






Влияние атмосферной турбулентности на спектральный состав радиосигнала

Д.С. Ключев¹ , А.Н. Волобуев² , К.А. Адыширин-Заде² ,
Т.А. Антипова² , Н.Н. Александрова² 

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара,
ул. Л. Толстого, 23

² Самарский государственный медицинский университет
443099, Россия, г. Самара,
ул. Чапаевская, 89

Аннотация – Обоснование. Показана необходимость исследования влияния атмосферной турбулентности на спектральные характеристики радиосигнала. **Цель.** Проведено изучение влияния атмосферной турбулентности на спектральную флуктуацию интенсивности радиосигнала и на смещение спектральных составляющих радиосигнала. **Методы.** Исследования проведены на основе анализа связи двухволновых и одноволновых корреляционных соотношений. На основе решения дифференциального уравнения для флуктуаций эйконала амплитуды электромагнитной волны и использования выведенного тригонометрического соотношения получена связь между двухволновым Фурье-спектром и одноволновыми спектрами. При этом использован единый источник воздействия турбулентности на радиосигнал в точке координаты распространения радиоволны путем введения новой переменной, равной среднему значению координат воздействия турбулентности. Для нахождения возникающего двойного интеграла одна из координат воздействия преобразована в угловую переменную. **Результаты.** Найдена зависимость относительного безразмерного среднего квадрата флуктуаций интегральной интенсивности радиосигнала от волнового числа турбулентных пульсаций атмосферы при различных смещениях спектральных длин волн радиосигнала. **Заключение.** Показано, что турбулентность мало искажает спектральную информационную сущность распространяющегося радиосигнала в различных диапазонах длин волн.

Ключевые слова – турбулентность атмосферы; радиосигнал; корреляционные соотношения; спектральная интенсивность; спектральное смещение.

Различие атмосферной рефракции для различных длин волн в спектре радиосигнала определяет влияние турбулентности на спектр радиосигнала. Основной вклад в флуктуации амплитуд радиоволн под действием турбулентных пульсаций, составляющих спектр радиосигнала, вносят верхняя тропосфера и нижняя стратосфера.

Влияние турбулентности приводит, во-первых, к изменению спектральной флуктуации интенсивности радиосигнала, а во-вторых, к изменению спектра радиосигнала за счет сдвига длин волн в спектре. Эти два процесса связаны между собой.

Рассмотрим средний квадрат флуктуаций интегральной (по спектру) интенсивности радиосигнала за счет турбулентности атмосферы:

$$\langle J^2 \rangle = \left\langle \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I'(\lambda) d\lambda \right\rangle^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \langle I'(\lambda) I'(\lambda') \rangle d\lambda d\lambda', \quad (1)$$

где $I'(\lambda)$ – флуктуации спектральной плотности интенсивности, принимаемой антенной, радиоволны; λ_1 и λ_2 – границы спектра радиоволны, угловые скобки означают процесс осреднения.

Будем считать, что в результате воздействия турбулентности на радиосигнал произошел сдвиг отдельной длины волны в спектре с величины λ до λ' .

Спектральную зависимость плотности интенсивности радиоволны в случае малых флуктуаций, рис. 1, примем в виде

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{2\chi'_\lambda} \approx I_0(\lambda) (1 + 2\chi'_\lambda), \quad (2)$$

где $I_0(\lambda)$ – предполагаемая спектральная плотность интенсивности радиоволны на границе тропосферы и стратосферы; $\chi'_\lambda(\lambda)$ – спектральные флуктуации амплитуды эйконала радиосигнала за счет турбулентности [1]. Коэффициент 2 использован, т. к. интенсивность радиосигнала (или модуль вектора Пойнтинга) пропорциональна квадрату напряженностей электрического и магнитного полей в электромагнитной волне.

