

Научная статья

УДК 621.396.4

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-91-103



Методика расчета пропускной способности радиорелейной линии миллиметрового диапазона с адаптивной модуляцией в условиях замираний

Ирина Валерьевна Степанец, stepanets.iv@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: Статья посвящена разработке методики расчета пропускной способности радиорелейной линии (РРЛ) с адаптивной модуляцией в условиях замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн. Показана взаимосвязь пропускной способности с коэффициентами неготовности интервалов РРЛ с разными градациями скорости передачи при известной функции распределения замираний. Представлены результаты обработки статистики замираний на интервалах РРЛ в диапазоне E-band (71–76/81–86 ГГц) и метеоданных, на основе которых была выявлена их взаимосвязь, учтенная в предлагаемом аналитическом выражении функции распределения замираний. Проведен сравнительный анализ результатов расчета коэффициентов неготовности и пропускной способности интервалов РРЛ в диапазоне E-band на основе предлагаемой и используемых в существующих методиках функций распределения. Показана высокая адекватность разработанной методики результатам измерений.

Ключевые слова: радиорелейная связь, пропускная способность, радиорелейный интервал, радиорелейная линия, диапазон E-band, замирания, статистика замираний, статистика погодных условий, коэффициент неготовности

Ссылка для цитирования: Степанец И.В. Методика расчета пропускной способности радиорелейной линии миллиметрового диапазона с адаптивной модуляцией в условиях замираний // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 91–103. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-91-103

Method of Throughput Calculation for Microwave Link with Adaptive Modulation Under the Fading Conditions Inherent for Millimeter Waves

Irina Stepanets, stepanets.iv@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to the development of a method for calculating the capacity of microwave links with adaptive modulation under fading conditions in millimeter wave range. The relationship between throughput and unavailability coefficient of microwave links with different transmission rate levels are shown for a known distribution function of fading. The results of data analysis of fading statistics at microwave links in the E-band range (71–76/81–86 GHz) and meteorological statistics are presented. The relationship of both statistics was revealed and taken into account in the proposed

analytical equation for the distribution function of fading. A comparative analysis of the calculation results of the unavailability coefficient and throughput at microwave links in the E-band range was carried out based on the proposed distribution function as well as based on the distribution functions of existing methods. High relevance of the developed method to the measurement results is shown.

Keywords: microwave communication, throughput, microwave link, microwave line, E-band range, fading, fading statistics, weather statistics, unavailability coefficient

For citation: Stepanets I. Method of Throughput Calculation for Microwave Link with Adaptive Modulation Under the Fading Conditions Inherent for Millimeter Waves. *Proc. of Telecom. Universities*. 2023;9(3):91–103. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-91-103

Введение

Радиорелейная связь широко применяется на транспортных сетях связи и сетях доступа различного назначения, благодаря возможности быстрого развертывания с существенно меньшими затратами по сравнению с волоконно-оптическими линиями связи. В сетях подвижной связи радиорелейная связь составляет основу беспроводного распределительного транспортного сегмента, так как обеспечивает информационное включение узлов радиодоступа с ядром сети напрямую, или через ближайшую площадку, оборудованную точкой доступа к волоконно-оптическим линиям связи. Развитие технологий подвижной связи 5G и в перспективе 6G, выдвигает высокие требования к пропускной способности беспроводного транспортного сегмента в целом и радиорелейной связи в частности [1, 2]. Одним из направлений повышения пропускной способности систем радиорелейной связи для удовлетворения требований сетей 5G является освоение новых диапазонов радиочастотного спектра [3, 4]. В отчете Европейского института телекоммуникационных стандартов ETSI GR mWT 012 отмечается, что повышение пропускной способности радиорелейных систем беспроводного сегментов Backhaul/X-Haul распределительной транспортной сети 5G возможно на основе совместного применения стандартного диапазона частот (4–42 ГГц) и освоения диапазона миллиметровых волн (30 – 300 ГГц), включая Q-band (40,5–43,5 ГГц), V-band (59–64 ГГц), E-band (71–76/81–86 ГГц), W-band (92–96 ГГц) и D-band (150 ГГц).

Применение диапазона миллиметровых радиоволн позволяет в целом решить задачу повышения пропускной способности радиорелейных систем передачи. Однако существенная зависимость распространения радиоволн указанного диапазона от метеоусловий и недостаточная изученность этой зависимости выступают сдерживающим фактором прогнозирования качества связи в радиорелейных линиях (РРЛ) на этапе их планирования и проектирования. Сложилась ситуация, когда методы и модели расчета показателей качества радиорелейной связи, описанные в нормативных документах отрасли и рекомендациях, отстают от технологиче-

ских достижений и не охватывают широко применяемый на практике участок миллиметрового диапазона волн E-band. Так, ГОСТ Р 53363-2009 по расчету показателей качества РРЛ ограничивается диапазоном частот от 3,4–40,5 ГГц, а разработанная НИИР методика расчета трасс цифровых РРЛ прямой видимости охватывает диапазон частот от 2 до 20 ГГц [5]. В Рекомендации Международного Союза Электросвязи для проектирования наземных систем прямой видимости [6] указан более высокий диапазон частот ее применимости, но с осторожной оговоркой: «... по крайней мере, для частот до 100 ГГц», что также свидетельствует о недостаточной изученности влияния метеоусловий на распространение радиоволн миллиметрового диапазона.

Особенностью радиорелейной связи в миллиметровом диапазоне частот является ее сильная подверженность влиянию осадков, вызывающих глубокие замирания сигналов, для борьбы с которыми на интервалах РРЛ (радиорелейных интервалах – РРИ) либо поддерживается повышенный запас мощности, либо используется адаптивная модуляция (АМ). Радиорелейное оборудование в этом диапазоне широко применяется на практике довольно продолжительный период, за который уже собран большой объем статистических данных [4], позволяющий оценить и обобщить влияние метеоусловий на замирания сигналов. На основе имеющихся статистических данных были проведены исследования указанного влияния в диапазоне E-Band, что позволило разработать рассмотренную в данной статье методику расчета пропускной способности РРЛ с АМ в условиях замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн.

Основные положения разработанной методики

В основу разработанной методики расчета пропускной способности РРЛ с адаптивной модуляцией легла математическая модель функционирования сети радиорелейной связи с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов, предложенная в работе [7].

Под пропускной способностью РРИ без АМ, работающего с постоянной скоростью передачи, понимается максимальная скорость $C_{\max} \in \{C_i\}_n$, поддерживаемая радиорелейным оборудованием, при

условии обеспечения требуемого коэффициента неготовности $K_{нг} (C_{max}) \leq K_{нг.тр}$:

$$C_{max} = \max_{i=1,n} C_i | K_{нг.i} \leq K_{нг.тр}. \quad (1)$$

В случае заданной постоянной скорости передачи $C_{тр}$ интервал РРЛ считается пригодным, если $K_{нг} (C_{тр}) \leq K_{нг.тр}$, что эквивалентно условию $C_{max} \geq C_{тр}$. Отсюда следует, что расчет пропускной способности РРИ непосредственно связан с расчетом коэффициента неготовности и с оценкой пригодности интервала.

Однозначного определения пропускной способности РРИ, работающего с переменной скоростью передачи в режиме с АМ, в настоящее время не существует, поскольку такие интервалы применяются в мультисервисных транспортных сетях связи и сетях доступа, предназначенных для одновременной передачи разных типов трафика с разными требованиями к скорости передачи и коэффициенту неготовности. В работе [7] предлагается оценивать пропускную способность таких РРИ раздельно для двух типов трафика: 1) требующего постоянную скорость передачи и 2) допускающего переменную скорость передачи.

