СТАТЬИ

УДК 519.6:004

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО КАНАЛА ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ТРАЕКТОРНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ РЕПЕРНОГО СИГНАЛА

[1]Агеева Е.Т., [2]Афанасьев Н.Т., [1]Багинов А.В., [1]Ким Д.Б., [2]Танаев А.Б., [2]Чудаев С.О.

[1]ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», Братск;

[2]ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», Иркутск, e-mail: spacemaklay@gmail.com

Рассмотрены вопросы диагностики состояния канала передачи информации между корреспондентами. На основе ранее предложенной нами схемы численно-аналитической алгоритмизации статистических расчетов разработана оперативная методика оценки ожидаемых характеристик сигнала, прошедшего возмущенный информационный канал. Для реализации методики в качестве входных параметров используются данные измерений статистических моментов характеристик пробного сигнала на неспециализированной реперной трассе, подобной основной. С использованием лучевого приближения и метода возмущений для реперной трассы получены функциональные соотношения, связывающие дисперсии флуктуаций фазы, групповой задержки и доплеровского сдвига частоты пробного сигнала с параметрами хаотических неоднородностей канала. В качестве модели средней диэлектрической проницаемости канала используется произвольный аналитический высотный профиль. Модель хаотических возмущений канала характеризуется пространственно-временным корреляционным эллипсоидом. Временные флуктуации среды учтены в рамках гипотезы о замороженном переносе. Статистическая пространственная неоднородность случайного поля неоднородностей задана функцией, связанной со средней диэлектрической проницаемостью, и учитывает изменения параметров неоднородностей в зависимости от пути распространения сигнала в информационном канале. Выполнено обращение полученных функциональных соотношений для статистических траекторных моментов сигнала на реперной трассе для модели эффективного корреляционного эллипсоида с ограниченным числом параметров. Восстановленные параметры эллипсоида используются в аналитических формулах для расчета ожидаемых траекторных моментов сигнала на заданной трассе. Получены приближенные аналитические формулы явной связи статистических траекторных характеристик сигналов на заданной и реперной трассах.

Ключевые слова: диагностика, сигнал, информационный канал, флуктуации, статистические моменты, алгоритмы, численные и аналитические методы

DIAGNOSTICS OF THE STATE OF THE INFORMATION CHANNEL USING THE STATISTICAL TRAJECTORY CHARACTERISTICS OF THE REFERENCE SIGNAL

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

[1]Bratsk State University, Bratsk;

[2]Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: spacemaklay@gmail.com

The diagnosis issuesof the information transfer channel’s condition between correspondents were considered. We developed an operational methodology for assessing the expected characteristics of a signal transmitted through a perturbed information channel that is based on the previously proposed scheme of numerical analytical algorithmization of statistical calculations. The measurement data of the statistical moments of the probe signal characteristics on unspecialized reference track similar to the main one are used as input parameters for implement of the methodology.Using the ray approximation and the perturbation method for the reference path, the functional relations that connect the variances of phase fluctuations, group delay and Doppler frequency shift of the probe signal with the parameters of the channel’s chaotic irregularitiesare obtained.An arbitrary analytical altitude profile is used as a model of the average dielectric constant of the channel. The model of chaotic channel disturbances is characterized by a spatio-temporal correlation ellipsoid. Temporary fluctuations of the medium are taken into account in the framework of the frozen turbulence hypothesis.The statistical spatial heterogeneity of a random field of inhomogeneities is given by a function associated with the average dielectric constant, and takes into account changes in the parameters of the irregularities depending on the signal propagation path in the information channel. The obtained functional relations are transformed for the statistical trajectory moments of the signal on the reference track for the model of an effective correlation ellipsoid with a limited number of parameters.The restored ellipsoid parameters are used in analytical formulas to calculate the expected trajectory moments of the signal on given path. Approximate analytical formulas are obtained for the explicit connection of the signals’ statistical trajectory characteristics on a given and reference paths.

