

Ю. И. Малышенко, Ю. В. Левадный

**ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ДОЖДЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ
МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА С УЧЕТОМ МЕТЕОСТАТИСТИЧЕСКИХ СВЕДЕНИЙ
О ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЫПАДЕНИЯ ДОЖДЕЙ**

*Институт радиопроизводства и электроники им. А. Я. Усикова, НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: yulev@ire.kharkov.ua*

Известно, что продолжительность сильных дождей, создающих ряд существенных помех в работе радиолокационных станций (РЛС) микроволнового диапазона, составляет лишь малый процент по отношению к продолжительности года. Это позволяет разработчикам РЛС ограничиться заметно меньшим запасом энергетического потенциала на преодоление дополнительного затухания в осадках, величина которого определяется конкретными значениями допустимой суммарной продолжительности сбоев в работе РЛС из-за дождей, характерных для района их расположения. На конкретных примерах РЛС с частотами 10, 35, 70 и 95 ГГц изложена методика прогнозирования величины вероятности их бесперебойной работы в дождях в одном из районов Украины с привлечением характерных для него метеостатистических данных о продолжительности их выпадения. Для решения этой задачи также произведено обобщение современных данных по коэффициентам ослабления и отражаемости дождей частично путем оригинальных расчетов, частично путем анализа литературных данных. Таким образом персоналу штатных РЛС предоставлены современные расчетные модели, которые сверены с эмпирическими данными и дополнены новыми аналитическими зависимостями, повышающими точность их применения на практике. Ил. 13. Табл. 6. Библиогр.: 26 назв.

Ключевые слова: микроволновый диапазон радиоволн, радиолокационная станция и дожди, удельная эффективная площадь рассеяния дождя.

Как известно, дожди повышенной интенсивности создают ряд существенных помех в работе радиолокационных станций (РЛС). С одной стороны, дожди ослабляют радиосигналы на пути их следования до цели и обратно, в связи с чем для преодоления вносимого дождем затухания, необходимо предусмотреть запас потенциала РЛС. С другой стороны, при поиске или сопровождении летательных аппаратов в воздухе дожди создают мешающие отражения радиоволн от находящихся в освещенном объеме дождевых капель. Эти отражения могут превысить по эффективной площади рассеяния (ЭПР) полезное отражение от малоразмерной цели – она окажется замаскированной и может быть потеряна. В то же время продолжительность дождей повышенной интенсивности и создаваемых ими указанных помех обычно составляет лишь малый процент по отношению к периоду наблюдения (обычно его соотносят с продолжительностью года). Это позволяет разработчикам ограничиться заметно меньшим запасом энергетического потенциала РЛС на преодоление дополнительного затухания в дождях. Однако при этом необходимо по возможности точно знать либо суммарную продолжительность сбоев в работе действующей РЛС от воздействия дождей, либо величину энергетического потенциала РЛС или линии связи, необходимого для обеспечения заранее заданной величины вероятности бесперебойной работы в дождях, характерных для района их расположения. В связи с этим в нашей работе изложена методика определения указанных величин на примере конкретных РЛС, работающих на частотах 10, 35, 70 и 95 ГГц, излучение которых подвержено заметным воздей-

ствиям дождей. При этом полагается, что они развернуты в наиболее дождливом (не считая Карпат) районе Украины – на севере Черниговской области – и имеют технические параметры, подобные зарубежным станциям [1]. Требующиеся для решения указанных задач коэффициенты ослабления и удельной радиолокационной отражаемости 1 м^3 дождя (удельной ЭПР) на указанных частотах будут взяты из обобщенных данных по ним, представленных в разд. 2.

1. Распределения интенсивности дождей, соответствующих погонных затуханий и коэффициентов обратного рассеяния. В основе данной работы лежит распределение продолжительности выпадения дождей из диссертационной работы В. А. Румянцева [2]. Распределение относится к стыку дождливых районов Смоленской, Брянской и северной части Черниговской областей, т. е. к региону, из которого вытекают многие крупные реки европейской территории СНГ. Отметим, что для нас в таких распределениях менее интересна область слабых дождей, хотя именно они чаще возникают и дольше присутствуют, так как подразумевается, что РЛС всегда обладает достаточным потенциалом для их преодоления, а вот участки распределений, относящиеся к наиболее высоким интенсивностям, имеют решающее значение в этом вопросе. По современным требованиям данные для этого участка должны накапливаться с помощью скоростных дождемеров (с постоянной времени порядка 10 с), которыми метеостанции Украины до сих пор не оборудованы, причем в течение многих лет, поскольку продолжительность сильных дождей обычно не превышает нескольких единиц и де-

сятков минут в год. В основу же указанных распределений положены скрупулезно обработанные плювиографические записи за 1970-е гг., усредненные за десятилетний период наблюдений в четырех городах с постоянной времени 1 мин для слабых дождей и 3 мин для сильных. Последняя цифра означает, что должны быть исключены участки распределений, относящиеся к проценту времени года менее $2 \cdot 10^{-4} \%$, т. е. 1,1 мин. Вид этого распределения показан на рис. 1 сплошной толстой линией. Видно, что оно вполне согласуется с распределениями, полученными в других странах с похожим климатом (● – из работы [3], ○ – [4], Δ – [5], ■ – [6], □ – [7]).

