УДК 519.6
DOI 10.17513/snt.39727

ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА СВЯЗИ

[1]Ким Д.Б., [2]Афанасьев Н.Т., [2]ТанаевА.Б., [2]Чудаев С.О.

[1]ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», Братск, e-mail: kdechan@yandex.ru;
[2]ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», Иркутск, e-mail: spacemaklay@gmail.com

Развит метод оперативной диагностики возможных статистических характеристик сигнала в информационном канале с трехмерными флуктуациями параметров по данным измерений флуктуационных характеристик пробного сигнала. С помощью метода возмущений получены алгебраические уравнения связи дисперсий направления распространения, доплеровского смещения частоты, групповой и фазовой задержки основного и пробного сигналов в информационном канале. Уравнения получены для фиксированных координат пунктов излучения и приема сигналов. Коэффициенты уравнений учитывают фундаментальные решения краевых задач Дирихле для основного и пробного сигналов. Интегралы для коэффициентов сведены к линейным дифференциальным уравнениям первого порядка с начальными условиями Коши. Сделан вывод общей системы дифференциальных уравнений для совместного расчета коэффициентов алгебраических уравнений и траекторных характеристик основного и пробного сигналов в регулярном канале. В качестве модели неопределенности параметров канала использована пространственно-временная корреляционная функция, учитывающая динамику средней диэлектрической проницаемости канала. Временные флуктуации параметров канала рассмотрены в приближении вмороженного переноса относительно направления распространения сигнала. Разработанный метод позволяет проводить экспресс-оценку возможных флуктуаций сигнала в информационном канале с неопределенностью параметров как в режиме просвечивания, так и в условиях отражения. Приведены примеры численных экспериментов для определения ожидаемых флуктуаций траекторных характеристик сигналов связи на различных рабочих частотах по данным измерений статистических характеристик сигнала пробного источника.

Ключевые слова: информационный канал, сигналы, флуктуации, асимптотические разложения, алгоритмы, математическое моделирование, статистические характеристики, оптимизация

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты FZZE-2020-0024, FZZE-2023-0004), с использованием УНУ «Астрофизический комплекс МГУ – ИГУ» (договор ЕВ-075-15-2021-675).

EXPRESS DIAGNOSTICS OF SIGNAL CHARACTERISTICS UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY OF COMMUNICATION CHANNEL PARAMETERS

[1]Kim D.B., [2]Afanasev N.T., [2]Tanaev A.B., [2]Chudaev S.O.

[1]Bratsk State University, Bratsk, e-mail: kdechan@yandex.ru;
[2]Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: spacemaklay@gmail.com

A method for on-line diagnostics of possible statistical characteristics of a signal in an information channel with three-dimensional fluctuations of parameters based on measurement data of the fluctuation characteristics of a test signal has been developed. With the help of the perturbation method, algebraic equations for the connection of dispersions of the propagation direction, Doppler frequency shift, group and phase delays of the main and probe signals in the information channel are obtained. The equations are obtained for fixed coordinates of points of emission and reception of signals. The coefficients of the equations take into account the fundamental solutions of the Dirichlet boundary value problems for the main and test signals. The integrals for the coefficients are reduced to first-order linear differential equations with initial Cauchy conditions. The conclusion of a general system of differential equations for the joint calculation of the coefficients of algebraic equations and the trajectory characteristics of the main and test signals in a regular channel is made. The spatiotemporal correlation function, which takes into account the dynamics of the average channel permittivity, is used as a model for the uncertainty of the channel parameters. Temporal fluctuations of the channel parameters are considered in the approximation of frozen transfer with respect to the signal propagation direction. The developed method makes it possible to carry out an express assessment of possible signal fluctuations in the information channel with parameter uncertainty both in the transmission mode and in reflection conditions. Examples of numerical experiments are given to determine the expected fluctuations in the trajectory characteristics of communication signals at different operating frequencies from the measurement data of the statistical characteristics of the test source signal.

