






Влияние атмосферного ветра на распространение радиоволн

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 физических характеристик атмосферы, в частности ветра, на атмосферную турбулентность и, следовательно, на характеристики радиосигнала. **Цель.** Найдена зависимость временной спектральной функции потока энергии радиосигнала от скорости ветра в тропосфере в плоскости антенны. **Методы.** Разработан метод перехода от декартовой системы координат в плоскости антенны к полярной системе координат волновых чисел. На основе этого метода прослежена связь между Фурье спектральной функцией корреляционного момента и представлением функции Бесселя. Для Фурье спектральной функции корреляционного момента использовано ранее полученное решение дифференциального уравнения для флуктуаций амплитуды эйконала электромагнитной волны в турбулентной атмосфере на фронте электромагнитной волны на координате приемной антенны. С помощью обратного преобразования Фурье найдена связь между временной спектральной функцией потока энергии радиосигнала и временной корреляционной функцией этого потока. **Результаты.** На основе исследования временной корреляционной функции потока энергии радиосигнала выявлена ее связь с двухточечным корреляционным моментом, характеризующим флуктуации амплитуды эйконала радиосигнала. Для анализа влияния ветра применена модель турбулентности, отражающая инерционную область турбулентности, в которой поток энергии от более крупных турбулентных вихрей к более мелким вихрям определяется вязкой диссипацией самых мелких вихрей. **Заключение.** Численный расчет показал, что ветер в плоскости антенны сдувает турбулентные вихри в этой плоскости, улучшая качество принимаемого радиосигнала.

Ключевые слова – радиосигнал; атмосферная турбулентность; атмосферный ветер; временная корреляционная функция; система координат волновых чисел; Фурье спектральные функции.

Введение

Распространение радиосигнала от излучателя до приемной антенны зависит от физических характеристик атмосферы, через которую проходит радиосигнал. В частности, на распространение радиосигнала в турбулентной атмосфере оказывают влияние флуктуации атмосферного давления, температуры, влажности, время суток и т. д.

Перечисленные характеристики влияют на коэффициент преломления среды. Мы ограничимся анализом распространения радиоволн в тропосфере, рассматривая эту среду как неэлектропроводящую газовую смесь с относительной магнитной проницаемостью, равной единице, так что $n = \sqrt{\epsilon}$, где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды. Особое внимание обратим на движение среды, создаваемое атмосферным ветром, для чего рассмотрим две координаты в тропосфере X_1 и X_2 , рис. 1. На рис. 1 показано также направление радиосигнала вдоль координаты X .

Существует множество эмпирических формул, описывающих зависимость показателя прелом-

ления от характеристик атмосферы. Например, в [1] для сантиметровых радиоволн используется формула

$$n = 1 + 10^{-6} \frac{79p}{T} \left(1 + \frac{7800\vartheta}{T} \right), \quad (1)$$

где p – давление в миллибарах; T – абсолютная температура; ϑ – удельная влажность (отношение плотности водяного пара к плотности влажного воздуха).

1. Временная корреляционная функция потока энергии радиосигнала

Поток энергии радиосигнала, рис. 1, падающий на антенну, можно найти по формуле [2]:

$$P(\mathbf{X}, t) = \int_{\Sigma} I(\mathbf{X}, t) dX = I(0) \int_{\Sigma} e^{2\chi(\mathbf{X}, t)} d\mathbf{X}, \quad (2)$$

где $I(\mathbf{X}, t)$ – интенсивность радиосигнала, зависящая от координаты \mathbf{X} и времени t вследствие турбулентности атмосферы, $I(\mathbf{X}, t) = I(0)e^{2\chi(\mathbf{X}, t)}$; $I(0)$ – постоянная составляющая интенсивности радиосигнала на координате $\mathbf{X} = 0$, где турбулент-

ность отсутствует. Функция $\chi'(\mathbf{X}, t)$ – характеризует флуктуации амплитуды эйконала радиосигнала [3] на координате \mathbf{X} за счет турбулентности атмосферы. Коэффициент 2 использован, т. к. интенсивность радиосигнала (или модуль вектора Пойнтинга) пропорциональна квадрату напряженностей электрического и магнитного полей в электромагнитной волне, Σ – площадь круговой приемной антенны на координате $X = L$, рис. 1.

