

Мерцание радиосигнала за счет турбулентности атмосферы

Д.С. Ключев¹ , А.Н. Волобуев² , С.В. Краснов² ,
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. Турбулентные пульсации показателя преломления в атмосфере приводят к искажениям при прохождении радиосигнала. Это может создать искажение передаваемой информации за счет возникающих пульсаций амплитуды, фазы и интенсивности электромагнитной волны, которая передает радиосигнал. Флуктуации интенсивности радиосигнала приводят к мерцанию радиосигнала на приемной антенне за счет турбулентных явлений в атмосфере, которые представляют собой сложное многофункциональное физическое явление. **Цель.** Рассмотрена проблема флуктуации интенсивности радиосигнала на приемной антенне за счет турбулентности атмосферы – мерцание радиосигнала. Эта проблема в настоящее время является исключительно актуальной, т. к. существует тенденция активного, негативного вмешательства в процесс качественного прохождения радиосигнала на фоне природно обусловленных турбулентных пульсаций. **Методы.** Проведен теоретический анализ прохождения радиосигнала через турбулентную атмосферу. Исследована пространственная корреляционная функция флуктуаций интенсивности принимаемого радиосигнала за счет турбулентности атмосферы. **Результаты.** Введено понятие характеристики мерцания радиосигнала как среднего по сечению приемной антенны значения случайной величины – дисперсии логарифма мощности радиосигнала. Рассчитана модель возникновения флуктуации в случае двух областей в сечении приемной антенны с различными уровнями интенсивности радиосигнала. Найдена корреляционная функция для этой модели. **Заключение.** На основе разложения в Фурье-спектр двухточечной пространственной корреляционной функции турбулентных пульсаций показателя преломления найдена зависимость характеристики мерцания радиосигнала от волнового числа турбулентных пульсаций атмосферы. Показано, что наибольшее влияние на радиосигнал турбулентность атмосферы оказывает, когда длина электромагнитной волны сравнима с масштабом турбулентных пульсаций.

Ключевые слова – атмосферная турбулентность; радиосигнал; радиоволны; флуктуации интенсивности; двухточечные турбулентные корреляции; Фурье-спектр.

Введение

Качественная передача информации с помощью радиосигнала является главной целью развития сетей связи в Российской Федерации [1]. Однако в турбулентной атмосфере всегда присутствуют флуктуации показателя преломления воздуха, влияющие на различные характеристики радиосигнала [2]. Кроме того, на характеристики радиосигнала влияют солнечная активность [3], тепловые режимы атмосферы [4], влажность воздуха [5], плотность среды и т. д.

Турбулентные флуктуации в атмосфере, являясь стохастическим волновым процессом, взаимодействуют с детерминированным электромагнитным волновым процессом радиосигнала. Эти флуктуации, в частности, влияют на амплитуду и фазу электромагнитной волны, на общую интенсивность принимаемого антенной сигнала, вызывают рассеяние радиоволн и т. д. Многие из этих эффектов оказываются существенными для ряда

практических задач, связанных с распространением радиоволн через атмосферу. Эти эффекты могут служить источниками ошибок в системах связи, локации, радионавигации и т. д. Количество работ, посвященных влиянию турбулентности растет как за счет расширения круга рассматриваемых прикладных задач, так и за счет работ, направленных на уточнение принципиальных вопросов теории явления [6–9].

1. Характеристика мерцания радиосигнала на приемной антенне

Рассмотрим вопрос о флуктуациях потока энергии или мощности электромагнитной волны 1 за счет турбулентности атмосферы, падающей на приемную антенну 2, рис. 1, [10]. Этот процесс будем называть мерцанием радиосигнала. Мерцание радиосигнала создает помехи и ухудшает процесс передачи информации по радиоканалу. На рис. 1 начало координат условно смещено вниз относи-

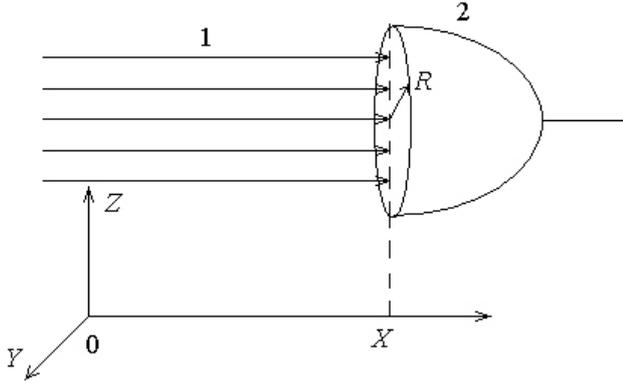


Рис. 1. Восприятие радиосигнала приемной антенной
Fig. 1. Perception of a radio signal by a receiving antenna

тельно центра приемной антенны 2. Также условно будем считать, что турбулентность начинается на координате $X = 0$, а на координате X находится приемная антенна.