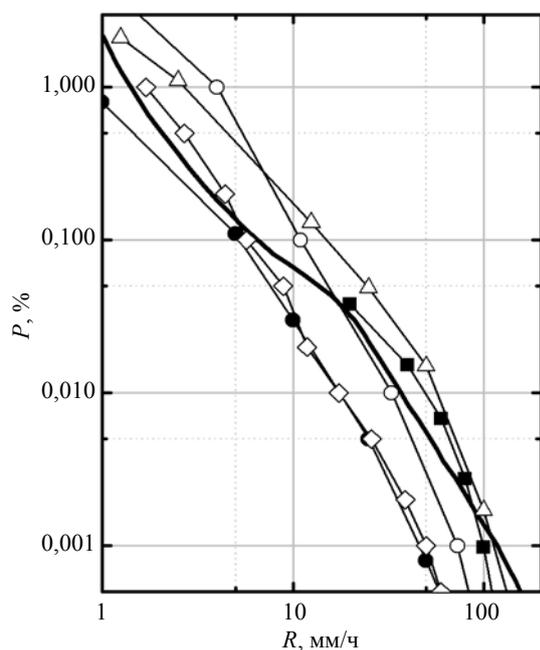


Рис. 1. Интегральные распределения продолжительности выпадения дождей с интенсивностью не ниже указанной

Излучение РЛС на указанных рабочих частотах испытывает также поглощение в некоторых постоянно присутствующих в атмосфере газовых компонентах (в кислороде и водяных парах). Не затрагивая слабой зависимости для коэффициентов молекулярного поглощения в воздухе от изменения температуры и давления воздуха, процентного состава кислорода и выбрав даже для наиболее изменчивого компонента – количества водяных паров – некоторое среднее значение, характерное для летнего времени в Украине ($7,5 \dots 8 \text{ г/м}^3$), приведем их значения в табл. 1 [8].

Таблица 1

Коэффициенты молекулярного поглощения в воздухе

$f, \text{ ГГц}$	10	35	70	95
$\gamma_{\text{возд}}, \text{ дБ/км}$	0,015	0,1	0,53	0,55

Эти значения были прибавлены к коэффициентам ослабления в дождях, что, впрочем, слабо отразилось на их величине. Используя взаимосвязь между интенсивностью дождя и значениями коэффициентов ослабления, рекомендованных *ITU-R* для горизонтальной поляризации, и отражаемости дождей (см. разд. 2) интегральное распределение интенсивности выпадения дождей на севере Украины превращается в интегральные распределения погонного ослабления и сечения обратного рассеяния, представленные на рис. 2.

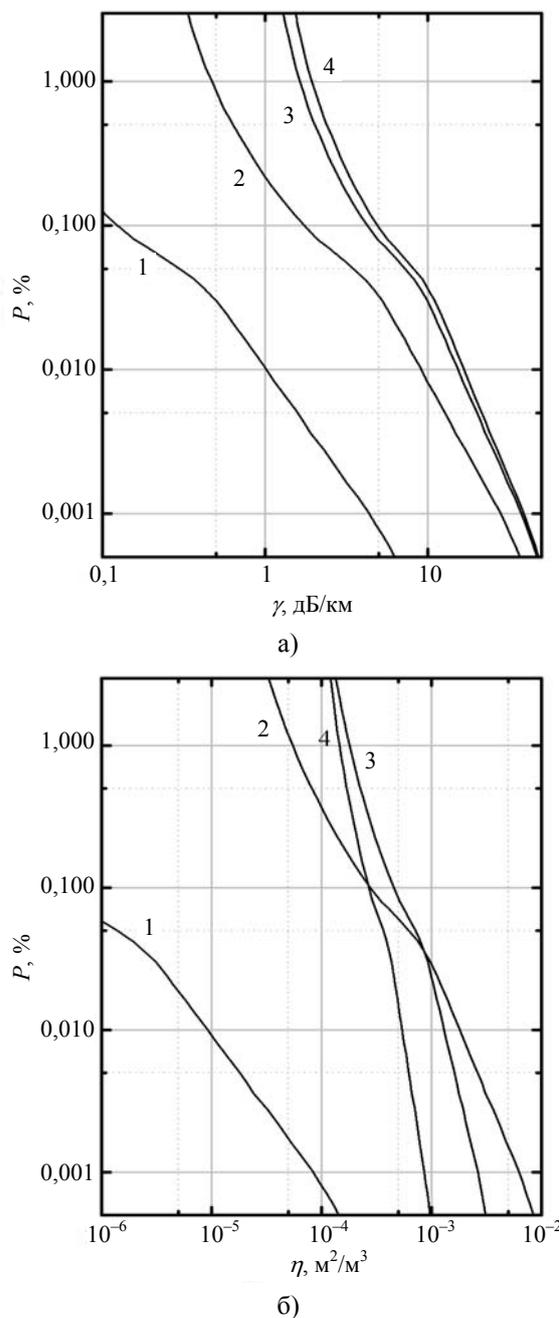


Рис. 2. Распределение погонного ослабления (а) и сечения обратного рассеяния (б) на частотах, в гигагерцах: 1 – 10; 2 – 35; 3 – 70; 4 – 95

Они являются исходным материалом для вычисления продолжительности сбоев в работе РЛС (с параметрами из табл. 2) в сильных дождях и изменения ее дальности действия в более слабых. Так, продолжительность сбоев за счет маскирующего действия дождя с $R = 10$ мм/ч составит 0,03 % времени года (данные рис. 1) для целей с ЭПР 5 м^2 на расстоянии 10 км в диапазоне 95 ГГц и 7 км в диапазоне 10 ГГц (рис. 3).

Таблица 2

Параметры РЛС [1]

f , ГГц	9,375	35	70	95
Обозначение	1	2	3	4
Коэффициент шума	10	13,4	18	28
Δf , МГц	4	6	14	20
τ , нс	700	200	85	80
P , кВт	40	20	10	8
D , м	1,83	0,92	0,92	0,92
$\Delta\theta$, °	1,2	0,68	0,34	0,24

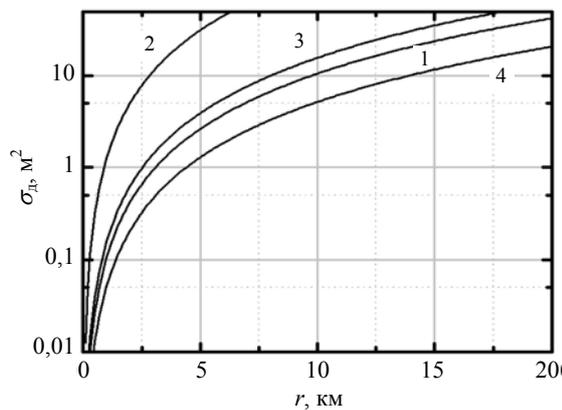


Рис. 3. Зависимость ЭПР дождя от расстояния для РЛС с параметрами из табл. 2 и $R = 10$ мм/ч

Рассмотрим задачу об изменении дальности действия РЛС в дождях. Для этого воспользуемся уравнением радиолокации [9]

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{ясн}} = \frac{P_{\text{ясн}}}{N_{\text{пр}}} = \frac{K_1 \sigma_{\text{ц}} / r_{\text{ясн}}^4}{N_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где $K_1 = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3}$; G – коэффициент усиления приемо-передающей антенны; $N_{\text{пр}} = kT_N B$ – тепловые шумы приемника; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T_N – шумовая температура приемника; B – полоса пропускания приемника; $\sigma_{\text{ц}}$ – ЭПР цели; $r_{\text{ясн}}$ – дальность до цели в ясную погоду.

