

УДК 621.396.962.23:621.396.98

В.В. Печенин, К.А. Щербина, М.А. Вонсович, Ю.В. Съедина, В.Ф. Зионг

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОГЕРЕНТНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КАНАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛА

Приведены результаты теоретического анализа влияния условий распространения на амплитудные и фазовые искажения радиосигнала, передаваемого сигнала по приемному каналу связи. Предложена мера количественных искажений параметров, вносимых приземной атмосферой (тропосферой). Даны практические рекомендации по использованию полученных результатов в целях учета влияния искажений, обусловленных средой распространения на амплитуду и фазу передаваемого по радиоканалу информационного сигнала.

Ключевые слова: распространение, среда, канал, когерентный, связь, фаза, амплитуда, искажения, функция, волна.

Введение

В большинстве высокоточных радиотехнических измерительных системах применяют высокостабильные гармонические колебания с длинами волн, намного меньшими по сравнению с характерными масштабами неоднородной среды распространения. Распространение электромагнитного излучения в этих условиях сопровождается случайными искажениями амплитуды и фазы – основных переносчиков измерительной информации в системах с высокостабильным излучением.

Реальные условия распространения, а также наличие амплитудных шумов определяют ряд задач, связанных с оценкой соотношения между влиянием аддитивных шумов и искажениями при распространении, а также выбором меры количественной оценки искажений, вносимых средой распространения. Как показал обзор литературы [1–3], количественная оценка влияния канала распространения на параметры сигнала может быть успешно осуществлена методами спектрального когерентного анализа [4–6].

Целью выполненных в работе исследований является количественная оценка амплитудных и фазовых искажений радиосигнала, распространяющегося в приземной атмосфере методами когерентного спектрального анализа

Изложение основного материала

Пусть на вход канала распространения (в дальнейшем радиоканала) поступает сигнал в виде монохроматического колебания с неизменными во времени амплитудой E_0 , фазой φ_0 , частотой ω_0 , так что

$$x(t) = E_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1)$$

Сигнал (1) посредством излучающей антенны преобразуется в электромагнитное поле. Предположим, что среда между излучателем и приемником, сосредоточена в основном в дальней зоне, тогда излучение можно представить в виде сферической волны. Непосредственно искажениям подвергаются амплиту-

да и фаза поля сферической волны. В дальнейшем на приемном конце радиоканала происходит преобразование поля в радиосигнал с искаженными средой распространения амплитудой и фазой, при этом наблюдается воздействие собственных шумов приемного тракта $n(t)$ представляющих собой «белый» шум с известными статистическими характеристиками.

Влияние среды на амплитуду E_0 и фазу исходного процесса φ_0 сводится к их модуляции случайными модулирующими функциями, $\Psi_E(\vec{t}, \vec{\rho})$ и $\Psi_\varphi(\vec{t}, \vec{\rho})$. Выходной процесс $y(\vec{t}, \vec{\rho})$ запишем в виде

$$y(\vec{t}, \vec{\rho}) = E_0 [1 + m_A \Psi_E(\vec{t}, \vec{\rho})] \times \sin \{ \omega_0 t + \varphi_0 [1 + m_\varphi \Psi_\varphi(\vec{t}, \vec{\rho})] \}. \quad (2)$$

Здесь $m_A = \sigma_E / E_0$, $m_\varphi = \sigma_\varphi / \varphi_0$, σ_E , σ_φ – среднеквадратические отклонения амплитуды и фазы от их математических ожиданий E_0 и φ_0 ; $\vec{\rho}$ – радиус-вектор разности приемной и передающей антенн.

В частном случае, когда излучающая апертура находится в начале координат, а приемная имеет одну координату (вдоль оси X), то $\vec{\rho} = L$.

Если среду распространения считать статистически однородной, то функции $\Psi_E(\vec{t}, \vec{\rho})$ и $\Psi_\varphi(\vec{t}, \vec{\rho})$ зависят только от $\vec{\rho}$ или от длины радиоканала и их поведение однозначно связано с поведением пространственных фильтрующих функций амплитуды (или логарифма амплитуды) $F_x(x)$ и фазы $F_\varphi(x)$ [3].