Общую плотность потока энергии или интенсивность плоской электромагнитной волны можно задать по формуле

$$I(X) = I(0) \exp(2\chi'(X)), \quad (1)$$

где $\chi'(X)$ – флуктуации амплитуды эйконала радиосигнала [11] на координате X , $I(0)$ – постоянная составляющая интенсивности радиосигнала на координате $X = 0$ (где турбулентность отсутствует), падающего на приемную антенну. Коэффициент 2 использован, т. к. интенсивность радиосигнала (или модуль вектора Пойтинга) пропорциональна квадрату напряженностей электрического и магнитного полей в электромагнитной волне.

Флуктуации амплитуды эйконала и амплитуды электромагнитной волны связаны соотношением $\chi' = \ln(A/A_0)$ [11], где A – общая амплитуда волны на координате X , а A_0 – постоянная составляющая амплитуды на координате $X = 0$, где турбулентность отсутствует.

Следовательно:

$$\begin{aligned} I(X) &= I(0) \exp\left(2 \ln\left(\frac{A}{A_0}\right)\right) = \\ &= I(0) \exp\left(\ln\left(\frac{A}{A_0}\right)^2\right) = I(0) \left(\frac{A}{A_0}\right)^2 = \\ &= \frac{I(0)}{E_0^2} E^2 = \frac{\varepsilon E_0^2 c}{E_0^2} E^2 = \varepsilon E^2 c, \end{aligned} \quad (2)$$

где $A = E$ – напряженность электрического поля в электромагнитной волне; ε – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, в кото-

ром распространяется радиосигнал; c – скорость света в вакууме. Энергию электрической и магнитной составляющих волны считаем одинаковыми.

Поток энергии радиосигнала, падающий на антенну, можно найти по формуле

$$P(X) = \int_{\Sigma} I(X) dX = I(0) \int_{\Sigma} e^{2\chi'(X)} dX. \quad (3)$$

где Σ – площадь приемной антенны на координате X .

Удобнее рассматривать не саму величину P , а ее логарифм.

Характеристикой мерцания радиосигнала будем считать дисперсию величины $\ln P$, т. е. величину $\left\langle (\ln(P/P_0))^2 \right\rangle$, где угловые скобки означают пространственное осреднение величины, P_0 – значение величины P на координате $X = 0$, так что $\ln P_0 = \langle \ln P \rangle$.

Если считать распределение турбулентности по сечению антенны на координате X изотропным, получим $P = I(0) \Sigma e^{2\chi'}$. В этом случае величина:

$$\begin{aligned} \left\langle \left(\ln \frac{P}{P_0} \right)^2 \right\rangle &= \left\langle \left(\ln \frac{I(0) \Sigma e^{2\chi'}}{P_0} \right)^2 \right\rangle = \\ &= \left\langle \left(\ln e^{2\chi'} \right)^2 \right\rangle = 4 \langle \chi'^2 \rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

где учтено $P_0 = I(0) \Sigma$.

Введем безразмерную характеристику мерцания принимаемого радиосигнала:

$$G = \frac{1}{4 \langle \chi'^2 \rangle} \left\langle \left(\ln \frac{P}{P_0} \right)^2 \right\rangle. \quad (5)$$

Преобразуем второй сомножитель в формуле (5):

$$\begin{aligned} \left\langle \left(\ln \frac{P}{P_0} \right)^2 \right\rangle &= \left\langle (\ln P - \ln P_0)^2 \right\rangle = \\ &= \left\langle (\ln P)^2 - 2 \ln P \ln P_0 + (\ln P_0)^2 \right\rangle = \\ &= \left\langle (\ln P)^2 \right\rangle - 2 \ln P_0 \langle \ln P \rangle + \left\langle (\ln P_0)^2 \right\rangle = \\ &= \left\langle (\ln P)^2 \right\rangle - \langle \ln P \rangle^2 = \ln \left(\left\langle P^2 \right\rangle - \langle P \rangle^2 \right) = \ln \frac{\langle P^2 \rangle}{\langle P \rangle^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

При выводе (6) использовано соотношение $\ln P_0 = \langle \ln P \rangle$, а также принято, что величина P логарифмически нормальная.