Keywords: diagnostics, signal, information channel, fluctuations, statistical moments, algorithms, numerical and analytical methods

Теория передачи сигналов в стохастическом информационном канале получила интенсивное развитие благодаря разработке новых аналитических методов расчета случайных волновых полей [1]. Что касается прогнозирования характеристик сигналов в реальных каналах, то на данном пути возникает ряд проблем [2]. Прежде всего, это связано с тем, что при решении прикладных задач параметры стохастической структуры канала зачастую неизвестны, либо известны с малой долей вероятности. В этих условиях надежный расчет ожидаемых статистических характеристик сигналов при связи между корреспондентами затруднителен. Одним из вариантов решения данной проблемы является предварительное определение параметров стохастической структуры канала по характеристикам принятого пробного сигнала на некоторой реперной трассе, подобной по своим свойствам заданной трассе. Для решения обратной задачи на реперной трассе вначале необходимо получить функциональные соотношения, связывающие характеристики пробного сигнала и параметры случайных неоднородностей канала. Несмотря на то, что эти соотношения достаточно сложны, решение обратной задачи здесь возможно за счет упрощения модели неоднородной структуры канала. В данном направлении был получен ряд важных результатов, благодаря описанию поля случайных неоднородностей с помощью многопараметрической модели гауссова корреляционного эллипсоида [3]. Однако определение всех параметров эллипсоида требует большого числа измеряемых статистических характеристик сигнала и в общем случае неоднозначно.

Обратная задача на реперной трассе решается в настоящей работе для модели эффективного корреляционного эллипсоида с малым числом параметров, характеризующей более общие свойства стохастической структуры среды канала и допускающей простое обращение функциональных соотношений между характеристиками реперного сигнала и параметрами случайного поля неоднородностей. Обобщенные параметры поля неоднородностей, восстановленные таким образом, представляют и самостоятельный интерес, поскольку они содержат интегральную информацию о статистической изменчивости канала. Найденные параметры эллипсоида, выраженные через характеристики принятого реперного сигнала, в дальнейшем используются в качестве входных параметров в алгоритме расчета статистических характеристик основного сигнала на заданной трассе. Рассмотрена возможность непосредственного использования параметров реперного сигнала для расчета ожидаемых характеристик основного сигнала в пункте назначения.

Цель работы заключается в создании методики оценки ожидаемых статистических траекторных характеристик сигнала в информационном канале по данным измерений траекторных моментов пробного сигнала на реперной трассе.

Основные теоретические соотношения

Для надежной и качественной передачи информации корреспонденту, находящемуся на заданном расстоянии от источника, необходимо знать ожидаемые флуктуации характеристик принятого сигнала в пункте назначения. Среди измеряемых характеристик большое значение имеют статистические моменты фазы, групповой задержки и доплеровского смещения частоты сигнала. Наиболее просто эти характеристики можно рассчитать в приближении геометрической оптики [4]. Очевидно, что для расчета флуктуаций характеристик сигнала необходимо знать параметры и свойства случайно-неоднородной среды канала, соединяющего корреспондентов.

Пусть $\varepsilon(x, z, \tau)$ – пространственно-временная случайная функция диэлектрической проницаемости, описывающая возмущенную среду канала. В лучевом приближении для совместного расчета фазы, групповой задержки и доплеровского сдвига частоты сигнала соответственно имеем стохастические интегралы по траектории:

$$\varphi = \frac{\omega}{c}\int^{S}\sqrt{\varepsilon(x,z,\tau)}\,dS\,,\ t = \int^{S}\frac{dS}{c\sqrt{\varepsilon(x,z,\tau)}}\,,$$

$$\Delta\omega = -\frac{\omega}{c}\frac{\partial}{\partial\tau}\int^{S}\sqrt{\varepsilon(x,z,\tau)}\,dS\,, \qquad (1)$$

где τ – время, ω – циклическая частота, c – скорость света, dS – элемент дуги траектории, соединяющей корреспондентов и являющейся решением системы уравнений

$$\frac{dx}{dt} = c\sqrt{\varepsilon}\cdot\sin\beta\,,\ \frac{dz}{dt} = c\sqrt{\varepsilon}\cdot\cos\beta\,,$$

$$\frac{d\beta}{dt} = c\frac{\partial\sqrt{\varepsilon}}{\partial x}\cdot\cos\beta - c\frac{\partial\sqrt{\varepsilon}}{\partial z}\cdot\sin\beta\,, \qquad (2)$$

где x, z – текущие координаты луча, β – угол рефракции, dt – элемент групповой задержки.