Ограничимся малыми флуктуациями, так что формула (2) приводится к виду

$$P(\mathbf{X}, t) = I(0) \int_{\Sigma} (1 + 2\chi'(\mathbf{X}, t)) d\mathbf{X} = \quad (3)$$

$$= P(\mathbf{X}, 0) + I(0) \int_{\Sigma} 2\chi'(\mathbf{X}, t) d\mathbf{X}.$$

Временную корреляционную функцию потока энергии радиосигнала на координатах \mathbf{X}_1 и \mathbf{X}_2 запишем в виде

$$R_{PP}(\tau) = \left\langle \left(P(\mathbf{X}_1, t) - \langle P(\mathbf{X}_1, 0) \rangle \right) \times \quad (4)$$

$$\times \left(P(\mathbf{X}_2, t + \tau) - \langle P(\mathbf{X}_2, 0) \rangle \right) \right\rangle / \langle P_0 \rangle^2 =$$

$$= \left\langle \left(I(0) \int_{\Sigma} 2\chi'(\mathbf{X}_1, t) d\mathbf{X}_1 \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left(I(0) \int_{\Sigma} 2\chi'(\mathbf{X}_2, t + \tau) d\mathbf{X}_2 \right) \right\rangle / I^2(0) \Sigma^2 =$$

$$= \frac{4}{\Sigma^2} \iint_{\Sigma \Sigma} \langle \chi'(\mathbf{X}_1, t) \chi'(\mathbf{X}_2, t + \tau) \rangle d\mathbf{X}_1 d\mathbf{X}_2 =$$

$$= \frac{4}{\Sigma^2} \iint_{\Sigma \Sigma} B_{\chi\chi} d\mathbf{X}_1 d\mathbf{X}_2,$$

где $P_0 = I(0)\Sigma$ – поток энергии радиосигнала (мощность радиосигнала) в невозмущенной атмосфере; τ – время распространения пульсаций радиосигнала за счет турбулентности (но не самого радиосигнала) на расстояние между координатами \mathbf{X}_1 и \mathbf{X}_2 , равное времени распространения турбулентных пульсаций.

Рассмотрим спектральное представление корреляционного момента $B_{\chi\chi}$ в виде интеграла Фурье:

$$B_{\chi\chi} = \langle \chi'(\mathbf{X}_1, t) \chi'(\mathbf{X}_2, t + \tau) \rangle = \quad (5)$$

$$= \int e^{-i\mathbf{k}'(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2)} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tau) d\mathbf{k}',$$

где \mathbf{k}' – волновой вектор электромагнитных флуктуаций (волновой вектор, характеризующий флуктуации амплитуды эйконала радиосигнала за счет

турбулентности); $F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tau)$ – спектральная функция корреляционного момента $B_{\chi\chi}$.

Подставляя (5) в (4), найдем Фурье-интеграл временной корреляционной функции потока энергии радиосигнала:

$$R_{PP}(\tau) = \frac{4}{\Sigma^2} \iint_{\Sigma \Sigma} \int e^{-i\mathbf{k}'(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2)} \times \quad (6)$$

$$\times F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tau) d\mathbf{k}' d\mathbf{X}_1 d\mathbf{X}_2.$$

2. Переход от декартовой системы координат в плоскости антенны к полярной системе координат волновых чисел

Рассмотрим интеграл $\int_{\Sigma} e^{i\mathbf{k}\mathbf{X}} d\mathbf{X}$ в плоскости антенны. При нахождении данного интеграла для упрощения обозначений заменим \mathbf{k}' на \mathbf{k} :

$$\int_{\Sigma} e^{i\mathbf{k}\mathbf{X}} d\mathbf{X} = \iint_{\Sigma} e^{i(k_2 Y + k_3 Z)} d\mathbf{X}. \quad (7)$$

Величину $\mathbf{k}\mathbf{X}$ в плоскости антенны можно представить в виде скалярного произведения $\mathbf{k}\mathbf{X} = k_2 Y + k_3 Z$.

