

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДЧХ-СИГНАЛОВ В ИОНОСФЕРНОМ КАНАЛЕ С ФЛУКТУИРУЮЩИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Н.И. Михайлов, Е.Т. Агеева, Д.Б. Ким

NUMERICAL-ANALYTICAL SYNTHESIS OF RFR SIGNALS IN THE IONOSPHERE CHANNEL WITH FLUCTUATING PARAMETERS

N.I. Mikhailov, E.T. Ageeva, D.B. Kim

Практическое решение проблемы передачи сигналов по информационным каналам особенно актуально. Важное место в решении данной проблемы занимают вопросы передачи сигналов в информационных каналах с регулярными и случайными неоднородностями. Примерами таких каналов являются каналы ионосферного радиозондирования (наклонного, возвратно-наклонного, трансionoсферного). В результате прохождения сигналом большого пути в канале могут возникнуть физические эффекты, описать которые можно только с определенной долей вероятности. В этих условиях для понимания физики явлений особенно важным представляется математическое моделирование дистанционно-частотных характеристик сигналов (ДЧХ) при распространении в протяженном канале с регулярными и случайными параметрами. С использованием численных и аналитических методов в работе предложен комплекс оперативных методов расчета ДЧХ сигналов при распространении в ионосферных каналах различного типа. Приведены результаты моделирования ДЧХ в каналах ионосферного радиозондирования, подверженных регулярным и случайным воздействиям.

Practical solution to the problem of signaling through information channels is especially important. An important role in solving this problem, take the transfer of signals in the data paths to regular and random in homogeneities. Examples of such channels are channels of ionospheric radio sounding (oblique, back-and-tilt, transionospheric). As a result of the passage of the large signal path in the channel may have physical effects that can only be described with a certain degree of probability. In these conditions it is especially important mathematical modeling of remotely-frequency characteristics of the signal propagation in a long channel with regular and random parameters. With the use of numerical and analytical methods in the paper, a set of operational methods of calculating RFR signals propagating in different types of ionospheric channels. Simulation results of RFR in the channels of the ionospheric radio sounding subject to regular and random effects.

Как известно, при прохождении сигнала через движущуюся неоднородную среду даже при фиксированных координатах источника и приемника наблюдается изменение рабочей частоты сигнала, связанное с эффектом Доплера. В связи с этим для прогнозирования оптимальных условий прохождения сигнала в нестационарном информационном канале важно исследовать статистические характеристики доплеровского смещения частоты (ДСЧ) сигнала в зависимости от параметров канала.

В данной работе в качестве примера нестационарного информационного канала взята случайно-неоднородная ионосфера, изменяющаяся во времени, а в качестве передаваемого сигнала рассмотрен радиосигнал декаметрового диапазона.

При моделировании дистанционно-угловых характеристик и среднеквадратичного отклонения σ_f ДСЧ радиосигнала на заданной ионосферной радиотрассе использовалась система уравнений из [Агеева и др., 2012а, б] и разработанный нами универсальный комплекс программ.

Для расчета среднего значения ДСЧ радиосигнала $\langle \Delta f \rangle$ использовалась система уравнений из [Агеева и др., 2012а, б] и выражение

$$\langle \Delta f \rangle = -\frac{f}{2} \int_0^{t_k} \left\langle \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \right\rangle dt,$$

где $\varepsilon(x, z, \tau) = \varepsilon_0(z, \tau) + \varepsilon_1(x, z, \tau)$ – диэлектрическая проницаемость нестационарной ионосферы (причем $\langle \varepsilon_1(x, z, \tau) \rangle = 0$).

Полагая, что изменение электронной концентрации ионосферы является нелинейным во времени, временную зависимость критической частоты главного максимума ионосферной ионизации можно представить в виде

$$f_{кр}(\tau) = f_{кр0} - b\tau^2,$$

где $f_{кр0}$ – критическая частота в начальный момент времени $\tau=0$. Критическая частота $f_{крк}$ в конечный момент времени, когда граница зоны молчания совпала с координатой приемника, определялась на основе анализа дистанционно-угловых характеристик (рис. 1).

