

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.1.3>

УДК: 621.396.93

ЛОГНОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН В СОТОВЫХ СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

С.Г. Цветков

г. Москва

Статья поступила в редакцию 24 сентября 2021 года

Аннотация. Представлены основные положения устойчивой детерминированной модели для расчета затухания средней мощности сигнала при распространении радиоволн дециметрового диапазона вдоль нормальной рассеивающей поверхности. Предлагаемая модель основана на свойстве логнормального распределения вариаций средней приемной мощности относительно медианного уровня глобального степенного закона распространения радиоволн и призвана повысить точность и достоверность прогнозирования среднего затухания сигнала вдоль земной поверхности. Модель может быть применена для высокоточного расчета радиопокрытия и выявления межсотовой интерференции в мобильных сотовых сетях связи, а также может повысить точность расчета радиорелейных линий связи.

Ключевые слова: распространение радиоволн дециметрового диапазона, случайное рассеяние радиоволн рассеивающей поверхностью, прогнозирование затухания средней мощности сигнала, логарифмически нормальное распределение вероятностей, плоскость зеркального отражения, нормальная рассеивающая поверхность.

Abstract. The main provisions of a stable deterministic model for calculating the attenuation of the average signal power during the propagation of radio waves in the decimeter range along a normal scattering surface are presented. The proposed model is based on the property of the lognormal distribution of variations in the average

receiving power relative to the median level of the global power law of radio wave propagation and is designed to improve the accuracy and reliability of predicting the average signal attenuation along the earth's surface. The model can be used for high-precision calculation of radio coverage and detection of inter-cell interference in mobile cellular communication networks, and can also improve the accuracy of calculating radio relay communication lines.

Keywords: propagation of radio waves of the decimeter range, random scattering of radio waves by a scattering surface, predicting the attenuation of the average signal power, log-normal probability distribution, plane of specular reflection, normal scattering surface.

Автор для переписки: С.Г. Цветков, tsg001@rambler.ru

Введение

По результатам эксперимента Окумура в дециметровом диапазоне радиоволн в [1] отмечается, что перемещение приемника на несколько метров вызывает резкое изменение измеренного уровня напряженности поля на 10...20 дБ. При этом случайный характер отклонений соответствует распределению Рэлея. Эмпирические примеры распределения средней напряженности поля на небольшом интервале выборки в основном аппроксимируют логарифмически нормальное распределение вероятностей. Медианные значения средней напряженности поля подчиняются степенному закону распространения радиоволн в зависимости от протяженности трассы. Такое обобщение экспериментальных наблюдений представлено в [2] как три режима распространения радиоволн в мобильных сетях связи. Свойство логнормального распределения вариаций средней приемной мощности сигнала относительно медианного уровня глобального степенного закона распространения радиоволн объясняется с помощью центральной предельной теоремы (ЦПТ) теории вероятностей.

Отмеченное универсальное свойство может внести заметный вклад в повышение точности и достоверности прогнозирования затухания средней

мощности сигнала в дециметровом диапазоне радиоволн, что является основной задачей настоящей работы.

Причиной наблюдаемых резких изменений мгновенной напряженности поля в пределах всего нескольких метров может являться случайное рассеяние радиоволн динамичной (перемещение мобильного приемника, транспортный трафик, растительность и т.п.) рассеивающей поверхностью (РП). В частном случае для гладких поверхностей, удовлетворяющих критерию Рэлея, устойчивым к погрешностям исходных данных решением расчета потерь мощности сигнала L в дБ относительно потерь в свободном пространстве является интерференционная формула [3], которая в простейшем случае для малых углов скольжения над плоскостью, обладающей свойствами диэлектрика (фаза отражения $\theta \approx \pi$), может быть представлена в следующем виде:

$$L = -20 \lg(F), \quad (1)$$

где $F = \sqrt{1 - 2R \cos(\Delta\varphi) + R^2}$ – множитель ослабления, R – коэффициент отражения Френеля, $\Delta\varphi$ – фаза запаздывания за счет разности хода отраженного луча относительно прямого.

Для относительно коротких трасс ($\Delta\varphi > \pi$) формула (1) характеризует интерференционную структуру поля. Для более протяженных трасс ($\Delta\varphi \leq \pi$) множитель ослабления F монотонно убывает с увеличением длины трассы. При меньших значениях $\Delta\varphi \leq \frac{\pi}{4.5}$ для весьма протяженных трасс $F \approx \Delta\varphi$, что соответствует известной формуле Введенского. Формула (1) не объясняет случайных изменений измеренной приемной мощности сигнала, встречающихся повсеместно на реальных трассах различной протяженности в дециметровом диапазоне.

Очевидно, что в практике мобильной сотовой связи наиболее распространенными являются РП, существенно отличающиеся от гладких, удовлетворяющих критерию Рэлея. В обзоре [4] такого рода РП классифицируются как статистически шероховатые поверхности, неровности

которых образованы естественными причинами. Отмечается незавершенность теории по рассеянию волн такими РП по причине обилия требующих внимания факторов. Несмотря на значительные достижения современных методов интегрального и параболического уравнений для вычисления множителя ослабления радиоволн над земной поверхностью [5,6], поиск решений, устойчивых к погрешностям определения многочисленных исходных данных, характеризующих динамичную РП, остается актуальной задачей в мобильной сотовой связи.

В настоящей работе на основе фундаментальных теоретических решений [3,7-10] определяются и обосновываются свойства РП, которые соответствуют случайному характеру поведения измерений электромагнитного поля [1,2] и позволяют просто и эффективно осуществить регуляризацию неустойчивого решения поставленной задачи. Адаптация методов [7,8] к таким свойствам РП приводит к формированию представленной в статье устойчивой (к погрешностям исходных данных) детерминированной (не требующей калибровки исходных данных) логнормальной модели рассеяния (ЛМР). Для простоты изложения материала рассмотрен случай РП, обладающих свойствами диэлектрика ($\theta \approx \pi$).