Для нахождения интеграла (7) в плоскости антенны при $X = L$ нужно рассматривать две взаимосвязанные системы координат: декартову систему координат $\mathbf{X}(X = L, Y, Z)$ и систему координат волновых чисел $\mathbf{k}_0(k_1, k_2, k_3) = \mathbf{k}_0(k_1, k)$.

Перейдем в (7) к полярным координатам в системе координат волновых чисел. Модуль дуги в плоскости антенны:

$$|d\mathbf{X}| = \sqrt{dY^2 + dZ^2} = \beta \sqrt{k_3^2 d\varphi^2 + k_2^2 d\varphi^2} = \beta k d\varphi, \quad (8)$$

где обозначено $k = \sqrt{k_3^2 + k_2^2}$ – полярный радиус в системе координат волновых чисел (общий суммарный вектор \mathbf{k}_0 в данном анализе участия не принимает); $d\varphi$ – дифференциал угловой полярной координаты в этой системе координат; β – размерный коэффициент перехода от декартовых координат к системе координат волновых чисел $[\beta] = \text{м}^2$. В соответствии с рис. 1 связь дифференциалов в декартовой системе координат и полярной системе координат волновых чисел имеет вид $dY = \beta k_3 d\varphi$ и $dZ = \beta k_2 d\varphi$.

Интеграл $\int_{\Sigma} e^{i\mathbf{k}\mathbf{X}} d\mathbf{X}$ можно найти как интеграл по контуру окружности радиуса R в полярной системе координат волновых чисел. При этом $\Sigma = \pi R^2$.

Перейдем от полярной системы координат волновых чисел к радиусу антенны R в декартовой системе координат. Учитывая в полярных координа-

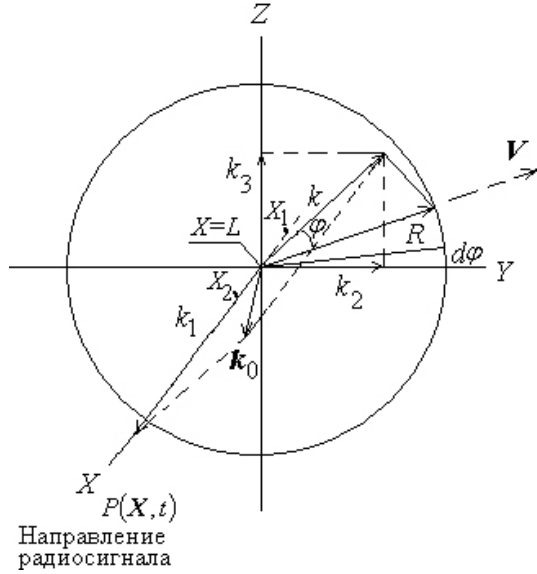


Рис. 1. Связь декартовой системы координат и системы координат волновых чисел в плоскости антенны
Fig. 1. Relationship between the Cartesian coordinate system and the wave number coordinate system in the antenna plane

тах $\beta k = R \cos \varphi$, рис. 1, в соответствии с (8) имеем $\mathbf{k} d\mathbf{X} = k R \cos \varphi d\varphi$ и $\mathbf{k}\mathbf{X} = k R \cos \varphi$.

Таким образом, найдем:

$$\int_{\Sigma} e^{i\mathbf{k}\mathbf{X}} d\mathbf{X} = \mathbf{n} \int_0^{2\pi} e^{ikR \cos \varphi} R \cos \varphi d\varphi = \quad (9)$$

$$= \mathbf{n} R \int_0^{2\pi} e^{ikR \cos \varphi} \cos \varphi d\varphi,$$

где \mathbf{n} – единичный вектор в направлении координаты \mathbf{X} . Проведена замена пределов интегрирования от декартовых координат к полярной системе координат волновых чисел.