Расчет флуктуаций траекторных характеристик проведем в приближении метода возмущений [5]. Для функций, входящих в уравнения (1), (2), используем разложения: $\varepsilon = \varepsilon_0(z,\tau) + \varepsilon_1(x,z,\tau)$, $\varphi = \varphi_0 + \varphi_1$, $t = t_0 + t_1$, $\Delta\omega = \Delta\omega_0 + \Delta\omega_1$, $S = S_0 + S_1$, $x = x_0 + x_1$, $z = z_0 + z_1$, $\beta = \beta_0 + \beta_1$. Подставляя эти разложения в (1), (2) и проводя линеаризацию при условии $|\varepsilon_1| << \varepsilon_0$, в нулевом приближении имеем

$$\varphi_0 = \omega\int_0^{t_к}\varepsilon_0(z_0,\tau)dt_0, \Delta\omega_0 = -\omega\frac{\partial}{\partial\tau}\int_0^{t_к}\varepsilon_0(z_0,\tau)dt_0\,, \qquad (3)$$

$$\frac{dx_0}{dt}=c\sqrt{\varepsilon_0}\sin\beta_0,\frac{dz_0}{dt}=c\sqrt{\varepsilon_0}\cos\beta_0,\frac{d\beta_0}{dt}=-c\frac{\partial\sqrt{\varepsilon_0}}{\partial z_0}\sin\beta_0 \tag{4}$$

соответственно, для поправок первого порядка малости:

$$\varphi_1=\frac{\omega}{2}\int_0^{t_\text{к}}\left(z_1\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z_0}+\frac{2\sqrt{\varepsilon_0}\cos\beta_0}{c}\frac{dz_1}{dt}+\varepsilon_1\right)dt_0, \tag{5}$$

$$t_1=-\int_0^{t_\text{к}}\frac{\sin^2\beta_0}{\varepsilon_0}\cdot\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z}z_1(t_0)dt_0-\frac{1}{2}\int_0^{t_\text{к}}\frac{\varepsilon_{10}(t)}{\varepsilon_0(t_0)}dt_0, \tag{6}$$

$$\Delta\omega_1=-\frac{\omega}{2}\int_0^{t_\text{к}}\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial\tau}dt_0+\frac{\omega}{4}\int_0^{t_\text{к}}\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial\tau}dt_0, \tag{7}$$

$$\frac{dz_1}{dt}=-c\sqrt{\varepsilon_0}\beta_1\sin\beta_0+c\cos\beta_0\frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}}\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z_0}z_1+c\cos\beta_0\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_0}}, \tag{8}$$

$$\frac{dx_1}{dt}=c\sqrt{\varepsilon_0}\beta_1\cdot\cos\beta_0+c\sin\beta_0\frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}}\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z_0}z_1+c\sin\beta_0\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_0}}, \tag{9}$$

$$\frac{d\beta_1}{dt}=-c\frac{\partial\sqrt{\varepsilon_0}}{\partial z_0}\beta_1\cos\beta_0-c\cdot\sin\beta_0\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}}\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z_0}\right)z_1-$$
$$-c\cdot\sin\beta_0\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_0}}\right)+c\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_0}}\right)\cos\beta_0, \tag{10}$$

где x_0, z_0, β_0, φ_0, t_0, $\Delta\omega_0$, x_1, z_1, β_1, φ_1, t_1, $\Delta\omega_1$ – средние и флуктуационные характеристики сигнала; $t_\text{к}$ – групповая задержка сигнала в пункте назначения $x_\text{к}$, функция ε_0 – описывает среднюю диэлектрическую проницаемость канала, ε_1 – случайные возмущения. Важно отметить, что флуктуация текущей траектории $z_1(t_0)$, входящая в интегралы (5), (6), должна удовлетворять граничным условиям: $z_1(0) = z_1(t_\text{к}) = 0$.