Следовательно, спектральные флуктуации интенсивности радиосигнала за счет турбулентности атмосферы относительно границы стратосферы и тропосферы имеют вид

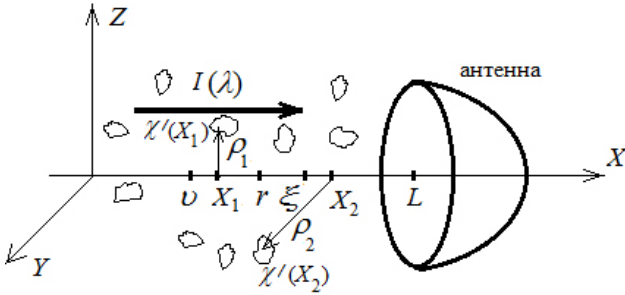


Рис. 1. К анализу пространственной двухточечной корреляционной функции флуктуаций эйконала радиосигнала в турбулентной атмосфере

Fig. 1. On the analysis of the spatial two-point correlation function of the eikonal fluctuations of a radio signal in a turbulent atmosphere

$$I'(\lambda) = I(\lambda) - I_0(\lambda) \approx 2I_0(\lambda)\chi'_\lambda. \quad (3)$$

Таким образом, формулу (1) для среднего квадрата флуктуаций интенсивности интегрального радиосигнала можно записать как

$$\begin{aligned} \langle J'^2 \rangle &= 4 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0(\lambda) I_0(\lambda') \langle \chi'_\lambda \chi'_{\lambda'} \rangle d\lambda d\lambda' = \\ &= 4 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0(\lambda) I_0(\lambda') B_{\chi\chi}(\lambda, \lambda') d\lambda d\lambda', \end{aligned} \quad (4)$$

где $B_{\chi\chi}(\lambda, \lambda') = \langle \chi'_\lambda(\lambda) \chi'_{\lambda'}(\lambda') \rangle$ – двухволновое корреляционное соотношение амплитудных пульсаций эйконала в спектре радиосигнала за счет турбулентности атмосферы [2].

Если имеется пространственное поле пульсаций эйконала радиосигнала за счет турбулентности $\chi'(\mathbf{X})$, рис. 1, то Фурье-интеграл пространственной двухточечной корреляционной функции $B_{\chi\chi} = \langle \chi'(X_1) \chi'(X_2) \rangle$ имеет вид [1]:

$$B_{\chi\chi} = \int e^{-i\mathbf{k}'\rho} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', X_1, X_2) d\mathbf{k}', \quad (5)$$

где \mathbf{k}' – волновой вектор флуктуаций эйконала электромагнитной волны за счет турбулентности; $\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$, ρ_1 и ρ_2 – радиусы векторы с началом в точках X_1 и X_2 на оси X в плоскостях (Y, Z) , модули которых вычисляются по формулам $\rho = \sqrt{Y^2 + Z^2}$, рис. 1; $F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', X_1, X_2)$ – двухточечный Фурье-спектр флуктуаций эйконала радиосигнала.

Решение дифференциального уравнения для флуктуаций эйконала амплитуды электромагнитной волны [1] записывается как

$$F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', X_1, X_2) = \frac{\mu}{4} B \zeta^2 k^2 \int_0^{X_1} \int_0^{X_2} \sin \frac{k^2(X_1 - \nu)}{2k} \times \quad (6)$$

$$\times \sin \frac{k^2(X_2 - \xi)}{2k} F_{nn}(\mathbf{k}', \nu, \xi) d\nu d\xi,$$

где ζ – волновое число турбулентных пульсаций; k – волновое число радиосигнала; ν и ξ – координаты на оси X источников воздействия турбулентности на электромагнитную волну, рис. 1; $F_{nn}(\mathbf{k}', \nu, \xi)$ – двухточечный Фурье-спектр флуктуаций показателя преломления за счет турбулентности; μ и $B = 4$ – постоянные величины.

В формуле (6) для сохранения размерностей физических величин уменьшена степенная зависимость спектральной функции $F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', X_1, X_2)$ от волнового числа турбулентных пульсаций до ζ^2 . Как будет показано в дальнейшем, это не влияет на конечный результат анализа.

На фронте волны при $X_1 = X_2 = L$, рис. 1, формула (6) для Фурье-спектра преобразуется в

$$\begin{aligned} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}') &= \mu \zeta^2 k^2 \int_0^L \int_0^L \sin \frac{k^2(L - \nu)}{2k} \times \\ &\times \sin \frac{k^2(L - \xi)}{2k} F_{nn}(\mathbf{k}', \nu, \xi) d\nu d\xi. \end{aligned} \quad (7)$$

где обозначено $F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', L, L) = F_{\chi\chi}(\mathbf{k}')$.

