

Рис. 4. Графическое окно просмотра трехмерной поверхности нечеткого вывода в программе fuzzyTECH.

Литература

References

1. Гордеев С.М. Классификация и учет влияния почвенно-грунтовых условий при проектировании лесозаготовок // Механизация лесоразработок и транспорт леса: межвуз. сб. научн. тр. Л.: ЛТА, 1987. Вып.12. С.14-17.
2. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
3. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком. М., 2007. 288 с.

1. Gordeev S.M. Classification and soil conditions effect feedback while lumbering projection // Mehanizatsiya lesorazrobotok i transport lesa. Mezhevuz. sb. nauchn. tr. L.: LTA, Vyp.12. S.14-17.
2. Leonenkov A. Fuzzy modeling in Matlab and fuzzyTECH environment. SPb.: BHV-Peterburg, 2005. 736 s.
3. Shtovba S.D. Fuzzy systems designing by means of MATLAB. M: Goryachaya liniya – Telekom. M., 2007. 288 s.

УДК 519.8

Численно-аналитический алгоритм моделирования флуктуаций траекторных характеристик информационного сигнала в канале связи

Е.Т. Агеева¹, Н.Т. Афанасьев², А.В. Багинов¹, Д.Б. Ким¹, Н.И. Михайлов¹

¹Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия. E-mail: Sphalerite@yandex.ru

²Иркутский государственный университет, Ленина 3, Иркутск, Россия

Статья поступила 27.04.2012, принята 12.09.2012

Для оценки характеристик информационного сигнала в канале связи с флуктуирующими параметрами предложен оперативный численно-аналитический алгоритм моделирования. Характеристики информационного сигнала описываются в лучевом приближении и рассчитываются как решения стохастической системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Для решения стохастической системы с краевыми условиями Коши и Дирихле используется метод малого параметра. Получены интегральные выражения для статистических траекторных характеристик информационного сигнала. Показано, что интегральные выражения могут быть преобразованы и вычислены путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями. Получена полная система дифференциальных уравнений для одновременного расчета средних и флуктуационных характеристик информационного сигнала в канале связи. Полная система уравнений положена в основу разработанного численно-аналитического алгоритма моделирования статистических характеристик информационного сигнала в канале связи.

Ключевые слова: информационный сигнал, канал связи, дисперсия направления распространения, диэлектрическая проницаемость, корреляционная функция, численные алгоритмы.

Numerical and analytical algorithm of modeling the fluctuations trajectory characteristics of information signal in a communication channel

For assessing the characteristics of information signal in a communication channel with fluctuating parameters the operative numerical and analytical algorithm of modeling is offered. Characteristics of information signal are described in beam approach and the decision of stochastic system of the ordinary differential equations of the first order is analyzed. For the decision of stochastic system with regional conditions of Cauchy and to Dirichlet the method of small parameter is used. Integrated expressions for statistical trajectory characteristics of information signal are received. It is shown that integrated expressions can be transformed and calculated by a solution of the relevant system of the differential equations with the set entry conditions. The full system of the differential equations for simultaneous calculation of averages and fluctuation characteristics of information signal in a communication channel is received. The full system of the equations is put in a basis of the designed numerical and analytical modeling algorithm of statistical characteristics of an information signal in a communication channel.

Keywords: information signal, communication channel, dispersion of the direction of distribution, dielectric permeability, correlation function, numerical algorithms.

Практическое решение проблемы передачи информационных сигналов по каналам связи является в настоящее время весьма актуальным [1, 2]. Успех здесь во многом определяется пониманием физических закономерностей, сопровождающих процесс распространения информационных сигналов. Особое место в решении данной проблемы занимают вопросы передачи сигналов в каналах связи с временем задержки, значительно превышающим длительность передаваемых сообщений. Примерами таких каналов являются радио- и гидроакустические каналы связи между пунктами, разнесенными на большое расстояние.