В формуле (9) используем известное представление функции Бесселя [4]:

$$J_m(Z) = \frac{(-i)^m}{\pi} \int_0^{\pi} e^{iZ \cos t} \cos m t dt. \quad (10)$$

Следовательно, для интеграла (9) при $m=1$ запишем:

$$\int_{\Sigma} e^{i\mathbf{k}\mathbf{X}} d\mathbf{X} = \mathbf{n} R \frac{2\pi}{-i} J_1(kR) = \quad (11)$$

$$= -\mathbf{n} \frac{2\pi R^2}{iR} J_1(kR) = -\mathbf{n} \frac{2\Sigma}{iR} J_1(kR).$$

Таким образом, двойной интеграл равен

$$\iint_{\Sigma \Sigma} e^{-i\mathbf{k}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2)} d\mathbf{X}_1 d\mathbf{X}_2 = \left(\frac{2}{R} J_1(kR) \right)^2 \Sigma^2. \quad (12)$$

Применяя обратное преобразование Фурье по времени τ к формуле (6) и возвращаясь к прежним

обозначениям \mathbf{k}' , найдем временную спектральную функцию потока энергии радиосигнала:

$$F_{PP}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega\tau} R_{PP}(\tau) d\tau = \quad (13)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega\tau} \frac{4}{\Sigma^2} \iint_{\Sigma \Sigma} \int e^{-i\mathbf{k}'(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2)} \times$$

$$\times F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tau) d\mathbf{k}' d\mathbf{X}_1 d\mathbf{X}_2 d\tau =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega\tau} \frac{4}{\Sigma^2} \int \left(\frac{2}{R} J_1(k'R) \right)^2 \Sigma^2 F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tau) d\mathbf{k}' d\tau =$$

$$= \frac{2}{\pi} \int \left(\frac{2}{R} J_1(k'R) \right)^2 d\mathbf{k}' \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega\tau} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tau) d\tau,$$

где ω – частота турбулентных пульсаций, равная частоте пульсаций радиосигнала.

Функцию $F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tau)$ можно получить, используя решение дифференциального уравнения для флуктуаций амплитуды эйконала χ' электромагнитной волны в турбулентной атмосфере [3]:

$$F_{\chi\chi}(\mathbf{k}') = \mu \zeta^4 \int_0^L \int_0^L \sin \frac{k'^2(L-\nu)}{2k} \times \quad (14)$$

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

где ζ – волновой вектор турбулентных пульсаций; μ – постоянный масштабный коэффициент пропорциональности между корреляционным моментом показателя преломления и корреляционным моментом флуктуаций амплитуды эйконала радиосигнала $B_{nn} = \mu B_{\chi\chi}$ (где двухточечные корреляционные функции $B_{nn} = \langle n_1(X_1) n_1(X_2) \rangle$ и $B_{\chi\chi} = \langle \chi'(X_1) \chi'(X_2) \rangle$); ν и ξ – координаты двухточечного источника воздействия турбулентности на электромагнитную волну; $F_{nn}(\mathbf{k}', \nu, \xi)$ – спектральная функция пульсаций показателя преломления; \mathbf{k} – волновой вектор электромагнитной волны; \mathbf{k}' – волновой вектор, характеризующий флуктуации амплитуды эйконала радиосигнала.

Формула (14) записана на фронте электромагнитной волны при $X = X_1 = X_2 = L$, т. е. на координате приемной антенны. Используем также единую координату источника воздействия турбулентности на электромагнитную волну $\nu = \xi$. В этом случае формула (14) упрощается:

$$F_{\chi\chi}(\mathbf{k}') = \mu \zeta^2 \int_0^L \sin^2 \frac{k'^2(L-\xi)}{2k} F_{nn}(\mathbf{k}', \xi) d\xi, \quad (15)$$

где $F_{nn}(\mathbf{k}', \xi)$ – трехмерная спектральная функция поля флуктуаций показателя преломления $n'(\mathbf{X})$.

3. Влияние атмосферного ветра на пульсационные корреляционные соотношения параметров атмосферы

Введем в анализ процесса распространения радиосигнала атмосферный ветер и исследуем его влияние на параметры тропосферы, которые определяют влияние на этот процесс распространения.

Рассмотрим корреляционную функцию пульсаций показателей преломления при наличии ветра:

$$B_{nn}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2 + \mathbf{V}\tau) = \langle n'(\mathbf{X}_1, t)n'(\mathbf{X}_2, t + \tau) \rangle = \langle n'(\mathbf{X}_1, t)n'(\mathbf{X}_2 - \mathbf{V}\tau, t) \rangle, \quad (16)$$

где \mathbf{V} – компонента скорости ветра в плоскости, перпендикулярной координатам векторов \mathbf{X}_1 и \mathbf{X}_2 . Для определенности анализа предполагаем, что координатные точки X_1 и X_2 лежат в плоскости антенны, рис. 1, так что $X = X_1 = X_2 = L$. Следовательно, вектор скорости \mathbf{V} также лежит в плоскости антенны, рис. 1, т. е. ветер направлен перпендикулярно направлению распространения радиосигнала.

