

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛАБЫХ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

В.А. Иванов, Д.В. Иванов, А.Р. Лашевский

INVESTIGATION OF WEAK MOVING IONOSPHERIC DISTURBANCES

V.A. Ivanov, D.V. Ivanov, A.R. Lashchevskiy

Исследовано влияние перемещающихся ионосферных возмущений на импульсную и дисперсионную характеристики широкополосного радиоканала. Разработан новый метод определения параметров слабых перемещающихся ионосферных возмущений. Работа выполнена при поддержке РФФИ (04-05-65120, 05-07-90313).

Influence of moving ionospheric disturbances on impulse and dispersion characteristics wideband radio channels. New method of the determination parameter weak moving ionospheric disturbances. The work is done under support of RFBR (projects 04-05-65120, 05-07-90313).

Введение

Применение широкополосных (ШК) и сверхширокополосных радиоканалов (СШК) для радиосвязи на коротких волнах позволяет существенно увеличить количество информации, передаваемое в единицу времени. Однако такие каналы долгое время не привлекали внимание исследователей и разработчиков перспективной аппаратуры, в силу того, что их характеристики «разрушаются» из-за амплитудной и фазовой дисперсии. В настоящее время, в связи с развитием вычислительной техники, появилась возможность учитывать дисперсионные искажения и компенсировать их при приеме сигналов [1–4].

Цель работы

Теоретически и экспериментально (с помощью ЛЧМ ионозонда), исследовать влияние регулярной и нерегулярной структуры ионосферы на коррекцию дисперсионных искажений в канале и решить обратную задачу: по величине дисперсионных искажений определить параметры нерегулярной структуры ионосферы.

Влияние ПИВ на результаты коррекции дисперсионных искажений ИХ широкополосных радиоканалов

Известно, что решение волнового уравнения в приближении геометрической оптики для двухточечной задачи соответствует передаточной функции $H(f)$ канала распространения. С учетом ограничивающей полосы анализируемых частот каналообразующей аппаратуры для канала во временной области можно задать импульсную характеристику (ИХ):

$$h(t) = \sum_{j=1}^m \int_{f_p}^{f_p+B} H_{0j}(f) \exp(-i\varphi_j(f)) \exp(i2\pi ft) df, \quad (1)$$

где $H_{0j}(f)$ – АЧХ канала, образованного j -м лучем; $\varphi_j(f)$ – ФЧХ канала, образованного j -м лучем; B – полоса частот радиоканала.

Важное значение имеет дисперсионная характеристика (ДХ): $\tau_j(f) = d\varphi_j / 2\pi df$. В случае постоянной ДХ и АЧХ в полосе канала, ИХ j -ого луча имеет вид:

$$|h_j(t)|_1 = H_{0j}(f_p) \cdot B \cdot \frac{|\sin \pi B(t - \tau_j(f_p))|}{|\pi B(t - \tau_j(f_p))|}. \quad (2)$$

Если ДХ не является постоянной в полосе канала функцией, то импульсная характеристика меняет свою форму. В работах [3–5] показано, что форму ИХ можно вернуть путем компенсации непостоянной составляющей ДХ. Для этого ДХ следует аппроксимировать многочленом $P_n(f)$. Математически процесс компенсации можно представить в виде следующей формулы для ИХ j -ого луча:

$$h_j(t) = \int_{f_p}^{f_p+B} H_{0j}(f) \exp\left(-2\pi i \int_{f_p}^f (\tau_j(f_p) + \Delta\tau_j(F) - P_{nj}(F)) dF\right) \times \exp(2\pi i ft) df \quad (3)$$

Перемещающиеся ионосферные возмущения будут приводить к тому, что ДХ становится «медленной» функцией времени. Если при этом компенсирующий многочлен не меняется, то ИХ в форме (3) начинает менять свою форму. Оценим эти изменения, предполагая, что в результате рассогласования разность между истинной нелинейной составляющей ДХ и ее аппроксимирующим многочленом на полосе канала можно представить в виде разложения в ряд Тейлора:

$$\Delta\tau(f, t) - P_n(f) = \gamma(t) \cdot (f - f_p) + \dots \quad (4)$$

Как нетрудно показать в этом случае ИХ имеет следующий вид:

$$|h_j(t)|_2 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{|H_{0j}|}{\sqrt{\gamma(t)}} \left[\{C(X_2) + C(X_1)\}^2 + \{S(X_2) + S(X_1)\}^2 \right]^{0.5}, \quad (5)$$