В качестве протяженных радиоканалов могут выступать, в частности, ионосферный канал декаметрового радиосвязи [3], канал дальнего тропосферного рассеяния ультракоротких радиоволн [4], каналы дальней космической связи [5] и др. Примером гидроакустического канала является канал связи для обмена информацией между донными станциями и исследовательскими судами [2]. Оснащение донных станций каналом акустической связи и управления создает принципиально новые возможности для решения задач исследования морей и океанов. В результате прохождения информационным сигналом большого пути в канале могут возникнуть физические эффекты, следствием которых являются непредсказуемые искажения принимаемого сигнала. В этих условиях особенно важными представляются априорные сведения о пространственно-временных вариациях параметров канала и разработка оперативных алгоритмов расчета их влияния на характеристики сигнала.

Для описания свойств реальных каналов связи эффективно используется метод математического моделирования [6].

Одной из реализаций метода математического моделирования является численное моделирование [7], которое заключается в получении решений различными вычислительными алгоритмами. Моделирование свойств объектов с использованием численных методов часто оказывается более эффективным по сравнению с аналитическими расчетами упрощенных частных случаев поведения объекта. С помощью численного моделирования удается визуализировать зависимости

характеристик объекта для широкого набора начальных параметров задачи.

В последние годы в вероятностных исследованиях информационных каналов получены значительные результаты благодаря использованию теории случайных полей [8]. Рассматривая канал как динамическую систему, подверженную малым случайным воздействиям, можно получить приближенные аналитические соотношения между характеристиками информационного сигнала и параметрами канала. Последующая алгоритмизация этих соотношений позволяет выполнить моделирование статистических характеристик информационного сигнала при дальнем распространении в канале связи.

Здесь следует заметить, что наряду с известными достоинствами приближенного аналитического подхода, он обладает и недостатками. Прежде всего, это медленная сходимости решений в отдельных случаях и ограниченная область применимости [9]. Кроме того, результатом использования полуаналитических методов, как правило, являются сложные интегральные выражения, которые с трудом поддаются вычислению. Таким образом, возникает необходимость разработки численно-аналитического алгоритма расчета характеристик информационного сигнала, который позволил бы использовать универсальность численных алгоритмов и простоту получения результатов аналитических методов.

При изучении дальнего распространения звуковых и электромагнитных волн в природных волновых каналах широко используется метод лучевого приближения [10]. Основным физическим эффектом, возникающим в процессе распространения лучей, является эффект рефракции. В естественных условиях, вследствие влияния неоднородности среды канала, лучи изменяют направление распространения. В рамках геометрической оптики получены аналитические выражения для характеристик лучевых траекторий информационного сигнала для некоторых простых аналитических моделей каналов [2 – 5].

Хорошо известны два типа краевых условий при построении лучевых траекторий [10]. Первый тип связан с постановкой начальной задачи Коши, когда краевые условия задаются только в пункте расположения передающего устройства. Второй тип характеризует

задачу Дирихле. В этом случае краевые условия задаются как в передатчике, так и в приемнике. В зависимости от преследуемой цели иногда эффективнее решать первую задачу, например, когда необходимо получить сведения о характеристиках информационного сигнала (дальности распространения, количестве лучей и их углах прихода) на протяженном участке наблюдения в канале. При организации канала связи между стационарными корреспондентами более адекватной реальным условиям является краевая задача Дирихле. Это связано с тем, что при решении задачи Коши лучи под влиянием неоднородностей уже не попадают в пункт приема. В результате наблюдатель может лишь рассчитать статистику проекций направления распространения сигнала, а не самих углов прихода.

Что же касается непосредственно аналитического и численного решения траекторных краевых задач, то более разработанной к настоящему времени является задача Коши. Это объясняется успехами, достигнутыми в теории решений дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями [11]. Вместе с тем, математическая теория решений дифференциальных уравнений с заданными граничными условиями разработана в меньшей степени [12].