Keywords: information channel, signals, fluctuations, asymptotic expansions, algorithms, mathematical modeling, statistical characteristics, optimization

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (projects FZZE-2020-0024, FZZE-2023-0004), using unique scientific facilities «Astrophysical Complex MGU – IGU» (contract EB-075-15-2021-675).

Как известно [1, с. 9; 2, с. 138], для выбора частотно-углового режима передающих устройств и прогнозирования возможных флуктуаций характеристик сигналов в каналах передачи информации необходима априорная оценка состояния канала. Поскольку параметры реальных каналов известны лишь с определенной долей вероятности, оценка ожидаемых характеристик сигналов не всегда удовлетворяет потребности практики. Один из способов повышения качества и надежности передачи сигналов заключается в решении обратной задачи восстановления параметров канала по данным измерений характеристик некоторого пробного сигнала с дальнейшим использованием этих сведений в решении основной задачи передачи сигналов в заданном направлении. Кроме того, существует возможность так называемой прямой диагностики канала, когда ожидаемые характеристики передаваемых сигналов определяются непосредственно по данным измерений сигнала от некоторого пробного источника. В работе [3] нами был предложен подход для оценки некоторых статистических характеристик сигнала в информационном канале с двумерными флуктуациями параметров по флуктуациям сигнала пробного источника на фиксированной рабочей частоте. В настоящей работе этот подход использован в многочастотном режиме и применен для оценки комплекса статистических траекторных характеристик сигналов в канале с трехмерными флуктуациями параметров.

Цель работы заключается в развитии метода оперативной многочастотной диагностики возможных флуктуаций траекторных характеристик сигналов в информационном канале с трехмерной неопределенностью параметров по данным измерений флуктуаций встречного сигнала пробного источника.

Вывод функциональных связей

Для расчета статистических характеристик сигнала в информационном канале с неопределенностью параметров использовался метод геометрической оптики [4, с. 96]. В отличие от [3] траектории лучей определялись в трехмерном пространстве путем решения лучевых дифференциальных уравнений в форме Эйлера:

$$\begin{cases} \dfrac{dz}{dx} = ctg\beta \qquad \dfrac{dy}{dx} = tg\alpha \\ \dfrac{d\beta}{dx} = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\left(1+\sin^2\beta\, tg^2\alpha\right)\left(\dfrac{\partial\sqrt{\varepsilon}}{\partial x}ctg\beta - \dfrac{\partial\sqrt{\varepsilon}}{\partial z}\right) \\ \dfrac{d\alpha}{dx} = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\left(1+\cos^2\alpha\, ctg^2\beta\right)\left(\dfrac{\partial\sqrt{\varepsilon}}{\partial y} - \dfrac{\partial\sqrt{\varepsilon}}{\partial x}tg\alpha\right) \end{cases}, \qquad (1)$$

где x, y, z – переменные лучевые координаты; α, β – угловые параметры луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях, ε – диэлектрическая проницаемость стохастического информационного канала, dx – элемент дальности.

Система уравнений (1) была решена методом возмущений [5, с. 234]. Диэлектрическая проницаемость канала задавалась суммой средней составляющей $\langle\varepsilon\rangle = \varepsilon_0(z)$ и флуктуационной $\varepsilon_1(x,y,z)$. Предполагалось, что $|\varepsilon_1| << \varepsilon_0$, $\langle\varepsilon_1\rangle = 0$. Уравнения (1) были решены с помощью разложений:

$$\beta = \beta_0 + \beta_1,\ z = z_0 + z_1,\ \alpha = \alpha_0 + \alpha_1,\ y = y_0 + y_1.$$

где $\beta_0 = \langle\beta\rangle$, $z_0 = \langle z\rangle$, $\alpha_0 = \langle\alpha\rangle$, $y_0 = \langle y\rangle$ – параметры средней траектории; β_1, z_1, α_1, y_1 – малые флуктуации траекторных параметров. Используя эти разложения и полагая, что средняя траектория лежит в плоскости Z0X ($y_0 = 0$, $\alpha_0 = 0$), был сделан вывод уравнений для расчета средней траектории и ее флуктуаций.