Как видно из уравнения (1), при фиксированных ЭПР цели и параметрах РЛС ее дальность действия зависит от соотношения сигнал-

шум (S/N). Но это отношение мгновенно ухудшается, как только воздушная цель оказывается внутри зоны дождя, потому что шумовые сигналы от окружающих ее капель дождя складываются в приемнике с его собственными шумами. Следовательно, прежде чем оценивать изменение дальности, необходимо проследить изменение отношения S/N в дожде. Как следует из справочника [9], приведенное выше уравнение в этом случае приобретает вид

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{д}} = \frac{P_{\text{д}}}{N_{\text{пр}} + N_{\text{д}}} = \frac{K_1 \sigma_{\text{ц}} \psi / r_{\text{д}}^4}{N_{\text{пр}} + N_{\text{д}}}, \quad (2)$$

где $\psi = e^{-2\gamma r_{\text{д}}}$; γ – погонное ослабление (см. разд. 2); $r_{\text{д}}$ – дальность до цели во время дождя; $N_{\text{д}}$ – факторшум, учитывающий маскирующее действие дождя:

$$N_{\text{д}} = \frac{K_1 \pi}{r_{\text{д}}^4} \psi r_{\text{д}}^2 \theta_{\text{а}} \theta_{\text{ум}} c \tau \eta, \quad (3)$$

где η – удельная ЭПР дождя; c – скорость света; τ – длительность зондирующего импульса РЛС; $\theta_{\text{а}}$ и $\theta_{\text{ум}}$ – ширина диаграммы направленности антенны по азимуту и углу места соответственно.

Ввод в последнее уравнение метеостатистических данных приводит к зависимости входящих в него переменных величин еще от процента времени года. Последовательно фиксируя значения процентов и выбирая из рис. 2 соответствующие значения γ и η можно для РЛС из табл. 2, построить интегральные распределения (рис. 4) возможных отношений S/N для цели с ЭПР 10 м^2 , находящейся на расстоянии 5 км.

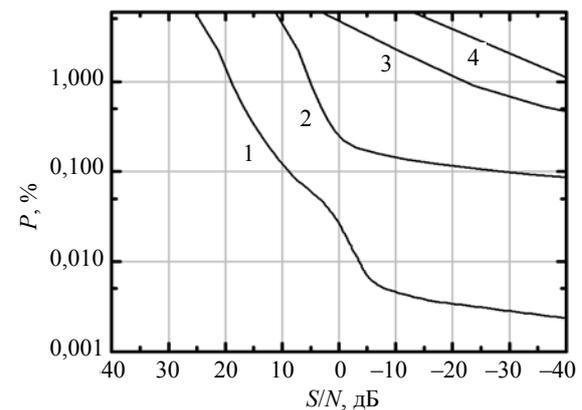


Рис. 4. Распределение соотношения S/N для РЛС с параметрами из табл. 2 и цели с ЭПР 10 м^2 на расстоянии 5 км

Таким образом, можно оценить, что для такой цели соотношение S/N для радиолокатора 3-см диапазона с одиночным импульсом будет 19 дБ в течение 1 % времени года (при отсутствии дождя соотношение S/N должно быть 57,1 дБ). Также, используя это распределение,

можно оценить и интегральное распределение вероятности правильного обнаружения, которое при фиксированной вероятности ложной тревоги связано с соотношением S/N .

Более наглядным примером использования метеостатистики является оценка дальности действия РЛС. Для получения интегральных распределений дальности действия РЛС в дождях воспользуемся следующим подходом [9]: в действующей РЛС отношение S/N автоматически поддерживается на неизменном уровне независимо от погоды. Это дает основание приравнять уравнения (1) и (2). Проводя несложные математические преобразования, получаем следующее уравнение:

$$r_{\text{ясн}}^4 = \frac{1 + C_2 r_d^{-2} \psi}{\psi r_d^{-4}}, \quad (4)$$

где $C_2 = \pi K_1 \eta h \theta_a \theta_{\text{ум}} / (8 N_r)$. Уравнение (4) нельзя решить непосредственно относительно r_d , однако можно задавать величины r_d (дальность действия в дожде) и по ним вычислять соответствующие значения $r_{\text{ясн}}$. Таким образом, были получены зависимости дальности действия РЛС от интенсивности дождя, соответствующие им интегральные распределения дальности действия приведены на рис. 5 для РЛС с вышеупомянутыми параметрами. Из рис. 5 следует, что моноимпульсная РЛС 3-см диапазона с паспортным отношением $S/N = 25$ дБ в ясную погоду сможет обеспечить наблюдение целей с ЭПР 10 м^2 на расстоянии до 12 км в дождях, характерных для севера Черниговской области в течение 99 % времени года (время сбоев из-за дождей не более 1 % или 3,65 дней в году). В РЛС с накоплением нескольких сотен импульсов время сбоев будет заметно меньше, либо увеличится дальность действия.