где $C(X)$, $S(X)$ – интегралы Френеля,

$$X_{1,2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi\sqrt{\gamma(t)}} \left[\pi B\gamma(t) \mp (t - \tau_j(f_p)) \right].$$

Найдем максимальные значения для ИХ, рассчитанных по формулам (1) и (2), а затем отношения для них. В результате для отношения получим:

$$\frac{|h_j(\tau_j)|_2}{|h_j(\tau_j)|_1} = \sqrt{\frac{C^2(x) + S^2(x)}{x^2}}, \quad (6)$$

где $x = \sqrt{2\gamma(t)}B$.

Введем коэффициент потерь, равный:

$$g(t) = 10 \lg \frac{C^2(x) + S^2(x)}{x^2}. \quad (7)$$

Если причиной изменений функции $\gamma(f)$ являются ПИВ, то ее можно представить в виде:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cdot \cos[\Omega(t - k \frac{f_p}{V})], \quad (8)$$

где $k = h / f_p$ – коэффициент, связывающий высоту с рабочей частотой зондирующей волны, Ω – частота перемещающегося возмущения, V – вертикальная скорость перемещения возмущения.

Очевидно, что коэффициент потерь будет периодически меняться вслед за изменениями $\gamma(f)$. Изменяя период его вариаций, и разность фаз $\Delta\phi$ между изменениями на двух рабочих частотах можно оценить масштаб вертикальную скорость перемещения возмущения:

$$V = \frac{\Omega \cdot k(f_{p2} - f_{p1})}{\Delta\phi} \text{ и } L = \frac{2\pi V}{\Omega}. \quad (9)$$

Результаты вычислительного эксперимента для радиолинии, протяженностью 3.5 Мм (Иркутск–Йошкар-Ола) приведены на рис. 1. В начале вычисления проводились для заданной рабочей частоты, равной 0.85 МГц, для невозмущенной ионосферы. При прохождении ПИВ с вертикальной скоростью 30 м/с и 55 м/с (рис. 1, а, б и рис. 1, в, г соответственно) и параметрами: $\Delta N / N = 0.1$, $l = 40$ км значение МПЧ радиолинии менялось в соответствии с функцией на рис. 1, а, в. Корректирующий многочлен $P_n(F)$ находился путем решения задачи вариационного исчисления [4–5] для ДХ, заданной без учета возмущения ионосферного профиля. Рис. 1, б, г иллюстрирует изменение выигрыша от коррекции в зависимости от высоты ПИВ. Из рис. 1, б, г видно, что при прохождении ПИВ через полосу канала выигрыш от коррекции в начале уменьшается, а затем восстанавливается до прежнего уровня.

Экспериментальная апробация метода

Натурный эксперимент проводился с помощью вертикально-наклонного ионозонда с линейно – частотно модулированным (ЛЧМ) сигналом, созданного в лаборатории Распространения радиоволн Марийского государственного технического университета. Низкочастотный сигнал разностной частоты нарезается на примыкающие (или перекрывающиеся) элементы, которые подвергаются спектральной обработке. Отметим, что элемент спектра подобен импульсной

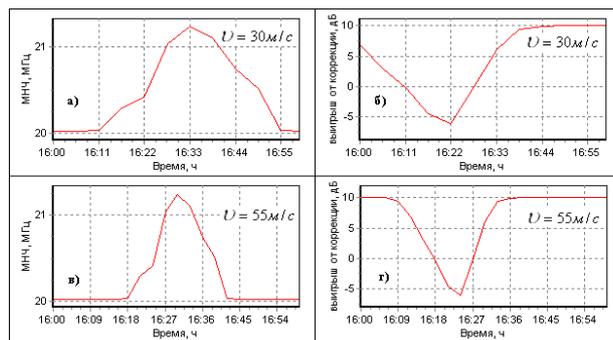


Рис. 1.