Таким образом, формула (5) преобразуется к виду

$$G = \frac{1}{4\langle\chi^2\rangle} \ln \frac{\langle P^2 \rangle}{\langle P \rangle^2} = \frac{1}{4\langle\chi^2\rangle} \ln \frac{\langle P^2 \rangle}{\langle I \rangle^2 \Sigma^2}. \quad (7)$$

2. Корреляционная функция флуктуаций интенсивности радиосигнала

Рассмотрим корреляционную функцию флуктуаций интенсивности принимаемого радиосигнала:

$$B_{II}(|X_1 - X_2|, \rho) = \langle I(X_1 - \langle I \rangle) I(X_2 - \langle I \rangle) \rangle, \quad (8)$$

где $\rho = \sqrt{Y^2 + Z^2}$ – радиальная координата, которую в аргументах для интенсивностей не указываем.

Учитывая

$$\begin{aligned} \langle I(X_1 - \langle I \rangle) I(X_2 - \langle I \rangle) \rangle &= \\ = \langle I(X_1) I(X_2) - \langle I \rangle^2 \rangle &= \langle I(X_1) I(X_2) \rangle - \langle I \rangle^2, \end{aligned}$$

найдем:

$$\begin{aligned} \langle P^2 \rangle &= \iint_{\Sigma} \langle I(X_1) I(X_2) \rangle dX_1 dX_2 = \\ = \langle I \rangle^2 \Sigma^2 + \iint_{\Sigma} B_{II}(|X_1 - X_2|, \rho) dX_1 dX_2 \rho d\rho d\varphi, \end{aligned} \quad (9)$$

где φ – угловая координата в плоскости приемной антенны.

Рассмотрим флуктуацию интенсивности принимаемого сигнала в поперечном сечении приемной антенны радиуса R , рис. 2.

Рассмотрим две области 3 и 4 в поперечном сечении радиосигнала. Интенсивности в этих областях немного отличаются друг от друга – флуктуация интенсивностей. Примем обе области круговые с радиусом R . Предположим, что область 4 частично перекрывает область 3, так что окружность области 4 проходит через центр области 3. Хотя точная реализация такой модели на практике маловероятна, она позволяет рассчитать радиальную корреляцию интенсивностей радиосигнала. В данной модели корреляция интенсивностей возникнет на удвоенной площади заштрихованного сегмента, рис. 2. Площадь произвольного сегмента 5 можно найти, вычтя из площади сектора с углом 2φ площадь равностороннего треугольника с вершинным углом 2φ :

$$S_5 = \varphi R^2 - \frac{1}{2} \rho^2 \sin 2\varphi = \quad (10)$$

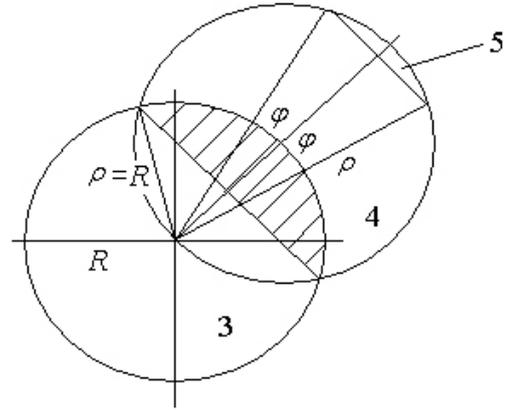


Рис. 2. К расчету корреляции флуктуаций интенсивности радиосигнала в поперечном сечении антенны
Fig. 2. To the calculation of the correlation of fluctuations in the intensity of the radio signal in the cross section of the antenna

$$\begin{aligned} &= \varphi R^2 - \rho^2 \cos \varphi \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \\ &= R^2 \left(\varphi - \frac{\rho^2}{R^2} \cos \varphi \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \right). \end{aligned}$$

Для удвоенного заштрихованного сегмента $\rho = R$, поэтому формулу (10) можно переписать в виде

$$S_5 = R^2 \left(\varphi - \cos \varphi \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \right). \quad (11)$$

Обозначим $\cos \varphi = t$. Поэтому удвоенную заштрихованную площадь $2S_5$ можно записать в виде

$$2S_5 = 2R^2 \left(\arccos t - t \sqrt{1 - t^2} \right). \quad (12)$$

Фактически с помощью формулы (12) мы геометрическим способом нашли интеграл в формуле (9) по переменной $\rho = 2Rt$. Следовательно:

$$\begin{aligned} \langle P^2 \rangle &= \iint_{\Sigma} \langle I(X_1) I(X_2) \rangle dX_1 dX_2 = \\ = \langle I \rangle^2 \Sigma^2 + 16 \Sigma \iint_{\Sigma} B_{II}(|X_1 - X_2|, 2Rt) S_5 dX_1 dX_2 dt. \end{aligned} \quad (13)$$