Чтобы ввести скорость воздуха в атмосфере в формулу (15) нужно учесть, что сдвиг в аргументе корреляционной функции (16) на $\mathbf{V}\tau$ соответствует умножению в спектральной функции на $e^{-i\mathbf{k}'\mathbf{V}\tau}$.

Следовательно, формула (15) приобретает вид

$$F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tau) = \mu\zeta^2 \int_0^L \sin^2 \frac{k'^2(L-\xi)}{2k} F_{nn}(\mathbf{k}', \xi) e^{-i\mathbf{k}'\mathbf{V}\tau} d\xi. \quad (17)$$

Подставим формулу (17) в (13):

$$F_{PP}(\omega) = \frac{2}{\pi} \int \left(\frac{2}{R} J_1(k'R) \right)^2 d\mathbf{k}' \times \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega\tau} F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tau) d\tau = \frac{8\mu\zeta^2}{\Sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^L \left(J_1(k'R) \sin \frac{k'^2(L-\xi)}{2k} \right)^2 \times F_{nn}(\mathbf{k}', \xi) e^{i(\omega - \mathbf{k}'\mathbf{V})\tau} d\mathbf{k}' d\xi d\tau, \quad (18)$$

где интегрирование по ξ идет по всей длине воздействия турбулентности на радиосигнал от 0 до L .

Проведем в формуле (18) интегрирование по τ , используя формулу представления δ -функции Дирака [5]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{i(\omega - \mathbf{k}'\mathbf{V})\tau} d\tau = 2\pi\delta(\omega - \mathbf{k}'\mathbf{V}). \quad (19)$$

В результате имеем:

$$F_{PP}(\omega) = \frac{16\mu\zeta^2}{\Sigma} \int_0^L \left(J_1(k'R) \sin \frac{k'^2(L-\xi)}{2k} \right)^2 \times F_{nn}(\mathbf{k}', \xi) \delta(\omega - \mathbf{k}'\mathbf{V}) d\mathbf{k}' d\xi. \quad (20)$$

Далее, используя свойства δ -функции, исключим ее из выражения (20).

Заменим дифференциал $d\mathbf{k}' = \mathbf{n} dk' d\varphi$, где φ – угол между векторами \mathbf{k}' и \mathbf{V} , рис. 1, а \mathbf{n} – в данном случае единичный вектор в направлении вектора \mathbf{k}' . Следовательно, формула (20) преобразуется к виду

$$F_{PP}(\omega) = \frac{16\mu\zeta^2}{\Sigma} \int_0^L \left(J_1(k'R) \sin \frac{k'^2(L-\xi)}{2k} \right)^2 \times F_{nn}(\mathbf{k}', \xi) \mathbf{n} dk' d\xi \int_{-\pi}^{\pi} \delta(\omega - \mathbf{k}'\mathbf{V}) d\varphi. \quad (21)$$

Используя свойство δ -функции

$$\int_a^b f(Z) \delta(Z) dZ = f(0)$$

при $a < 0 < b$ и интегрируя по углу φ , найдем:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \delta(\omega - \mathbf{k}'\mathbf{V}) d\varphi = \int_{-\pi}^{\pi} \delta(\omega - k'V \cos \varphi) d\varphi = \int_{-\pi}^{\pi} \delta(Z) \frac{dZ}{\sqrt{(k'V)^2 - (\omega - Z)^2}} = \frac{1}{\sqrt{(k'V)^2 - \omega^2}}, \quad (22)$$

где обозначено $Z = \omega - k'V \cos \varphi$.

Следовательно, формула (21) принимает вид

$$F_{PP}(\omega) = \frac{16\mu\zeta^2}{\Sigma} \times \int_0^L \left(J_1(k'R) \sin \frac{k'^2(L-\xi)}{2k} \right)^2 \frac{F_{nn}(\mathbf{k}', \xi) dk' d\xi}{\sqrt{(k'V)^2 - \omega^2}}. \quad (23)$$

Так как в выражении (23) отсутствуют векторные сомножители, единичный вектор \mathbf{n} опускаем.