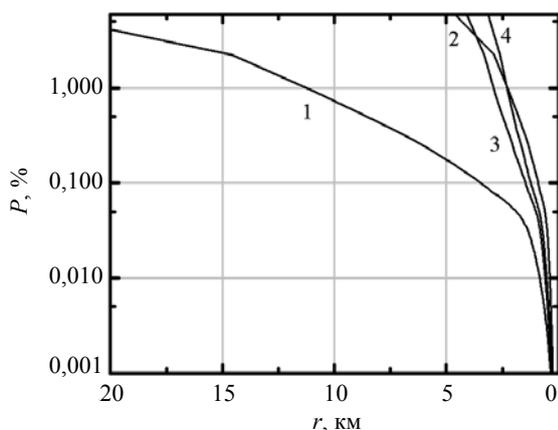


Рис. 5. Распределение максимальной дальности действия РЛС с параметрами из табл. 2

Кроме РЛС метеостатистика используется при проектировании систем радиосвязи, когда возникает вопрос обеспечения заданной вероятности бесперебойной работы в дождях. На рис. 6 для вероятностей бесперебойной работы 0,9999 (кривые 1 и 2) и для 0,999 (кривые 3 и 4) на частотах 35 ГГц (кривые 2 и 4) и 95 ГГц (кривые 1 и 3) были построены графики зависимости энергетического потенциала радиолинии от максимальной дальности действия.

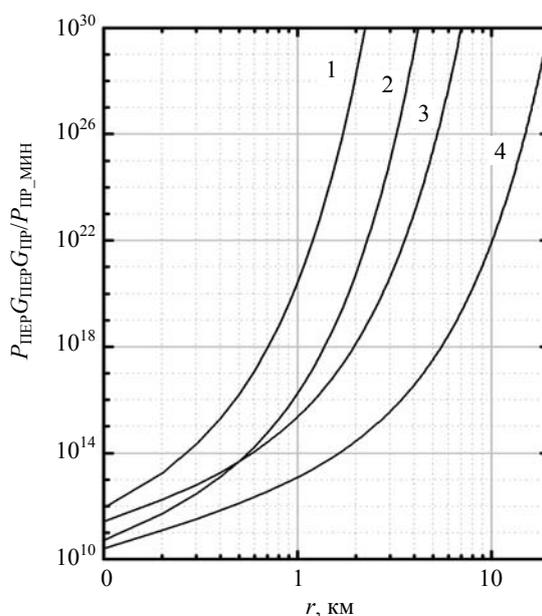


Рис. 6. Соотношение энергетического потенциала системы радиосвязи и ее максимальной дальности действия при заданной вероятности бесперебойной работы

Таким образом, если необходимо обеспечить вероятность бесперебойной работы радиолинии длиной 10 км на частоте 35 ГГц равную 0,999, то необходимо иметь энергетический потенциал $(P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} / P_{\text{пр_мин}})$ не менее 10^{22} , где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика; $P_{\text{пр_мин}}$ – чувствительность приемника; $G_{\text{пер}}$ и $G_{\text{пр}}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн.

2. Обобщенные данные по удельным коэффициентам ослабления и отражения в дождях для диапазона 1...100 ГГц. Погонное ослабление радиоволн в дождях. В расчетно-теоретическом плане коэффициенты погонного ослабления и удельной ЭПР дождя представлены в виде суммы воздействий каждой из дождевых капель, располагающихся в единичном объеме дождя, на проходящее сквозь дождь электромагнитное излучение с длиной волны λ , где степень воздействия выражается сечениями ослабления каждой отдельной капли $C_{\text{осл}}(\lambda, D_i)$ (размерность м^2 или см^2) для первого коэффициента и сечениями

обратного рассеяния $C_{\text{рлс}}(\lambda, D_i)$ (с той же размерностью) для второго коэффициента, а именно [10]:

$$\gamma = 0,4343 \sum C_{\text{осл}} N(D_i) \Delta D, \text{ дБ/км}; \quad (5)$$

$$\eta = 10^{-4} \sum C_{\text{рлс}} N(D_i) \Delta D, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (6)$$

где сечения имеют размерность см^2 и суммирование ведется по всем дождевым каплям $N(D)$ в 1 м^3 дождя. Следовательно, в этих расчетах необходимо располагать конкретным видом функций распределения дождевых капель по размерам для различной интенсивности дождей R , мм/ч. Обычно среди имеющихся в литературе функций распределения выбирают те, которые проверены многолетней практикой и хорошо работают в микроволновом диапазоне. В первую очередь это распределения Лоус-Парсонса (*L-P*), Маршалла-Палмера (*M-P*) и Вейбула (*W*). Первые два из них представлены в более удобных для вычисления редакциях, а именно в редакциях де Вольфа [11] для распределения *L-P* и Олсона для распределения *M-P* [12].

Основная сложность вычисления коэффициентов γ и η по вышеприведенным выражениям связана с трудностями вычисления сечений ослабления и рассеяния отдельных капель, так как они, согласно теории Ми, выражаются бесконечными и медленно сходящимися рядами с комплексными коэффициентами a_n и b_n , включающими в себя сферические функции Бесселя и Ханкеля с комплексными аргументами. Вычисление этих функций в данной работе осуществлялось с помощью разложения в ряд Тейлора, т. е. без использования рекуррентных формул:

$$j_n(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(n+k+1)} \left(\frac{z}{2}\right)^{2k}, \quad (7)$$

$j_{-n}(z) = (-1)^n j_n(z)$ при n , равном целому числу, где Γ – гамма-функция.

Функция Ханкеля выражается через функцию Бесселя

$$h_n^{(2)}(z) = \frac{j_{-n}(z) - e^{i\pi n} j_n(z)}{-i \sin(\pi n)}. \quad (8)$$

Проверку реализованного алгоритма расчета проводили путем сопоставления с результатами расчета по аналогичной методике, приведенными в работе [13].

В нашей работе вычисления ослабления и рассеяния радиоволн в дожде выполнены для рабочих частот в пределах $1 \dots 100$ ГГц в предположении сферической формы дождевых капель. Часть полученных результатов в виде графиков коэффициентов ослабления представлена на рис. 7, а для распределения дождевых капель по размеру W [14] (сплошная линия) и рис. 7, б –

L-P (сплошная линия), *M-P* (штриховая линия), а графики удельных коэффициентов отражения будут представлены в следующем подразделе.