Учитывая (12), формулу (9) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \langle P^2 \rangle &= \langle I \rangle^2 \Sigma^2 + \frac{16}{\pi} \Sigma^2 \iint_{X_1, X_2} \int_0^1 B_{II}(|X_1 - X_2|, 2Rt) \times \\ &\times \left(\arccos t - t \sqrt{1 - t^2} \right) t dt dX_1 dX_2. \end{aligned} \quad (14)$$

Подобная формула, найденная несколько более формальным путем, была получена в [8].

Подставляя (14) в (7), найдем:

$$G = \frac{1}{4\langle\chi'^2\rangle} \ln \left(1 + \frac{16}{\pi} \iint_{X_1, X_2} \int_0^1 \frac{B_{II}(|X_1 - X_2|, 2Rt)}{\langle I \rangle^2} \times \right. \quad (15)$$

$$\left. \times \left(\arccost - t\sqrt{1-t^2} \right) t dt dX_1 dX_2 \right).$$

Замечаем, что интеграл:

$$\frac{16}{\pi} \int_0^1 \left(\arccost - t\sqrt{1-t^2} \right) t dt = 1, \quad (16)$$

и, подставляя в (15) вместо единицы значение (16), преобразуем формулу (15) к виду

$$G = \frac{1}{4\langle\chi'^2\rangle} \ln \left(\frac{16}{\pi} \iint_{X_1, X_2} \int_0^1 \left(1 + \frac{B_{II}(|X_1 - X_2|, 2Rt)}{\langle I \rangle^2} \right) \times \right. \quad (17)$$

$$\left. \times \left(\arccost - t\sqrt{1-t^2} \right) t dt dX_1 dX_2 \right).$$

Проведем интегрирование корреляционной функции $B_{II}(|X_1 - X_2|, 2Rt)$ в продольном направлении. Учитывая $I(X) = I(0)e^{2\chi'(X)}$, преобразуем в (9) среднее значение:

$$\langle I(X_1)I(X_2) \rangle = \langle I \rangle^2 + B_{II}(|X_1 - X_2|) = \quad (18)$$

$$= I^2(0) \left\langle \exp \left(2\chi'(X_1) + 2\chi'(X_2) \right) \right\rangle =$$

$$= I^2(0) \exp \left\langle 2 \left(\chi'(X_1) + \chi'(X_2) \right)^2 \right\rangle.$$

Последнее равенство справедливо для нормального двумерного совместного распределения случайных величин $\chi'(X_1)$ и $\chi'(X_2)$. Для нормально распределенной случайной величины справедливо соотношение $\langle \exp(2\chi') \rangle = \exp(2\langle\chi'^2\rangle)$.

Проведем дальнейшие преобразования формулы (18):

$$\langle I \rangle^2 + B_{II}(|X_1 - X_2|) = \quad (19)$$

$$= I^2(0) \exp \left\langle 2 \left(\chi'(X_1) + \chi'(X_2) \right)^2 \right\rangle =$$

$$= I^2(0) \exp \left\langle \left(2\chi'^2(X_1) + 2\chi'^2(X_2) \right)^2 + \right.$$

$$\left. + 4\chi'(X_1)\chi'(X_2) \right\rangle = I^2(0) \exp \left\langle 4\chi'^2 + 4B_{\chi\chi} \right\rangle,$$

где $B_{\chi\chi} = \langle \chi'(X_1)\chi'(X_2) \rangle$ – двухточечные корреляционные соотношения амплитудных пульсаций электромагнитной волны за счет турбулентности атмосферы [11].

Вместо корреляционной функции $B_{\chi\chi} = \langle \chi'(X_1)\chi'(X_2) \rangle$ используем корреляционную функцию флуктуаций логарифма амплитуды в виде

$$R_{\chi\chi}(|X_1 - X_2|) = \frac{B_{\chi\chi}(|X_1 - X_2|)}{\langle\chi'^2\rangle}. \quad (20)$$

Следовательно, формулу (19) можно записать в виде

$$\langle I \rangle^2 + B_{II}(|X_1 - X_2|) = \quad (21)$$

$$= I^2(0) \exp \left\langle 4\chi'^2 \left(1 + R_{\chi\chi}(|X_1 - X_2|) \right) \right\rangle.$$