1. Свойства нормальной рассеивающей поверхности для открытых земных трасс

Пусть согласно [1,2] потери L воздушного интерфейса средней приемной мощности сигнала по отношению к излучаемой при выражении их в дБ представляют собой случайную величину, распределенную по нормальному закону. Медианной оценкой затухания средней мощности сигнала в заданной точке и ее окрестности является математическое ожидание (МО) случайной величины L , которое характеризует искомые средние потери рассеяния. Для нормального закона справедливо «правило трех сигма» (3σ), согласно которому по заданным значениям МО и среднеквадратического отклонения (СКО) с вероятностью 0.997 можно определить доверительный интервал изменения

значений случайной величины L . В настоящей работе исходя из представленных ниже свойств РП определяются границы доверительного интервала $L_{\min} \leq L \leq L_{\max}$, по которым с высокой вероятностью определяется МО случайной величины L . При этом выражение для искомого МО \bar{L} в дБ имеет следующий вид:

$$\bar{L} = \frac{L_{\min} + L_{\max}}{2}. \quad (2)$$

Предположим (1-е свойство), что возмущение поля рассеивающей поверхностью открытой трассы не превосходит возмущение от плоскости зеркального отражения (ПЗО), соответствующей основному препятствию этой РП, однако может к нему приближаться. Предположим также (2-е свойство), что размещение на трассе такой ПЗО в определенной степени случайно, что приводит к случайному изменению фазы запаздывания $\Delta\varphi$ отраженного от ПЗО сигнала в достаточно большом диапазоне, соответствующем изменению значений функции $\cos(\Delta\varphi)$ из (1) от -1 до 1. Поверхность, обладающую двумя указанными свойствами, назовем нормальной рассеивающей поверхностью (НРП).

Для НРП согласно (1) можно ожидать следующий диапазон случайного изменения множителя ослабления:

$$1 - R \leq F \leq 1 + R, \quad (3)$$

который согласуется с присутствующими в измерениях случайными замираниями сигнала и определяет границы искомого доверительного интервала $L_{\min} \leq L \leq L_{\max}$.

Введение понятия НРП является по существу механизмом регуляризации неустойчивой задачи и согласуется с общими физическими представлениями о том, что в случае неустойчивости результатов расчета фазы к ошибкам исходных данных, амплитуда, в данном случае коэффициент R , остается единственным информативным параметром, характеризующим потери рассеяния.

Достаточно строгое теоретическое обоснование наличия у широкого класса земных поверхностей 1-го свойства НРП можно получить с помощью результатов [7], где на основе решения уравнений Максвелла рассмотрены методы определения множителя ослабления для случая распространения радиоволн вдоль гладкой сферической земной поверхности. Там же полученные результаты применены для учета влияния рельефа местности на величину множителя ослабления при замене реального препятствия сферой при условии выполнения критерия Рэлея. Так согласно [7] для открытых трасс с одиночным препятствием при достаточно больших значениях просвета между линией прямой видимости между приемо-передатчиками (ПП) и наиболее высокой точкой профиля трассы (при $\Delta\varphi \geq \frac{\pi}{3}$), множитель ослабления может быть оценен по формуле, аналогичной формуле (1):

$$F_S = \sqrt{1 - 2RD \cos(\Delta\varphi) + R^2 D^2}, \quad (1a)$$

где D – коэффициент расходимости сферического препятствия ($0 \leq D \leq 1$).

Коэффициент расходимости стремится к единице лишь для идеально плоских поверхностей, например, согласно [7] (формулы 6.2.7-6.2.8, $\Delta y = 0$) возмущение поля при отражении от плоской крыши строения может приближаться к возмущению при отражении от плоскости ($D=1$). Таким образом множитель ослабления F_S из (1a), соответствующий произвольной трассе с одиночным препятствием, не может превысить диапазон (3), характерный для соответствующей этому препятствию ПЗО, однако может к нему приближаться, что означает выполнение 1-го свойства НРП. Полагая в соответствии с [7], что наличие дополнительных препятствий на открытой трассе, как правило, не приводит к увеличению результирующего возмущения поля, можно ожидать, что 1-е свойство НРП с большой вероятностью выполняется для открытых земных трасс.

Теоретическое обоснование 2-го свойства НРП для открытых земных поверхностей связано с условием применимости формулы (1a): $\Delta\varphi \geq \frac{\pi}{3}$, которая

справедлива в основном в интерференционной зоне, включающей все минимумы и максимумы множителя ослабления. Иначе, при $\Delta\varphi < \frac{\pi}{3}$ согласно [7] следует применять дифракционные формулы.

Применение формулы (1а) в интерференционной зоне предъявляет повышенные требования к точности определения исходных данных РП. Такие требования зачастую невыполнимы для определения фазы запаздывания $\Delta\varphi$ с точностью, соответствующей критерию Рэлея, что вынуждает довольствоваться определением диапазона изменения множителя ослабления (3), предполагая выполнение 2-го свойства НРП. Физические предпосылки выполнения этого свойства для открытых трасс земной поверхности обсуждаются в разделе 3.

В следующем разделе модель [7] адаптируется к условиям НРП. С привлечением результатов [8] определяется критерий выбора основного препятствия трассы и соответствующей ПЗО, оценивается максимальное значение R доверительного интервала (3), приводится формула расчета средних потерь рассеяния на открытых трассах, удовлетворяющих свойствам НРП.

2. Логнормальная модель рассеяния для открытых земных трасс

Способ [8] определения существенной зоны отражения от плоской поверхности как части поверхности, пересекающейся с наиболее значимыми конфокальными эллипсоидами вращения (КЭВ), которые соответствуют зонам Френеля и определяют существенную зону распространения волн в свободном пространстве, можно использовать для определения основного препятствия на открытых земных трассах.