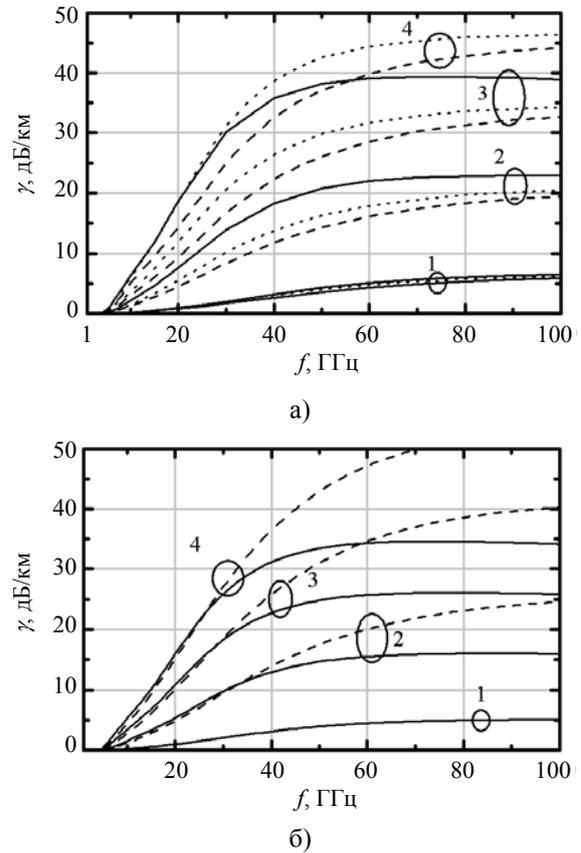


Рис. 7. Зависимость погонного затухания радиоволн в дожде от частоты для интенсивностей дождя, мм/ч: 1 – 10; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 150

Инженерный подход к оценке коэффициентов ослабления радиоволн микроволнового диапазона в дождях основывается на рекомендациях Международного союза электросвязи (*International Telecommunication Union*), который регулярно публикует достоверные (сверенные с экспериментами) значения коэффициентов ослабления радиоволн в дождях в виде зависимостей $\gamma = aR^b$ [15]. Графики частотных зависимостей этих коэффициентов для горизонтальной и вертикальной поляризации приведены на рис. 7, а (штриховая и пунктирная линии для горизонтальной и вертикальной поляризации).

Пользуясь этим графиком, можно получить значения ослабления радиоволн для ряда частот, которые не представлены в рекомендациях. Также эти значения можно оценить аналитически – воспользовавшись формулами из статей [16] и [17] для вычисления частотного хода коэффициентов a и b на любой частоте микроволнового диапазона и далее по ним посчитать погонное

ослабление на необходимых рабочих частотах. Указанные статьи – это, по сути, два вида аналитических аппроксимаций тех же данных ITU-R.

Удельная радиолокационная отражаемость дождей. Сведений об отражаемости радиолокационных сигналов от дождей в открытой печати весьма мало, они в основном касаются расчетно-теоретической области, а отчетов по фундаментальным измерениям отражаемости дождей – считанные единицы. К ним относятся экспериментальные работы двух американских исследовательских армейских лабораторий (*US Army Ballistic Research Laboratory* – далее будем обозначать *BRL* и *US Army Harry Diamond Laboratory*), а также работы гражданского Технологического института штата Джорджия (будем обозначать *GT*). Наиболее полно результаты измерений опубликовала именно последняя организация: имеется открытый и выставленный в Интернет отчет [1] и опубликована книга-справочник [18]. По результатам измерений второй вышеназванной лаборатории найдена всего лишь одна публикация [19] с краткими данными по отражаемости дождей. Отчеты по результатам измерений армейской лаборатории *BRL*, по-видимому, до сих пор остаются закрытыми, но опубликованы отчеты вторичного уровня, т. е. те, в которых цитируются результаты *BRL* другими авторами, как, например, в отчете [20]. Имеются также журнальные публикации результатов измерений этой лаборатории в двух статьях, написанных сотрудниками *BRL* [21, 22]. Краткий перечень параметров их измерительных комплексов содержится в [1, 21]. Запись отраженных сигналов от дождя и от калибровочного уголкового отражателя в *BRL* производилась кинокамерой с экрана индикатора типа *A*, а в *GT* – на цифровой магнитофон. Время усреднения отраженных от дождя импульсов составляло 0,1 с (*BRL*) и 30 с (*GT*). Результаты измерений *BRL* в виде графиков отражаемости дождей от их интенсивности представлены в двух разновидностях. Первая из них – пиковые значения (их можно посмотреть на рис. 6–9 в [20]), а в нашей работе они не воспроизведены, поскольку такие графики актуальны лишь при непосредственном измерении γ_d путем сопоставления посланных и принятых в дождях импульсов. Вторая разновидность – обычные усредненные удельные отражаемости. Последние из работы [22] представлены на рис. 8. В этой же статье для каждой из четырех представленных на этом рисунке графических зависимостей приводится также аналитическая аппроксимация следующего вида:

$$\eta = \alpha R^\beta. \tag{9}$$

с коэффициентами, приведенными в табл. 3.