4. Модель турбулентности атмосферы

Дальнейшие преобразования (23) связаны с принятием определенной модели турбулентности.

Будем считать, что пульсации волнового числа радиосигнала пропорциональны турбулентным пульсациям $\zeta \sim \mathbf{k}'$. Для простоты вычислений по-

ложим $\zeta = \mathbf{k}'$. В этом случае спектральная функция пульсаций волнового числа электромагнитной волны $F_{nn}(\mathbf{k}', \xi) \sim F(\zeta)$. Кроме того, как и в [2], принимаем $F(\zeta) \approx \beta \zeta^{1/3}$, где постоянная величина β не зависит от волнового числа турбулентности ζ . Данный закон в основном отражает турбулентную инерционную область [3]. Турбулентность в этой области находится в статистическом равновесии: поток энергии от более крупных турбулентных вихрей к более мелким определяется вязкой диссипацией самых мелких вихрей.

В этом случае формула (23) преобразуется к виду

$$F_{PP}(\omega) = \frac{16\pi\mu\beta\zeta^2}{\Sigma} \int_0^{\zeta} (J_1(\zeta R))^2 \times \quad (24)$$

$$\times \frac{\zeta^3}{\sqrt{(\zeta V)^2 - \omega^2}} d\zeta \int_0^L \sin^2 \frac{\zeta^2(L-\xi)}{2k} d\xi.$$

Последний интеграл в (24) легко вычисляется:

$$\int_0^L \sin^2 \frac{\zeta^2(L-\xi)}{2k} d\xi = \quad (25)$$

$$= \frac{L}{2} - \frac{1}{2} \int_0^L \left(\cos \frac{\zeta^2(L-\xi)}{k} \right) d\xi =$$

$$= \frac{k}{2\zeta^2} \left(\frac{\zeta^2 L}{k} - \left(\sin \frac{\zeta^2 L}{k} \right) \right) \approx$$

$$\approx \frac{k}{12\zeta^2} \left(\frac{\zeta^2 L}{k} \right)^3 = \frac{1}{12} \left(\frac{\zeta^2}{k} \right)^2 L^3.$$

При вычислении интеграла (25) использована приближенная формула

$$\sin Z \approx Z - \frac{Z^3}{6}$$

Таким образом, формула (24) принимает вид

$$F_{PP}(\omega) = \frac{4\pi\mu\beta\zeta^2 L^3}{3\Sigma k^2} \int_0^{\zeta} \frac{\zeta^3 (J_1(\zeta R))^2}{\sqrt{(\zeta V)^2 - \omega^2}} d\zeta = \quad (26)$$

$$= \frac{4\pi\mu\beta\zeta^2 L^3}{3\Sigma k^2 V} \int_0^{\zeta} \frac{\zeta^3 (J_1(\zeta R))^2}{\sqrt{\zeta^2 - \left(\frac{\omega}{V}\right)^2}} d\zeta.$$

Аналогично [2], где использовалась относительная характеристика мерцания принимаемого радиосигнала, введем относительную спектральную функцию потока энергии радиосигнала:

$$U_{PP} = \frac{\omega F_{PP}(\omega)}{4\langle \chi'^2 \rangle} = \frac{\gamma \zeta^2 \Omega}{\Sigma k^2} \int_0^{\zeta} \frac{\zeta^3 (J_1(\zeta R))^2}{\sqrt{\zeta^2 - \Omega^2}} d\zeta, \quad (27)$$

где обозначено $\Omega = \omega/V$, а также γ – постоянная величина. Принято также $\langle \chi'^2 \rangle \sim L^3$ [1].

Как уже указывалось ранее, величина $\omega = \zeta u' = \zeta \sqrt{\frac{2}{3} E}$ – частота турбулентных пульсаций, где u' – скорость турбулентных пульсаций; $E = \frac{3}{2} \langle u'^2 \rangle$ – энергия турбулентности, приходящаяся на единицу массы среды (атмосферы) [6]. Все координатные компоненты пульсационной скорости приняты одинаковыми. Таким образом, величина

$$\Omega = \frac{\omega}{V} = \zeta \frac{u'}{V} = \zeta \frac{\sqrt{\frac{2}{3} E}}{V} \approx C \frac{\zeta^6}{V},$$

где C – постоянная величина.