Любая точка трассы принадлежит одному из КЭВ. Для наглядности ограничимся вертикальной плоскостью (двумерный вариант ЛМР). Построим ПЗО, являющуюся касательной к КЭВ в произвольно заданной точке трассы (см. рисунок 1). Эта точка является точкой зеркального отражения для ПЗО (угол падения равен углу отражения). Возмущение поля от такой ПЗО соответствует множителю ослабления F из (1), где

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi \tilde{h}_1 \tilde{h}_2}{\lambda r}, \quad (4)$$

r – протяженность трассы, λ – длина волны, \tilde{h}_1, \tilde{h}_2 – приведенные высоты антенн ПП относительно ПЗО.

Согласно модели Калинина [7], приведенные высоты можно выразить через физические параметры трассы следующим образом:

$$\tilde{h}_1 = \frac{H}{2k}, \tilde{h}_2 = \frac{H}{2(1-k)}, \quad (5)$$

где $H = k(h_1 - h_2) + h_2 - \delta$ – просвет между заданной точкой трассы и линией прямой видимости (LOS) между ПП с высотами антенн h_1 и h_2 , $k = \frac{b}{r}$, b – расстояние от ПП с высотой h_2 до заданной точки трассы, δ – высота заданной точки трассы.

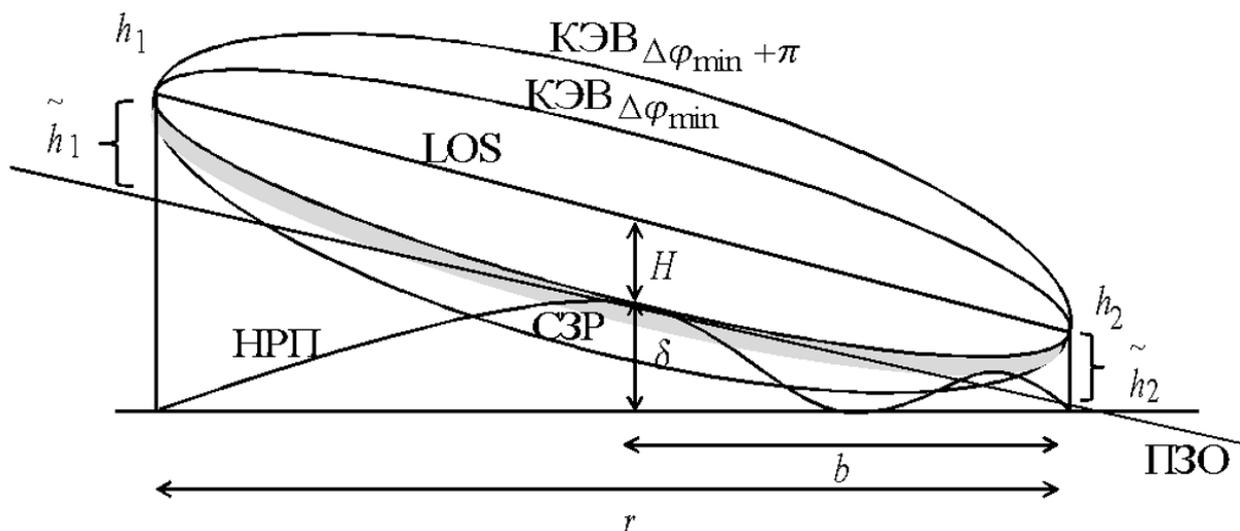


Рис. 1. Иллюстрация НРИП, КЭВ, ПЗО, СЗР

Согласно рисунку 1 через величину просвета H также выражается дифракционный параметр ν соответствующего КЭВ:

$$\nu = -\frac{\sqrt{2H}}{r_F},$$

где $r_F = \sqrt{\lambda r k(1-k)}$ – радиус первой зоны Френеля.

Отсюда согласно (4,5) получаем зависимость между фазой запаздывания и дифракционным параметром:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi v^2}{2}. \quad (6)$$

Формулы (5) справедливы для части трассы, в достаточной степени удаленной от ПП, при выполнении условия $\frac{\tilde{h}_1 + \tilde{h}_2}{r} \ll 1$, что как правило выполняется при определении основного препятствия, если $\frac{h_1 + h_2}{r} \ll 1$.

Определим основное препятствие посредством определения точки касания профиля трассы одним из КЭВ, которому согласно (6) соответствует наименьшая фаза запаздывания $\Delta\varphi_{\min}$ из всех КЭВ, влияющих на наземные виртуальные (по Гюйгенсу) источники излучения. Основному препятствию соответствует ПЗО, являющаяся плоскостью, касательной к КЭВ в точке его касания профиля трассы. Возмущение поля от ПЗО основного препятствия соответствует множителю ослабления F из (1), рассчитанного с учетом формул (4-6).

Согласно 1-му свойству, возмущение поля от НРП не превышает возмущение поля от ПЗО основного препятствия трассы, то есть в терминах множителя ослабления выполняется следующее условие:

$$1 - R_{\max} \leq F_{\text{НРП}} \leq 1 + R_{\max}, \quad (3a)$$

где $F_{\text{НРП}}$ – множитель ослабления для НРП, R_{\max} – коэффициент отражения от ПЗО основного препятствия, для которого значение параметра v максимально для всей открытой трассы.

Таким образом, согласно (3a) границы доверительного интервала потерь мгновенной мощности сигнала в дБ на открытых трассах, удовлетворяющих свойствам НРП, определяются следующим образом:

$$L_{\min} \leq L \leq L_{\max}, \quad (7)$$

где $L_{\min} = L_0 - 20\lg(1 + R_{\max})$, $L_{\max} = L_0 - 20\lg(1 - R_{\max})$, $L_0 = 20\lg\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)$ – потери в свободном пространстве, выраженные в дБ.