характеристике радиоканала с полосой, равной полосе элемента сигнала и связан с ней следующей формулой [1]:

$$\left| h_j \left(\frac{F}{f} \right) \right| = \dot{f} |S_j(F)|, \quad (10)$$

где $F = \dot{f} \tau(f)$ – разностная частота, $S_j(F)$ – спектр сигнала разностной частоты для j -го принимаемого луча.

Ионограмма является ДХ различных радиоканалов, реализуемых в полосе прозрачности радиолинии. Ее аппроксимация многочленом позволяла решить задачу компенсации дисперсионных искажений.

Из (10) следует что формула для коэффициента потерь ИХ будет совпадать с коэффициентом потерь для спектров разностной частоты.

Натурный эксперимент по изучению «времени жизни» скорректированного канала проводился на трассе Иркутск–Йошкар-Ола 11.03.2004 г. На рис. 2 приведены вариации выигрыша для двух рабочих частот (рис. 2, а – 0.8 МГц, б – 0.9 МГц), сплошной линией изображена зависимость η для случая, когда компенсация ДХ осуществлялась в каждом текущем сеансе, а пунктиром – только в первом сеансе.

Периодический характер изменения выигрыша ухудшения выигрыша от коррекции позволяет связать его с прохождением через выбранный ШК ПИВ. Сопоставление результатов натурного и вычислительного эксперимента позволяют оценить параметры возмущения. Расчеты показали, что ПИВ имел $\Delta N / N = 0.1$, перемещался с вертикальной скоростью 15 м/с [7] и его вертикальный масштаб составлял ~ 54 км.

Выводы

Исследовано влияние коррекции дисперсионных искажений на импульсные характеристики широкополосного радиоканала с полосой 1 МГц. Разработан радиофизический метод, позволяющий определять параметры слабых ионосферных возмущений.

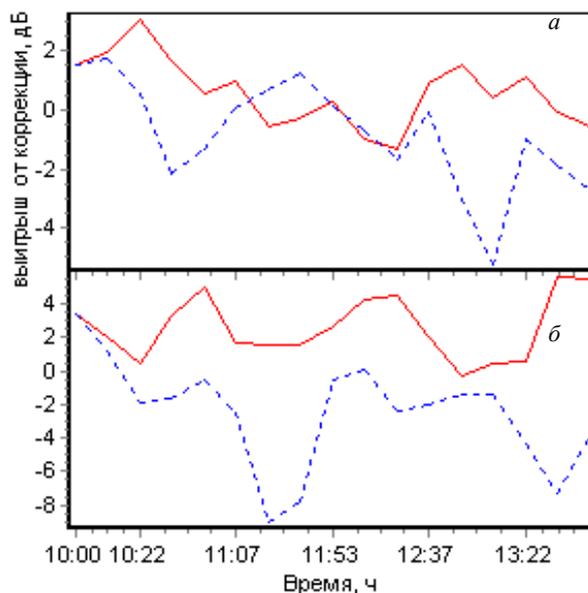


Рис. 2.

Новый метод получил успешную экспериментальную апробацию.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты: 04-05-65120, 05-07-90313).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А., Иванов Д.В., Колчев А.А. Исследования особенностей дисперсионных характеристик радиоканалов с помощью ЛЧМ-ионозонда // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. XLIV, № 3. С. 241–253.

2. Иванов В.А., Иванов Д.В., Колчев А.А. Коррекция широкополосных коротковолновых ионосферных радиоканалов // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 6, С. 688–697.

3. Арманд Н.А., Смирнов В.М., Хагфорс Т. Проблемы коррекции искажений СШП сигналов при распространении через ионосферу Марса // Всерос. науч. конф. «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации связи и акустике». Муром, 2003. С. 191–196.

4. Иванов В.А., Иванов Д.В. Исследования эффектов нерегулярной дисперсии в широкополосных ионосферных радиоканалах // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 3, С. 273–282.

*Марийский государственный технический университет,
Йошкар-Ола*