В случае передачи первого типа трафика, требующего постоянной скорости, в качестве пропускной способности РРИ с АМ в [7] предлагается, как и в случае РРИ без АМ, рассматривать максимальную скорость C_{max} , рассчитываемую по формуле (1).

В случае передачи второго типа трафика, допускающую переменную скорость, в качестве пропускной способности РРИ с АМ в [7] предлагается рассматривать среднюю скорость передачи C_{cp} , рассчитываемую по формуле:

$$C_{cp} = \sum_{i=1}^n C_i (F(V_{i+1}) - F(V_i)) = \sum_{i=1}^n C_i (P_{н.i+1} - P_{н.i}), \quad (2)$$

где V_i – допустимое ослабление сигнала (соответствующее глубине замирания, в результате чего уровень сигнала снижается до чувствительности приемника $P_{с.тр.i}$), при котором на скорости передачи C_i , соответствующей i -му уровню модуляции, выполняются требования к вероятности ошибки (BER), $F(V) = Pr(v < V)$ – функция распределения вероятности (ФРВ) ослабления сигнала v ; $F(V_i) = P_{н.i} == K_{нг.i}$ – вероятность ослабления сигнала v меньше допустимой величины V_i , соответствующая коэффициенту неготовности $K_{нг.i}$ при работе РРИ с АМ на скорости C_i ; n – число доступных в РРИ градаций скорости передачи (уровней модуляции), упорядоченных по возрастанию, т. е. $C_1 < C_2 < \dots < C_n$. При $i = n$ в формуле (2) следует подставлять значения $F(V_{i+1}) = P_{н.i+1} = 1$.

В случае передачи трафика с переменной скоростью со средней величиной C_{cp} , рассчитываемой по формуле (2), пригодность РРИ с АМ оценивается по критерию допустимости коэффициента неготовности на минимальной градации скорости $K_{нг} (C_1) \leq K_{нг.тр}$.

Обычно первый тип трафика (с постоянной скоростью передачи) является приоритетным, а второй (с переменной скоростью передачи) – неприоритетным. В случае передачи обоих типов трафика одновременно именно по величине коэффициента неготовности РРИ с АМ при передаче первого типа трафика с заданной скоростью $C'_{тр}$ делается вывод о пригодности интервала, т. е. РРИ с АМ считается пригодным, если $P_{н}(C'_{тр}) < P_{н.тр}$. Если при этом оказывается, что $C_{j-1} \leq C'_{тр} < C_j$, где $1 < j \leq n$, то избыточные градации скорости $\{C_j, \dots, C_n\}$ можно использовать для передачи неприоритетного трафика с максимальной средней скоростью:

$$C''_{cp} = \sum_{i=j}^n (C_i - C'_{тр}) (F(V_{i+1}) - F(V_i)) = \sum_{i=j}^n (C_i - C'_{тр}) (P_{н.i+1} - P_{н.i}), \quad (3)$$

где $C'_{тр} = 0$ и $j = 1$ (при отсутствии первого типа трафика) формула (3) совпадает с формулой (2).

Коэффициент неготовности РРИ с АМ при обслуживании неприоритетного трафика со средней скоростью C''_{cp} (3) определяется вероятностью ослаблений, меньше допустимой величины V_j для градации скорости C_j , т. е. $P_{н}(C''_{cp}) = P_{н.j}$.

Расчеты по приведенным выше формулам (1–3) являются основной отличительной особенностью разработанной методики расчета пропускной способности РРЛ с АМ, в части, касающейся отдельных РРИ с АМ, по сравнению с известными методиками – без АМ [5, 6]. Пересчет пропускных способностей и коэффициентов неготовности РРИ с АМ к аналогичным показателям РРЛ с АМ приведен в [7].

Для расчета пропускной способности РРИ с АМ по формулам (1–3) необходимо знать ФРВ ослабления сигнала (функцию распределения замираний) $F(V)$, точное аналитическое выражение которой для РРИ в диапазоне миллиметровых волн в настоящее время неизвестно. В то же время в Рекомендации ITU-R P.530 приводится формула расчета ослабления с заданной вероятностью при известной интенсивности дождя, превышаемой в течение 0,01 % времени. Из данной формулы можно получить функцию распределения замираний $F(V)$, однако, как будет показано далее, эта функция существенно отличается от имеющихся статистических распределений, что вызвало необходимость проведения специальных исследований зависимости замираний сигнала от метеоусловий. Результаты

проведенных исследований позволили получить аналитическое выражение $F(V)$, которое более точно соответствует имеющимся статистическим данным о распределении замираний.

Далее в настоящей статье приводятся основные результаты анализа статистических данных, а также выполненное на их основе обоснование предлагаемой функции распределения замираний более подробно.

Анализ статистических данных о замираниях сигналов на интервалах РРЛ с АМ, функционирующих в диапазоне E-band

Статистические данные о замираниях сигналов на РРЛ с АМ, функционирующих в диапазоне E-band, были предоставлены компанией ИнфоТел [8]. Сбор статистики измерений уровней сигналов происходил в умеренном климатическом поясе Европейского континента на 23-х РРЛ и 41-й близлежащей метеостанции в течение 15 следующих друг за другом месяцев. Пространственные параметры наблюдаемых РРЛ характеризовались длиной интервалов от 3 до 10 км и высотой подвеса антенн от 23 до 79 м. Расстояния между площадками с радиорелейными станциями (РРС) и метеостанциями составляли от 0,6 до 10 км. Технические параметры РРС: диаметр антенны 0,6 м, ширина полосы сигнала 2000 МГц, доступные уровни модуляции 4QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, которым соответствовали значения чувствительности приемников и скорости передачи, приведенные в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Технические параметры РРС

TABLE 1. Technical Parameters of Microwave Link Station

Уровень модуляции	Чувствительность приемника $P_{с.тр.i}$ при BER = 10^{-6} , дБм	Скорость передачи C_i , Мбит/с
4QAM	-60	2731
16QAM	-54	5462
32QAM	-51	6828
64QAM	-48	8193
128QAM	-44	9559

В результате обработки статистических данных было выяснено, что средние значения мощности сигнала на входе приемников РРС составляли от -41,4 до -31,2 дБм, среднеквадратическое отклонение (СКО) варьировалось от 1,7 до 4,5 дБм, максимальная глубина замираний достигала от 13,6 до 40,8 дБ. На всех РРЛ использовался режим АМ. Усредненные статистические функции плотности вероятности (ФПВ) и ФРВ уровней сигналов при разных адаптивно переключаемых уровнях модуляции представлены на рисунке 1. Как видно из рисунка 1а, пики ФПВ для различных уровней модуляции приходятся на области значений мощности сигнала, превышающих значения соответствующих данным уровням чувствительностей (таблица 1),

что в целом соответствует математической модели функционирования РРЛ с АМ [8], использованной в формулах (2 и 3).