Фактически рассматривается единая точка наблюдения на оси X воздействия турбулентных пульсаций на электромагнитную волну.

Несложная модификация решения дифференциального уравнения для флуктуаций эйконала амплитуды электромагнитной волны [1] для двухволновой корреляционной функции $B_{\chi\chi}(\lambda, \lambda') = \langle \chi'_\lambda(\lambda) \chi'_{\lambda'}(\lambda') \rangle$ показывает, что Фурье спектр $F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \lambda, \lambda')$ должен быть записан в форме

$$\begin{aligned} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \lambda, \lambda') &= \mu \zeta^2 k_1 k_2 \int_0^L \int_0^L \sin \frac{k^2(L - \nu)}{2k_1} \times \\ &\times \sin \frac{k^2(L - \xi)}{2k_2} F_{nn}(\mathbf{k}', \nu, \xi) d\nu d\xi, \end{aligned} \quad (8)$$

где $k_1 = 2\pi/\lambda$ и $k_2 = 2\pi/\lambda'$ – волновые числа длин волн радиосигнала (исходной и сдвинутой за счет влияния турбулентности) на координатах воздействия турбулентности на радиосигнал ν и ξ .

При $X_1 = X_2 = L$ можно рассматривать единый источник воздействия турбулентности на радиосигнал в точке координаты X распространения радиоволны, т. е. ввести новую переменную $r = (\nu + \xi)/2$.

Следовательно, формулу (8) можно записать в виде

$$F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \lambda, \lambda') = \mu \zeta^2 k_1 k_2 \int_0^L \int_0^L \sin \frac{k'^2 (L-r)}{2k_1} \times \quad (9)$$

$$\times \sin \frac{k'^2 (L-r)}{2k_2} F_{nn}(\mathbf{k}', r) d\nu d\xi.$$

Кроме того, необходимо осуществить замену дифференциального элемента в двойном интеграле $d\nu d\xi$ по формуле [3]. Представим $\xi = L\varphi/2\pi$, где ξ меняется в пределах $(0, L)$ при изменении φ – угловой переменной в пределах $(0, 2\pi)$. Следовательно, $\nu = 2r - L\varphi/2\pi$. С помощью якобиана J дифференциальный элемент $d\nu d\xi$ преобразуется:

$$d\nu d\xi = |J| dr d\varphi = \begin{vmatrix} \frac{\partial \nu}{\partial r} & \frac{\partial \nu}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial \xi}{\partial r} & \frac{\partial \xi}{\partial \varphi} \end{vmatrix} dr d\varphi = \quad (10)$$

$$= \begin{vmatrix} 2 & -\frac{L}{2\pi} \\ 0 & \frac{L}{2\pi} \end{vmatrix} dr d\varphi = 2 \frac{L}{2\pi} dr d\varphi.$$

Таким образом, формула (9) сводится к одиночному интегралу по независимой переменной r :

$$F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \lambda, \lambda') = 2\mu \zeta^2 k_1 k_2 \frac{L}{2\pi} \int_0^{L/2} \int_0^{L/2} \sin \frac{k'^2 (L-r)}{2k_1} \times \quad (11)$$

$$\times \sin \frac{k'^2 (L-r)}{2k_2} F_{nn}(\mathbf{k}', r) dr d\varphi =$$

$$= 2\mu \zeta^2 k_1 k_2 L \int_0^L \sin \frac{k'^2 (L-r)}{2k_1} \times$$

$$\times \sin \frac{k'^2 (L-r)}{2k_2} F_{nn}(\mathbf{k}', r) dr.$$

Для вычисления интеграла (11) докажем тригонометрическое тождество в подынтегральном выражении:

$$\sin \frac{k'^2 (L-r)}{2k_1} \sin \frac{k'^2 (L-r)}{2k_2} = \quad (12)$$

$$= \sin^2 \frac{k'^2 (L-r)}{2\tilde{k}_1} - \sin^2 \frac{k'^2 (L-r)}{2\tilde{k}_2},$$

где $\tilde{k}_i = 2\pi/\tilde{\lambda}_i$, а величины $\tilde{\lambda}_1 = (\lambda + \lambda')/2$, а $\tilde{\lambda}_2 = (\lambda - \lambda')/2$ – полусмещение длины волны за счет влияния турбулентности.

