{кp}*, называется коэффициентом максимально применимой частоты (МПЧ) для заданной радиолинии (М-фактор). Величина М-фактора показывает степень отличия распространения на линии связи от вертикального.

На рис. 2 приведены зависимости М-фактора от протяженностей трассы от 0 до 400 км: рис. 1а - для различных значений начальной высоты (h_0) , рис. 1б - полутолщины (y_m) и рис. 1в - критической частоты слоя $(f_{\kappa p})$. Все представленные результаты относятся к низкому и среднему уровню солнечной активности.



Видно, что наибольшее влияние на значение М-фактора оказывает полутолщина слоя. При ее росте величина М-фактора снижается, причем, чем больше протяженность трассы, тем на большую величину уменьшается М-фактор. Такая же зависимость Мфактора имеет место от h_0 . Однако она менее выражена. Критическая частота практически не влияет на величину М-фактора.

Однако изменение М-фактора от протяженности трассы (0-400 км) может составлять лишь 3-4% от 1, поэтому распространение сигнала в NVIS методе можно считать квазивертикальным.

В работе были синтезированы NVIS ионограммы для случаев однослойной ионосферы (ночные ионограммы) и с учетом подстилающего слоя (дневные ионограммы) для различных параметров ионосферных слоев, взятых из модели IRI, и протяженности трассы.

На рис.2 показаны примеры синтезированных ионограмм: а) протяженность трассы 100 км, параметры ионосферы соответствуют дневному времени суток; б) протяженность трассы 100 км, параметры ионосферы соответствуют ночному времени суток.



Видно, что ионограммы для одно- и двухслойной ионосферы отличаются между собой. Их различия зависят от отношения $f_{\kappa pF} / f_{\kappa pE}$. Проведенные нами исследования показали, что при $f_{\kappa pF} / f_{\kappa pE} > 2,5$ значения времени группового запаздывания в диапазоне частот 2,5 МГц < f < 5 МГц для однослойной и двухслойной моделей ионосферы практически совпадают. Это позволяет применять однослойную модель ионосферы для исследования ионограмм в указанном диапазоне частот для дневного времени суток.

Согласно терминологии, предложенной в [2], ионограмма названа дисперсионной характеристикой (ДХ) радиоканала. Также показано, что степень дисперсности среды распространения определяется наклоном ДХ, т.е. $s = \frac{d\tau}{df}$. Поэтому зависимость s(f) разумно назвать дифференциальной ионограммой (ДИ). Примеры ДИ, заданных на относительной сетке частот, соответствующих ионограммам, приведенным на рис. 2а и на рис. 26, представлены на рис. 3.



Рис. 3. Синтезированные дифференциальные NVIS ионограммы

Видно, что в диапазоне частот от 0,5МПЧ до 0,85МПЧ дифференциальные ионограммы для однослойной и двухслойной моделей практически совпадают, что соответствует выводам, сделанным для ионограмм.

На основе синтезированных ДИ было проведено исследование зависимости s(f) от высоты (h_0) , полутолщины (y_m) и критической частоты слоя $(f_{\kappa p})$ на частотах $0,75f_{\kappa p}$, $0,8f_{\kappa p}$, $0,8f_{\kappa p}$, $0,9f_{\kappa p}$ и $0,95f_{\kappa p}$ для радиолиний протяженностью 100, 200 и 400 км.

В результате проведенных исследований получено, что величина s(f) не зависит от высоты слоя, а зависимости от полутолщины и критической частоты могут быть выражены следующими эмпирическими формулами:

$$s(y_m) = 1,69 \ y_m - 58,23$$
 (4)

$$s(f_{\kappa p}) = -16,43f_{\kappa p} + 300,41 \tag{5}$$

Далее рассматривались полиномиальные модели ДИ для радиоканалов с полосой 1 МГц, средние частоты которых выбирались из диапазона (0,3 – 0,95) МПЧ. Для исследований частотный диапазон (0,3 – 0,95) МПЧ был разбит на полосы в 1 МГц с перекрытием 0.5 МГц. При этом частоты близкие к МПЧ были исключены по причине того, что они относятся к «рискованным» для практического использования частотам.