Среднее значение мощности сигнала (RSL, аббр. от англ. Received Signal Level) и СКО для различных видов модуляции приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Статистические значения RSL и СКО

TABLE 2. Statistical Values of RSL and Standard Deviation

Модуляции	RSL	СКО
4QAM	-53,3	7,8
16QAM	-48,6	5,9
32QAM	-45,3	4,7
64QAM	-40	3,4
128QAM	-36,5	3,4

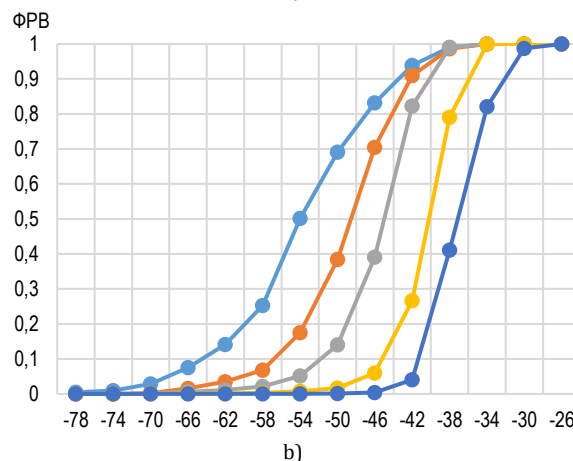
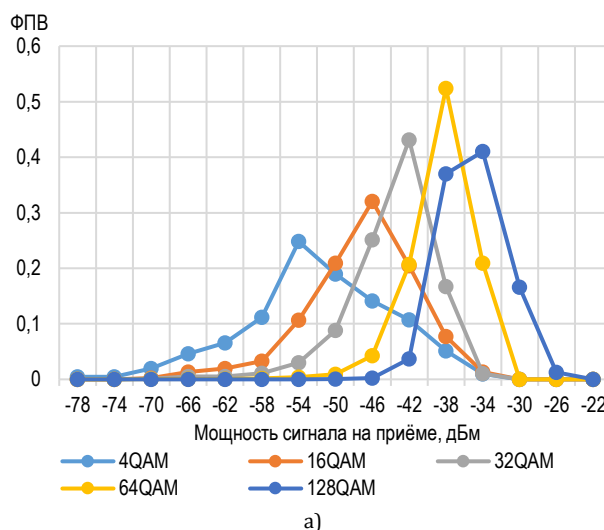


Рис. 1. Статистические ФПВ (а) и ФРВ (б) мощности сигнала на входе приемников РРС с АМ

Fig. 1. Statistical Functions of Probability Density (a) and Cumulative Distribution Functions (b) for the Signal Power at the Input of Microwave Link Receivers with Adaptive Modulation

На рисунке 2 для примера приведены гистограммы ФПВ мощности сигнала на входе приемников РРС для 4-х из 23-х анализируемых РРЛ независимо от текущего уровня модуляции.

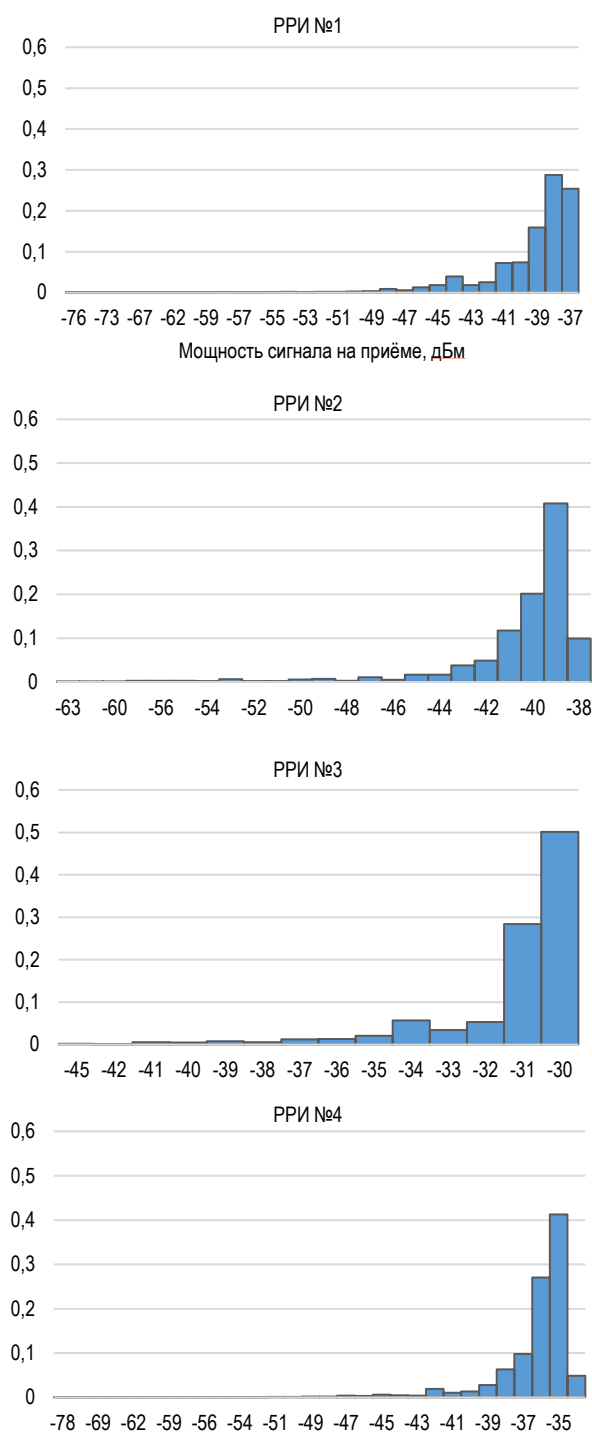


Рис. 2. Гистограммы уровней сигналов выбранных интервалов

Fig. 2. Histograms of Signal Levels for Selected Intervals

Из приведенных гистограмм были получены статистические ФРВ уровней сигнала, с которыми были сопоставлены аналитические функции распределения замираний, полученные на основании формул в Рекомендации ITU-R P.530 [6], где описана процедура оценки долгосрочной статистики затухания (ослабления с обратным знаком в дБ) сигналов из-за влияния осадков (дождя), которая после некоторых преобразований позволяет полу-

чить аналитическую функцию распределения замираний для дождя заданной интенсивности.

В указанной рекомендации приводится выражение для оценки затухания (дБ) от дождя на трассе, превышаемое в течение 0,01 % времени:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_r, \quad (4)$$

где γ_R – удельное затухание (дБ/км), которое рассчитывается согласно Рекомендации ITU-R P.838 [9] для заданной частоты, поляризации и интенсивности дождя $R_{0,01}$, превышаемой в течение 0,01 % времени; d_r – длина РРИ с учетом коэффициента дальности r , которая была задана в расчетах в соответствии с местоположением РРС, участвующих в сборе статистических данных.

Затухание A_p , превышаемое в течение других процентов времени p , отличных от 0,01 %, рассчитывается с помощью выражения:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = c_1 p^{-(c_2 + c_3 \log_{10} p)}, \quad (5)$$

где C_1 , C_2 , и C_3 – определяемые по рекомендации [6] параметры.

Решив уравнение (5) относительно p , было получено аналитическое выражение для ФРВ замираний $F(V)$ глубиной более $A_p = -V$ при заданной интенсивности дождя $R_{0,01}$:

$$F(V) = \begin{cases} p(V), & p(V) \leq 1 \\ 1, & p(V) > 1 \end{cases}, \quad (6)$$

где

$$p(V) = 10^{\frac{-C_2 + \sqrt{C_2^2 - 4C_3(\lg(-V) - \lg(A_{0,01}) - \lg(C_1))}}{2C_3}}. \quad (7)$$

На рисунке 3 приведены результаты расчета ФРВ мощности сигнала с учетом распределения вероятности замираний, рассчитанной по формуле (6) для РРИ №4, имеющего длину 5,5 км, при различных значениях интенсивности дождя, которым соответствуют разные цветные линии. На этом же рисунке черным цветом изображена измеренная статистическая ФРВ мощности сигнала для РРИ №4. Из представленных графиков следует, что аналитическая функция распределения, посчитанная по ITU-R P.530, значительно отличается от статистической ФРВ при $R_{0,01} = 30$ мм/ч, соответствующей средне-статистическим данным о метеоусловиях в районе РРИ №4. В пределах значений уровня приемного сигнала, наиболее характерных для радиорелейной связи, от -60 дБм до примерно -35 дБм, средняя ошибка между статистическими данными и рассчитанными значениями вероятности замираний составляет 4,7 % при СКО = 15,2 %. В целом рассчитанные значения вероятностей оказались меньше статистических данных в указанном диапазоне уровней приемного сигнала от 3-х до 12-ти раз.