Для построения статистических моментов характеристик сигнала рассматривались условия медленной динамики неопределенности параметров канала. В задаче определения возможных флуктуаций характеристик сигнала по измеренным флуктуациям пробного сигнала мы использовали упрощенную модель пространственно-временной корреляционной функции неопределенности параметров канала [6, с. 86]: $N = N_1N_0$, где N_0 – гауссова корреляционная функция, множитель N_1 описывает медленную пространственную динамику хаотических параметров канала. Функция N_1 задавалась в виде $N_1 = \mu^2(1-\varepsilon_0)^2$, где μ^2 – интенсивность неопределенности параметров канала. Временная динамика параметров канала учитывалась в приближении вмороженного переноса [6, с. 92]:

$$N_0 = \exp\left(-\frac{1}{a^2}\left[\left(x_1-x_2\right)^2+\left(y_1-y_2\right)^2+\left(z_1-z_2-V(t_1-t_2)\right)^2\right]\right), \tag{2}$$

где t_1, t_2 – последовательные моменты времени, a – радиус пространственной корреляции неопределенности параметров канала, V – скорость вмороженного переноса относительно направления распространения сигнала.

Следуя подходу, предложенному в [3], неизвестные параметры корреляционной функции неопределенности параметров канала предварительно определялись по трем статистическим моментам пробного сигнала: дисперсиям доплеровского смещения частоты, групповой и фазовой задержек, а затем использовались для расчета возможных флуктуаций характеристик основного сигнала. Следует заметить, что структура приближенного решения для статистических моментов траекторных характеристик сигнала и выбранная модель пространственно-временной корреляционной функции неопределенности параметров канала позволяют по трем восстановленным параметрам модели рассчитать пять ожидаемых статистических характеристик основного сигнала в информационном канале. С учетом фиксированных координат приемных и передающих пунктов основных и пробного сигналов были получены алгебраические уравнения связи дисперсий флуктуационных характеристик этих сигналов в информационном канале:

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{G_5}{J_2}\sigma_{\Delta tp}^2 - \frac{G_5 J_3}{J_2 J_1}\sigma_{\varphi p}^2,\quad \sigma_\beta^2 = \frac{G_6}{J_2}\sigma_{\Delta tp}^2 - \frac{G_6 J_3}{J_2 J_1}\sigma_{\varphi p}^2$$

$$\sigma_\varphi^2 = \frac{G_1}{J_1}\sigma_{\varphi p}^2,\quad \sigma_f^2 = \frac{G_4}{J_4}\sigma_{fp}^2,\quad \sigma_{\Delta t}^2 = \frac{G_2}{J_2}\sigma_{\Delta tp}^2 + \sigma_{\varphi p}^2\left(\frac{G_3}{J_1} - \frac{G_2 J_3}{J_2 J_1}\right), \tag{3}$$

где σ_α^2, σ_β^2, σ_f^2, σ_φ^2, $\sigma_{\Delta t}^2$ – дисперсии горизонтального и вертикального углов прихода, доплеровского смещения частоты, фазы и групповой задержки основного сигнала; σ_{fp}^2, $\sigma_{\varphi p}^2$, $\sigma_{\Delta tp}^2$ – дисперсии доплеровского сдвига частоты, фазы и групповой задержки пробного сигнала; коэффициенты J_1, J_2, J_3, J_4, G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6 определяются из системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{dJ_1}{dx} = \frac{\sqrt{\pi}\omega^2(1-\varepsilon_0)^2}{4c^2\sin\beta_p\sqrt{\varepsilon_0}},\quad \frac{dJ_2}{dx} = \frac{2\sin\beta_p\sqrt{\pi}(1-\varepsilon_0)^2 F_p^2}{c^2\sqrt{\varepsilon_0^3}},\quad \frac{dJ_3}{dx} = \frac{\sqrt{\pi}(1-\varepsilon_0)^2}{4c^2\sin\beta_p\sqrt{\varepsilon_0^5}},$$