Усредненная сумма большого числа независимых одинаково распределенных случайных величин, каковыми являются выраженные в дБ мгновенные значения приемной мощности сигнала на открытой трассе, согласно

ЦПТ распределена по нормальному закону. Усреднение измерений не приводит к расширению границ доверительного интервала (7). Более того, вероятность событий, соответствующих граничным значениям, уменьшается. Однако, такие события остаются вероятными при измерении средней приемной мощности. В этих условиях, учитывая, что для усредненной суммы события достижения каждой из границ (7) равновероятны, искомое МО \bar{L} потерь средней мощности сигнала в соответствии с (2) может быть оценено исходя из границ доверительного интервала (7) по следующей формуле:

$$\bar{L} = L_0 - 20 \lg(\sqrt{1 - R_{\max}^2}). \quad (8)$$

Формулы (7,8) справедливы в условиях применимости формулы (1а), то есть согласно [7] должно выполняться условие: $\nu \leq \nu_0$, где

$$\nu_0 = -\sqrt{\frac{2}{3}} \approx -0.8165. \quad (9)$$

Коэффициент отражения R_{\max} вычисляется в соответствии с известными формулами отражения Френеля для угла скольжения β , рассчитанного относительно ПЗО основного рассеивающего препятствия открытой трассы ($\text{tg } \beta = \frac{\tilde{h}_1 + \tilde{h}_2}{r}$). Как правило, достаточна точность следующих приближенных формул:

$$R_{\max} = R_v = \frac{1 - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon - 1}} \text{tg } \beta}{1 + \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon - 1}} \text{tg } \beta} \quad \text{— для вертикальной поляризации,}$$

$$R_{\max} = R_g = 1 - \frac{2}{\sqrt{\varepsilon - 1}} \text{tg } \beta \quad \text{— для горизонтальной поляризации,}$$

$$R_{\max} = R_x = \sqrt{\frac{R_v^2 + R_g^2}{2}} \quad \text{— для X поляризации (45°),}$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость НРП.

Формула определения средних потерь рассеяния (8) главным образом зависит от физических параметров, не требующих калибровки по результатам

измерений. Отсутствие в формуле фазы запаздывания $\Delta\varphi$ указывает на устойчивость предлагаемого решения к погрешностям исходных данных рассеивающих препятствий. Таким образом, формула (8) может быть позиционирована как устойчивая детерминированная логнормальная модель рассеяния радиоволн дециметрового диапазона на открытых трассах вдоль нормальной рассеивающей поверхности в сотовых сетях мобильной связи.

Согласно закону больших чисел среднее значение большого числа наблюдаемых значений случайной величины с большой вероятностью близко к МО, что указывает на высокую потенциальную точность формулы (8), близкую к нулю.

Формулы (7, 8) получены в предположении случайного изменения фазы запаздывания $\Delta\varphi$ в достаточно широком диапазоне (2-е свойство НРП). В разделе 3 обсуждаются физические предпосылки выполнения этого свойства для земных поверхностей, формализуется многоволновая модель рассеяния вдоль НРП, на основании которой в разделе 4 формула (8) обобщается на случай закрытых и полуоткрытых трасс.

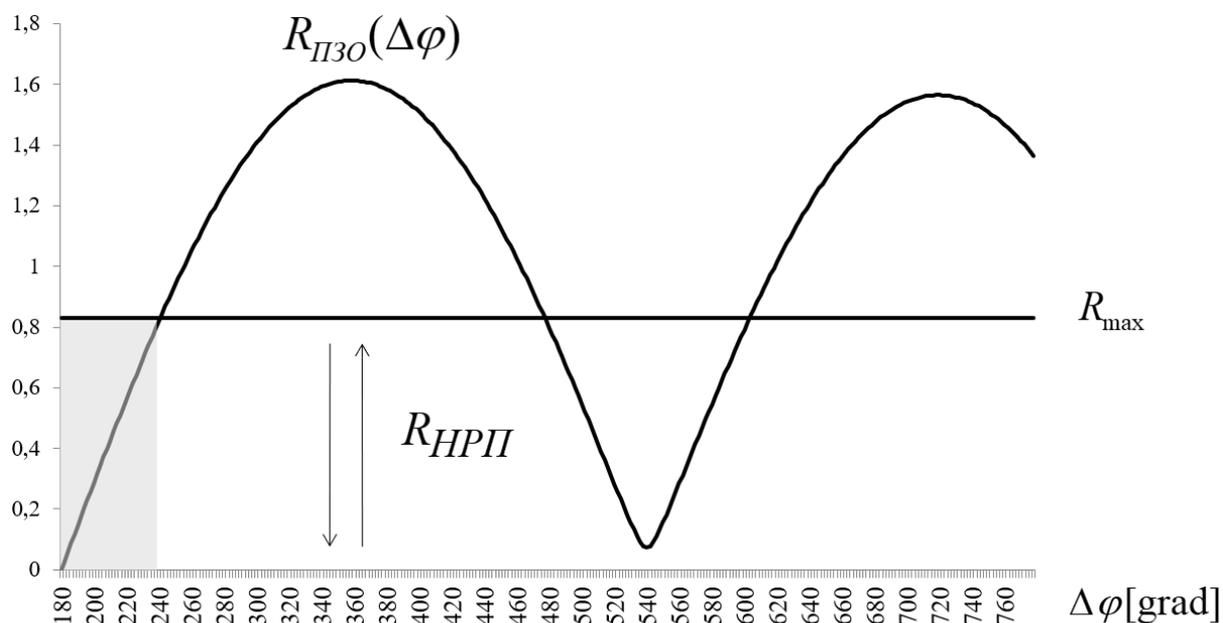
3. Многоволновая модель рассеяния и физические предпосылки 2-го свойства НРП

Применение способа построения КЭВ Фейнберга [8] к НРП обнаруживает структуру многоволнового случайного рассеяния сигнала, что связано с затухающим осциллирующим характером поведения интегрального возмущения поля от эллипсов существенной зоны отражения ПЗО, как функции

$$R_{ПЗО}(\Delta\varphi) = \left| \frac{E_R(\Delta\varphi)}{E_0} \right| \text{ при } \Delta\varphi \geq \Delta\varphi_{\min} \geq \frac{\pi}{3}, \text{ где } E_0 \text{ – напряженность невозмущенного}$$

поля, $E_R(\Delta\varphi)$ – напряженность поля, создаваемая виртуальными источниками эллипса, соответствующего значению $\Delta\varphi$ (см. рисунок 2). По аналогии с минимальной зоной дифракционной модели Гюйгенса-Френеля [7] определим существенную зону рассеяния (СЗР) ПЗО как такую минимальную часть ПЗО,

для которой возмущение поля $R_{ПЗО}(\Delta\varphi)$ совпадает с возмущением R_{\max} от всей ПЗО. СЗР ПЗО представляет собой эллипс, содержащий точку зеркального отражения.