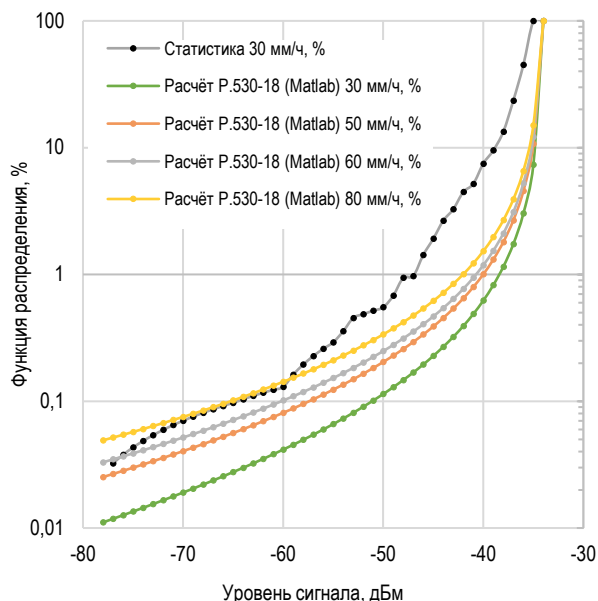


Рис. 3. Статистическая ФРВ уровня сигнала на РРИ №4 и функции распределения, рассчитанные по ITU-R P.530-18 при различных интенсивностях дождя $R_{0,01}$

Fig. 3. Statistical PDF (Probability Density Function) of the Signal Level at the Interval No. 4 and Distribution Functions Calculated According to ITU-R P.530-18 for Various Rain Rates $R_{0,01}$

Попытки уменьшения погрешности с помощью поправочного коэффициента к интенсивности дождя и ее увеличения с градациями 50, 60 и 80 мм/ч не привели к желаемому результату. Как видно из рисунка 3, при увеличении интенсивности дождя возникает неоднородная погрешность, то есть графики аналитической функции распределения и статистики показывают хорошее совпадение для низких значений уровня сигнала (менее -60 дБм), а для более высоких значений погрешность остается большой. С учетом поправки до 80 мм/ч средняя ошибка уменьшилась, но лишь до 4,2 %, а СКО составило 13,9 %.

Как видно из рисунка 3, результаты расчета функции распределения замираний в соответствии с Рекомендацией ITU-R P.530 для диапазона частот E-band получаются слишком оптимистичными, а введение поправочного коэффициента к интенсивности дождя не позволяет уменьшить погрешность. На практике такой оптимистичный результат прогноза влияния замираний на качество связи на РРИ с АМ может привести к завышенным ожиданиям устойчивости и пропускной способности, недостижимым в реальных условиях.

Для обоснования более подходящего аналитического выражения для расчета функции распределения замираний были проведены исследования влияния различных параметров метеоусловий на распространение радиоволн в диапазоне частот E-band, результаты которых представлены далее.

Анализ влияния метеоусловий на замирания сигналов на интервалах РРЛ в диапазоне E-band

Для выявления влияния различных погодных условий на замирания радиорелейного сигнала статистика РРИ была совмещена с метеорологической статистикой. Для этого использовались метеосводки близлежащих к РРИ метеостанций. Совмещение данных обеих статистик произведено с периодом в пятнадцать минут.

Совмещение данных позволило выявить степень зависимости уровня сигнала на приеме РРИ от следующих погодных параметров: температуры; температуры точки росы; давления; ветра; дождей; влажности.

Более подробный перечень погодных параметров [10] и единиц измерения, зафиксированных с периодом 15 мин: средняя температура ($^{\circ}\text{C}$), максимальная температура ($^{\circ}\text{C}$), минимальная температура ($^{\circ}\text{C}$), температура на высоте 15 см от поверхности земли ($^{\circ}\text{C}$), температура точки росы ($^{\circ}\text{C}$) (температура воздуха, при которой содержащийся в нем пар достигает состояния насыщения и начинает конденсироваться в росу), давление (гПа), направление ветра ($^{\circ}$), порывы ветра (м/с), скорость ветра (м/с), интенсивность дождя (мм), относительная влажность (%).

В качестве примера на рисунке 4 представлены совмещенные графики двух групп статистик, снятых с периодом в 15 мин на 4-х из 23-х РРИ: уровни мощности сигнала на входе приемника РРС и погодных явлений вблизи этих станций. По горизонтальной оси отложены дата и время. По вертикальным осям отложены две шкалы: левая – совокупная для нескольких показателей; правая – для интенсивности дождей (мм/15 мин). Для примера были выбраны данные за январь и февраль, что соответствует для рассматриваемого региона наихудшим с точки зрения осадков месяцам. Представленные графики позволяют наглядно оценить причины возникновения замираний из-за погодных условий.

Визуальный анализ графиков подтверждает понижение уровня сигнала во время возникновения дождей. Однако это не единственная зависимость замираний от погодных условий. Также заметны явные провалы уровня сигнала при одновременном резком снижении относительной влажности и пиках средней температуры и температуры точки росы. При этом необходимо отметить, что в эти промежутки времени кривая интенсивности дождя указывает на отсутствие осадков, то есть влияние дождей на выявленные замирания в эти временные интервалы исключено.