Учитывая $\langle I \rangle = I(0) \exp \left(2\langle\chi'^2\rangle \right)$, имеем:

$$B_{II}(|X_1 - X_2|) = \frac{\langle I \rangle^2}{\exp \left(4\langle\chi'^2\rangle \right)} \times \quad (22)$$

$$\times \left(\exp \left\langle 4\chi'^2 \left(1 + R_{\chi\chi}(|X_1 - X_2|) \right) \right\rangle - \langle I \rangle^2 \right) =$$

$$= \langle I \rangle^2 \left(\exp \left\langle 4\chi'^2 R_{\chi\chi}(|X_1 - X_2|) \right\rangle - 1 \right) =$$

$$= \langle I \rangle^2 \left(\exp \left(\langle 4\chi'^2 \rangle R_{\chi\chi}(|X_1 - X_2|) \right) - 1 \right).$$

Подставляя формулу (22) в (17) и используя $B_{II}(|X_1 - X_2|, 2Rt) = B_{II}(|X_1 - X_2|)B_{II}(2Rt)$, найдем радиальную зависимость функции:

$$G(R) = \frac{1}{4\langle\chi'^2\rangle} \times \quad (23)$$

$$\times \ln \left(\frac{16}{\pi} \iint_{X_1, X_2} \int_0^1 \left(\exp \left(\langle 4\chi'^2 \rangle R_{\chi\chi}(|X_1 - X_2|, 2Rt) \right) \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left(\arccost - t\sqrt{1-t^2} \right) t dt dX_1 dX_2 \right) =$$

$$= \frac{1}{4\langle\chi'^2\rangle} \ln \left(\frac{16}{\pi} \int_0^1 \exp \left(\langle 4\chi'^2 \rangle R_{\chi\chi}(2Rt) \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left(\arccost - t\sqrt{1-t^2} \right) t dt \right).$$

В формуле (23) интегрирование по координатам X_1 и X_2 не проводится.

Учитывая $B_{\chi\chi} = \langle \chi'^2 \rangle R_{\chi\chi}$ и $B_{nn} = \mu B_{\chi\chi}$ [11], где B_{nn} – двухточечная корреляция турбулентных флуктуаций показателя преломления, μ – посто-

янный масштабный коэффициент пропорциональности, формулу (23) можно записать в виде

$$G(R) = \frac{1}{4\langle\chi^{1/2}\rangle} \ln \left(\frac{16}{\pi} \int_0^1 \exp \left(\frac{4}{\mu} B_{nn}(2Rt) \right) \times \right. \quad (24)$$

$$\left. \times \left(\arccos t - t\sqrt{1-t^2} \right) t dt \right).$$

При малых величинах t подынтегральная функция в (24) равна $\exp \left(\frac{4}{\mu} B_{nn}(2Rt) \right) \frac{\pi}{2} t$, поэтому формулу (24) можно записать в виде

$$G(R) = \frac{1}{4\langle\chi^{1/2}\rangle} \ln \left(8 \int_0^1 \exp \left(\frac{4}{\mu} B_{nn}(2Rt) \right) t dt \right). \quad (25)$$

3. Корреляционная функция атмосферных турбулентных флуктуаций

Фурье-спектр двухточечной корреляции турбулентных флуктуаций показателя преломления имеет вид [11]:

$$B_{nn}(2Rt) = \int e^{-i\zeta\rho} F_{nn}(\zeta, \rho) d\zeta = \quad (26)$$

$$= \int_0^{\zeta} e^{-i\zeta 2Rt} F_{nn}(\zeta, 2Rt) d\zeta,$$

где ζ – волновой вектор турбулентных пульсаций.

Пренебрегая зависимостью функции F_{nn} от радиальной координаты $\rho = 2Rt$, принимаем $F_{nn}(\zeta) \approx \beta\zeta^{1/3}$, где β – постоянный коэффициент. Данный закон в основном отражает турбулентную инерционную область [11]. Турбулентность в этой области находится в статистическом равновесии: поток энергии от более крупных турбулентных вихрей к более мелким определяется вязкой диссипацией самых мелких вихрей.