Из рис. 1 следует, что при заданном расстоянии между источником и приемником x_k и выбранной критической частоте $f_{кр0}$ в начальный момент времени ($\tau=0$) минимум кривой $x(\tau)$ с течением времени (а следовательно, с уменьшением критической частоты) поднимается. Касательная x_k к минимуму кривой $x(\tau)$ соответствует критической частоте радиоволн в ионосфере в конечный момент времени.

При этой частоте верхние (педерсеновские) и нижние лучи сливаются, а x_k является размером зоны молчания. Был рассмотрен характерный интервал времени изменения электронной концентрации ионосферы порядка 5 ч.

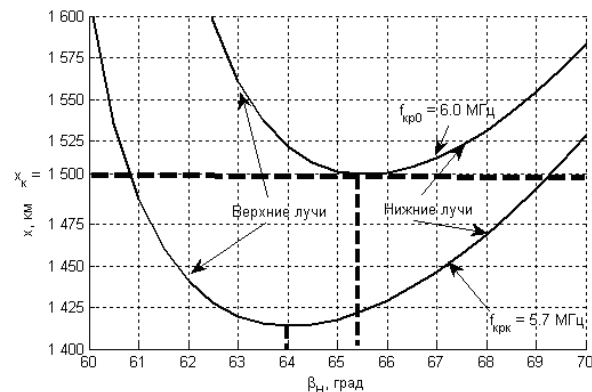


Рис. 1. Дистанционно-угловая характеристика радиосигнала при рабочей частоте $f=12$ МГц.

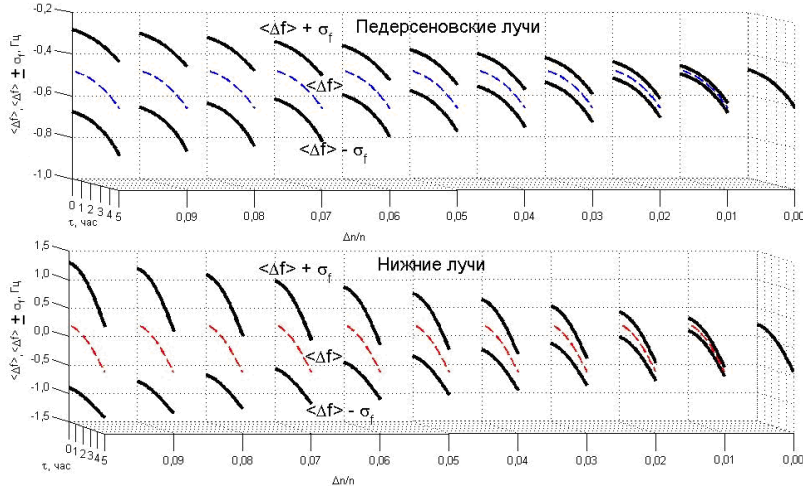


Рис. 2. Зависимость среднего значения $\langle \Delta f \rangle$ доплеровского смещения частоты от времени τ и электронной концентрации $\Delta n_e/n_e$.

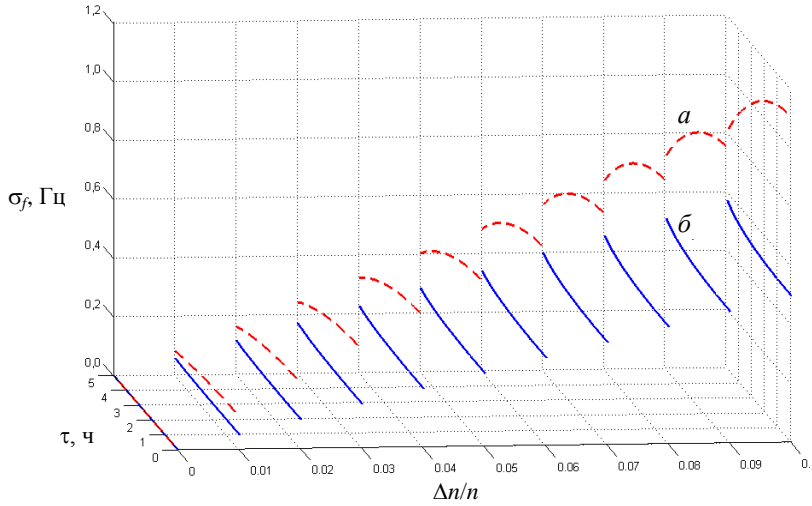


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичного отклонения σ_f доплеровского смещения частоты от времени τ и электронной концентрации $\Delta n_e/n_e$: а – педрсенсовские лучи; б – нижние лучи.