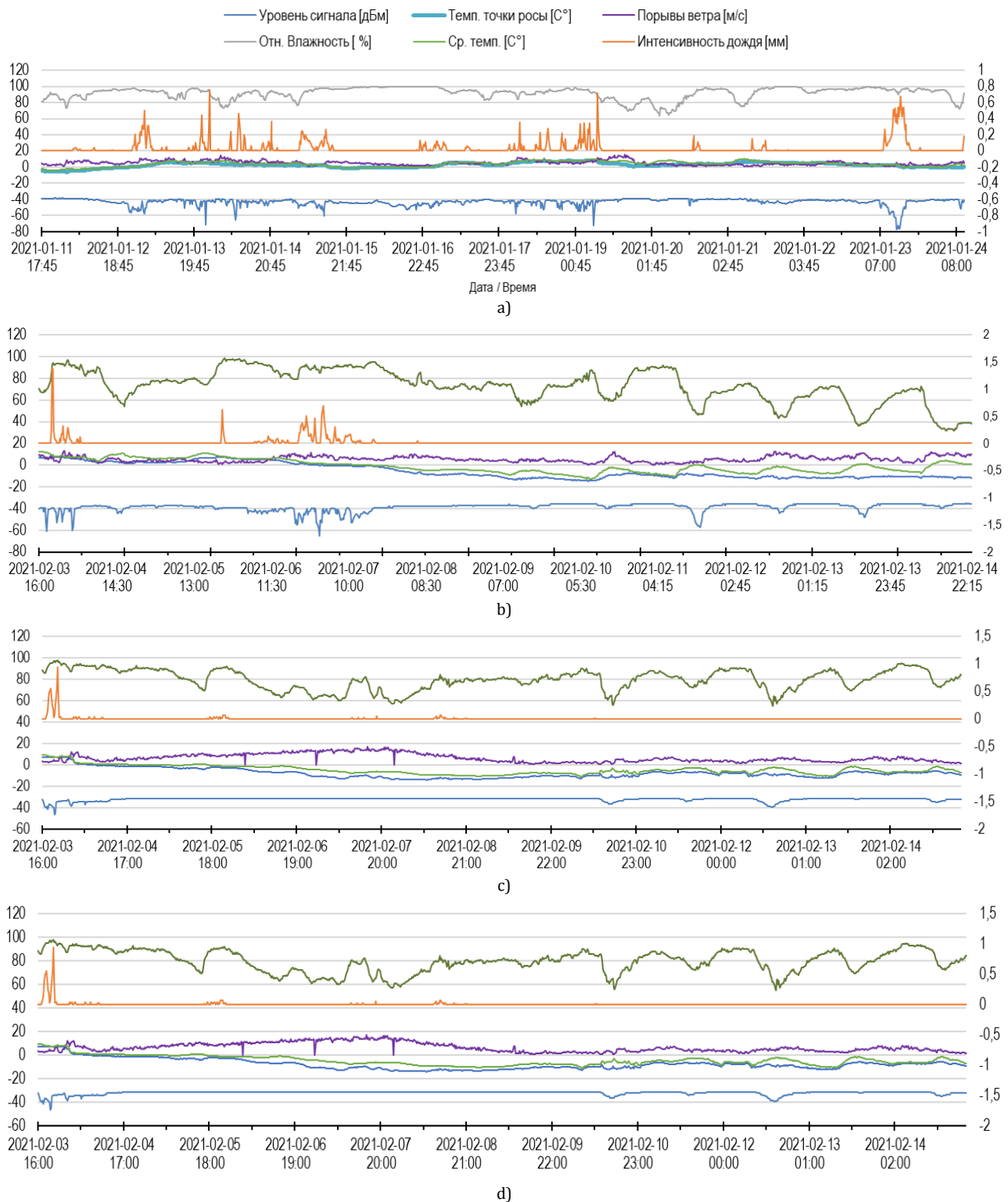


Рис. 4. Пример совмещенной статистики для РРИ №1 (а), РРИ №2 (b), РРИ №3 (c), РРИ №4 (d)

Fig.4. Example of Combined Statistics for Interval No. 1 (a), No. 2 (b), No. 3 (c), No. 4 (d)

Согласно критерию Стьюдента для 99-процентного доверительного интервала и заданной статистической погрешности 0,2 дБм уровня принимаемого сигнала были рассчитаны требуемые количества испытаний для каждого из приведенных РРЛ

интервалов [11]. Для РРИ №1 требуется 1554 испытаний (было проведено 2677 испытаний); для РРИ №2 – 1169 (было проведено 1286); для РРИ №3 требуется 516 испытаний (было проведено 3087); для РРИ №4 – 91 (было проведено 1086).

В целях численного исследования влияние всех перечисленных метеорологических явлений на мощность сигнала на приеме, была проведена оценка влияния отдельных погодных явлений путем вычисления корреляции Пирсона [12]. Расчеты коэффициентов корреляции показали, какие погодные параметры оказывают наибольшее влияние на мощность сигнала (указаны в порядке возрастания степени влияния): относительная влажность, температура точки росы, давление, интенсивность дождя. Значения коэффициентов корреляции представлены в таблице 3.

Чтобы проверить представленную взаимосвязь между перечисленными погодными параметрами и мощностью сигнала на предмет искажений вследствие взаимных влияний каких-либо погодных явлений друг на друга, был применен способ расчета коэффициента частной корреляции, который исключает влияние третьего параметра:

$$r_{xy(z)} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}}, \quad (8)$$

где $r_{xy(z)}$ – коэффициент частной корреляции между мощностью сигнала (x) и исследуемым погодным параметром (y) без влияния другого погодного параметра (z); r_{yz} – коэффициент взаимной корреляции между двумя погодными параметрами.

Так как самое большое значение коэффициента корреляции на мощность сигнала приходится на интенсивность дождя, важно исключить искажения этого показателя за счет влияния других корреляционно значимых эффектов погоды. Сделав сравнительный анализ первой и второй строк таб-

лиц 3–6 и принимая во внимание разницу значений между простой r_{xy} и частной $r_{xy(z)}$ корреляциями, можно подчеркнуть следующее. Во-первых, в корреляции между сигналом и интенсивностью дождя взаимосвязь между давлением и интенсивностью дождя не играет существенной роли. Во-вторых, наибольшая разница между корреляциями r_{xy} и $r_{xy(z)}$ присутствует в случае воздействия давления и температуры точки росы на сигнал. Это говорит о том, что корреляция между сигналом и давлением подвергается влиянию от температуры, и наоборот. Что, впрочем, не противоречит закону Шарля о взаимосвязи давления и температуры [13]. В-третьих, относительная влажность не вносит в корреляцию сигнала с интенсивностью дождя значительного влияния. В-четвертых, температура точки росы вносит в корреляцию сигнала с относительной влажностью определенное влияние, так как наблюдается заметная разница между коэффициентами корреляций r_{xy} и $r_{xy(z)}$ в случае воздействия относительной влажности на сигнал при учете температуры точки росы.

Из представленных таблиц 4–7 следует, что среди погодных явлений можно выделить основной фактор – интенсивность дождя как непосредственно влияющий на уровень сигнала в диапазоне E-band и независимый от других погодных явлений. Следует также выделить следующие погодные факторы, которые вносят в своей совокупности весомое воздействие на замирание сигнала: относительная влажность в совокупности с температурой точки росы, температура точки росы в совокупности с давлением.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета коэффициента корреляции между наиболее значимыми погодными параметрами и замираниями сигнала

TABLE 3. Results of Calculating the Correlation Coefficient between the Most Significant Weather Parameters and Signal Fading

Статистический параметр	Погодные параметры			
	относительная влажность	температура точки росы	давление	интенсивность дождя
Коэффициент корреляции между мощностью сигнала на приеме и погодными явлениями	–0,36442	–0,39255	0,39712	–0,40621

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета частной и общей корреляции между сигналом и интенсивностью дождя

TABLE 4. Calculation Results of Partial and General Correlation between Signal and Rain Intensity

Статистический параметр	Корреляция сигнала и погодных параметров		
	Сигнал (x) – интенсивность дождя (y) без влияния		
	давления (z)	относительной влажности (z)	температуры точки росы (z)
$r_{xy(z)}$ без влияния z	–0,37	–0,36541	–0,37956
r_{xy}	–0,41	–0,41	–0,41
r_{yz}	–0,19	0,1997	0,156443

ТАБЛИЦА 5. Результаты расчета частной и общей корреляции между сигналом и давлением

TABLE 5. Calculation Results of Partial and General Correlation between Signal and Pressure

Статистический параметр	Корреляция сигнала и погодных параметров		
	Сигнал (x) – давление (y) без влияния		
	интенсивности дождя (z)	относительной влажности (z)	температуры точки росы (z)
$r_{xy(z)}$ без влияния z	0,358	0,365	0,264
r_{xy}	0,397	0,397	0,397
r_{yz}	-0,19	-0,17	-0,4632

ТАБЛИЦА 6. Результаты расчета частной и общей корреляции между сигналом и температурой точки росы

TABLE 6. Calculation Results of Partial and Total Correlation between Signal and Dew Point Temperature

Статистический параметр	Корреляция сигнала и погодных параметров		
	Сигнал (x) – температура точки росы (y) без влияния		
	давления (z)	относительной влажности (z)	интенсивности дождя (z)
$r_{xy(z)}$ без влияния z	-0,2565	-0,31758	-0,36454
r_{xy}	-0,39255	-0,39255	-0,39255
r_{yz}	-0,4632	0,304	0,16

ТАБЛИЦА 7. Результаты расчета частной и общей корреляции между сигналом и относительной влажностью

TABLE 7. Calculation Results of Partial and General Correlation between Signal and Relative Humidity

Статистический параметр	Корреляция сигнала и погодных параметров		
	Сигнал (x) – относительная влажность (y) без влияния		
	давления (z)	температуры точки росы (z)	интенсивности дождя (z)
$r_{xy(z)}$ без влияния z	-0,328	-0,2797	-0,316
r_{xy}	-0,365	-0,365	-0,365
r_{yz}	-0,17	0,304	0,20

Обоснование предлагаемой аналитической функции распределения замираний на РРИ в диапазоне E-band

Предлагаемый в данной работе способ нахождения теоретической ФРВ замираний основан на методе моментов, или методе выравнивания имеющегося статистического ряда с помощью некоторых параметров, характерных для заданного статистического материала [15]. Подобные методы уже использовались ранее, но их применение ограничивалось максимальным значением частот 35 ГГц [16]. Суть метода состоит в том, что для нахождения аналитического выражения расчета вероятности замираний сигнала на РРИ в условиях дождей необходимо для имеющихся статистических данных определить моменты, а на их основе найти параметры, характеризующие искомую функцию распределения.