В результате исследований было установлено, что в случае однослойной ночной ионосферы ДИ в диапазоне частот (0.3 – 0.6) МПЧ можно описать полиномом первой степени, на частотах (0.45 – 0.85) МПЧ - полиномом второй степени, а на частотах (0.6 – 0.95) МПЧ - полиномом третьей степени; а в случае двухслойной ионосферы (дневные ионограммы) на частотах (0.3 – 0.5) МПЧ можно описать полиномом третьей степени, на частотах (0.4 – 0.7) МПЧ - полиномом первой степени, на частотах (0.5 – 0.8) МПЧ - полиномом второй степени и на частотах (0.6 – 0.95) МПЧ - полиномом третьей степени.

Коэффициенты полиномов для низкой и средней солнечной активности для случая однослойной ионосферы для зимнего и летнего времени года представлены в таблице 1, а коэффициенты полиномов для случая двухслойной ионосферы – в таблице 2.

1 dOJIH	ца т. Коэффициенты полиномов ди	
ƒ/МПЧ	Коэффициенты полинома (Зима)	Коэффициенты полинома (Лето)
0.3-0.6	α_{10} =-70; α_{11} =5*10 ⁻⁴	α_{10} =-21; α_{11} =2,7*10 ⁻⁴
0.45-0.85	$\alpha_{20}=601; \alpha_{21}=7,3*10^{-4}; \alpha_{22}=5,3*10^{-10}$	$\alpha_{20}=118; \alpha_{21}=3,1*10^{-4}; \alpha_{22}=1,1*10^{-10}$
0.6-0.95	α_{30} =4500; α_{31} =0,075; α_{32} =4,1*10 ⁻⁸ ;	$\alpha_{30} = -5*10^6$; $\alpha_{31} = 0,6; \alpha_{32} = 2,1*10^{-7}$;
	$\alpha_{33}=7,7*10^{-15}$	$\alpha_{32}=2,7*10^{-14}$

Таблица 1. Коэффициенты полиномов ДИ

таблица 2 Коэффициенты полиномов ди		
ƒ/МПЧ	Коэффициенты полинома (Зима)	Коэффициенты полинома (Лето)
0.3-0.5	$\alpha_{30} = -8,1*10^4; \ \alpha_{31} = 0,08; \ \alpha_{32} = 2,7*10^{-8};$	$\alpha_{30}=-3,7*10^6; \alpha_{31}=0,28;\alpha_{32}=-7,5*10^{-8};$
	$\alpha_{33}=2,9*10^{-15}$	$\alpha_{33} = 6.5 \times 10^{-15}$
0.4-0.7	α_{10} =-845; α_{11} =3*10 ⁻⁴	α_{10} =-2410; α_{11} =6*10 ⁻⁴
0.5-0.8	$\alpha_{20}=6,4*10^4; \alpha_{21}=-0,003; \alpha_{22}=5,3*10^{-10}$	$\alpha_{20}=4,6*10^5; \alpha_{21}=-0,022; \alpha_{22}=2,6*10^{-9}$
0.6-0.95	$\alpha_{30} = -6,3*10^6; \alpha_{31} = 0,47; \alpha_{32} = -1,1*10^{-7};$	α_{30} =-2,8*10 ⁶ ; α_{31} =18; α_{32} =-3,8*10 ⁻⁶ ;
	$\alpha_{33}=9,9*10^{-15}$	$\alpha_{33}=2,7*10^{-13}$

Таблица 2 – Коэффициенты полиномов ДИ

Выводы: Разработана методика синтеза дифференциальных NVIS ионограмм. Установлено, что величина s(f) не зависит от высоты слоя, а зависимости от полутолщины и критической частоты выражаются эмпирическими формулами соответственно: $s(y_m)=1,69 \ y_m-58,23, \ s(f_{\kappa p})= -16,43f_{\kappa p}+300,41$. В работе получены полиномиальные модели дифференциальных NVIS ионограмм для случаев однослойной и двухслойной ионосферы, рассчитаны коэффициенты полиномов для зимнего и летнего времени суток для низкой и средней солнечной активности.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 10-07-00466-а; 10-02-00620-а; 09-07-00331-а; ФЦП: ГК № 02.740.11.0233; АВЦП: проект № 2.1.1/3896.

Литература

1. Pielou, J.M., Skywave radar propagation predictions for HF radar system planning / Pielou, J.M. // IEE Conf. Pub. -1985. P. 510-514.

2. Иванов, Д.В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции / Д.В. Иванов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 268 с.

3. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. - М.: Мир, 1973. - 502 с.

4. Иванов, В.А. Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, В.В. Шумаев. - Йошкар-Ола, 1998. - 204 с.