Для решения задачи Дирихле требуется «пристрелка» траекторий в пункт приема, когда изменяются параметры и свойства среды канала. В случае регулярного канала задача «пристрелки» траекторий решается удовлетворительно. Вместе с тем, уже в присутствии в канале детерминированных локализованных неоднородностей вопросы «пристрелки» вызывают большие трудности. Ситуация осложняется еще в большей степени, если в канале возникают различного рода флуктуации. В этом случае обычные методы «пристрелки» лучевых траекторий становятся неустойчивыми, и требуются принципиально иные подходы к решению краевой задачи. В определенной мере указанные трудности можно обойти, если при построении лучевых траекторий в канале с флуктуирующими параметрами использовать численно-аналитический алгоритм моделирования.

Для расчета случайных лучевых траекторий будем использовать нелинейную систему обыкновенных дифференциальных уравнений, полученную путем решения стохастического нелинейного дифференциального уравнения в частных производных первого порядка, принадлежащего к классу уравнений Гамильтона-Якоби [10]. В частности, в двумерном случае она имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = c\sqrt{\varepsilon} \cos \beta, \\ \frac{dx}{dt} = c\sqrt{\varepsilon} \sin \beta, \\ \frac{d\beta}{dt} = c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon}}{\partial x} \cos \beta - c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon}}{\partial z} \cdot \sin \beta. \end{cases}, \quad (1)$$

где x и z – горизонтальная и вертикальная координаты луча (рис. 1), dt – элемент группового времени, β – угол отклонения луча от вертикали, ε – случайная

функция, характеризующая диэлектрическую проницаемость среды канала, c – скорость света.

Отметим, что все изложенное ниже будет относиться к электромагнитным волнам. Вместе с тем, дальнейшие рассуждения применимы и к случаю распространения звуковых волн в гидроакустическом канале, если в системе уравнений (1) вместо функции $c\sqrt{\varepsilon}(x, z)$ рассматривать локальную скорость звука $V(x, z)$, а в качестве градиентов $c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon}}{\partial x}$ и $c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon}}{\partial z}$ использовать градиенты $\frac{\partial V(x, z)}{\partial x}$ и $\frac{\partial V(x, z)}{\partial z}$.

Для решения стохастической системы (1) с краевыми условиями Коши и Дирихле используем метод малого параметра. Представим диэлектрическую проницаемость среды канала в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_0(z) + \varepsilon_1(z, x), \quad (2)$$

где ε_0 – регулярная фоновая составляющая среды, ε_1 – малая флуктуационная компонента ($\varepsilon_1 \ll \varepsilon_0$), причем ε_1 изменяется плавно и непрерывно.

Следуя [12], решение системы (1) будем искать в виде:

$$z = z_0 + z_1, \quad x = x_0 + x_1, \quad \beta = \beta_0 + \beta_1, \quad (3)$$

где x_0, z_0, β_0 – невозмущенные характеристики луча, x_1, z_1, β_1 – малые возмущения ($z_1 \ll z_0, x_1 \ll x_0, \beta_1 \ll \beta_0$).

Разлагая функции $\sqrt{\varepsilon}$, $\cos \beta$ и $\sin \beta$ в ряд Тейлора и ограничиваясь первым порядком малости, имеем:

$$\begin{aligned} \sqrt{\varepsilon} &= \sqrt{\varepsilon_0(z_0)} + \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \cdot \frac{\partial \varepsilon_0(z_0)}{\partial z_0} z_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_1(z_0, x_0)}{\sqrt{\varepsilon_0}} \\ \cos(\beta_0 + \beta_1) &= \cos \beta_0 - \beta_1 \cdot \sin \beta_0, \\ \sin(\beta_0 + \beta_1) &= \sin \beta_0 + \beta_1 \cdot \cos \beta_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (1) и проводя линеаризацию, получаем порождающую систему дифференциальных уравнений для характеристик луча в регулярном канале:

$$\begin{aligned} \frac{dz_0}{dt} &= c\sqrt{\varepsilon_0} \cos \beta_0, \\ \frac{dx_0}{dt} &= c\sqrt{\varepsilon_0} \sin \beta_0, \\ \frac{d\beta_0}{dt} &= -c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon_0}}{\partial z} \sin \beta_0 \end{aligned} \quad (5)$$