Чтобы не усложнять формулы, использовали колмогоровский закон для энергии изотропной турбулентности $E(\zeta) \sim \zeta^{-5/3}$ [3]. Подставляя выражение для Ω в формулу (27), найдем:

$$U_{PP} = \frac{C_1 \zeta^{\frac{13}{6}}}{\Sigma k^2 V} \int_0^{\zeta} \frac{\zeta^3 (J_1(\zeta R))^2}{\sqrt{\zeta^2 - \frac{C^2 \zeta^3}{V^2}}} d\zeta = \quad (28)$$

$$= \frac{C_1 \zeta^{\frac{13}{6}}}{\Sigma k^2} \int_0^{\zeta} \frac{\zeta^{\frac{25}{6}} (J_1(\zeta R))^2}{\sqrt{V^2 \zeta^{\frac{5}{3}} - C^2}} d\zeta,$$

где C_1 – постоянная величина

Рассмотрим реальную ситуацию, которая может возникнуть в тропосфере и стратосфере для средних и коротких волн [2]. Пусть длина радиоволны и масштаб турбулентных пульсации равны между собой $\lambda \approx 10$ м. Следовательно, волновые числа радиосигнала и турбулентных пульсаций $k = \zeta = 0,628$ м⁻¹. В этом случае:

$$U_{PP} = \frac{C_1 \zeta^{\frac{1}{6}}}{\pi R^2} \int_0^{\zeta} \frac{\zeta^{\frac{25}{6}} (J_1(\zeta R))^2}{\sqrt{V^2 \zeta^{\frac{5}{3}} - C^2}} d\zeta. \quad (29)$$

На рис. 2 показана зависимость относительной спектральной функции $U_{PP}(V)$. Для расчета принимались следующие значения постоянных: $C = 0,01$ м^{1/6}/с, $C_1 = 100$, радиус антенны $R = 1$ м. Размерность C_1 определяется тем, что

относительная спектральная функция $U_{PP}(V)$ – безразмерная величина.

Как видно из графика, с увеличением скорости атмосферного ветра в плоскости антенны значение спектральной функции $U_{PP}(V)$, а следовательно, и влияние турбулентности на радиосигнал падает. Это связано с тем, что ветер сдувает турбулентные пульсации в плоскости антенны, уменьшая их влияние на принимаемый радиосигнал.

Заключение

Исследование временной корреляционной функции $R_{PP}(\tau)$ потока энергии радиосигнала на координатах X_1 и X_2 , рис. 1, позволило установить ее связь с двухточечным корреляционным моментом, характеризующим флуктуации амплитуды эйконала радиосигнала $B_{\chi\chi}$. С помощью перехода от декартовой системы координат в плоскости антенны к полярной системе координат волновых чисел найдена связь между Фурье спектральной функцией корреляционного момента $F_{\chi\chi}(\mathbf{k}', \tau)$ и представлением функции Бесселя. При этом для Фурье спектральной функции корреляционного момента использовано ранее полученное решение дифференциального уравнения для флуктуаций амплитуды эйконала χ' электромагнитной волны в турбулентной атмосфере на фронте электромагнитной волны на координате приемной антенны.

Применяя обратное преобразование Фурье, прослежена связь между временной спектральной функцией $F_{PP}(\omega)$ и временной корреляционной функцией потока энергии радиосигнала.

Путем исследования корреляционной функции пульсаций показателей преломления при наличии

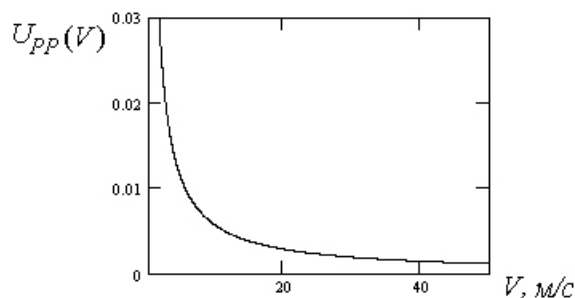


Рис. 2. Зависимость относительной корреляционной функции флуктуаций потока энергии радиосигнала от скорости ветра в атмосфере

Fig. 2. Dependence of the relative correlation function of fluctuations in the radio signal energy flux on wind speed in the atmosphere

ветра B_{nn} выявлена зависимость временной спектральной функции потока энергии радиосигнала $F_{PP}(\omega)$ и скорости ветра в тропосфере в плоскости антенны.