$$\frac{dJ_4}{dx} = \frac{f^2\sqrt{\pi}\sin^2\beta_{0p}(1-\varepsilon_0)^2}{2c^2\sin\beta_p\sqrt{\varepsilon_0}},\quad \frac{dG_1}{dx} = \frac{\sqrt{\pi}\omega^2(1-\varepsilon_0)^2}{4c^2\sin\beta_n\sqrt{\varepsilon_0}},\quad \frac{dG_2}{dx} = \frac{2\sin\beta_n\sqrt{\pi}(1-\varepsilon_0)^2F^2}{c^2\sqrt{\varepsilon_0^3}},$$

$$\frac{dG_3}{dx} = \frac{\sqrt{\pi}(1-\varepsilon_0)^2}{4c^2\sin\beta_n\sqrt{\varepsilon_0^5}},\quad \frac{dG_4}{dx} = \frac{f^2\sqrt{\pi}\sin^2\beta_0(1-\varepsilon_0)^2}{2c^2\sin\beta_n\sqrt{\varepsilon_0}},\quad \frac{dG_5}{dx} = \frac{x^2\sqrt{\pi}\sin\beta_0(1-\varepsilon_0)^2}{2x_\kappa^2\sin^4\beta_n},$$

$$\frac{dG_6}{dx} = \frac{R_1^2(x)\sqrt{\pi}(1-\varepsilon_0)^2}{2R_1^2(x_\kappa)\varepsilon_0^2\sin\beta_0},\quad \frac{dP_1}{dx} = \frac{\sin\beta_n}{\varepsilon_0^2}\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z_0}\frac{R_1(x)}{c},\quad \frac{dP_2}{dx} = -\frac{\sin\beta_n}{\varepsilon_0^2}\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z_0}\frac{R_2(x)}{c}, \tag{4}$$

$$\frac{dP_{1p}}{dx} = \frac{\sin\beta_p}{\varepsilon_0^2}\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z_{0p}}\frac{R_{1p}(x)}{c},\quad \frac{dP_{2p}}{dx} = -\frac{\sin\beta_p}{\varepsilon_0^2}\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z_{0p}}\frac{R_{2p}(x)}{c},\quad \frac{dR_1}{dx} = -\frac{\varepsilon_0 Q_1}{\sin^2\beta_n},$$

$$\frac{dR_{1p}}{dx} = -\frac{\varepsilon_0 Q_{1p}}{\sin^2\beta_p},\quad \frac{dR_2}{dx} = -\frac{\varepsilon_0 Q_2}{\sin^2\beta_n},\quad \frac{dR_{2p}}{dx} = -\frac{\varepsilon_0 Q_{2p}}{\sin^2\beta_p},\quad \frac{dz_{0p}}{dx} = ctg\beta_{0p},$$

$$\frac{dz_0}{dx} = ctg\beta_0,\quad \frac{dQ_1}{dx} = WR_1,\quad \frac{dQ_{1p}}{dx} = W_pR_{1p},\quad \frac{dQ_2}{dx} = WR_2,\quad \frac{dQ_{2p}}{dx} = W_pR_{2p},$$

$$\frac{d\beta_{0p}}{dx} = -\frac{1}{2\varepsilon_0}\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z_{0p}},\quad \frac{d\beta_0}{dx} = -\frac{1}{2\varepsilon_0}\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z_0}.$$