и систему на вариации:

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{dt} &= -c\sqrt{\varepsilon_0} \beta_1 \cdot \sin \beta_0 + c \cdot \cos \beta_0 \cdot \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \cdot \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z_0} z_1 + c \cdot \cos \beta_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_0}}, \\ \frac{dx_1}{dt} &= c\sqrt{\varepsilon_0} \beta_1 \cdot \cos \beta_0 + c \cdot \sin \beta_0 \cdot \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \cdot \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z_0} z_1 + c \cdot \sin \beta_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_0}}, \end{aligned}$$

$$\frac{d\beta_1}{dt} = -c \frac{\partial \sqrt{\epsilon_0}}{\partial z_0} \beta_1 \cdot \cos \beta_0 - c \cdot \sin \beta_0 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2\sqrt{\epsilon_0}} \cdot \frac{\partial \epsilon_0}{\partial z_0} \right) \cdot z_1 - c \cdot \sin \beta_0 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_1}{\sqrt{\epsilon_0}} \right) + c \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_1}{\sqrt{\epsilon_0}} \right) \cdot \cos \beta_0. \quad (6)$$

Решая линейную неоднородную систему уравнений (6), для вариаций вертикальной координаты и угла рефракции луча получаем:

$$z_1 = -R_1(t) \cdot \int \frac{R_2 \cdot B_1}{p \cdot a_{12}} \cdot dt + R_2(t) \cdot \int \frac{R_1 \cdot B_1}{p \cdot a_{12}} \cdot dt, \quad (7)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{a_{12}} \cdot \frac{dz_1}{dt} - \frac{a_{11}}{a_{12}} z_1 - \frac{D}{a_{12}}, \quad (8)$$

где p – неизвестная постоянная величина, определяемая при наложении конкретных краевых условий задачи.

$R_1(t)$ и $R_2(t)$ – решения однородных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} R_1'' - b_1 R_1' - b_2 R_1 = 0, \\ R_2'' - b_1 R_2' - b_2 R_2 = 0, \end{cases}$$

знак «штрих» означает дифференцирование по переменной t

$$\begin{aligned} a_{11} &= c \cdot \cos \beta_0 \cdot \frac{1}{2\sqrt{\epsilon_0}} \cdot \frac{\partial \epsilon_0}{\partial z_0}, \\ a_{21} &= -c \cdot \sin \beta_0 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2\sqrt{\epsilon_0}} \cdot \frac{\partial \epsilon_0}{\partial z_0} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} a_{12} &= -c \cdot \sqrt{\epsilon_0} \cdot \sin \beta_0 = -c \sin \beta_H, \\ D &= c \cdot \cos \beta_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_1}{\sqrt{\epsilon_0}}, \\ B_1 &= D' - \frac{a'_{12}}{a_{12}} D + a_{12} D_1 - a_{22} D. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{a'_{12}}{a_{12}}, \\ b_2 &= a'_{11} - \frac{a'_{12} a_{11}}{a_{12}} + a_{12} a_{21} - a_{22} a_{11}. \end{aligned} \quad (11)$$

Дальнейшие преобразования (7)-(8) выполним вначале для краевой задачи Коши. Как известно [11], производные по начальным параметрам от решения порождающей нелинейной системы дифференциальных уравнений в совокупности образуют фундаментальные решения линейной однородной системы уравнений на вариации. Поэтому в качестве фундаментальных решений выберем

$$R_1 = \frac{\partial z_0}{\partial z_H} \quad \text{и} \quad R_2 = \frac{\partial z_0}{\partial \beta_H} \quad \text{с начальными условиями}$$

$$R_1(t=0) = 1; \quad R_2(t=0) = 0; \quad z_0 = z_H, \quad \beta_0 = \beta_H.$$

Здесь z_H – вертикальная координата луча в момент выхода, β_H – начальный угол падения луча из источника (рис. 1).