Используя также действительную часть экспоненты в формуле (26), имеем:

$$B_{nn}(2Rt) = \beta \int_0^{\zeta} \zeta^{1/3} \cos(2\zeta Rt) d\zeta. \quad (27)$$

Интеграл (27) в квадратурах точно найти невозможно, поэтому используем разложение $\cos(2\zeta Rt) = 1 - 2\zeta^2 R^2 t^2$. В этом случае:

$$B_{nn}(2Rt) = \beta \int_0^{\zeta} \zeta^{1/3} (1 - 2\zeta^2 R^2 t^2) d\zeta = \quad (28)$$

$$= \beta \left(\frac{3}{4} \zeta^{4/3} - \frac{6}{10} \zeta^{10/3} R^2 t^2 \right).$$

Подставляя (28) в (25), найдем:

$$G(R) = \quad (29)$$

$$= \frac{1}{4\langle\chi^{1/2}\rangle} \ln \left(8 \int_0^1 \exp \left(\frac{4}{\mu} \beta \left(\frac{3}{4} \zeta^{4/3} - \frac{6}{10} \zeta^{10/3} R^2 t^2 \right) \right) t dt \right) =$$

$$= \frac{1}{4\langle\chi^{1/2}\rangle} \ln \left(\frac{5\mu}{\left(\frac{10}{3\beta\zeta^{3/3} R^2} \right)} \exp \left(\frac{3}{\mu} \beta \zeta^{4/3} \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left(1 - \exp \left(-\frac{12}{5\mu} \beta \zeta^{10/3} R^2 \right) \right) \right).$$

Эта формула довольно сложна для анализа. Упростим ее, разложив последнюю экспоненту в ряд $e^{\delta} = 1 + \delta$. В результате получим:

$$G(R) = \frac{1}{4\langle\chi^{1/2}\rangle} \ln \left(4 \exp \left(\frac{3}{\mu} \beta \zeta^{4/3} \right) \right) = \quad (30)$$

$$= \frac{1}{4\langle\chi^{1/2}\rangle} \left(\ln 4 + \frac{3\beta}{\mu} \zeta^{4/3} \right).$$

Учитывая (5), находим зависимость характеристики мерцания радиосигнала от волнового числа турбулентных пульсаций:

$$\left\langle \left(\ln \frac{P}{P_0} \right)^2 \right\rangle = 4\langle\chi^{1/2}\rangle G = \quad (31)$$

$$= \ln 4 + \frac{3\beta}{\mu} \zeta^{4/3} = 1,386 + \frac{3\beta}{\mu} \zeta^{4/3}.$$

На рис. 3 показан график зависимости по формуле (31), построенный при условии $\beta = \mu$. Размерность отношения $[\beta/\mu] = \text{м}^{4/3}$. Отклонение первого слагаемого от нуля связано с общей приближенностью теоретического анализа. Должно выполняться условие: при $\zeta = 0$ (бесконечно большие турбулентные пульсации) характеристика

$$\text{мерцания} \left\langle \left(\ln \frac{P}{P_0} \right)^2 \right\rangle = 0, \text{ т. к. } P = P_0.$$

Из рис. 3. видно, что при росте волнового числа турбулентных пульсаций наблюдается увеличение мерцания радиосигнала, воспринимаемого при-

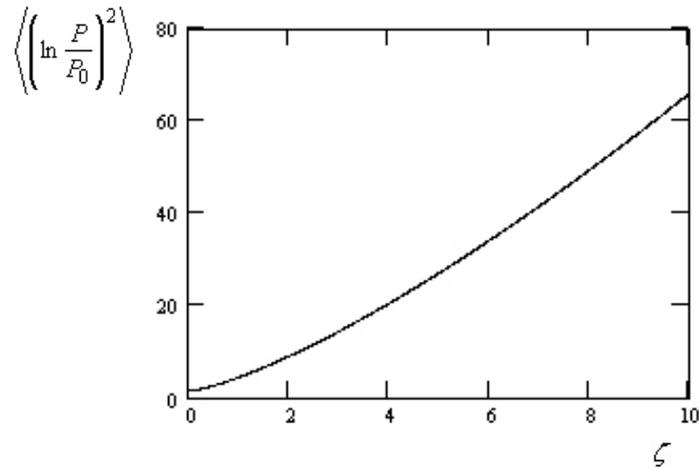


Рис. 3. Зависимость характеристики мерцания радиосигнала на приемной антенне от волнового числа турбулентных пульсаций атмосферы

Fig. 3. Dependence of the characteristics of the scintillation of the radio signal at the receiving antenna on the wave number of turbulent atmospheric pulsations

емной антенной. В действительности график должен начинаться из точки (0,0).

Влияние турбулентных пульсаций на радиосигнал максимально в том случае, когда длина электромагнитной волны близка к масштабу турбулентных пульсаций. В атмосфере имеются турбулентные пульсации самых разных масштабов. В таблице показаны примерные границы масштабов турбулентных пульсаций в тропосфере, стратосфере и ионосфере [6].

Турбулентные пульсации различных масштабов не существуют отдельно друг от друга. Турбулентные пульсации больших масштабов включают в себя турбулентные пульсации более малых масштабов.