Предлагается использовать следующее экспоненциальное выражение для интегральной ФРВ [16]:

$$F(A, \alpha, \beta, \delta) = \begin{cases} \alpha(\delta^2 e^{\beta\delta^2 A} + \delta e^{\beta\delta A} + e^{\beta A}), & A < 0. \\ 1, & A \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

Определить параметры α , β и δ можно, основываясь на характерных для заданной статистики значениях: P_d – вероятность наличия дождя, в долях; A_{sr} – статистическое среднее ослабление во время дождя (дБ); D_A – статистическая дисперсия ослабления во время дождя (дБ²). Параметры P_d , A_{sr} , D_A могут быть получены на основе d_r – длины РРИ с учетом коэффициента дальности r , γ_R – удельного затухания (дБ/км), которое рассчитывается согласно Рекомендации ITU-R P.838 [9] для заданной частоты, поляризации и средней интенсивности дождя, полученной из статистических данных о метеоусловиях в районе РРИ.

Для определения параметров α , β и δ при заданных значениях P_d , A_{sr} , D_A необходимо решить следующую систему уравнений [15] относительно данных параметров:

$$\begin{cases} P_d = \alpha(\delta^2 + \delta + 1) \\ A_{sr} = \frac{-3}{\beta(\delta^2 + \delta + 1)} \\ D_A = \frac{2}{\beta^2 \delta^2} - A_{sr}^2 \end{cases} \quad (10)$$

Деление третьего уравнения на квадрат второго дает соотношение $\varphi(\delta)$:

$$\varphi(\delta) = \frac{D_A}{A_{sr}^2} = \frac{2(\delta^2 + \delta + 1)^2}{9\delta^2} - 1, \quad (11)$$

из которого была выведена формула:

$$\delta = \frac{\sqrt{18 \frac{D_A}{A_{sr}^2} - 12 \sqrt{\frac{D_A}{A_{sr}^2}} + 2 + 6 + 3\sqrt{2} \sqrt{\frac{D_A}{A_{sr}^2}} + 1} - 2}{4}. \quad (12)$$

Остальные параметры определяются по формулам:

$$\alpha = \frac{P_d}{\delta^2 + \delta + 1}, \quad (13)$$

$$\beta = \frac{-3P_d}{A_{sr}(\delta^2 + \delta + 1)}. \quad (14)$$

Для 4-х из 23-х РРИ, выбранных ранее для примера, был выполнен расчет замираний в условиях дождя с интенсивностью 15 и 30 мм/ч, превышаемой в течение 0,01 % времени, что характерно для климатических регионов, в которых находятся ин-

тервалы. Графики ФРВ ослабления сигнала в дождях для РРИ, функционирующих в диапазоне E-band, полученные на основе статистики и рассчитанные с помощью предложенного метода, представлены на рисунке 5, соответственно, синим и красным цветами.

Результаты расчета по предложенной аналитической ФРВ замираний, основанной на методе моментов, показали хорошее совпадение со статистическими данными для 4-х интервалов. Для РРИ №1 средняя ошибка между статистическими данными и рассчитанными значениями вероятности замираний сигнала глубиной до -37 дБ составляет 0,4 %, СКО = 2 %. Для РРИ №2 при глубине замираний до -23 дБ средняя ошибка - 1 %, СКО = 1,1 %. Для РРИ №3 при глубине замираний до -14 дБ средняя ошибка - 1,6 %, СКО = 2,3 %. А для РРИ №4 при глубине замираний до -40 дБ средняя ошибка - 0,5 %, СКО = 1,2 %. Обобщенный результат точности расчета вероятности замираний для предложенного метода по всем четырем РРИ составляет среднюю ошибку 0,9 % и СКО - 1,6 %.