Для Фурье спектральной функции пульсаций волнового числа электромагнитной волны (или трехмерной спектральной функции поля флуктуаций показателя преломления) $F_{nn}(\mathbf{k}', \xi) \sim F(\xi)$ использована модель турбулентности, отражающая инерционную область турбулентности, в которой поток энергии от более крупных турбулентных вихрей к более мелким определяется вязкой диссипацией самых мелких вихрей. Это позволило найти зависимость относительной спектральной функции потока энергии радиосигнала $U_{PP}(V)$ от скорости ветра, имеющего направление в плоскости антенны, т. е. поперек направления радиосигнала. Расчет показывает, что такой ветер сдувает турбулентные вихри в плоскости антенны, улучшая качество принимаемого радиосигнала.

Список литературы

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 2. М.: Наука, 1967. 720 с.
2. Мерцание радиосигнала за счет турбулентности атмосферы / Д.С. Ключев [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. Возникновение флуктуаций амплитуды и фазы радиосигнала в турбулентной атмосфере / Д.С. Ключев [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>
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. С. 667.
5. Левич В.Г. Курс теоретической физики. Т. 1. М.: Физматгиз, 1962. С. 681.
6. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория. М.: Изд-во физмат. литературы, 1963. С. 89.

Информация об авторах

Ключев 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. 2, pp. 22–29

DOI 10.18469/1810-3189.2024.27.2.22-29

UDC 532.537

Original Research

Received 18 October 2023

Accepted 20 November 2023

Published 29 June 2024

Influence of atmospheric wind on the propagation of radio waves

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 necessary to study the influence of the physical characteristics of the atmosphere, in particular, wind on atmospheric turbulence and, consequently, on the characteristics of the radio signal it is shown. **Aim.** The dependence of the time-spectral function of the radio signal energy flux on the wind speed in the troposphere in the antenna plane is found. **Methods.** A method of transition from the Cartesian coordinate system in the antenna plane to the polar coordinate system of wave numbers has been developed. Based on this method the relationship between the Fourier spectral function of the correlation moment and the representation of the Bessel function is found. For the Fourier spectral function of the correlation moment, the previously obtained solution of the differential equation for the fluctuations of the eikonal amplitude of electromagnetic wave in a turbulent atmosphere at the front of the electromagnetic wave at the coordinate of the receiving antenna is used. Using the inverse Fourier transform the relationship between the time-spectral function of the radio signal energy flux and the time-correlation function of this flux is found. **Results.** Based on the study of the time-correlation function of the radio signal energy flow its relationship with the two-point correlation moment characterizing the fluctuations of the eikonal amplitude of the radio signal is found. To analyze the effect of wind, a turbulence model was used, reflecting the inertial turbulence interval, in which the energy flow from larger turbulent vortices to smaller vortices is determined by the viscous dissipation of the smallest vortices. **Conclusion.** Numerical calculations have shown that such a wind in the antenna plane blows away turbulent vortices in this plane, bettering the quality of the received radio signal.

Keywords – radio signal; atmospheric turbulence; atmospheric wind; time-correlation function; coordinate system of wave numbers; Fourier-spectral functions.

References

1. A. S. Monin and A. M. Yaglom, *Statistical Hydromechanics*, vol. 2. Moscow: Nauka, 1967. (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. 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.)
4. G. Korn and T. Korn, *Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers*. Moscow: Nauka, 1970. (In Russ.)
5. V. G. Levich, *Course of Theoretical Physics*, vol. 1. Moscow: Fizmatgiz, 1962. (In Russ.)
6. I. O. Khintse, *Turbulence. Its Mechanism and Theory*. Moscow: Izd-vo fizmat. literatury, 1963. (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 Physics and Mathematics 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>