Для доказательства (12) преобразуем по известным тригонометрическим тождествам правую часть формулы (12):

$$\sin^2 \frac{k'^2 (L-r)}{2\tilde{k}_1} - \sin^2 \frac{k'^2 (L-r)}{2\tilde{k}_2} = \quad (13)$$

$$= \sin \left(\left(k'^2 (L-r) \right) \left(\frac{\tilde{k}_2 + \tilde{k}_1}{2\tilde{k}_1 \tilde{k}_2} \right) \right) \times$$

$$\times \sin \left(\left(k'^2 (L-r) \right) \left(\frac{\tilde{k}_2 - \tilde{k}_1}{2\tilde{k}_1 \tilde{k}_2} \right) \right).$$

Учитывая

$$\frac{\tilde{k}_2 + \tilde{k}_1}{2\tilde{k}_1 \tilde{k}_2} = \frac{1}{2k_1} \quad \text{и} \quad \frac{\tilde{k}_2 - \tilde{k}_1}{2\tilde{k}_1 \tilde{k}_2} = \frac{1}{2k_2},$$

получаем тождество (12).

Подставив тождество (12) в подынтегральное выражение (11), запишем:

$$F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \lambda, \lambda') = 2\mu \zeta^2 k_1 k_2 L \int_0^L \sin \frac{k'^2 (L-r)}{2k_1} \times \quad (14)$$

$$\times \sin \frac{k'^2 (L-r)}{2k_2} F_{nn}(\mathbf{k}', r) dr =$$

$$= 2\mu \zeta^2 k_1 k_2 L \left(\int_0^L \sin^2 \frac{k'^2 (L-r)}{2\tilde{k}_1} F_{nn}(\mathbf{k}', r) dr - \right.$$

$$\left. - \int_0^L \sin^2 \frac{k'^2 (L-r)}{2\tilde{k}_2} F_{nn}(\mathbf{k}', r) dr \right).$$

Проводя аналогичные преобразования для Фурье-спектра одноволновой корреляционной функции (7) с использованием переменной $r = (\nu + \xi)/2$ и формулы для произведения подынтегральных дифференциалов, аналогично (10) получаем интеграл от одной независимой переменной r :

$$F_{\chi\chi}(\mathbf{k}' \lambda) = \mu \zeta^2 k^2 \int_0^L \int_0^L \sin \frac{k'^2 (L-\nu)}{2k} \times \quad (15)$$

$$\times \sin \frac{k'^2 (L-\xi)}{2k} F_{nn}(\mathbf{k}', \nu, \xi) d\nu d\xi =$$

$$= 2\mu \zeta^2 k^2 L \int_0^L \sin^2 \frac{k'^2 (L-r)}{2k} F_{nn}(\mathbf{k}', r) dr.$$

где волновое число $k = 2\pi/\lambda$.

Таким образом, формула (14) связи между двухволновым Фурье-спектром и одноволновыми спектрами принимает вид

$$F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \lambda, \lambda') = \frac{k_1 k_2}{\tilde{k}_1^2} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}' \tilde{\lambda}_1) - \frac{k_1 k_2}{\tilde{k}_2^2} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}' \tilde{\lambda}_2) = \quad (16)$$

$$= \frac{\tilde{\lambda}_1^2}{\lambda \lambda'} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}' \tilde{\lambda}_1) - \frac{\tilde{\lambda}_2^2}{\lambda \lambda'} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}' \tilde{\lambda}_2).$$

В (16) степенная зависимость ζ^2 сокращается в правой и левой частях равенства, поэтому этот со-

множитель, как отмечалось ранее, не участвует в дальнейшем анализе.