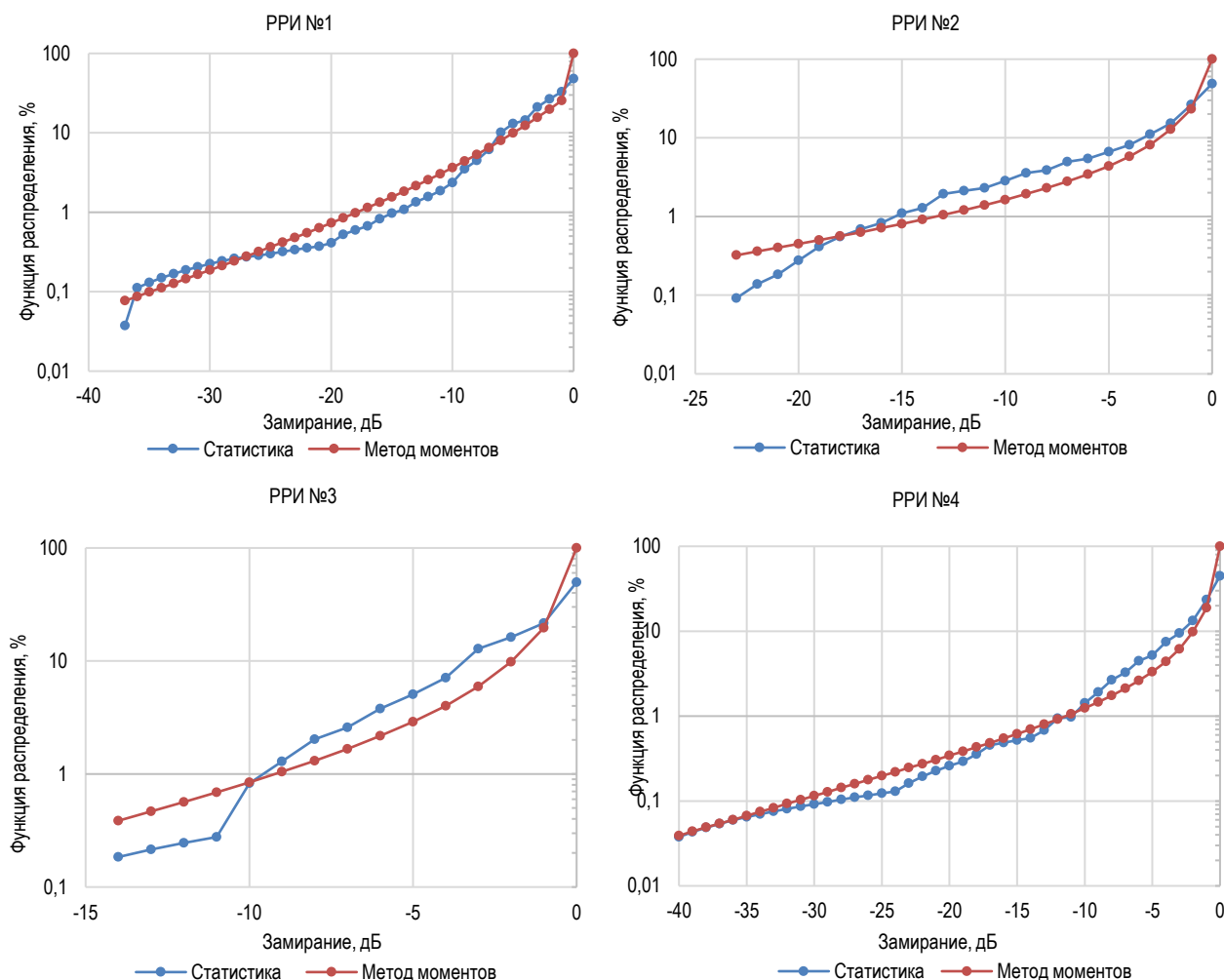


Рис. 5. Сравнение статистических ФРВ замираний и предлагаемой аналитической ФРВ

Fig. 5. Comparison of Statistical PDF and Proposed Analytical PDF of Fading

Результаты расчета средних значений уровня мощности сигнала P_{SR} по предложенной методике и статистические данные $P_{SR_стат}$ представлены в таблице 8. Символами $P_{SR_стат1}$ и $P_{SR_стат2}$ обозначены значения среднего уровня мощности сигнала, соответственно, на станции 1 и станции 2 РРИ. Разница между статистическими данными $P_{SR_стат}$ и рассчитанными значениями P_{SR} для 4-х рассматри-

ваемых интервалов находится в диапазоне значений от $-3,9$ до $3,8$ дБм, средняя ошибка составляет $-0,26$ дБм и СКО – $2,94$ дБм.

Таким образом, предложенная функция распределения (9) замираний сигнала в условиях дождей позволяет рассчитать коэффициент неготовности для всех уровней модуляции, а затем, используя выражение (2) или (3), среднюю скорость передачи данных на РРИ с АМ.

ТАБЛИЦА 8. Средние значения уровни мощности сигнала (дБм) в дождях, рассчитанные предложенным методом и полученные на основе статистики

TABLE 8. Average Values of Signal Strength Levels (dBm) at Rain Calculated by the Proposed Method and Obtained on the Basis of Statistics

Интенсивность дождя $I_d = 15$ мм/ч				Интенсивность дождя $I_d = 30$ мм/ч			
РРИ №1, $R = 9$ км		РРИ №2, $R = 8$ км		РРИ №3, $R = 7$ км		РРИ №4, $R = 6$ км	
Расч. P_{SR}	Стат. $P_{SR_стат1};$ $P_{SR_стат2}$	Расч. P_{SR}	Стат. $P_{SR_стат1};$ $P_{SR_стат2}$	Расч. P_{SR}	Стат. $P_{SR_стат1};$ $P_{SR_стат2}$	Расч. P_{SR}	Стат. $P_{SR_стат1};$ $P_{SR_стат2}$
$-43,7$	$-43,4$ $-41,9$	$-39,1$	$-42,8$ $-43,2$	$-49,7$	$-45,5$ $-46,3$	$-37,3$	$-39,6$ $-38,99$

Сравнение результатов расчета пропускной способности и устойчивости РРИ с АМ по разработанной методике со статистическими данными

Для возможности сравнения аналитических результатов со статистическими данными, расчет пропускной способности и устойчивости работы РРИ в диапазоне E-band выполнен для РРИ №4. На данном интервале применяется оборудование, которое поддерживает режим АМ с техническими параметрами, представленными в таблице 1.

Результаты расчета распределения вероятности уровня мощности сигнала на входе приемника РРИ №4 в диапазоне E-band, полученные на основе аналитических функций и статистических данных, представлены на рисунке 6. Расчеты и статистические данные соответствуют условиям дождя со средней интенсивностью 30 мм/ч, превышаемой в течение $0,01$ % времени. Для Рекомендации ITU-R P.530 и предлагаемого метода расчет распределения вероятности уровня сигнала на входе приемника выполнен с использованием аналитических функций распределения замираний сигнала, соответственно, (6 и 9).

Представленные на рисунке 6 графики позволяют выполнить сравнительную оценку аналитических методов расчета устойчивости РРИ со статистическими данными. Например, требуется рассчитать устойчивость работы РРИ №4 в сети доступа на уровне модуляции 4QAM для обеспечения скорости передачи данных 2731 Мбит/с. Устойчивость работы оценивается коэффициентом неготовности $K_{нг,i}$ на i -й скорости передачи (i -м уровне модуляции). Для сети доступа требуемое значение коэффициента неготовности $K_{нг,треб} = 0,05$ % [5], что соответствует красной горизонтальной линии на ри-

сунке 6. Вертикальная линия красного цвета показывает чувствительность приемника для модуляции 4QAM при $BER = 10^{-6}$. Точка пересечения указанных линий является критерием устойчивой работы РРИ. Интервал соответствует требованиям по устойчивости, если выполняется условие $K_{нг,i} \leq K_{нг,треб}$.

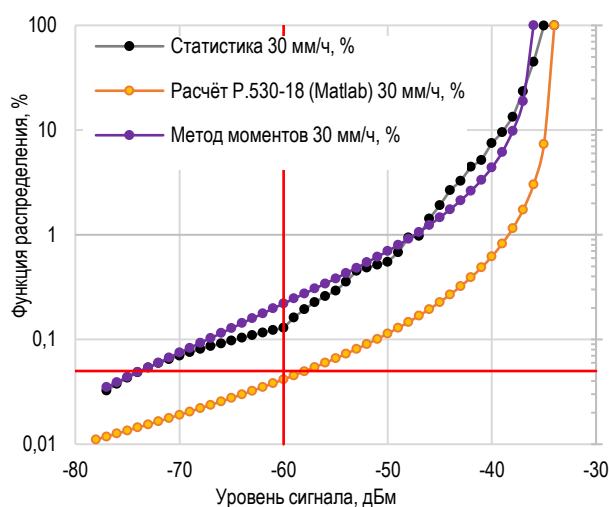


Рис. 6. Функции распределения вероятности уровня мощности сигнала на входе приемника, рассчитанная для РРИ №4 по различным методикам и их сравнение со статистическими данными

Fig. 6. Probability Distribution Functions for the Signal Power Level at the Receiver Input Calculated for the Station No. 4 Using Various Methods and Their Comparison with Statistical Data

Из графика следует, что согласно расчетам по Рекомендации ITU-R P.530 интервал соответствует требованиям по устойчивости работы, а согласно расчетам по предложенному методу и статистическим данным – интервал не соответствует требованиям по устойчивости для работы в сети доступа.

Следовательно, опасность применения чрезмерно оптимистичного прогноза, который дает Рекомендация ITU-R P.530, на практике может повлечь к нарушению устойчивой работы РРЛ в реальных условиях. Более надежный прогноз дает разработанный метод (сиреневая линия), который хорошо согласуется со статистическими данными и позволяет избежать завышенных ожиданий от устойчивости работы РРЛ и связанных с этим риском. Сравнение результатов моделирования, полученных по предложенной методике с эмпирическими значениями, было проведено по критерию согласия Колмогорова для уровня значимости 5 % [14, 16]. Пороговая величина параметра $\lambda_{\text{порог}}$ критерия согласия Колмогорова для заданного уровня значимости составляет 1,35, а вычисленное значение $\lambda_{\text{расч}}$ для статистического и предложенного теоретического рядов – 1,31, что меньше порогового значения $\lambda_{\text{порог}}$. Это позволяет считать допустимой гипотезу о соответствии предложенного аналитического распределения статистическому.

Результаты расчета пропускной способности РРЛ №4 с использованием формулы (2) рассмотренными аналитическими методами и статистические данные представлены на рисунке 7.