Фильтрующая функция логарифма амплитуды $F_x(x)$ и фильтрующая функция фазы $F_\varphi(x)$ как пространственные характеристики определяют пространственные спектральные выражения амплитуды и фазы электромагнитной волны, обусловленные параметрами среды, а именно: пространственной частотой $x = 2\pi / L_0$ флуктуаций показателя преломления. Сама пространственная частота x зави-

сит от размеров внешнего L_0 – масштаба неоднородностей и l_0 – внутреннего масштаба.

Для флуктуаций логарифма уровня χ фильтрующая функция $F_\chi(x)$, как следует из [3], определяется выражением

$$F_\chi(x) = 1 - \frac{\sin(x^2 L \setminus k)}{x^2 L \setminus k}, \quad (3)$$

а для флуктуаций фазы

$$F_\varphi(x) = 1 + \frac{\sin(x^2 L \setminus k)}{x^2 L \setminus k}. \quad (4)$$

Здесь $k = 2\pi/h$ – волновое число; h – длина волны излучения.

В большинстве случаев модулирующие функции $\Psi_\varphi(t, \rho)$ и $\Psi_E(t, \rho)$ зависят от времени, поскольку тропосферная турбулентность движется. Следовательно, более правдоподобным является статистическое описание радиоканала на основе частотных спектров и временных корреляционных функций.

Наиболее предпочтительны с точки зрения основ когерентного спектрального анализа энергетические частотные спектры флуктуаций уровня и фазы сигнала, прошедшего среду распространения.

Частотный спектр логарифма уровня $W_\chi(\omega)$ и фазы $W_\varphi(\omega)$ являются Фурье-образами от соответствующих корреляционных функций $B_\chi(L, \tau)$ и $B_\varphi(L, \tau)$. Используя результаты [4], приведем основное соотношение для вычисления спектров флуктуаций уровня и фазы

$$W_{\chi, \varphi}(\omega) = \frac{8\pi^2 k^2 L}{v_\perp} \int_0^\infty F_{\chi, \varphi}(x) \Phi_n(x) dx'; \quad (5)$$

$$x = x^2 + \omega^2 / v_\perp^2.$$

Здесь v_\perp – поперечная к трассе радиоканала скорость ветра; $\Phi_n(x)$ – пространственный спектр флуктуаций показателя преломления.

Аналитический расчет $W_\chi(\omega)$ или $W_\varphi(\omega)$, как следует из (5), требует знания $F_\chi(\omega)$ или $F_\varphi(\omega)$, а также $\Phi_n(x)$. При теоретическом анализе пользуются представлением $\Phi_n(x)$ в виде колмогоровского

$$\Phi_n(x) = 0.033 C_n^2 x^{-11/3}, \quad (6)$$

где C_n^2 – структурная характеристика показателя преломления. Подстановка (3), (4) и (6) в (5) $W_\chi(\omega)$ приводит к двум асимптотическим выражениям

$$W_\chi^0(\omega) = 2.765 \sigma_\chi^2 / \omega_\perp \text{ при } \omega \rightarrow 0;$$

$$W_\chi^\infty(\omega) = 7.13 \cdot \sigma_\chi^2 / \omega_\perp \cdot (\omega / \omega_\perp)^{-8/3} \text{ при } \omega \rightarrow \infty, \quad (7)$$

где $\sigma_\chi^2 = 0.307 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$; $\omega_\perp = v_\perp / (k/L)^{1/3}$.

Спектр флуктуаций фазы $W_\varphi(\omega)$ также определяется соотношением (5). Асимптотические выражения для спектра фазы имеют вид

$$W_\varphi^0 = 2W_\chi^0(\omega) \text{ при } \omega \rightarrow 0;$$

$$W_\varphi^\infty = W_\chi^\infty(\omega) \text{ при } \omega \rightarrow \infty. \quad (8)$$

Эти две асимптотики с законом спада $\omega^{-8/3}$ справедливы до тех пор, пока ω / v_\perp (5) находится в пределах $2\pi L_0$ и $2\pi l_0$. Для ω / ω_\perp верно:

$$\sqrt{\gamma L} / L_0 < \frac{\omega}{\omega_\perp} < \sqrt{\gamma L} / l_0. \quad (9)$$