Имея соотношения между спектрами (16), можно получить связь между соответствующими корреляционными функциями (5):

$$\begin{aligned} B_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \lambda, \lambda') &= \langle \chi_{\lambda'}(\mathbf{k}', \lambda) \chi_{\lambda}(\mathbf{k}', \lambda') \rangle = \\ &= \int e^{-i\mathbf{k}'\rho} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', X_1, \lambda, X_2, \lambda') d\mathbf{k}' = \\ &= \int e^{-i\mathbf{k}'\rho} \left(\frac{\tilde{\lambda}_1^2}{\lambda\lambda'} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tilde{\lambda}_1) - \frac{\tilde{\lambda}_2^2}{\lambda\lambda'} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tilde{\lambda}_2) \right) d\mathbf{k}' = \\ &= \frac{\tilde{\lambda}_1^2}{\lambda\lambda'} B_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tilde{\lambda}_1) - \frac{\tilde{\lambda}_2^2}{\lambda\lambda'} B_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tilde{\lambda}_2). \end{aligned} \quad (17)$$

Координаты $X_1 = X_2 = L$ как аргументы спектров в процессе вывода опускаем.

Используя связь между корреляционной функцией флуктуаций амплитуды эйконала радиосигнала за счет турбулентности и корреляционной функцией флуктуаций показателя преломления атмосферы за счет турбулентности $B_{nn} = \mu B_{\chi\chi}$ [1], где μ – постоянный масштабный коэффициент пропорциональности, находим:

$$B_{nn}(\mathbf{k}', \lambda, \lambda') = \frac{\tilde{\lambda}_1^2}{\lambda\lambda'} B_{nn}(\mathbf{k}', \tilde{\lambda}_1) - \frac{\tilde{\lambda}_2^2}{\lambda\lambda'} B_{nn}(\mathbf{k}', \tilde{\lambda}_2). \quad (18)$$

В [2; 4; 5] была вычислена зависимость для одноволновой корреляционной функции от волнового числа турбулентности ζ и радиуса ρ с началом координат на оси X :

$$B_{nn}(\rho) = \beta \left(\frac{3}{4} \zeta^{\frac{4}{3}} - \frac{6}{40} \zeta^{\frac{10}{3}} \rho \right), \quad (19)$$

где β – постоянный коэффициент.

Нас интересует функциональная зависимость спектра радиосигнала на оси X от атмосферной турбулентности, поэтому положим $\rho = 0$. Вследствие этого, полагая $B_{nn}(\rho) = B_{nn}(\mathbf{k}', \tilde{\lambda}_1) \approx B_{nn}(\mathbf{k}', \tilde{\lambda}_2)$, формулу (18) преобразуем как

$$B_{nn}(\lambda, \lambda') = \frac{3}{4} \beta \frac{\tilde{\lambda}_1^2 - \tilde{\lambda}_2^2}{\lambda\lambda'} \zeta^{\frac{4}{3}}. \quad (20)$$

Вводя обозначение

$$\varepsilon = \frac{\tilde{\lambda}_2}{\tilde{\lambda}_1} = \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda + \lambda'}$$

– относительное спектральное смещение длины волны радиосигнала за счет турбулентности, а, также полагая в процессе преобразований приближенно $\lambda \approx \lambda'$, так что

$$\tilde{\lambda}_1^2 = \left(\frac{\lambda + \lambda'}{2} \right)^2 \approx \lambda^2 \approx \lambda\lambda',$$

находим:

$$B_{nn}(\lambda, \lambda') = \frac{3}{4} \beta (1 - \varepsilon^2) \zeta^{\frac{4}{3}}. \quad (21)$$

Предположим в формуле (4), что величины $I_0(\lambda)$ и $I_0(\lambda')$ на границе тропосферы и стратосферы приблизительно постоянные. Тогда формулу (4), используя $B_{nn} = \mu B_{\chi\chi}$, можно переписать так:

$$\begin{aligned} \frac{\langle J'^2 \rangle}{I_0(\lambda) I_0(\lambda')} &= 4 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\chi\chi}(\lambda, \lambda') d\lambda d\lambda' = \\ &= \frac{4}{\mu} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{nn}(\lambda, \lambda') d\lambda d\lambda', \end{aligned} \quad (22)$$