Таблица 3
Значения параметров α и β
на различных частотах

f , ГГц	9,375	35	70	95
α	$1,04 \cdot 10^{-8}$	$8,49 \cdot 10^{-5}$	$5,55 \cdot 10^{-4}$	$3,42 \cdot 10^{-4}$
β	1,52	1,05	0,59	0,57

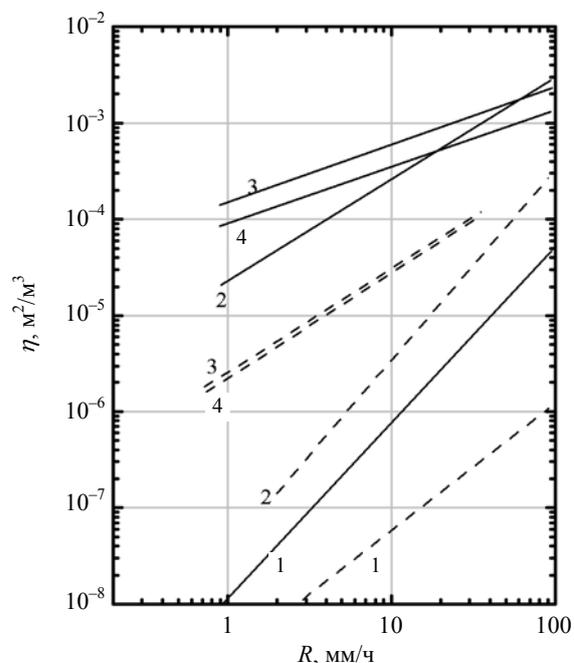


Рис. 8. Зависимость усредненных η от интенсивности дождя для вертикальной поляризации (сплошная линия, получены в *BRL*) и для правой круговой поляризации (штриховая линия, получены в *GT*) на частотах, в гигагерцах: 1 – 9,375; 2 – 35; 3 – 70; 4 – 95

Приведенная выше аналитическая формула (5) с коэффициентами, указанными в табл. 3, весьма удобна в практических вычислениях, в связи с чем значения этих коэффициентов включены также в сводный график рис. 9 для всех рассматриваемых здесь частот.

Теперь перейдем к освещению результатов измерений отражаемости дождей, выполненных в организации *GT*. По аналогии с предыдущим здесь также опустим графики пиковых значений отражаемостей (их можно видеть и в отчете [20] (рис. 10–13), и в книге [18] (рис. 3.8–3.10)). Из рис. 10 видно, что эмпирические данные *GT* в несколько раз ниже, чем *BRL*. Как показали последовавшие за этим измерения и теоретические расчеты, предпочтение в этом конфликте должно быть отдано результатам измерений *BRL*, а данные измерений *GT* должны быть отброшены, как содержащие систематическую ошибку в обработке результатов измерений.

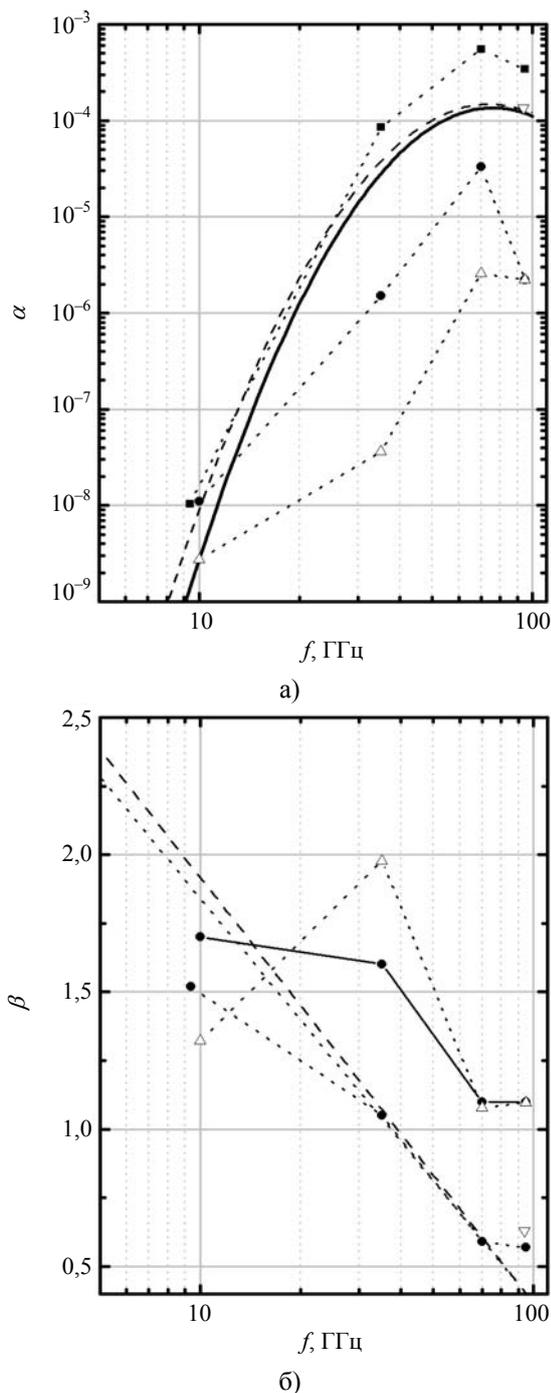


Рис. 9. Частотные зависимости коэффициентов α и β : ● – *GT*; ■ – *BRL*; Δ – *GT* круговая поляризация; сплошная – из работы [23] вертикальная поляризация; штриховая – из работы [23] горизонтальная поляризация; ∇ – из работы [24]

Все вышеприведенные эмпирические данные относились к линейным поляризациям излучения РЛС, а теперь перейдем к освещению результатов измерений на круговой поляризации, как известно, обеспечивающей заметное преимущество в снижении мешающих отражений от сферических капель в среднем порядка 15 дБ (этот вывод взят из статьи сотрудников *BRL* [22]).

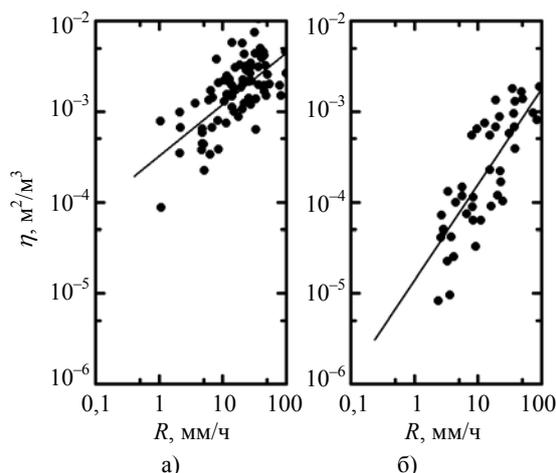


Рис. 10. Сопоставление пиковых η на частоте 95 ГГц, полученных: а) – *BRL*; б) – *GT*