Тогда, вычисляя (7), (8), для флуктуаций вертикальной координаты и угла прихода луча получаем:

$$z_1(t) = R_1(t) \cdot \int_0^t \frac{B_1 \cdot R_2(t)}{c \cdot \sin \beta_H} \cdot dt - R_2(t) \cdot \int_0^t \frac{B_1 \cdot R_1(t)}{c \cdot \sin \beta_H} \cdot dt, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \beta_1(t) &= \left[\frac{1}{a_{12}} \cdot \frac{dR_1}{dt}(t) - \frac{a_{11}}{a_{12}} \cdot R_1(t) \right] \cdot \int_0^t \frac{B_1 R_2(t)}{c \cdot \sin \beta_H} \cdot dt - \\ &- \left[\frac{1}{a_{12}} \cdot \frac{dR_2}{dt}(t) - \frac{a_{11}}{a_{12}} \cdot R_2(t) \right] \cdot \int_0^t \frac{B_1 R_1(t)}{c \cdot \sin \beta_H} \cdot dt - \frac{D}{a_{12}}. \end{aligned} \quad (13)$$

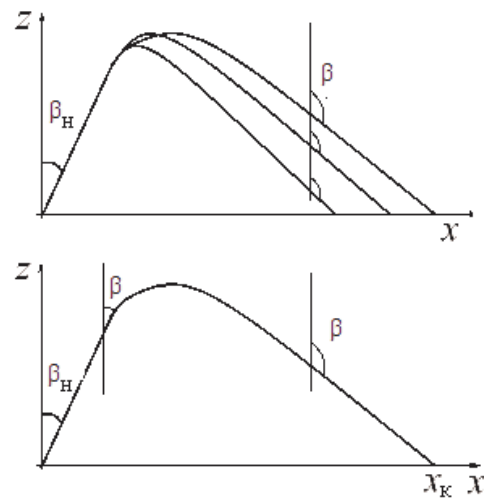


Рис. 1. Траектории лучей в возмущенном и регулярном каналах.

Как уже отмечалось, в задаче Коши возмущенный луч под влиянием флуктуаций диэлектрической проницаемости не приходит в стационарный приемный пункт. Поэтому при организации канала связи между пунктами с фиксированными координатами необходимо решать задачу Дирихле. В данном случае в качестве фундаментальных решений удобно выбрать:

$$\begin{aligned} R_1(t) &= \frac{\partial z_0}{\partial \beta_H}(t), \\ R_2(t_k - t) &= \frac{\partial z_0}{\partial \beta_H}(t_k - t) \end{aligned} \quad (14)$$

При этом начальные условия: $R_1(t=0) = 0$, $R_2(t=t_k) = 0$. Вычисляя (7), получаем:

$$z_1(t) = R_1(t) \cdot \int_{t_k}^t \frac{R_2(t) \cdot B_1}{c \cdot \sin \beta_H \cdot R_1(t_k)} \cdot dt - R_2(t) \cdot \int_0^t \frac{R_1(t) \cdot B_1}{c \cdot \sin \beta_H \cdot R_1(t_k)} \cdot dt. \quad (15)$$

Используя (15), можно вычислить текущую вариацию угла рефракции вдоль траектории.