Используя формулу (21), а также учитывая $\tilde{\lambda}_1 = (\lambda + \lambda')/2$, запишем (22) в виде

$$\begin{aligned} \frac{\langle J'^2 \rangle}{I_0^2(\tilde{\lambda}_1)} &= \frac{3}{\mu} \beta \zeta^{\frac{4}{3}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \varepsilon^2) d\lambda d\lambda' = \\ &= \frac{3}{\mu} \beta \zeta^{\frac{4}{3}} (\lambda_2 - \lambda_1)^2 - \frac{3}{\mu} \beta \zeta^{\frac{4}{3}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon^2 d\lambda d\lambda'. \end{aligned} \quad (23)$$

Найдем второе слагаемое в (23). Для этого используем переменные $\tilde{\lambda}_1 = (\lambda + \lambda')/2$ и $\tilde{\lambda}_2 = (\lambda - \lambda')/2$. Применяя якобиан, преобразуем произведение дифференциалов под знаком двойного интеграла (23):

$$\begin{aligned} d\lambda d\lambda' &= |J| d\tilde{\lambda}_1 d\tilde{\lambda}_2 = \begin{vmatrix} \frac{\partial \lambda}{\partial \tilde{\lambda}_1} & \frac{\partial \lambda}{\partial \tilde{\lambda}_2} \\ \frac{\partial \lambda'}{\partial \tilde{\lambda}_1} & \frac{\partial \lambda'}{\partial \tilde{\lambda}_2} \end{vmatrix} d\tilde{\lambda}_1 d\tilde{\lambda}_2 = \\ &= \begin{vmatrix} 2 & 2 \\ 2 & -2 \end{vmatrix} d\tilde{\lambda}_1 d\tilde{\lambda}_2 = 8 d\tilde{\lambda}_1 d\tilde{\lambda}_2. \end{aligned} \quad (24)$$

Следовательно, учитывая $\varepsilon = \tilde{\lambda}_2 / \tilde{\lambda}_1$, найдем:

$$\begin{aligned} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon^2 d\lambda d\lambda' &= 8 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tilde{\lambda}_2^2}{\tilde{\lambda}_1^2} d\tilde{\lambda}_1 d\tilde{\lambda}_2 = -\frac{8}{3} \frac{\tilde{\lambda}_2^3}{\tilde{\lambda}_1} \Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \\ &= -\frac{8}{3} \varepsilon^3 \tilde{\lambda}_1^2 \Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2} \approx -\frac{8}{3} \varepsilon^3 (\lambda_2 - \lambda_1)^2. \end{aligned} \quad (25)$$

Таким образом, формула (23) преобразуется следующим образом:

$$K(\zeta, \varepsilon) = \frac{\langle J'^2 \rangle}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2 I_0^2(\tilde{\lambda}_1)} = \frac{3}{\mu} \beta \zeta^{\frac{4}{3}} \left(1 + \frac{8}{3} \varepsilon^3 \right), \quad (26)$$

где $K(\zeta, \varepsilon)$ – относительный безразмерный параметр, учитывающий влияние атмосферной турбулентности на средний квадрат флуктуаций

интегральной (по спектру) интенсивности радиосигнала. Влияние турбулентности на спектр радиосигнала характеризуется относительным спектральным смещением длины волны радиосигнала $\varepsilon = (\lambda - \lambda') / (\lambda + \lambda')$.

На рис. 2 показан график зависимости по формуле (25), построенный, как и в [2], при условии $\beta = \mu$. Размерность отношения $[\beta / \mu] = \text{м}^{4/3}$.

Как следует из рис. 2, параметр среднего квадрата флуктуаций интегральной интенсивности радиосигнала $K(\zeta, \varepsilon)$ растет с увеличением волнового числа турбулентных пульсаций ζ . При этом, чем больше относительное смещение длины волны радиосигнала ε , тем круче рост $K(\zeta, \varepsilon)$. При малых $\varepsilon < 0,2$ величина флуктуаций интегральной интенсивности радиосигнала $K(\zeta, \varepsilon)$ практически не зависит от смещения спектральных длин волн радиосигнала ε за счет турбулентности.

С практической точки зрения это указывает на то, что турбулентность мало искажает спектральную информационную сущность распространяющегося радиосигнала в различных диапазонах длин волн.