С учетом того, что форма реальных капель отличается от сферической, указанное число не остается постоянным по всему микроволновому диапазону: существуют участки длин волн, где преимущество еще больше (когда все капли малы по сравнению с длиной волны и меньше сказывается их асферичность), и есть участки, где выигрыш меньше (K_a – диапазон длины волн 0,8...1,5 см, область резонансов Ми на наиболее крупных, а значит, заведомо асферичных дождевых каплях). *GT* в своих измерениях тоже подтвердила наличие упомянутого преимущества от использования круговой поляризации – именно из книги их сотрудников [1] на рис. 8 приведены графики величин удельной отражаемости дождей на круговой поляризации. Для удобного пользования этими графиками нами подобраны аппроксимирующие зависимости типа (9) и для круговой поляризации, коэффициенты которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения параметров α и β на различных частотах для круговой поляризации

f , ГГц	10	35	70	95
α	$2,76 \cdot 10^{-9}$	$3,61 \cdot 10^{-8}$	$2,59 \cdot 10^{-6}$	$2,23 \cdot 10^{-6}$
β	1,32	1,98	1,08	1,1

Эти же данные представлены на сводном графике коэффициентов α , β (рис. 9), на котором особенно наглядно видно преимущество от работы РЛС на круговой поляризации.

Выше цитировались результаты измерений η двух коллективов *BRL* и *GT*. Известно, что такие же измерения выполнены еще одной армейской исследовательской лабораторией *US Army Harry Diamond Laboratory*. Но из их измерений мы смогли найти лишь одно число в статье сотрудников этой лаборатории [19] для отражаемос-

ти дождей на вертикальной поляризации на частоте 95 ГГц: $\eta = -35$ дБ при интенсивностях дождей 4...6 мм/час, что означает $\eta = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{м}^3$. Это число также говорит в пользу правильности данных BRL.

Далее перейдем к освещению результатов теоретических расчетов удельной отражаемости дождей. Ранее упоминалось, что в нашей работе выполнены вычисления удельной отражаемости дождей (рис. 11) для частот 1...100 ГГц, интенсивностей 0,1...100 мм/час с использованием модели сферических капелек и функций распределения дождевых капелек по размерам W (рис. 11, а) и $L-P$ (рис. 11, б), которые хорошо согласуются с данными BRL.

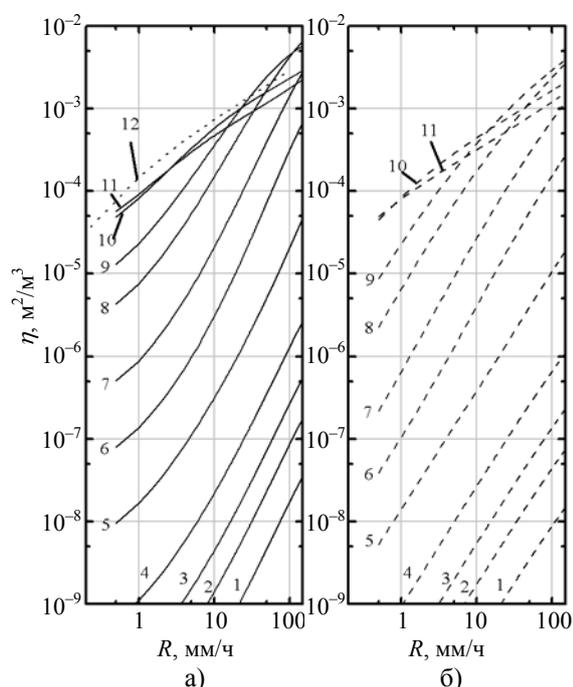


Рис. 11. Результаты теоретических расчетов удельной отражаемости дождей для распределения капелек по размерам W (а) и $L-P$ (б) на частотах (в гигагерцах): 1 – 1; 2 – 1,5; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 6; 6 – 10; 7 – 15; 8 – 25; 9 – 35; 10 – 70; 11 – 95; 12 – 95 из работы [24]

В литературе имеются многочисленные примеры и других расчетных работ. В частности, в книге [10] на стр. 59 в табл. 2.2, а также в статьях [25] на рис. 7, 8 для 35 и 95 ГГц и в работе [24] для 94 ГГц (график отражаемостей из последней нанесен на рис. 11) – во всех случаях кривые практически совпадают с результатами наших расчетов и близки к результатам измерений BRL. Такое же совпадение наблюдается и с коэффициентами α , β из [23, 24, 26], которые нанесены на сводный график рис. 9 треугольным значком [24] и пунктирной линией [23]. Правда, на частотах см диапазона (частоты менее 10 ГГц) формулы из [23, 25] для $\alpha(f)$ перестают работать (в то же

время формулы для $\beta(f)$ сохраняют здесь свою работоспособность). В работе [23] также много опечаток и неточностей в таблице коэффициентов α , β . В нашей работе они исправлены и помещены в табл. 5.

Таблица 5

Значения параметров α и β на различных частотах для вертикальной и горизонтальной поляризации

f , ГГц	α^{V-V}	β^{V-V}	α^{H-H}	β^{H-H}
3	$1,703 \cdot 10^{-10}$	2,610	$2,477 \cdot 10^{-9}$	2,727
5	$4,97 \cdot 10^{-7}$	2,303	$3,550 \cdot 10^{-6}$	2,383
7,5	$1,055 \cdot 10^{-4}$	2,044	$4,647 \cdot 10^{-4}$	2,110
10	$2,800 \cdot 10^{-3}$	1,860	$9,134 \cdot 10^{-3}$	1,917
20	1,268	1,418	2,325	1,45
30	14,088	1,158	20,326	1,177
35	20,064	1,06	37,658	1,073
70	133,243	0,617	146,573	0,607
95	118,895	0,421	128,024	0,401
100	111,174	0,389	119,755	0,367

Данные табл. 5 позволяют оперативно получать величины отражаемости дождей на частотах микроволнового диапазона.