Для расчета флуктуации $z_1(t_0)$ используем выражение, полученное в результате решения краевой траекторной задачи [6, 7]:

$$z_1(t_0)=R_1(t_0)\cdot\int_{t_\text{к}}^{t_0}\frac{R_2(t)\cdot B_1}{c\cdot\sin\beta_\text{н}\cdot R_1(t_\text{к})}dt-R_2(t_0)\cdot\int_0^{t_0}\frac{R_1(t)\cdot B_1}{c\cdot\sin\beta_\text{н}\cdot R_1(t_\text{к})}dt, \tag{11}$$

где $\beta_\text{н}$ – угол входа луча в канал $B_1=\frac{c^2}{2}\cdot\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial z_0}$, $R_1=\frac{\partial z_0}{\partial\beta_\text{н}}(t)$, $R_2=\frac{\partial z_0}{\partial\beta_\text{н}}(t_\text{к}-t)$. Подставляя (11) в (5), (6) и считая $\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial\tau}<<\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial\tau}$, после аналитических преобразований, имеем

$$\varphi_1=\frac{\omega}{2}\int_0^{t_\text{к}}\varepsilon_1\,dt_0,\ t_1=\int_0^{t_\text{к}}\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial z_0}(t_0)F(t_0)dt_0-\frac{1}{2}\int_0^{t_\text{к}}\frac{\varepsilon_1(t_0)}{\varepsilon_0(t_0)}dt_0,\ \Delta\omega_1=-\frac{\omega}{2}\int_0^{t_\text{к}}\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial\tau}dt_0, \tag{12}$$

где $F(t)=F_1(t)+F_2(t)$, $F_1(t)=\frac{c}{2\sin\beta_\text{н}R_1(t_\text{к})}R_2(t)P_1(t)$, $F_2(t)=\frac{c}{2\sin\beta_\text{н}R_1(t_\text{к})}R_1(t)P_2(t)$,

$$P_1(t)=\int_0^{t}\frac{\sin^2\beta_0}{\varepsilon_0}\cdot\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z}R_1(t)dt,\ P_2(t)=\int_t^{t_\text{к}}\frac{\sin^2\beta_0}{\varepsilon_0}\cdot\frac{\partial\varepsilon_0}{\partial z}R_2(t)\,dt.$$

На основе (12) составим статистические моменты сигнала, принятого в пункте $x_к$:

$$\sigma_\varphi^2 = \langle \varphi_1^2 \rangle = \left\langle \frac{\omega^2}{4} \int_0^{t_к} \varepsilon_1(z_1(t_1), x_1(t_1))\, dt_1 \cdot \int_0^{t_к} \varepsilon_1(z_2(t_2), x_2(t_2)) dt_2 \right\rangle =$$

$$= \frac{\omega^2}{4} \int_0^{t_к}\int_0^{t_к} \langle \varepsilon_1(z_1(t_1), x_1(t_1))\ \varepsilon_1(z_2(t_2), x_2(t_2)) \rangle\, dt_1 dt_2 = \frac{\omega^2}{4} \int_0^{t_к}\int_0^{t_к} N(t_1, t_2)\, dt_1 dt_2, \tag{13}$$