СЗР

Рис. 2. Иллюстрация к определению СЗР ПЗО

Согласно рис. 3, аппроксимируя возмущение поля от СЗР ПЗО разницей возмущений от плоскостей с фазами запаздывания $\Delta\varphi_{\min}$, $\Delta\varphi$ и коэффициентами отражения R_{\max} и $R \approx R_{\max}$, соответственно

$$(R_{ПЗО}(\Delta\varphi) \approx |R_{\max} \exp(-i\Delta\varphi_{\min}) - R \exp(-i\Delta\varphi)|),$$

нетрудно убедиться, что граница эллипса СЗР ПЗО приблизительно соответствует фазе запаздывания $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\min} + \frac{\pi}{3}$. При случайном изменении фазы запаздывания $\Delta\varphi_{\min}$ в достаточно широком диапазоне (2-е свойство НРП) соответствующий СЗР ПЗО множитель ослабления

$$F_{СЗР ПЗО} = \sqrt{1 - 2R_{\max} \cos(\Delta\varphi_{\min} - \frac{\pi}{3}) + R_{\max}^2}$$

изменяется в границах (3а), откуда следует, что границы доверительного интервала (7) определяются виртуальными источниками, находящимися в каждый момент периода усреднения в пределах СЗР ПЗО основного препятствия трассы. Учитывая близость средней приемной мощности к МО, понятно, что

находящиеся вне СЗР ПЗО виртуальные источники практически не изменяют среднее затухание сигнала (можно считать, что они взаимно компенсируют друг друга в среднем). СЗР ПЗО иллюстрируется на рисунке 1, как пересечение затененной зоны и ПЗО.

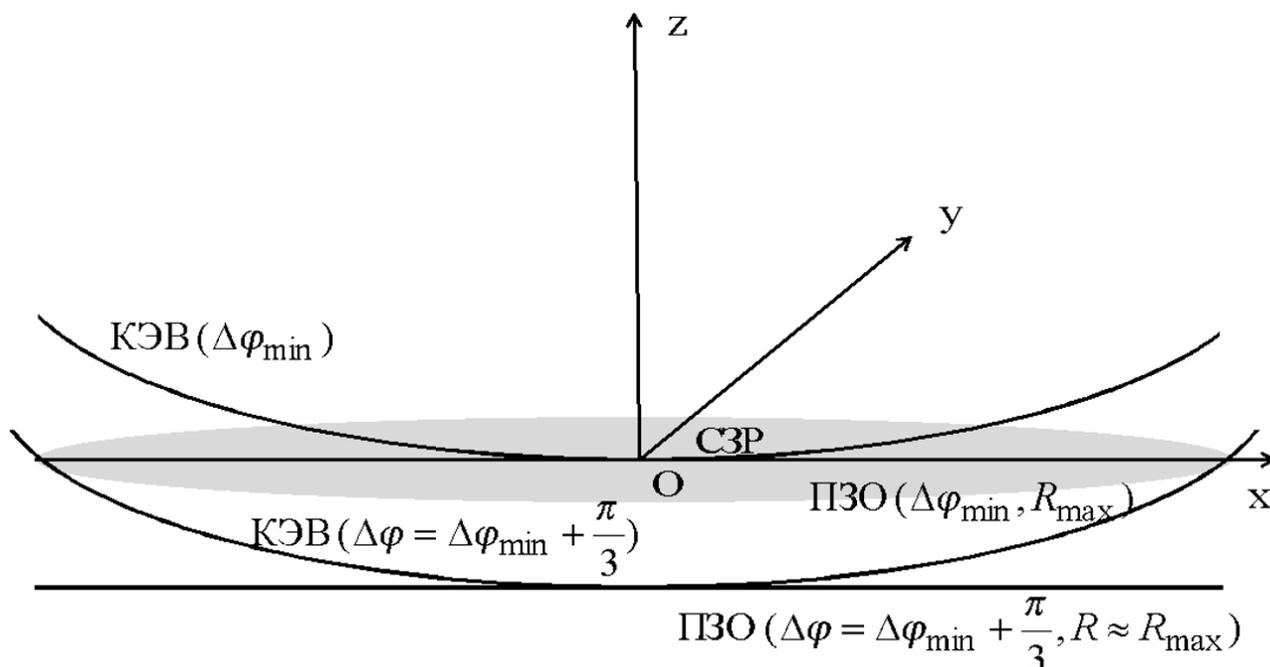


Рис. 3. Определение границы эллипса СЗР ПЗО (в плоскости Oxy)

Аналогично определим СЗР НРП как такую минимальную часть НРП, для которой возмущение поля $R_{НРП}(\Delta\varphi)$ от части поверхности, пересекающейся с КЭВ, фазы запаздывания которых не превышают значение $\Delta\varphi$, совпадает с возмущением $R_{НРП}$ от всей НРП ($R_{НРП}(\Delta\varphi) = R_{НРП}$). При этом можно ожидать (см. рисунок 1), что при увеличении параметра $\Delta\varphi = \frac{\pi v^2}{2}$ в случае перехода через границы смежных КЭВ, значения фаз запаздывания $\Delta\varphi$ которых отличаются на величину πn ($n = 1, 2, \dots$) относительно КЭВ с минимальной фазой $\Delta\varphi_{\min}$, в целом сохраняется затухающий осциллирующий характер поведения интегрального возмущения поля $R_{НРП}(\Delta\varphi)$. В отличие от ПЗО по причине произвольного случайного вида НРП (на всем протяжении трассы) возможны заметные отклонения зависимости возмущения $R_{НРП}(\Delta\varphi)$ от зависимости $R_{ПЗО}(\Delta\varphi)$, не приводящие, однако, согласно 1-му свойству к увеличению возмущения поля от

НРП: $R_{НРП} \leq R_{\max}$ (см. рисунок 2). За период усреднения размер и расположение СЗР НРП могут случайно изменяться вблизи основного препятствия или препятствий. СЗР НРП иллюстрируется на рисунке 1, как пересечение затененной зоны и НРП.