Перейдем теперь непосредственно к когерентному спектральному анализу. Полученные выше результаты оказались необходимыми для преобразования радиоканала к форме, удобной для спектрального анализа. Из полученных результатов следует, что радиоканал представим в виде системы с одним входом. Входной процесс $x(t)$ преобразуется с помощью многомерного оператора $\bar{A}(\Psi_E, \Psi_\varphi)$ в совокупность процессов, амплитуды и фазы которых зависят от пространственных фильтрующих функций $F_\chi(x)$ и $F_\varphi(x)$. Непосредственно радиоканал представим в виде четырехполосника с амплитудно-частотной $H_\chi(\omega)$ или фазочастотной $H_\varphi(\omega)$ характеристиками. Для конкретного радиоканала вид частотной и фазовой характеристик однозначно связан с одной из пространственных модулирующих функций Ψ_E и Ψ_φ . Основное соотношение (5) и выражения (7) и (8) однозначно определяют вид $H_\chi(\omega)$ и $H_\varphi(\omega)$. Все существующие особенности когерентного анализа вытекают из свойств простейшей функции когерентности $\gamma_{xy}^2(\omega)$, называемой также квадратичной когерентностью, или амплитудно-квадратичной когерентностью.

Функция когерентности равна квадрату модуля нормированного взаимного спектра мощности между входом и выходом радиоканала

$$\gamma_{xy}^2(\omega) = |W_{xy}(\omega)|^2 / W_{xx}(\omega) W_{yy}(\omega). \quad (10)$$

Здесь индексом x обозначен входной процесс $x(t)$, подверженный воздействию оператора $\bar{A}(\Psi_E, \Psi_\varphi)$.

С учетом воздействия шумов $n_{\chi, \varphi}(t)$ на выходе канала и вида частотной характеристики $H_{\chi, \varphi}(t)$ можно получить

$$\gamma_{xy}^2(\omega, \chi) = \frac{|H_\chi(\omega)|^2 W_{xx}(\omega, E)}{W_{vv}(\omega, \chi) + W_{nn}(\omega, \chi)}; \quad (11)$$

$$\gamma_{xy}^2(\omega, \varphi) = \frac{|H_\varphi(\omega)|^2 W_{xx}(\omega, \varphi)}{W_{vv}(\omega, \varphi) + W_{nn}(\omega, \varphi)}, \quad (12)$$

где W_{vv} – спектр выходного процесса без шумов; W_{nn} – спектр шумов на выходе канала.

Из теории спектрального когерентного анализа следует, что $0 \leq \gamma_{xy}^2(\omega) \leq 1$. Следовательно, для ра-

диоканала, согласованного с частотными и фазовыми искажениями, $|H_{x,\varphi}(\omega)|^2=1$, а функции когерентности, определенные из (11) и (12), можно записать в виде

$$\gamma_{xy}^2(\omega, \chi) = \frac{1}{1+1/q_\chi^2} = \frac{1}{1+\mu_\chi^2}; \quad (13)$$

$$\gamma_{xy}^2(\omega, \varphi) = \frac{1}{1+1/q_\varphi^2} = \frac{1}{1+\mu_\varphi^2}, \quad (14)$$

где $q_\chi^2 = \frac{W_{vv}(\omega, \chi)}{W_{nn}(\omega, \chi)}$, $q_\varphi^2 = \frac{W_{vv}(\omega, \varphi)}{W_{nn}(\omega, \varphi)}$ – отношение

сигнал/шум по мощности соответственно для амплитудного $W_{nn}(\omega, \chi)$ и фазового $W_{nn}(\omega, \varphi)$ шумов.

Формулы (13) и (14) дают возможность учета влияния среды распространения, если заданы отношения сигнал/шум по амплитуде или допустимая величина фазовых флуктуаций, обусловленных процессами электрического характера (например, флуктуации фазы в передающем тракте, многократные преобразования в приемном тракте и т.п.).