$$\sigma_{\Delta t}^2 = \langle t_1^2 \rangle = \left\langle \left(\int_0^{t_к} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial z_0}(t_1) F(t_1) dt_1 - \frac{1}{2}\int_0^{t_к} \frac{\varepsilon_1(t_1)}{\varepsilon_0(t_1)} dt_1 \right) \cdot \left(\int_0^{t_к} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial z_0}(t_2) F(t_2) dt_2 - \frac{1}{2}\int_0^{t_к} \frac{\varepsilon_1(t_2)}{\varepsilon_0(t_2)} dt_2 \right) \right\rangle =$$

$$= \int_0^{t_к}\int_0^{t_к} \left\langle \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial z_0}(t_1) \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial z_0}(t_2) \right\rangle F(t_1) F(t_2) dt_1 dt_2 - \frac{1}{2}\int_0^{t_к}\int_0^{t_к} \left\langle \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial z_0}(t_1) \varepsilon_1(t_2) \right\rangle \frac{F(t_1)}{\varepsilon_0(t_2)} dt_1 dt_2 -$$

$$- \frac{1}{2}\int_0^{t_к}\int_0^{t_к} \left\langle \varepsilon_1(t_1) \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial z_0}(t_2) \right\rangle \frac{F(t_2)}{\varepsilon_0(t_1)} dt_1 dt_2 + \frac{1}{4}\int_0^{t_к}\int_0^{t_к} \langle \varepsilon_1(t_1) \varepsilon_1(t_2) \rangle \frac{1}{\varepsilon_0(t_1)\varepsilon_0(t_2)} dt_1 dt_2 =$$

$$= \int_0^{t_к}\int_0^{t_к} \frac{\partial^2 N}{\partial z_{01} \partial z_{02}} F(t_1) F(t_2) dt_1 dt_2 - \frac{1}{2}\int_0^{t_к}\int_0^{t_к} \frac{\partial N}{\partial z_{01}} \frac{F(t_1)}{\varepsilon_0(t_2)} dt_1 dt_2 -$$

$$- \frac{1}{2}\int_0^{t_к}\int_0^{t_к} \frac{\partial N}{\partial z_{02}} \frac{F(t_2)}{\varepsilon_0(t_1)} dt_1 dt_2 + \frac{1}{4}\int_0^{t_к}\int_0^{t_к} \frac{N}{\varepsilon_0(t_1)\varepsilon_0(t_2)} dt_1 dt_2, \tag{14}$$

$$\sigma_\omega^2 = \langle \Delta\omega_1^2 \rangle = \left\langle \frac{\omega}{2} \int_0^{t_к} \frac{\partial \varepsilon_1(\tau_1)}{\partial \tau_1} dt_1\, \frac{\omega}{2} \int_0^{t_к} \frac{\partial \varepsilon_1(x_2)}{\partial \tau_2} dt_2 \right\rangle = \frac{\omega^2}{4} \int_0^{t_к}\int_0^{t_к} \frac{\partial^2 N}{\partial \tau_1 \partial \tau_2} dt_1 dt_2, \tag{15}$$