Представленные результаты обосновывают структуру многоволновой модели случайного рассеяния вдоль НРП открытой трассы применительно к вычислению средней приемной мощности. Интересно, что эта модель в определенной степени идентична принятой в радиолокации [9] (§3.7, стр.109) модели сложной пространственно распределенной цели, а именно: с большой вероятностью средняя приемная мощность сигнала (в дБ) представляет собой усреднение мгновенных мощностей, которые являются результатом интерференции прямой волны и совокупности рассеянных виртуальными источниками СЗР НРП волн, сумма амплитуд которых не превосходит амплитуду луча, отраженного от соответствующей ПЗО основного препятствия.

В рамках представленной многоволновой модели рассеяния, следуя стандартной схеме [3] вывода интерференционной формулы с учетом выполнения неравенств $R_{НРП} \leq R_{\max} < 1$, нетрудно убедиться, что мгновенное возмущение поля от случайной СЗР НРП эквивалентно возмущению от некой случайной эффективной ПЗО и ограничено возмущением от ПЗО основного препятствия открытой трассы. При этом множитель ослабления F для эффективной ПЗО будет удовлетворять интерференционной формуле из (1) с тем лишь принципиальным отличием, что коэффициент отражения R ($R \leq R_{\max}$) и фаза запаздывания $\Delta\varphi$ являются случайными величинами. Учитывая, что обе эти случайные величины зависят от одного и того же случайного параметра H из (5), нормальное распределение вероятностей среднего затухания сигнала является одномерным. Случайное изменение (в пределах от долей до единиц метров для дециметрового диапазона волн) высоты δ эффективной ПЗО между границами смежных КЭВ приводит к случайному изменению фазы запаздывания $\Delta\varphi$ в большом диапазоне (2-е свойство НРП), однако не приведет к

существенной погрешности определения коэффициента отражения R_{\max} . Это обстоятельство соответствует случайному характеру поведения измерений и обосновывает применение формулы (8) для расчета искомых средних потерь рассеяния вдоль НРП открытой трассы.

Таким образом, случайный вид вертикального профиля открытой динамической трассы определяет случайный состав виртуальных источников СЗР НРП, который влияет на случайное изменение высоты эффективной ПЗО и создает предпосылки выполнения 2-го свойства НРП. В некоторых случаях, например, в условиях прямой видимости на узких улицах может оказаться существенным учет рассеяния в ортогональной или других, отличных от вертикальной, плоскостях (трехмерный вариант ЛМР).

4. Многолучевая логнормальная модель рассеяния для закрытых и полуоткрытых трасс

Представленная в разделе 3 многоволновая модель рассеяния вдоль НРП открытых трасс представляется перспективной в части ее развития на случай закрытых и полуоткрытых земных трасс, так как основные свойства измерений поля (случайный характер и наличие замираний) идентичны вне зависимости от степени закрытости трассы.

При расчете совместных потерь дифракции и отражения используют приближенные решения в рамках геометрической оптики. Примером такого подхода является четырех лучевой метод [3,8,10]. Используемый в этом методе виртуальный источник на вершине клиновидного препятствия является следствием строгого решения уравнения Кирхгоффа и взаимно компенсирующих свойств смежных зон Френеля. В [7] (рис. 6.15) представлена обобщенная многолучевая физическая картина многократной дифракции и отражения радиоволн от гладкой рэлеевской поверхности с аналогичными виртуальными источниками над вершинами каждого клиновидного препятствия. Указанные многолучевые модели дифракции и отражения легко адаптируются к условиям НРП, если в соответствии с разделом 3 на каждом открытом участке

трассы учет всей совокупности волн, рассеянных виртуальными источниками СЗР НРП, свести к учету одного луча, отраженного от эффективной случайной ПЗО.

Рассмотрим четырех лучевой метод. На рисунке 4 представлено клиновидное препятствие Π , вызывающее потери дифракции. Между ним и каждым из приемо-передатчиков ПП1 и ПП2 схематично изображены препятствия П1 и П2, вызывающие рассеяние радиоволн, которое определяется эффективными случайными ПЗО1 и ПЗО2.

По-прежнему, значения затухания на трассе средней мощности сигнала, выраженные в дБ, распределены по нормальному закону. Однако, в отличие от открытых трасс, затухание для четырех лучевого метода зависит от высот двух независимых случайных ПЗО и поэтому характеризуется двумерным нормальным распределением вероятностей, для которого аналогом искомого доверительного интервала является эллипс рассеяния. В эллипсе рассеяния для независимых случайных величин максимальное отклонение затухания средней мощности сигнала от МО определяется его наибольшей полуосью, которая соответствует ПЗО с наибольшим значением R_{\max} . Это обстоятельство позволяет при определении искомого доверительного интервала ограничиться учетом лучей, каждый из которых отражен лишь от одной из случайных ПЗО и пренебречь лучами, испытывающими двойное (и более – для многолучевой картины) отражение.