Между тем, наибольший интерес представляют флуктуации направления распространения радиоволн в конкретных условиях решаемых задач. В частности, для оценки случайных вариаций угла прихода радиолуча, испытавшего воздействие хаотической стратификации слоистой ионосферы, в пункте наблюдения имеем:

$$\beta_k = \frac{c}{2 \cdot \frac{\partial z_0}{\partial \beta_H}(t_k)} \cdot \int_0^{t_k} \frac{\partial z_0}{\sin \beta_H} \left(\frac{\partial \epsilon_1}{\partial z_0} \right) dt. \quad (16)$$

Составляя на основе (16) выражение для дисперсии, имеем:

$$\begin{aligned} \sigma_\beta^2 &= \left\langle \frac{c}{2R_1(t_k)} \int_0^{t_k} \frac{\partial z_0}{\sin \beta_H} \left(\frac{\partial \epsilon_1}{\partial z_1} \right) dt_1 \cdot \frac{c}{2R_1(t_k)} \int_0^{t_k} \frac{\partial z_0}{\sin \beta_H} \left(\frac{\partial \epsilon_1}{\partial z_2} \right) dt_2 \right\rangle = \\ &= \frac{c^2}{4R_1^2(t_k)} \int_0^{t_k} \int_0^{t_k} \frac{\partial z_0(t_1) \cdot \partial z_0(t_2)}{\sin^2 \beta_H} \left\langle \left(\frac{\partial \epsilon_1(z_1)}{\partial z_1} \right) \cdot \left(\frac{\partial \epsilon_1(z_2)}{\partial z_2} \right) \right\rangle dt_1 dt_2, \quad (17) \end{aligned}$$

где $\left\langle \frac{\partial \epsilon_1(z_1)}{\partial z_1} \cdot \frac{\partial \epsilon_1(z_2)}{\partial z_2} \right\rangle = \frac{\partial^2 N}{\partial z_1 \cdot \partial z_2}$ – смешанная вторая

производная от корреляционной функции флуктуаций диэлектрической проницаемости среды канала. Дальнейшие преобразования (17) можно выполнить, задавая конкретный вид функции N . В частности, для квазиоднородного случайного поля флуктуаций среды канала [8], когда $N = N_1 \cdot N_0$, где N_0 – гауссова корреляционная функция, характеризующая статистически однородное случайное поле неоднородностей, N_1 – медленная функция, описывающая статистическую неоднородность среды, после несложных преобразований получаем:

$$\sigma_\beta^2 = \frac{\sqrt{\pi} \cdot c}{2 \left(\frac{\partial z_0}{\partial \beta_H}(t_k) \right)^2} \int_0^{t_k} \frac{N_1}{a \cdot \sqrt{\epsilon_0^3}} \cdot \left(\frac{\partial z_0}{\partial \beta_H}(t) \right)^2 \cdot dt, \quad (18)$$

где a – вертикальный масштаб случайных неоднородностей диэлектрической проницаемости.

Формула (18) представляет собой довольно сложный интеграл, для вычисления которого необходимы не только сведения о поведении невозмущенной лучевой траектории на всем участке распространения в канале, но и знание фундаментальных решений для системы уравнений на вариации (6). Однако выражение (18) можно эффективно алгоритмизировать. Дифференцируя интеграл для дисперсии угла прихода по переменному верхнему пределу и объединяя полученное дифференциальное уравнение с порождающей системой лучевых уравнений (5), продифференцированной по начальному параметру β_H , а также непосредственно с самой системой (5), можно получить полную систему дифференциальных уравнений для одновременного

расчета дисперсии направления распространения и средних характеристик луча в канале связи:

$$\frac{dx_o}{dt} = c \sqrt{\epsilon_o} \sin \beta_o,$$

$$\frac{dz_o}{dt} = c \sqrt{\epsilon_o} \cos \beta_o,$$

$$\frac{d\beta_o}{dt} = -c \cdot \sin \beta_o \cdot \frac{1}{2 \sqrt{\epsilon_o}(z_o)} \cdot \frac{\partial \epsilon_o(z_o)}{\partial z_o}.$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial z_o}{\partial \beta_H} \right) = c \cdot \cos \beta_o \cdot \frac{1}{2 \sqrt{\epsilon_o}} \cdot \frac{\partial \epsilon_o}{\partial z_o} \cdot \frac{\partial z_o}{\partial \beta_H} - c \sqrt{\epsilon_o} \cdot \sin \beta_o \cdot \frac{\partial \beta_o}{\partial \beta_H},$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \beta_o}{\partial \beta_H} \right) &= -\frac{c}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_o}} \frac{\partial^2 \epsilon_o}{\partial z_o^2} - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o^3}} \frac{\partial \epsilon_o(z_o)}{\partial z_o} \right) \cdot \frac{dz_o}{d\beta_H} \cdot \sin \beta_o + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o}} \frac{\partial \epsilon_o(z_o)}{\partial z_o} \cdot \cos \beta_o \cdot \frac{d\beta_o}{d\beta_H}, \quad (19) \end{aligned}$$

$$\frac{dD_\beta}{dt} = \frac{N_1}{a \cdot \sqrt{\epsilon_o^3}} \cdot \left(\frac{\partial z_o}{\partial \beta_H}(t) \right),$$

$$\text{где } D_\beta = \frac{2 \cdot \sigma_\beta^2 \left(\frac{\partial z_o}{\partial \beta_H}(t_k) \right)^2}{\sqrt{\pi} \cdot c}.$$

Основными достоинствами вышеописанного алгоритма расчета статистических траекторных характеристик информационного сигнала являются следующие.

Во-первых, численно-аналитический алгоритм позволяет значительно снизить затраты машинного времени при численном расчете статистических моментов лучей.

Во-вторых, он позволяет в совокупности получить оперативную информацию о средних и флуктуационных характеристиках информационного сигнала в канале связи, что дает возможность получить более полное представление о самой структуре сигнала.

Наконец, **в-третьих**, вследствие высокой оперативности алгоритма, его можно использовать не только для оценки, но и для проведения большого объема расчетов характеристик информационного сигнала в канале связи [13].

С помощью метода малого параметра получена линейная неоднородная система обыкновенных дифференциальных уравнений для флуктуаций траекторных характеристик информационного сигнала в канале связи. Система решена с использованием теоремы о существовании производных по начальным параметрам от решения порождающей нелинейной системы дифференциальных уравнений, описывающей траекторию луча в невозмущенном канале. Аналитические формулы для флуктуационных характеристик луча использованы при построении статистических траекторных моментов. Полученные интегральные выражения для статистических моментов эффективно алгоритмизированы

ны. Получена полная система дифференциальных уравнений для одновременного расчета флуктуационных и средних характеристик луча в канале связи. Полная система уравнений положена в основу разработанного численно-аналитического алгоритма моделирования статистических характеристик информационного сигнала в канале связи.

Литература

1. Барабашов Б.Г., Вертоградов Г.Г. Динамическая адаптивная структурно-физическая модель ионосферного радиоканала // Математическое моделирование. 1996. № 8. С. 3–18.
2. Макаров А.И., Дворников В.Д., Конопелько В.К. Передача информации в гидроакустическом канале // Доклады БГУИР, 2004. № 2. С. 103-118.
3. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павел'ев А.Г. Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД, 2009. 496 с.
4. Давыденко Ю.И. Дальняя тропосферная связь. М.: Воениздат, 1968. 212 с.

References

1. Barabashov B. G., Vertogradov G. G. Dynamic adaptive structural and physical model of ionospheric radio-channel // Matematicheskoe modelirovanie. 1996. № 8. S.3–18.
2. Makarov A.I., Dvornikov V.D., Konopel'ko V.K. Information transfer through hydroacoustic channel // Doklady BGUIR, 2004. № 2. S.103-118.
3. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavel'ev A.G. Radio-wave propagation. M.: LENAND, 2009. 496 s.
4. Davydenko Yu.I. Tropospheric telecommunication. M.: Voenizdat, 1968. 212 s.
5. Yakovlev O.I. Space radiophysics. M.: Nauchnaya kniga, 1998. 432 s.
6. Samarsky A.A., Mikhailov A.P. Mathematical modeling. M.: Nauka. Fizmatlit. 1997. 320 s.

5. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с
6. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. М.: Наука: Физматлит. 1997. 320 с.
7. Самарский А. А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989 432 с.
8. Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. М.: Мир, 1981. Ч. 2. 320 с.
9. Барабаненков Ю.Н., Кравцов Ю.А., Рытов С.М., Татарский В.И. Состояние теории распространения волн в случайно-неоднородной среде // УФН. 1970. Т. 102. № 1. С. 3-42.
10. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1979. 304 с
11. Понтрягин Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1970. 332 с.
12. Теория ветвления и нелинейные задачи на собственные значения: сб. ст. /под ред. Дж.Б. Келлера, С.М. Антман. М.: Мир, 1974. 256 с.
13. Агеева Е.Т., Багинов А.В., Ким Д.Б. Программа: Расчёт параметров сигнала в неоднородном ионосферном канале «Ionosphaera K.1.11» гос. рег. № 2011612474.

7. Samarsky A. A., Gulin A.V. Numerical procedures. M.: Nauka. Gl. red. fiz-mat. lit., 1989 432 s.
8. Isimaru A. Wave propagation and scattering in randomly inhomogeneous media. Ch.2. M.: Mir, 1981. 320 s.
9. Barabanenkov Yu.N., Kravtsov Yu.A., Rytov S.M., Tatarsky V.I. Condition of the wave propagation theory in random medium // UFN. 1970. T. 102. № 1. S. 3-42.
10. Kravtsov Yu. A., Orlov Yu. I. Geometrical optics of inhomogeneous media. M.: Nauka, 1979. 304 s.
11. Pontryagin L.S. Ordinary differential equations. M.: Nauka, 1970. 332 s.
12. Ramification theory and characteristic constant nonlinear problems / Sbornik statey pod red. Kellera Dzh.B. i Antman S. M.: Mir, 1974. 256 s.
13. Ageeva E. T., Baginov A.V., Kim D.B. Program: Calculation of signal data in inhomogeneous ionospheric channel «Ionosphaera K.1.11» gos. reg. № 2011612474..

УДК 519.8

Компьютерное моделирование траекторных характеристик декаметрового радиосигнала в ионосферном канале связи

Е.Т. Агеева¹, Н.Т. Афанасьев², А.В. Багинов¹, Д.Б. Ким¹, Н.И. Михайлов¹

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

²Иркутский государственный университет, ул. Ленина 3, Иркутск, Россия. E-mail: Sphalerite@yandex.ru

Статья поступила 27.04.2012, принята 10.09.2012

С использованием численно-аналитического алгоритма расчета проведено компьютерное моделирование флуктуационных и средних характеристик декаметрового радиосигнала в ионосферном канале связи, подверженном естественным возмущениям детерминированного и случайного типа. Сделана оценка состояния канала в зависимости от параметров случайных неоднородностей и формы профиля регулярной диэлектрической проницаемости ионосферы в широком диапазоне рабочих частот. Проведен детальный анализ дистанционно-угловых характеристик декаметрового радиосигнала для различных параметров крупномасштабной регулярной неоднородности. Рассчитана динамика зоны молчания в зависимости от интенсивности неоднородности и соотношения рабочей и критической частоты слоя F2. Рассчитана дисперсия вертикального угла прихода радиосигнала как функция от угла выхода, рабочей частоты и параметров регулярной и случайных неоднородностей. Показано увеличение дисперсии вертикального угла прихода вблизи границы зоны молчания.

Ключевые слова: случайные неоднородности, декаметровый радиосигнал, зона молчания, статистические моменты, корреляционная функция, диэлектрическая проницаемость, дистанционно-угловая характеристика.