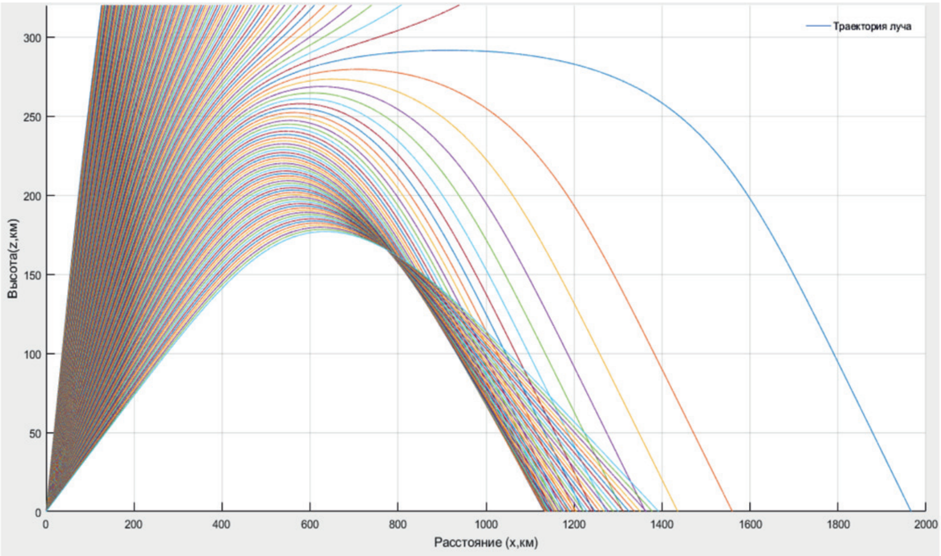
где $\langle\ \rangle$ – знак усреднения по ансамблю неоднородностей канала, $N(x_1, z_1, \tau_1, x_2, z_2, \tau_2) = \langle \varepsilon_1(x_1, z_1, \tau_1) \varepsilon_1(x_2, z_2, \tau_2) \rangle$ – функция корреляции флуктуаций диэлектрической проницаемости. Рассмотрим условия квазиоднородного случайного поля неоднородностей канала, когда $N = N_1 N_0$. Здесь N_0 – однородная часть корреляционной функции. Функция N_1 характеризует статистическую неоднородность случайного поля неоднородностей и учитывает непостоянство параметров неоднородностей в канале. Далее в качестве функции N_1 рассмотрим зависимость $N_1 = \mu^2 (1 - \varepsilon_0)^2$, где μ^2 – интенсивность неоднородностей канала. Движение неоднородностей учтем в рамках гипотезы о переносе замороженной турбулентности [8]: $N_0 = \exp\left(-\frac{1}{a^2}\left[(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2 - V(\tau_1 - \tau_2))^2 \right] \right)$, где a – масштаб возмущений, V – скорость движения поля неоднородностей. Считая, что функция N_1 изменяется более медленно, чем N_0, интегралы (13)–(15) можно преобразовать, используя метод метод суммарно-разностного интегрирования [8]:

$$\sigma_\varphi^2 = \int_0^{t_к} \frac{\sqrt{\pi}\omega^2 a \mu^2 (1-\varepsilon_0)^2}{4c\sqrt{\varepsilon_0}} dt_0,\ \sigma_\omega^2 = \int_0^{t_к} \frac{\omega^2 \sqrt{\pi}\, V^2 \mu^2 (1-\varepsilon_0)^2}{2a} \frac{\sin^2 \beta_0}{c\sqrt{\varepsilon_0}} dt_0, \tag{16}$$

$$\sigma_{\Delta t}^2 = \int_0^{t_k} [F(t)]^2 \frac{\mu^2 (1-\varepsilon_0)^2}{\sqrt{\varepsilon_0^{\,3}}} 2\sin^2 \beta_н \frac{\sqrt{\pi}}{ac} dt + \int_0^{t_k} \frac{\sqrt{\pi} a}{4c} \frac{\mu^2 (1-\varepsilon_0)^2}{\sqrt{\varepsilon_0^{\,5}}} dt. \tag{17}$$

Диагностика состояния канала

Для расчета ожидаемых траекторных моментов сигнала по формулам (16), (17) необходимы параметры корреляционного эллипсоида μ^2, V, a, которые в общем случае неизвестны, но их можно определить, решая обратную задачу на некоторой подобной (реперной) трассе. Источник реперного сигнала может находиться на некотором расстоянии от пункта назначения основного сигнала, а пункт приема реперного сигнала совпадает с пунктом излучения основного сигнала. На рис. 1 приведены возможные реперные трассы для основной трассы, длиной $x_к = 1200$ км. Расчеты выполнены в однослойном канале, средняя диэлектрическая проницаемость которого задана функцией: $\varepsilon_0 = 1 - \frac{f_{кр}^2}{f^2}\exp\left(-\left(\frac{z - z_m}{y_m}\right)^2\right)$, где z_m, y_m, $f_{кр}$ – высота минимума, полутолщина и критическая частота слоя. Параметры модели составляли: $z_m = 300$ км, $y_m = 150$ км, $f_{кр} = 7$ МГц. Рабочая частота $f = 12$ МГц.