Заключение

В работе проведено исследование влияния турбулентности атмосферы на интегральную и спектральную интенсивность радиосигнала.

Найдена связь между двухволновой корреляционной функцией амплитудных пульсаций эйконалов в спектре радиосигнала за счет турбулентности атмосферы и пространственной двухточечной корреляционной функцией.

На основе решения дифференциального уравнения для флуктуаций эйконала амплитуды электромагнитной волны найдена связь между двухволновым Фурье-спектром и одноволновыми спектрами. При этом использован единый источник воздействия турбулентности на радиосигнал в точке координаты X распространения радио-

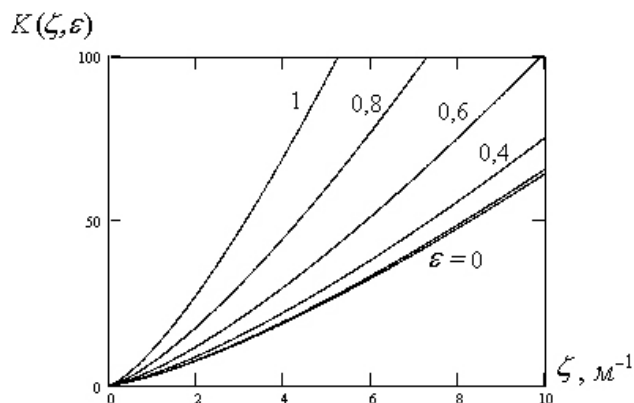


Рис. 2. Зависимость относительного безразмерного среднего квадрата флуктуаций интегральной интенсивности радиосигнала от волнового числа турбулентных пульсаций атмосферы ζ при различных смещениях спектральных длин волн радиосигнала ε

Fig. 2. Dependence of the relative dimensionless mean square of fluctuations of the integral intensity of a radio signal on the wave number of turbulent pulsations of the atmosphere ζ for different shifts of the spectral wavelengths of the radio signal ε

волны путем введения новой переменной, равной среднему значению координат воздействия турбулентности. Для нахождения двойного интеграла одна из координат воздействия преобразована в угловую переменную.

При использовании ранее найденной зависимости одноволновой корреляционной функции от волнового числа турбулентности ζ получена формула связи относительного безразмерного параметра, учитывающего влияние атмосферной турбулентности на средний квадрат флуктуаций интегральной (по спектру) интенсивности радиосигнала. Показано, что влияние турбулентности на спектр радиосигнала характеризуется кубом относительного смещения спектральной длины волны в радиосигнале ε^3 .

Установлено, что турбулентность мало искажает спектральную информационную сущность распространяющегося радиосигнала в различных диапазонах длин волн.

Список литературы

1. Возникновение флуктуаций амплитуды и фазы радиосигнала в турбулентной атмосфере / Д.С. Клюев [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 1. С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.1.28-37>
2. Мерцание радиосигнала за счет турбулентности атмосферы / Д.С. Клюев [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 3. С. 11–19. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.11-19>
3. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 3. М.: Наука, 1966. 662 с.
4. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория. М.: Изд-во физмат. литературы, 1963. 680 с.
5. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 2. М.: Наука, 1967. 720 с.

Информация об авторах

Клюев Дмитрий Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия. Автор более 250 научных работ.

Область научных интересов: электродинамика, устройства СВЧ, антенны, метаматериалы.
E-mail: klyuevd@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9125-7076>

Волобуев Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры медицинской физики, математики и информатики Самарского государственного медицинского университета, г. Самара, Россия. Автор более 400 научных работ.
Область научных интересов: биофизика, радиофизика.
E-mail: volobuev47@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8624-6981>

Адыширин-Заде Каира Алимовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры медицинской физики, математики и информатики Самарского государственного медицинского университета, г. Самара, Россия. Автор более 50 научных работ.
Область научных интересов: биофизика, радиофизика.
E-mail: adysirinzade67@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3641-3678>

Антипова Татьяна Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, математики и информатики Самарского государственного медицинского университета, г. Самара, Россия. Автор более 50 научных работ.
Область научных интересов: биофизика, радиофизика.
E-mail: antipovata81@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5499-2170>