Таким образом, масштабы турбулентных пульсаций покрывают любые диапазоны длин радиоволн [12], в частности СВЧ-излучение с длиной волны $\lambda = 1-10$ см и УКВ-излучение с длиной волны $\lambda = 10$ см – 10 м. Воздействие турбулентности осуществляется также на диапазоны длинных волн $\lambda = 10-1$ км, средних волн $\lambda = 1$ км – 100 м и коротких волн $\lambda = 100$ м – 10 м.

Заключение

Турбулентные явления в атмосфере, связанные с пульсациями показателя преломления, оказывают влияние на прохождение радиосигнала. Они могут привести к искажению передаваемой информации за счет флуктуаций амплитуды и фазы электромагнитной волны, которая передает радиосигнал. Существенное значение имеют флуктуации интенсивности электромагнитной волны, приводящие к мерцанию радиосигнала на при-

Таблица. Примерные границы масштабов турбулентных пульсаций в тропосфере, стратосфере и ионосфере
Table. Approximate boundaries of the scales of turbulent pulsations in the troposphere, stratosphere and ionosphere

Среда	λ_m	λ_0
Тропосфера	1,4 км	1 см
Стратосфера	3 км	0,5 см
Ионосфера	20 км	10 м

емной антенне. В работе введено понятие характеристики мерцания радиосигнала как среднего по сечению приемной антенны значения случайной величины – дисперсии логарифма мощности радиосигнала.

Турбулентность атмосферы представляет собой сложное физическое явление. Масштабы турбулентных пульсаций очень различаются по величине – от 0,5 см до 20 км. При этом турбулентные пульсации малых масштабов входят как составляющие в турбулентные пульсации больших масштабов. Наибольшее влияние на радиосигнал турбулентность атмосферы оказывает, когда длина электромагнитной волны сравнима с масштабом турбулентных пульсаций.

В работе удалось рассчитать ситуацию, когда размер турбулентной пульсации занимает определенный сегмент круговой принимающей антенны. В этом случае получаются довольно простые соотношения для корреляционной функции флуктуаций интенсивности принимаемого радиосигнала. При использовании Фурье-спектра двухточечной корреляции турбулентных флуктуаций показателя преломления в т. н. инерционной области

турбулентности найдена связь характеристики мерцания радиосигнала на приемной антенне от волнового числа турбулентных пульсаций атмосферы. При росте волнового числа турбулентных пульсаций возрастает характеристика мерцания радиосигнала.

Список литературы

1. Концепция глобально-интегрированной инфраструктуры пространственно-территориального развития как основа Генеральной схемы развития сетей связи Российской Федерации в рамках плана мероприятий по направлению «Информационная инфраструктура» программы «Цифровая экономика Российской Федерации» / С.А. Попов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 1. С. 67–79. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.1.67-79>
2. Некоторые особенности взаимодействия радиосигнала с турбулентной атмосферой / Д.С. Ключев [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 4. С. 122–128. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.122-128>
3. Нестеров В.И. Влияние солнечной активности на фазу принимаемого сигнала ОНЧ-диапазона // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 3. С. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.3.21-26>
4. Нестеров В.И. Сравнительный анализ данных о внезапных ионосферных возмущениях // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 1. С. 17–22. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7061>
5. Потапов А.А. Анализ и синтез топологических радиолокационных обнаружителей малоcontrastных целей на фоне интенсивных помех от земли, моря и осадков как новая ветвь теории статистических решений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2016. Т. 19, № 4. С. 19–29. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7126>
6. Распространение радиоволн / О.И. Яковлев [и др.]. М.: Ленанд, 2019. 496 с.
7. Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу. М.: Радио и связь, 1983. 224 с.
8. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
9. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 2. М.: Наука, 1967. 720 с.
10. Неганов В.А., Ключев Д.С., Табаков Д.П. Устройства СВЧ и антенны: Теория и техника антенн. Ч. 2. М.: Ленанд, 2020. 728 с.
11. 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>
12. Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов [и др.]. М.: Радиотехника, 2007. 476 с.

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>

Краснов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, математики и информатики Самарского государственного медицинского университета, г. Самара, Россия. Автор более 100 научных работ.

Область научных интересов: биофизика, информационные технологии в медицине, теория искусственного интеллекта.