Возможные реперные трассы в диэлектрическом информационном канале для дистанции между корреспондентами $x_к = 1200$ км

Для определения параметров корреляционного эллипсоида используем вышеприведенные аналитические расчеты. В частности, для дисперсий траекторных характеристик сигнала на реперной трассе x_p имеем

$$\sigma_{\varphi p}^2 = \int_0^{t_p} \frac{\sqrt{\pi}\omega^2 a\mu^2(1-\varepsilon_0)^2}{4c\sqrt{\varepsilon_0}} dt_0, \quad \sigma_{\omega p}^2 = \int_0^{t_p} \frac{\omega^2\sqrt{\pi}\, V^2\mu^2(1-\varepsilon_0)^2}{2a} \frac{\sin^2\beta_0}{c\sqrt{\varepsilon_0}} dt_0, \qquad (18)$$

$$\sigma_{\Delta tp}^2 = \int_0^{t_p} \left[F(t_0)\right]^2 \frac{\mu^2(1-\varepsilon_0)^2}{\sqrt{\varepsilon_0^{\,3}}} 2\sin^2\beta_p \frac{\sqrt{\pi}}{ac} dt_0 + \int_0^{t_p} \frac{\sqrt{\pi}a}{4c}\cdot\frac{\mu^2(1-\varepsilon_0)^2}{\sqrt{\varepsilon_0^{\,5}}} dt_0 . \qquad (19)$$

где β_p – угол входа реперного сигнала в канал. Решая уравнения (18), (19) относительно неизвестных параметров неоднородностей, имеем

$$\mu^2 = \sqrt{\frac{J_1\sigma_{\Delta tp}^2 - J_3\sigma_{\varphi p}^2}{J_2 J_1^2}}, \quad a = \frac{\sqrt{J_2\sigma_{\varphi p}^2}}{\sqrt{J_1\sigma_{\Delta tp}^2 - J_3\sigma_{\varphi p}^2}}, \quad V = \sqrt{\frac{\sigma_{\omega p}^2 J_1 J_2}{J_4(J_1\sigma_{\Delta tp}^2 - J_3\sigma_{\varphi p}^2)}}, \qquad (20)$$

где

$$J_1 = \frac{\sqrt{\pi}\omega^2}{4c}\int_0^{t_p} \frac{(1-\varepsilon_0)^2 dt_0}{\sqrt{\varepsilon_0}}, \quad J_2 = \frac{2\sin^2\beta_p\sqrt{\pi}}{c}\int_0^{t_p} \frac{(1-\varepsilon_0)^2 F_p^2 dt_0}{\sqrt{\varepsilon_0^3}}, \qquad (21)$$

$$J_3 = \frac{\sqrt{\pi}}{4c}\int_0^{t_p} \frac{(1-\varepsilon_0)^2 dt_0}{\sqrt{\varepsilon_0^5}}, \quad J_4 = \frac{\omega^2\sqrt{\pi}}{2c}\int_0^{t_p} \frac{\sin^2\beta_0(1-\varepsilon_0)^2 dt_0}{\sqrt{\varepsilon_0}}. \qquad (22)$$

Подставляя (20) в (16), (17) и проводя аналитические преобразования, имеем

$$\sigma_\varphi^2 = \frac{G_1}{J_1}\sigma_{\varphi p}^2,\ \sigma_\omega^2 = \frac{G_4}{J_4}\sigma_{\omega p}^2,$$

$$\sigma_{\Delta t}^2 = \frac{G_2}{J_2}\sigma_{\Delta tp}^2 + \sigma_{\varphi p}^2\left(\frac{G_3}{J_1} - \frac{G_2 J_3}{J_2 J_1}\right), \quad (23)$$