При использовании оперативного алгоритма системы уравнений из [Агеева и др., 2012а, б] неоднородная часть корреляционной функции случайных неоднородностей представлялась в виде

$$N_1 = \langle \gamma^2 \rangle (1 - \varepsilon_0)^2,$$

где $\langle \gamma^2 \rangle = \left(\frac{\Delta n_e}{n_e} \right)^2$, $\varepsilon_0(z) = 1 - \left(\frac{f_{кр}}{f} \right)^2 e^{-\left(\frac{z - z_m}{h_m} \right)^2}$.

Характерный размер случайных неоднородностей $a=10$ км, а скорость движения неоднородностей $v=0.1$ км/с. Параметры детерминированной ионосферы были выбраны следующие: $z_m=300$ км, $h_m=100$ км, а длина радиотрассы $x_k=1500$ км. Относительное изменение электронной концентрации варьировало от 0 до 0.1 с шагом 0.01. Среднеквадратичное отклонение σ_f ДСЧ вычислялось по формуле

$$\sigma_f = \sqrt{\langle \Delta f \rangle^2} = \sqrt{\frac{f^2 D_f \sqrt{\pi}}{2}},$$

где выражение D_f определялось из [Агеева и др., 2012а, б].

На рис. 2, 3 приведены результаты расчета среднего $\langle \Delta f \rangle$ и среднеквадратичного σ_f отклонения ДСЧ сигнала (рабочая частота $f=12$ МГц) на радиотрассе $x_k=1500$ км.

Из рис. 2, 3 следует, что с течением времени (с уменьшением критической частоты ионосферы) изменения средних значений $\langle \Delta f \rangle$ ДСЧ нижнего и верхнего лучей сильно зависят от начальных условий, т. е. от значений $\langle \Delta f \rangle$ в нулевой момент времени, который выбирается достаточно условно.

Между тем главное влияние на поведение $\langle \Delta f \rangle$ оказывает изменение длины траекторий нижних и верхних лучей при вариациях ионосферных параметров. В частности, уменьшение критической частоты ионосферы приводит к уменьшению длины траектории верхнего луча и увеличению траектории нижнего луча. В итоге в пункте приема $\langle \Delta f \rangle$ обеих лучей могут принимать также противоположные по знаку значения, что является важным свойством при их идентификации.

Из рис. 2, 3 видно, что среднеквадратичное отклонение ДСЧ σ_f с увеличением $(\Delta n_e/n_e)$ возрастает как для верхних, так и для нижних лучей. С течением

времени (уменьшением $f_{кр}$) σ_f падает для верхних лучей и возрастает для нижних. Такие изменения σ_f связаны с ростом флуктуаций частоты сигнала при увеличении пути лучей в случайно-неоднородной ионосфере.

В заключение отметим, что, используя измеренные частотные характеристики радиосигнала, можно смоделировать изменение состояния электронной концентрации в ионосфере с помощью разработанных оперативных алгоритмов в виде системы уравнений и универсального комплекса программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агеева Е.Т., Афанасьев Н.Т., Багинов А.В. и др. Численно-аналитический алгоритм моделирования флуктуаций траекторных характеристик информационного сигнала в канале связи // Системы. Методы. Технологии. 2012а. № 3(15). С. 61–66.

Агеева Е.Т., Афанасьев Н.Т., Багинов А.В. и др. Компьютерное моделирование траекторных характеристик декаметрового радиосигнала в ионосферном канале связи // Там же. 2012б. № 3(15). С. 66–70.

Братский государственный университет, Братск, Россия