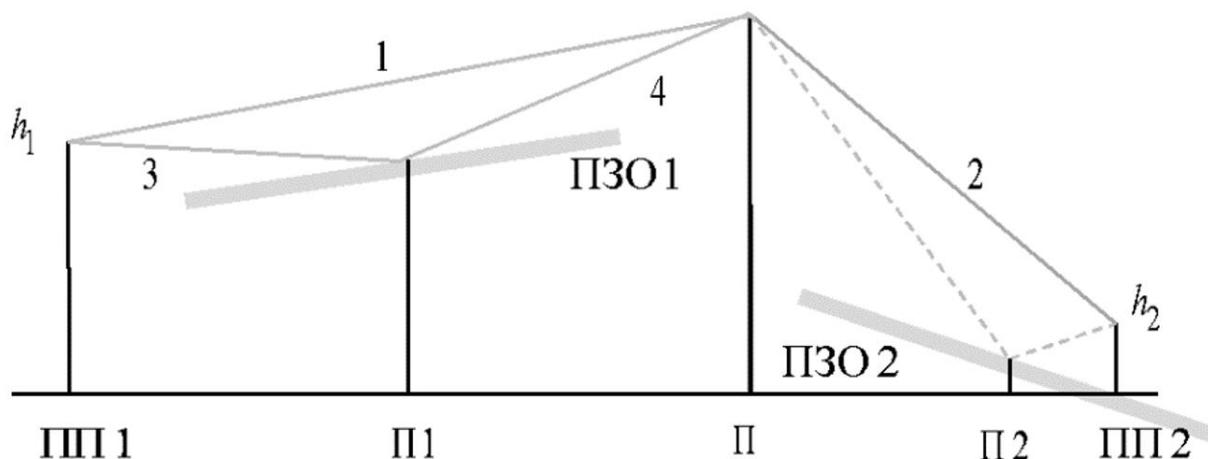


Рис. 4. Иллюстрация многолучевой ЛМР на закрытых трассах

Не трудно убедиться, что в таком случае обобщение формулы (8) для оценки затухания средней мощности сигнала \bar{L} [дБ] с учетом потерь дифракции и рассеяния вдоль НРП приводит к простому суммированию этих потерь и может быть представлено в следующем виде:

$$\bar{L} = L_0 + L_D - 20 \lg(\sqrt{1 - R_{\max}^2}), \quad (10)$$

где L_D – потери дифракции прямой волны, выраженные в дБ, R_{\max} – наибольший из всех коэффициентов отражения, вычисленных для ПЗО каждого из основных препятствий, расположенных на открытых участках трассы между реальными или виртуальными (при $\nu > \nu_0$) источниками.

На рис. 4 наибольшим является коэффициент отражения R_{\max} от случайной ПЗО1, соответствующий распространению волны по пути «3-4-2», способной привести наибольшее возмущение в дифрагированную волну «1-2». Строго говоря, коэффициент R_{\max} представляет собой обобщенный коэффициент отражения, учитывающий в том числе различие потерь дифракции прямого и отраженного от эффективной ПЗО лучей. Однако для практически важных случаев (достаточно больших значений коэффициента отражения) этим различием можно пренебречь.

Потери дифракции прямой волны L_D на одиночном клиновидном препятствии определяются по известной детерминированной модели [2,3], вычисление потерь многократной дифракции возможно с использованием детерминированных методов Буллингтона и Дэго [2]. Все эти методы устойчивы к погрешностям исходных данных. Таким образом, формулу (10) можно позиционировать как устойчивую детерминированную логнормальную модель рассеяния радиоволн дециметрового диапазона вдоль НРП на закрытых и полукрытых трассах сотовых сетей связи.

Заметим, что применение современных методов [5,6] для вычисления многократной дифракции L_D именно прямой волны также может привести к устойчивому решению, а вместе с тем позволит решить проблему, связанную с

нечетким критерием выбора методов Буллингтона или Дэго для конкретного заданного профиля трассы.

Тестовое применение формулы (10) на нескольких десятках примеров обнаруживает характерные погрешности при сравнении результатов расчетов и измерений. Как правило в городе на закрытых трассах при наличии плотной застройки, растительности и транспортного трафика СКО не превышало значений $\sigma = 2...3$ дБ (см. рисунок 5). При этом случайный разброс значений измеренной средней напряженности поля можно объяснить композицией двух нормальных случайных процессов, имеющих различные значения МО, отличающиеся на $5...6$ дБ, что может быть результатом влияния случайного транспортного трафика вблизи траектории перемещения измерительного комплекса.