где

$$G_1 = \frac{\sqrt{\pi}\omega^2}{4c}\int_0^{t_к}\frac{(1-\varepsilon_0)^2\,dt_0}{\sqrt{\varepsilon_0}},$$

$$G_2 = \frac{2\sin^2\beta_n\sqrt{\pi}}{c}\int_0^{t_к}\frac{(1-\varepsilon_0)^2 F^2\,dt_0}{\sqrt{\varepsilon_0^3}}, \quad (24)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{\pi}}{4c}\int_0^{t_к}\frac{(1-\varepsilon_0)^2\,dt_0}{\sqrt{\varepsilon_0^5}},$$

$$G_4 = \frac{\omega^2\sqrt{\pi}}{2c}\int_0^{t_к}\frac{\sin^2\beta_0(1-\varepsilon_0)^2\,dt_0}{\sqrt{\varepsilon_0}}. \quad (25)$$

Задавая средний высотный профиль диэлектрической проницаемости канала, формулы (23) можно использовать для оценки ожидаемых статистических траекторных характеристик сигнала на заданной трассе $x_к$ по данным измерений траекторных моментов на реперной трассе x_p. Из формул (21)–(25), в частности, имеем, что при малом отличии заданной и реперной трасс, когда $t_p \to t_к$, интегралы $G_1 \to J_1$, $G_2 \to J_2$, $G_3 \to J_3$, $G_4 \to J_4$, и соответственно дисперсии $\sigma_\varphi^2 \to \sigma_{\varphi p}^2$, $\sigma_\omega^2 \to \sigma_{\omega p}^2$, $\sigma_{\Delta t}^2 \to \sigma_{\Delta tp}^2$, что является следствием теоремы взаимности [9].

Заключение

На основе приближения геометрической оптики и метода возмущений получены функциональные соотношения, связывающие усредненные стохастические интегралы для основных траекторных характеристик реперного сигнала с параметрами корреляционной функции, описывающей статистически неоднородное случайное поле неоднородностей канала. Используемая модель пространственной зависимости неоднородной части корреляционной функции самосогласованна с изменением средней диэлектрической проницаемости канала и учитывает динамику степени возмущенности канала на трассах различной протяженности. При расчетах моментов траекторных характеристик учтены флуктуации траектории, возникающие при решении стохастической траекторной задачи с граничными условиями в пунктах излучения и приема реперного сигнала. Полученные функциональные соотношения для моментов траекторных характеристик на реперной трассе решены относительно конечного числа неизвестных параметров эффективного корреляционного эллипсоида при известных измеренных дисперсиях фазы, групповой задержки и доплеровского сдвига частоты принятого реперного сигнала в пункте излучения основного сигнала. Разработана оперативная методика оценки ожидаемых статистических характеристик основного сигнала в возмущенном информационном канале по известным параметрам хаотических неоднородностей канала, выраженным через измеренные дисперсии основных траекторных характеристик пробного сигнала на реперной трассе.

Список литературы

1. Сабельфельд К., Курбанмурадов О. Случайные поля и стохастические дифференциальные уравнения. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 264 с.

2. Благовещенский Д.В. Короткие волны в аномальных радиоканалах: Эксперимент, моделирование. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 422 с.

3. Гусев В.Д., Овчинникова Н.П. Модельное определение объемных характеристик неоднородностей ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1980. Т. 20. № 4. С. 626–631.

4. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. Линейные и нелинейные волны. URSS. 2019. 448 с.

5. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. Изд. 6. М.: URSS, 2017. 416 с.

6. 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.

7. Агеева Е.Т., Афанасьев Н.Т., Ким Д.Б., Медведева О.И., Чудаев С.О. Численно-аналитическая алгоритмизация расчетов флуктуаций группового времени задержки в каналах передачи сигналов // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 5. С. 9–14.

8. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Статистическая радиофизика и оптика. Случайные колебания и волны в линейных системах. М.: Физматлит, 2010. 426 с.

9. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. Изд. 3. М.: URSS. 2015. 688 с.