Здесь f – рабочая частота сигнала; $x_к$, $z_к$, $z_0(x)$, $\beta_0(x)$, β_n – координаты приемного пункта и траекторные характеристики основного сигнала соответственно; x_p, z_p, $z_{0p}(x)$, $\beta_{0p}(x)$, β_p – координаты пункта излучения и траекторные характеристики пробного сигнала; $c\sqrt{\varepsilon_0}$ – средняя составляющая групповой скорости сигнала; $F(x) = F_1(x) + F_2(x)$, $F_p(x) = F_{1p}(x) + F_{2p}(x)$,

$$F_{1p}(x)=\frac{c}{2\sin\beta_p R_{1p}(x_p)}R_{2p}(x)P_{1p}(x),\quad \omega=2\pi f,\quad F_{2p}(x)=\frac{c}{2\sin\beta_p R_{1p}(x_p)}R_{1p}(x)P_{2p}(x),$$

$$R_{1p}=\frac{\partial z_{0p}}{\partial\beta_p}(x),\quad F_1(x)=\frac{c}{2\sin\beta_n R_1(x_к)}R_2(x)P_1(x),\quad F_2(x)=\frac{c}{2\sin\beta_n R_1(x_к)}R_1(x)P_2(x),$$

$$R_{2p}=\frac{\partial z_{0p}}{\partial\beta_p}(x_p-x),\quad R_1=\frac{\partial z_0}{\partial\beta_n}(x),\quad R_2=\frac{\partial z_0}{\partial\beta_n}(x_к-x),\quad Q_1=\frac{\partial\beta_0}{\partial\beta_n}(x),\quad Q_2=\frac{\partial\beta_0}{\partial\beta_n}(x_к-x),$$

$$W=-\frac{\partial}{\partial z_0}\left(\frac{1}{2\varepsilon_0(z_0)}\left(\frac{\partial\varepsilon_0(z_0)}{\partial z_0}\right)\right),\quad W_p=-\frac{\partial}{\partial z_{0p}}\left(\frac{1}{2\varepsilon_0(z_{0p})}\left(\frac{\partial\varepsilon_0(z_{0p})}{\partial z_{0p}}\right)\right),$$

$$Q_{1p}=\frac{\partial\beta_{0p}}{\partial\beta_p}(x),\quad Q_{2p}=\frac{\partial\beta_{0p}}{\partial\beta_p}(x_p-x).$$

Краевые условия для системы (4):

$$\begin{gathered}
z_{0p}(x_p)=0,\quad \beta_{0p}(x_p)=\beta_p,\quad z_0(0)=0,\quad \beta_0(0)=\beta_n,\quad J_1(x_p)=0,\quad J_2(x_p)=0,\\
J_3(x_p)=0,\quad J_4(x_p)=0,\quad G_1(0)=0,\quad G_2(0)=0,\quad G_3(0)=0,\quad G_4(0)=0,\quad G_5(0)=0,\\
G_6(0)=0,\quad P_{1p}(x_p)=0,\quad P_{2p}(0)=0,\quad P_1(0)=0,\quad R_1(0)=0,\quad P_2(x_к)=0,\quad R_2(x_к)=0,\\
Q_1(0)=1,\quad Q_2(x_к)=1,\quad R_{1p}(x_p)=0,\quad R_{2p}(0)=0,\quad Q_{1p}(x_p)=1,\quad Q_{2p}(0)=1.
\end{gathered}\tag{5}$$

Решение системы (4) намного проще решения исходных краевых стохастических задач для характеристик основного и пробного сигналов на фиксированных рабочих частотах, поскольку уравнения для J_1, J_2, J_3, J_4, G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6 интегрируются с начальными условиями. Последнее в значительной степени повышает производительность расчетов [7]. При многочастотном режиме работы в стохастическом канале дополнительно требуется пристрелка средних траекторий основных и пробного сигналов для каждой рабочей частоты, что легко достигается методами вычислительной математики.

Численные эксперименты

Предложенный метод позволяет проводить диагностику возможных флуктуаций характеристик сигналов в информационном канале как в режиме просвечивания, так и в условиях отражения. Для обоих этих режимов были поставлены численные эксперименты.