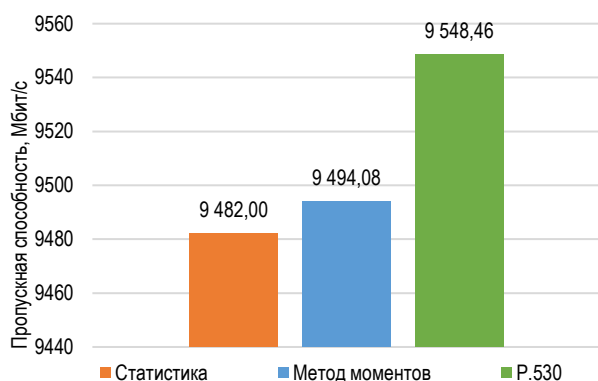


Рис. 7. Результаты расчета пропускной способности РРЛ №4 при использовании различных методик

Fig. 7. Calculation Results of the Throughput for Station No. 4 Using Various Methods

Расчет по методу моментов наиболее приближен к реальным значениям. Расчет пропускной способности по методике ITU-R P.530, как и следовало ожидать, дает слишком оптимистические значения по сравнению с реальными данными статистики.

Список источников

- 3GPP TS 22.261 V19.1.0 (2022) Service requirements for the 5G system. Release 19.
- ITU-R M.2083-0 (2015) IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.
- ETSI GR mWT 012 V1.1.1 (2018) 5G Wireless Backhaul/X-Haul.
- Степанец И.В., Степанец В.А., Зайчик Е.М., Одоевский С.М. 4. Особенности применения и планирования радиорелейной связи в сетях 5-го поколения // Информатизация и связь. 2019. № 3. С. 77–83. DOI:10.34219/2078-8320-2019-10-3-77-83
- Методика расчета трасс цифровых РРЛ прямой видимости в диапазоне частот 2–20 ГГц. Государственный Комитет Российской Федерации по связи и информации. Москва: Инженерный центр, 1998.

Численное сравнение результатов показывает, что погрешность расчетов по рекомендации ITU-R P.530 превышает погрешность по методу моментов в 5 раз. Использование результатов слишком оптимистичного прогноза на практике может привести к потере передаваемой информации.

Заключение

Существующие методики расчета устойчивости РРЛ базируются на математических моделях, справедливых для ограниченного частотного диапазона. Однако современные РРС функционируют на частотах 80 ГГц и выше, что продиктовано требованиями к росту пропускной способности. Анализ статистических данных и выполненные расчеты в рамках данной работы выявили несоответствия расчетов по существующим методикам со статистическими данными, измеренными на РРЛ с АМ.

В статье описывается разработанная методика расчета пропускной способности РРЛ с АМ в условиях замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн. Показана взаимосвязь пропускной способности с коэффициентами неготовности интервалов РРЛ с разными грациями скорости передачи при известной функции распределения замираний. Представлены результаты обработки статистики замираний на интервалах РРЛ в диапазоне E-band и метеоданных, на основе которых была выявлена их взаимосвязь, учтенная в предлагаемом аналитическом выражении функции распределения замираний. Проведен сравнительный анализ результатов расчета коэффициентов неготовности и пропускной способности интервалов РРЛ в диапазоне E-band на основе предлагаемой функции распределения и на основе функций распределения, используемых в существующих методиках. Показано, что результаты расчетов по разработанной методике в большей степени соответствуют результатам измерений, чем результаты расчетов по существующим методикам.

Направлением дальнейших исследований является продолжение обработки статистических данных с целью уточнения аналитической зависимости параметров предложенной функции распределения вероятности замираний от параметров метеоусловий в районе планируемого развертывания интервалов РРЛ с АМ в диапазоне E-band.

6. ITU-R P.530-18 (2021) Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.
7. Одоевский С.М., Ключников В.О., Степанец И.В. Модель функционирования сети связи, построенной на основе радиорелейных станций с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. №. 4. С. 63–76. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-63-76
8. Одоевский С., Степанец В. Проектирование РРЛ: программный комплекс ONEPLAN RPLS // Первая миля. 2016. № 8(61). С. 18–23.
9. ITU-R P.838-3 (2005) Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Question ITU-R 201/3.
10. Рыбакова Ж.В. Физическая метеорология (отдельные разделы). Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2013. 384 с.
11. Агишева Д.К., Зотова С.А., Матвеева Т.А., Светличная В.Б. Математическая статистика: учебное пособие // Успехи современного естествознания. 2010. № 2. С. 122–123.
12. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М: Кнорус, 2018. 480 с.
13. Введенский Б.А. (ред.). Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1960. Т. 5.
14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
15. Ларин Е.А. Метод расчёта ослабления радиоволн в дожде на приземных трассах // Электросвязь. 1982. № 8. С. 48–54.
16. Абезгауз Г.Г. и др. Справочник по вероятностным расчетам. М.: Воениздат, 1970. 536 с.

References

1. 3GPP TS 22.261 V19.1.0. *Service requirements for the 5G system*. Release 19. 2022.
2. ITU-R M.2083-0. *IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. 2015.
3. ETSI GR mWT 012 V1.1.1. *5G Wireless Backhaul/X-Haul*. 2018.
4. Stepanets I.V., Stepanets V.A., Zaychik E.M., Odovskiy S.M. Features of the Application and Planning of the Microwave Transmission in the 5th Generation Networks. *Informatizatsiya i svyaz*. 2019;3:77–83. (in Russ.) DOI:10.34219/2078-8320-2019-10-3-77-83
5. *Calculation Methodology for Digital Line-of-Sight Radar Routes in the 2–20 GHz Frequency Range*. Moscow: Engineering Center Publ.; 1998.
6. ITU-R P.530-18. *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. 2021.
7. Odovskiy S., Kluychnikov V., Stepanets I. Functional Model of Communication Network of Microwave Link Stations with Adaptive Modulation and Package Switching. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(4):63–76. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-63-76
8. Odovskiy S., Stepanets V. Designing Microwave Links, ONEPLAN RPLS Software. *Last Mile*. 2016;8(61):18–23. (in Russ.)
9. ITU-R P.838-3. *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Question ITU-R 201/3*. 2005.
10. Rybakova Zh. V. *Physical meteorology (separate sections)*. Tomsk: National Research Tomsk State University Publ; 2013. 384 p. (in Russ.)
11. Agisheva D.K., Zotova S.A., Matveeva T.A., Svetlichnaya V.B. Mathematical Statistics: Textbook. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia*. 2010;2:122–123. (in Russ.)
12. Ventzel E.S., Ovcharov L.A. *Probability Theory and its Engineering Applications*. Moscow: KNORUS Publ.; 2018. 480 p. (in Russ.)
13. Vvedensky B.A. (ed.) *Physical Encyclopedic Dictionary*. Moscow: Soviet Encyclopedia Publ.; 1960. vol.5. (in Russ.)
14. Wentzel E.S. *Probability Theory*. Moscow: Nauka Publ.; 1969. (in Russ.)
15. Larin E.A. Method for calculating the attenuation of radio waves in rain on near-earth routes. *Electrosvyaz*. 1982;8: 48–54. (in Russ.)
16. Abezgauz G.G. et al. *Handbook of Probability Calculation*. Moscow; Voenizdat Publ.; 1970. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 19.04.2023; одобрена после рецензирования 19.06.2023; принята к публикации 29.06.2023.

The article was submitted 19.04.2023; approved after reviewing 19.06.2023; accepted for publication 29.06.2023.

Информация об авторе:

СТЕПАНЕЦ
Ирина Валерьевна

аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств
Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-1167-1590>