Александрова Наталья Николаевна, старший преподаватель кафедры медицинской физики, математики и информатики Самарского государственного медицинского университета, г. Самара, Россия. Автор более 15 научных работ.
Область научных интересов: биофизика, радиофизика.
E-mail: grecova71@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5958-3851>

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2027, vol. 27, no. 3, pp. 110–116

DOI [10.18469/1810-3189.2024.27.3.110-116](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.3.110-116)
UDC 532.537
Original Research

Received 13 March 2024
Accepted 15 April 2024
Published 30 September 2024

Influence of atmospheric turbulence on the spectral composition of the radio signal

Dmitriy S. Klyuev¹ , Andrey N. Volobuev² , Kaira A. Adyshirin-Zade² ,
Tatyana A. Antipova² , Natalia N. Aleksandrova² 

¹ Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

² Samara State Medical University
89, Chapayevskaya Street,
Samara, 443099, Russia

Abstract – Background. It is shown that it is necessary to study the effect of atmospheric turbulence on the spectral characteristics of a radio signal. **Aim.** The influence of atmospheric turbulence on the spectral fluctuations of the radio signal intensity and on the displacement of the spectral components of the radio signal has been studied. **Methods.** The research was carried out on the basis of an analysis of the relationship between two-wave and single-wave correlation ratios. Based on the solution of the differential equation for fluctuations of the eikonal amplitude of an electromagnetic wave and the use of the derived trigonometric ratio, a connection between the two-wave Fourier-spectrum and single-wave spectra is obtained. In this case, a single source of turbulence effects on the radio signal was used at the coordinate point of the radio wave propagation by introducing a new variable equal to the average value of the coordinates of the turbulence effect. To find the resulting double integral, one of the coordinates of the turbulent action is transformed into an angular variable. **Results.** The dependence of the relative dimensionless mean of square of the integral intensity of the radio signal fluctuations on the wave number of turbulent pulsations of the atmosphere at various displacements of the spectral wavelengths of the radio signal is found. **Conclusion.** It is shown that turbulence slightly distorts the spectral information essence of a propagating radio signal in various wavelength ranges.

Keywords – atmospheric turbulence; radio-signal; correlation ratios; spectral intensity; spectral displacement.

References

1. D. S. Klyuev et al., "Occurrence of fluctuations in the amplitude and phase of the radio signal in a turbulent atmosphere," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 28–37, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.1.28-37>. (In Russ.)
2. D. S. Klyuev et al., "Flickering of a radio-signal due to an atmospheric turbulence," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 11–19, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.11-19>. (In Russ.)
3. G. M. Fikhtengol'ts, *Course of Differential and Integral Calculus*, vol. 3. Moscow: Nauka, 1966. (In Russ.)
4. I. O. Khintse, *Turbulence. Its Mechanism and Theory*. Moscow: Izd-vo fizmat. literatury, 1963. (In Russ.)
5. A. S. Monin and A. M. Yaglom, *Statistical Hydromechanics*, vol. 2. Moscow: Nauka, 1967. (In Russ.)

Information about the Authors

Dmitriy S. Klyuev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, head of the Department of Radioelectronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia. Author of over 250 scientific papers.

Research interests: electrodynamics, microwave devices, antennas, metamaterials.

E-mail: klyuevd@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9125-7076>

Andrey N. Volobuev, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics, Samara State Medical University, Samara, Russia. Author of over 400 scientific papers.

Research interests: biophysics, radiophysics.

E-mail: volobuev47@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8624-6981>

Kaira A. Adyshirin-Zade, Candidate of Pedagogical Sciences, associate professor of the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics, Samara State Medical University, Samara, Russia. Author of over 50 scientific papers.

Research interests: biophysics, radiophysics.

E-mail: adysirinzade67@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3641-3678>

Tatyana A. Antipova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics, Samara State Medical University, Samara, Russia. Author of over 50 scientific papers.

Research interests: physics, radiophysics.

E-mail: antipovata81@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5499-2170>

Natalia N. Aleksandrova, senior lecturer of the Department of Medical Physics Mathematics and Informatics, Samara State Medical University, Samara, Russia. Author of over 15 scientific papers.

Research interests: biophysics, radiophysics.

E-mail: grecova71@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5958-3851>