Регулярная диэлектрическая проницаемость канала с просвечиванием была задана двухслойной аналитической моделью:

$$\varepsilon_0(z_0)=1-\frac{f_{\grave{e}pE}^2}{f^2}\exp\left(-\left(\frac{z_0-z_{mE}}{y_{mE}}\right)^2\right)-\frac{f_{\grave{e}p}^2}{f^2}\exp\left(-\left(\frac{z_0-z_m}{y_m}\right)^2\right),\tag{6}$$

где $f_{крE}$, $f_{кр}$, y_{mE}, y_m, z_{mE}, z_m – критические частоты, полутолщины и высоты минимумов слоев. Параметры корреляционной функции неопределенности диэлектрической проницаемости канала были взяты: $\mu^2 = 0{,}0004$, $a = 10$ *км*, $V = 50$ *м/с*. Для данных параметров определялись среднеквадратичные отклонения траекторных характеристик пробного сигнала на частоте $f = 45$ *МГц*. Координаты пробного источника были взяты: $x_p = 2990$ *км*, $z_p = 1500$ *км*. Параметры модели (6) составляли: $f_{крE} = 4$ *МГц*, $f_{кр} = 8$ *МГц*, $y_{mE} = 40$ *км*, $y_m = 150$ *км*, $z_{mE} = 140$ *км*, $z_m = 400$ *км*. Рассчитанные («измеренные») значения флуктуационных характеристик пробного сигнала составили: среднеквадратичные отклонения фазового пути $\sigma_{\Phi p} = (\sigma_{\varphi p} c) / (2\pi f) = 27$ *м*, доплеровского смещения частоты σ_{fp} = 0,04 *Гц*, группового пути $\sigma_{\Delta Lp} = c\sigma_{\Delta tp} = 40.2$ *м* «Измеренные» дисперсии характеристик пробного сигнала являлись входными величинами для расчета возможных дисперсий флуктуационных характеристик основных сигналов на заданных дистанциях. Интегральные коэффициенты, входящие в алгебраические уравнения (3), были получены в результате расчета дифференциальных уравнений (4) с начальными условиями (5). Соответствующие величины среднеквадратичных отклонений представлены в табл. 1. Выполненные расчеты показали, что величины возможных статистических характеристик доплеровского смещения частоты, направления прихода (в градусах), групповой и фазовой задержки основных сигналов в информационном канале с неопределенностью параметров соответствуют теории рассеяния волн в среде с крупномасштабными (по сравнению с размером зоны Френеля) неоднородностями [6, с. 113].

Для канала с отражением входными данными являлись статистические характеристики принятого пробного сигнала, рассчитанные вдоль отраженной траектории, соединяющей корреспондентов, при заданной неопределенности параметров канала. Для описания диэлектрической проницаемости регулярного канала, как и выше, использовалась модель (6). Соответствующие модельные параметры были взяты: $f_{крE} = 4\,МГц, f_{кр} = 8\,МГц, y_{mE} = 35\,км, y_m = 120\,км$, z_{mE} = 150 *км*, z_m = 320 *км*. Выбирались три дистанции для передачи сигналов из основного источника на различных рабочих частотах: $x_к$ = 1765 *км* (f = 16*МГц*), $x_к$ = 1725 *км* (f = 14*МГц*) и $x_к$ = 1868 *км* (f = 18*МГц*). В качестве пробной была выбрана дистанция x_p = 1700 *км* (f = 15*МГц*). Величины неопределенности параметров канала на пробной дистанции были взяты: μ^2 = 0,0004, a = 10 *км*, V = 100 *м/с*. Для этих параметров расчеты флуктуационных характеристик пробного сигнала дают $\sigma_{fp}^2 = 0{,}04$ *Гц*^{2} (σ_{fp} = 0,2*Гц*), $\sigma_{\varphi p}^2 = (90)^2$ (среднеквадратичное отклонение фазового пути $\sigma_{\Phi p} = (\sigma_{\varphi p} c) / (2\pi f) = 286$ *м*), $\sigma_{\Delta tp}^2 = 2{,}04$ *мкс*^{2} (среднеквадратичное отклонение группового пути $\sigma_{\Delta Lp} = c\sigma_{\Delta tp} = 428$ *м*). Найденные величины дисперсий $\sigma_{\varphi p}^2$, $\sigma_{\Delta tp}^2$, σ_{fp}^2 пробного сигнала и вычисленные с помощью системы (4) коэффициенты J_1, J_2, J_3, J_4, G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6 были использованы в (3) для расчета возможных флуктуаций траекторных характеристик основных сигналов на заданных дистанциях. Результаты расчетов статистических характеристик сигналов на рассмотренных трассах представлены в табл. 2. Анализ показал, что возможные среднеквадратичные отклонения доплеровского смещения частоты, направления прихода, групповой и фазовой задержки сигналов в информационном канале с заданными корреляционными свойствами неопределенности параметров соответствуют общепринятым представлениям статистической радиофизики [6, с. 113].