E-mail: s.v.krasnov@samsmu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5437-3062>

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

2023, vol. 26, no. 3, pp. 11–19

DOI 10.18469/1810-3189.2023.26.3.11-19
UDC 532.537
Original Research

Received 18 March 2023
Accepted 19 April 2023
Published 27 September 2023

Flickering of a radio-signal due to an atmospheric turbulence

Dmitriy S. Klyuev¹ , Andrey N. Volobuev² , Sergei V. Krasnov² ,
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. Turbulent fluctuations of the refractive index in the atmosphere lead to distortions during the passage of the radio signal. This can lead to distortion of the transmitted information due to the resulting fluctuations of the amplitude, phase and intensity of the electromagnetic wave that transmits the radio signal. Fluctuations in the intensity of the radio signal lead to flickering of the radio signal on the receiving antenna due to turbulent phenomena in the atmosphere, which are a complex multifunctional physical phenomenon. **Aim.** The problem of fluctuation of the intensity of the radio signal at the receiving antenna due to atmospheric turbulence is considered – the flicker of the radio signal. This problem is currently extremely actual, because there is a tendency of active, negative interference in the process of high-quality transmission of the radio signal on the background of naturally caused turbulent fluctuations. **Methods.** A theoretical analysis of the passage of a radio signal through a turbulent atmosphere is carried out. The spatial correlation function of fluctuations in the intensity of the received radio signal due to atmospheric turbulence is investigated. **Results.** The concept of the radio signal flicker characteristic is introduced as the average value of a random variable over the cross section of the receiving antenna – the dispersion of the logarithm of the radio signal power. A model of the occurrence of fluctuations in the case of two regions in the cross section of the receiving antenna with different levels of radio signal intensity is calculated. The correlation function for this model is found. **Conclusion.** Based on the Fourier-spectrum expansion of the two-point spatial correlation function of turbulent fluctuations of the refractive index, the dependence of the flicker characteristic of the radio signal on the wave number of turbulent fluctuations of the atmosphere is found. It is shown that the turbulence of the atmosphere has the greatest effect on the radio signal when the length of the electromagnetic wave is comparable to the scale of turbulent fluctuations.

Keywords – atmospheric turbulence; radio-signal; radio wave; fluctuations of intensity; two-point spatial turbulent correlations; Fourier spectrum.

✉ volobuev47@yandex.ru (Andrey N. Volobuev)

 © Dmitriy S. Klyuev et al., 2023

References

1. S. A. Popov et al., “The concept of a global-integrated infrastructure of spatial and territorial development as the basis of the General scheme for the development of communication networks of the Russian Federation in the framework of the action plan for the «Information infrastructure» program of the «Digital economy of the Russian Federation»,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 67–79, 2019, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.1.67-79>. (In Russ.)
2. D. S. Klyuev et al., “Some features of a radio signal interaction with a turbulent atmosphere,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 122–128, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.122-128>. (In Russ.)
3. V. I. Nesterov, “Influence of solar activity on the phase of the received signal VLF range,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 21–26, 2019, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.3.21-26>. (In Russ.)
4. V. I. Nesterov, “Comparative analysis on sudden ionospheric disturbance,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 17–22, 2018, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7061>. (In Russ.)
5. A. A. Potapov, “Analysis and synthesis of topological radar detectors of low-contrast targets against the background of high intensity noise from the earth, sea and precipitation as the new branch of the statistical decision theory,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 19–29, 2016, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7126>. (In Russ.)
6. O. I. Yakovlev et al., *Propagation of Radio Waves*. Moscow: Lenand, 2019. (In Russ.)
7. Yu. A. Kravtsov, Z. I. Feyzulin, and A. G. Vinogradov, *Passage of Radio Waves Through the Atmosphere*. Moscow: Radio i svyaz', 1983. (In Russ.)
8. V. I. Tatarskiy, *Wave Propagation in a Turbulent Atmosphere*. Moscow: Nauka, 1967. (In Russ.)
9. A. S. Monin and A. M. Yaglom, *Statistical Hydromechanics*, vol. 2. Moscow: Nauka, 1967. (In Russ.)
10. V. A. Neganov, D. S. Klyuev, and D. P. Tabakov, *Microwave Devices and Antennas: Antenna Theory and Technique*, p. 2. Moscow: Lenand, 2020. (In Russ.)

11. 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.)
12. V. A. Neganov et al., *Electrodynamics and Propagation of Radio Waves*. Moscow: Radiotekhnika, 2007. (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>

Sergei V. Krasnov, Doctor of Technical Sciences, professor, chief of the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics, Samara State Medical University, Samara, Russia. Author of over 100 scientific papers.

Research interests: biophysics, information technologies in medicine, theory of artificial intellect.

E-mail: s.v.krasnov@samsmu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5437-3062>

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>