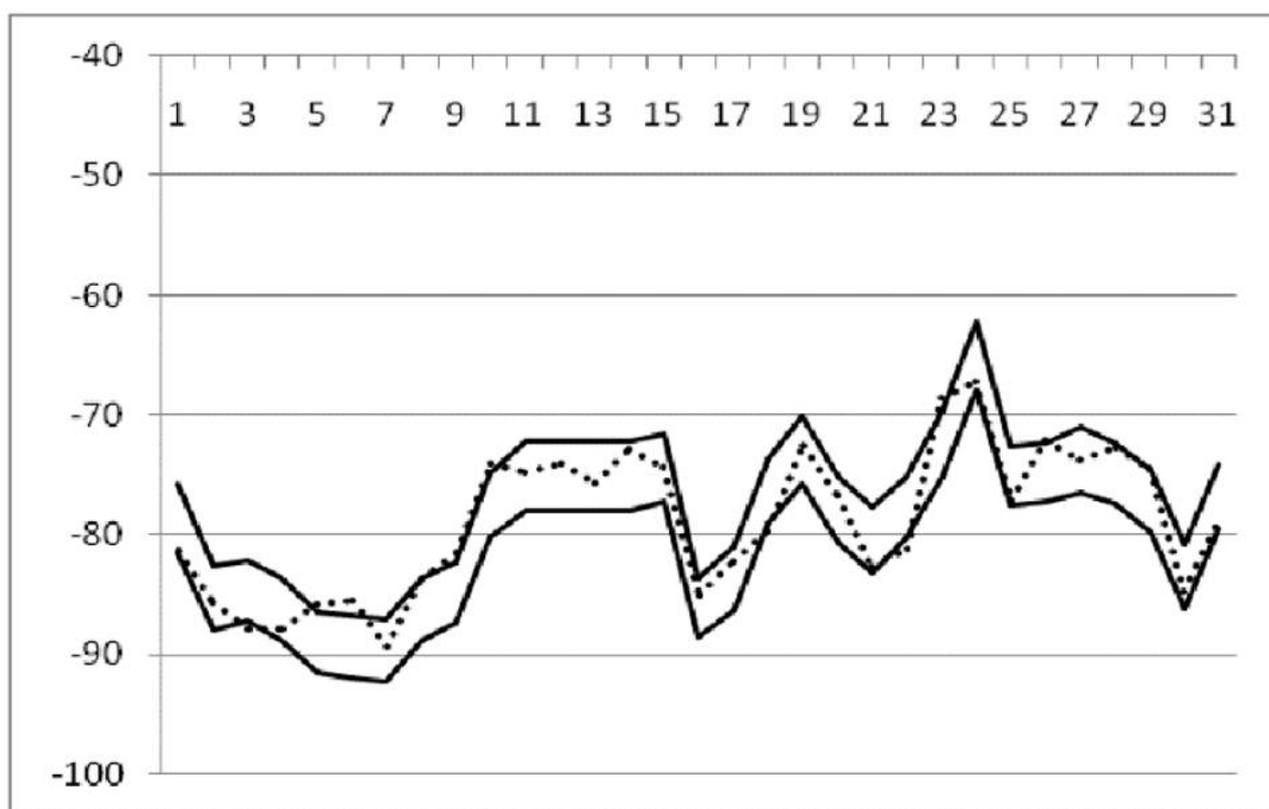


Рис. 5. Сравнение результатов расчетов средней приемной мощности согласно ЛМР и измерений RXLEV

На рисунке 5 сплошные линии соответствуют выраженным в дБм значениям средней приемной мощности, рассчитанным согласно формуле (10) ЛМР для двух указанных нормальных случайных процессов. Пунктирная линия,

заклученная в основном между расчетными сплошными линиями, соответствует измерениям средней приемной мощности (RXLEV). Порядковые номера измерений указаны на оси абсцисс. Длина трасс, соответствующих измерениям, изменялась в пределах 800...1000 м.

Согласно разделу 2 в случае, если средняя приемная мощность сигнала представляет собой усредненную сумму большого числа независимых одинаково распределенных случайных величин, потенциальная точность ЛМР согласно закону больших чисел стремится к нулю. Однако, как показывают результаты приведенных тестовых примеров, ЛМР также может быть использована для высокоточного определения границ возможного случайного разброса усредненных измерений, если средняя напряженность поля определяется композицией двух (или более) нормальных случайных процессов, имеющих различные значения МО.

Заключение

Отражение радиоволн от плоскости характеризуется детерминированной двух лучевой моделью, основанной на теории отражения Френеля. Несоответствие расчетов затухания сигнала по этой модели измерениям в дециметровом диапазоне привело в свое время к развитию эмпирических методов, основанных на калибровке абстрактных параметров моделей по результатам измерений, например, модель Окумура-Хата. Представляется, что эмпирические и полуэмпирические методы, внесшие значительный вклад в развитие сотовых сетей связи, во многом исчерпали свой потенциал. Даже потенциально наиболее точные, калиброванные по результатам измерений работающей сети модели не способны достоверно выявить межсотовую интерференцию, так как калибруются при ее наличии. Однако решение и этой важной для сотовой связи задачи возможно с привлечением представленной в статье устойчивой детерминированной ЛМР, основанной на общепризнанных теоретических результатах и эмпирических наблюдениях случайных свойств распространения радиоволн вдоль земной поверхности.

ЛМР может оказаться полезной для решения ряда задач при расчете затухания средней мощности сигнала вдоль НРП в УКВ диапазоне, например, для высокоточного расчета радиопокрытия и выявления межсотовой интерференции в мобильных сотовых сетях связи, а также при расчете радиорелейных линий.

Автор для переписки: С.Г. Цветков, tsg001@rambler.ru

Благодарности:

Автор благодарит за сотрудничество команду ОАО «МТС», работавшую под руководством президента компании М.А. Смирнова и вице-президента д.т.н. Ю.А. Громакова. Особую признательность автор выражает коллективу Службы планирования сети, в составе которого под руководством В.И. Гращенкова автору посчастливилось участвовать в решении теоретических и практических задач по планированию и оптимизации сети МТС. Настоящая работа была бы невозможна без О.В. Соколовой, которая поделилась с автором своим бесценным опытом. Большое влияние на понимание автором проблем представленной тематики оказал опыт работы с ведущими мировыми и отечественными программными комплексами планирования сети компаний Lucent Technologies, T-Mobile, Aircom International, ИнфоТел, а также с их разработчиками и экспертами.

Литература

1. Okumura Y., Ohmori E., Kawano T., Fukuda K. Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service. *Review of the Electrical Communication Laboratory*. 1968. V.16. №9-10. P.825-873.
2. Garry C. Hess. *Handbook of Land-Mobile Radio System Coverage*. London, Artech House Inc. 1998. 346 p.
3. Долуханов М.П. *Распространение радиоволн*. Москва, Связь. 1972. 336 с.
4. Шмелев А.Б. Рассеяние волн статистически неровными поверхностями. *Успехи физических наук*. 1972. Т.106. №3. С.459-480.

5. Ахияров В.В. Вычисление множителя ослабления над земной поверхностью методом параболического уравнения. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2012. №1. <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/16/text.pdf>
6. Ахияров В.В. Вычисление множителя ослабления радиоволн над поверхностью земли методом интегрального уравнения. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.5>
7. Калинин А.И. *Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний*. Москва, Связь. 1979. 296 с.
8. Фейнберг Е.Л. *Распространение радиоволн вдоль земной поверхности*. Москва, Наука Физматлит. 1999. 497 с.
9. Дулевич В.Е. и др. *Теоретические основы радиолокации*. Москва, Советское радио. 1964. 732 с.
10. Shelleng J., Burrows C., Ferrel E. Ultra-Short Wave Propagation. *Proc. IRE*. 1953. V.21. P.426-463.

Для цитирования:

Цветков С.Г. Логнормальная модель рассеяния радиоволн в сотовых сетях мобильной связи. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.1.3>