Таблица 1

Ожидаемые флуктуации характеристик сигнала в канале с просвечиванием

$z_к$ (*км*)	$x_к$(*км*)	σ_α(*гр.*)	σ_β(*гр.*)	$\sigma_{\Delta L}$(*м*)	σ_Φ(*м*)	σ_f (*Гц*)
1701	3106	0,041	0,039	37,5	28	0,037
1314	3020	0,063	0,051	43	32	0,043
1600	3300	0,058	0,047	40,8	30,5	0,0409

Таблица 2

Ожидаемые флуктуации характеристик сигналов в канале с отражением

f (*МГц*)	$x_к$(*км*)	σ_α(*гр.*)	σ_β(*гр.*)	σ_f (*Гц*)	σ_Φ(*м*)	$\sigma_{\Delta L}$(*м*)
14	1725	0,19	0,18	0,12	217	329
16	1765	0,23	0,22	0,16	270	483
18	1868	0,31	0,27	0,24	363	567

Заключение

Развит метод быстрой оценки возможных статистических моментов траекторных характеристик сигналов в информационном канале с неопределенностью параметров по данным наблюдений флуктуационных характеристик сигнала, излученного из пробного источника. Для трехмерного канала получены алгебраические уравнения связи дисперсий доплеровского смещения частоты, направления прихода, групповой и фазовой задержек основных и пробного сигналов. Интегральные коэффициенты этих уравнений определены в результате решения краевых стохастических задач с условиями Дирихле для основных и пробного источников. Интегралы для коэффициентов сведены к системе линейных дифференциальных уравнений первого порядка с начальными условиями Коши. В качестве модели неопределенности параметров канала использована пространственно-временная корреляционная функция, учитывающая пространственную динамику диэлектрической проницаемости регулярного канала. Для описания временных флуктуаций параметров диэлектрической проницаемости использовано приближение вмороженного переноса. Развитый метод диагностики позволяет проводить экспресс-оценку возможных флуктуаций сигналов в стохастическом информационном канале как в режиме просвечивания, так и в условиях отражения. Для практической реализации метода оперативной диагностики ожидаемых флуктуаций характеристик сигналов в условиях неопределенности параметров канала связи достаточно иметь модель диэлектрической проницаемости регулярного канала.

Список литературы

1. Долуханов М.П. Оптимальные методы передачи сигналов по линиям радиосвязи. 2-е изд. URSS. 2021. 176 с.

2. Липкин И.А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования. М.: Вузовская книга, 2017. 214 с.

3. Агеева Е.Т., Афанасьев Н.Т., Багинов А.В., Ким Д.Б., Танаев А.Б., Чудаев С.О. Диагностика состояния информационного канала по статистическим траекторным характеристикам реперного сигнала // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 5. С. 9–14.

4. Kravtsov Yu.A., Orlov Yu.I. Geometrical Optics of Inhomogeneous Medium. Berlin: Springer-Verlag, 1990. 312 p.

5. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. 6-е изд. URSS. 2017. 416 с.

6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. Ч. 2. М.: Мир, 1981. 320 с.

7. Агеева Е.Т., Афанасьев Н.Т., Ким Д.Б., Чудаев С.О. Оперативные алгоритмы расчета характеристик лучевых полей в стохастических неоднородных средах // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 2. С. 9–14.