Используя формулы (7) и (8) для расчета прогнозируемых значений $H_\varphi(\omega)$ и $H_\chi(\omega)$ при заданных характеристиках помехи, можно рассчитать конкретное значение функции когерентности по формулам (11), (12), решив тем самым вопрос о целесообразности учета влияния среды при ее модельном представлении.

Наконец, непосредственно измерив спектры флуктуаций амплитуды и фазы $W_\varphi(\omega)$ и $W_\chi(\omega)$, что не представляет больших трудностей, особенно при использовании высокоточных измерительных радиосистем, где, кроме этого, по калибровочным измерениям можно определить и спектры амплитудных и фазовых шумов, решив при этом вопрос о практической целесообразности учета влияния среды распространения в конкретных условиях эксплуатации системы.

Выводы

В статье приведены результаты теоретических исследований по использованию методов когерентного спектрального анализа для оценки степени искажений амплитуды и фазы гармонического сигнала, передаваемого по приземному каналу связи. Получены простые расчетные соотношения для оценки амплитудных и фазовых искажений в случае представления приземной тропосферы известными радиофизическими моделями распространения радиоволн в случайно-неоднородной среде. Приведены количественные расчеты спектров флуктуаций амплитуды и фазы вносимых средой распространения и формулы для расчета функций когерентности амплитудных и фазовых флуктуаций.

Список литературы

1. Арсеньян Т.И. Распространение электромагнитных волн в тропосфере [Текст] / Т.И. Арсеньян. – М.: Физ. фак-т. МГУ, 2004. – 147 с.
2. Яманов Д.Н. Основы электродинамики и распространения радиоволн [Текст] / Д.Н. Яманов. – М.: МГТУ ГА, 2005. – 100 с.
3. Арсеньян Т.И. Оптика случайно-неоднородных сред и проблемы распространения лазерного импульса в тропосфере [Текст] / Т.И. Арсеньян, П.В. Короленко. – М.: Физ. фак-т. МГУ, 2001. – 100 с.
4. Дженкинс Ж.М. Спектральный анализ и его применение [Текст] / М.Ж. Дженкинс, Д.Ж. Ваттс. – М.: Мир, 1972. – 453 с.
5. Кей С.М. Современные методы спектрального анализа [Текст] / С.М. Кей, С.Л. Марпл-мл. // ТИИЭР. – 1981. – Т. 69, № 11. – С. 5-52.
6. Исмару А. Распространение рассеивание волн в случайно-неоднородных средах [Текст] / А. Исмару. – М.: Мир Т.2, 1981. – 317 с.

Поступила в редколлегию 4.03.2016

Рецензент: д-р техн. наук, ст. научн. сотр. В.В. Павликов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КОГЕРЕНТНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ КАНАЛУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ НА ПАРАМЕТРИ СИГНАЛУ

В.В. Печенін, К.О. Щербина, М.А. Вонсович, Ю.В. С'єдіна, В.Ф. Зіонг

Наведено результати теоретичного аналізу впливу умов поширення на амплітудні і фазові спотворення радіосигналу, переданого сигналу по приймальному каналу зв'язку. Запропонована міра кількісних спотворень параметрів, внесених приземною атмосферою (тропосферою). Приведені практичні рекомендації щодо використання отриманих результатів з метою врахування впливу спотворень, зумовлених середовищем поширення, на амплітуду і фазу, передається по радіоканалу інформаційного сигналу.

Ключові слова: поширення, середовище, канал, когерентний зв'язок, фаза, амплітуда, спотворення, функція, хвиля.

USE OF COHERENT SPECTRUM ANALYSIS METHODS TO ASSESS INFLUENCE OF DISTRIBUTION CHANNEL ON SIGNAL PARAMETERS

V.V. Pechenin, K.A. Shcherbina, M.A. Vonsovich, J.V. Syedina, V.F. Ziong

The theoretical analysis results of propagation effects on the amplitude and phase distortions of radio receiver signal are cited. The ratio of numerical distortion parameters caused by the surface atmosphere (troposphere) is offered. The recommendations on practical application of the achieved results to help take into account the impact of the propagation medium distortions on amplitude and phase of the transmitted information radio signal are given.

Keywords: distribution, medium, channel, coherent, signal communication, phase, amplitude, distortion, function, wave.