На частотах $f \leq 10$ ГГц, где не требуется ни полных формул Ми, ни данных табл. 5, так как там используемые в РЛС длины волн значительно превышают размеры дождевых капелек, для этих целей применяют упрощенные (рэлеевские) формулы типа

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} M \sum D^6 N(D) \Delta D = \frac{\pi^5}{\lambda^4} MZ, \quad (10)$$

где параметр $Z = \sum D^6 N(D) \Delta D$ играет ключевую роль в радиометеорологических исследованиях облаков, дождей и других гидрометеоров. Поэтому в связанной с этим научным направлением литературе уже накопилось большое число эмпирических формул для зависимости Z от интенсивности дождей R , и все они могут быть использованы для оценки отражаемости дождей. Одна из формул, связанная с распределением $M-P$, не выходит из употребления уже много десятилетий: $Z = 200R^{1,6}$. Если именно эту формулу подставить в предыдущее выражение для η (6), то получим формулу вида (5), где $\alpha = 7,5f^4 \cdot 10^{-12}$, $\beta = 1,6$ (частота в гигагерцах), которая часто встречается в литературе. Но необходимо иметь в виду, что в последнюю формулу вошло также конкретное значение $M = 0,93$, пригодное лишь для определенной частоты и температуры. В общем, необходимо располагать полными зависимостями $M(f, t)$. Отдельные случайные величины M встречаются в литературе (см., напри-

мер, [10]), но всю зависимость в литературе обнаружить не удалось. Поэтому в рамках выполнения настоящей работы расчетно-теоретическим путем получен более универсальный ее вид, пригодный для всех частот низкочастотной части микроволнового диапазона и практически важных температур в интервале $-10...+25$ °С. Эти новые результаты представлены в виде аналитической зависимости от частоты

$$M = A + B_1 f + B_2 f^2 + B_3 f^3, \quad (11)$$

где все коэффициенты в зависимости от температуры принимают значения, приведенные в табл. 6.

Таблица 6
 Параметры аппроксимации функции $M(f, t)$

$t, ^\circ\text{C}$	25	20	10	0	-10
A	0,927	0,928	0,931	0,935	0,942
B_1	$3,838 \cdot 10^{-5}$	$5,031 \cdot 10^{-5}$	$7,485 \cdot 10^{-5}$	$1,490 \cdot 10^{-5}$	$-6,584 \cdot 10^{-4}$
B_2	$-1,402 \cdot 10^{-5}$	$-1,764 \cdot 10^{-5}$	$-2,911 \cdot 10^{-5}$	$-4,929 \cdot 10^{-5}$	$-7,529 \cdot 10^{-5}$
B_3	$3,53 \cdot 10^{-8}$	$5,062 \cdot 10^{-8}$	$1,083 \cdot 10^{-7}$	$2,349 \cdot 10^{-7}$	$4,544 \cdot 10^{-7}$

Необходимые в расчетах величины $M = \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right)^2$ значения комплексной диэлектрической проницаемости воды для различных температур и частот вычислялись по обычным формулам Дебая. Для практики важно отметить, что полученный нами более универсальный вид зависимости $M(f, t)$ позволяет заменить ранее приведенную формулу (10) с параметрами $\alpha = 7,5 f^4 \cdot 10^{-12}$ и $\beta = 1,6$ (частота в гигагерцах) на формулу (12) с расширенными возможностями $\eta = 7,556 \cdot 10^{-12} f^4 M(f, t) R^{1,6}, \quad (12)$

где f – частота, ГГц; $\eta, \text{ м}^2/\text{м}^3$; $t, ^\circ\text{C}$. Хотя графики для M на рис. 12 продлены до частот порядка 100 ГГц (для пояснения хода температурной зависимости), в расчетах по формуле (8) применяется лишь левая часть рисунка.

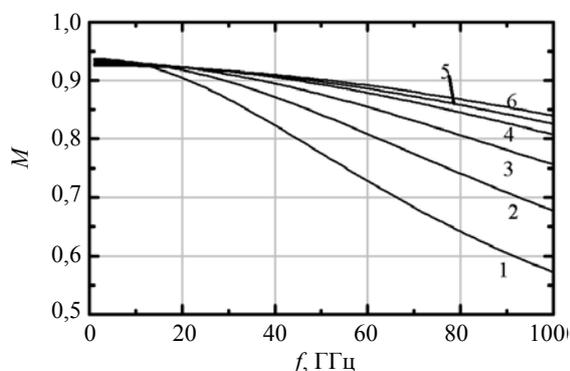


Рис. 12. Зависимость M от частоты для температур, °С: 1 – 10; 2 – 0; 3 – 10; 4 – 20; 5 – 25; 6 – 30

В таком виде последняя формула обеспечивает возможность оперативно вычислять удельную отражаемость дождей на частотах ниже 10...15 ГГц для любых указанных в табл. 6 температур. В общем же случае надо помнить, что для расчетов на всех частотах микроволнового диапазона выше рекомендовались еще три варианта:

- для дискретного набора частот (10, 35, 70 и 95 ГГц) можно применить вариант, предложенный *BRL* (уравнение (10) и коэффициенты из табл. 3);

- для непрерывного набора частот выше 10 ГГц можно применить формулы работы [26] и уравнение (10), но коэффициенты из табл. 5;

- во многих же практических ситуациях можно легко оценить удельную отражаемость дождей той или иной интенсивности по графикам рис. 8, 11.

Выводы. Таким образом, предоставлена обобщенная справочная информация для самостоятельного выполнения оценок степени воздействия дождей на рабочие параметры конкретных РЛС. С точки зрения полноты затрагиваемых в этой области радиофизических аспектов эти данные являются самодостаточными, кратко изложенными и охватывающими современные публикации экспериментальных данных и расчетно-теоретических моделей.

Также на примере использования метеостатистики о продолжительности выпадения дождей на севере Черниговской области показано, как для конкретных параметров РЛС с рабочими частотами в диапазоне 1...100 ГГц можно оценить процент времени сбоя в сопровождении той или иной цели в дождях.

Кроме того, представлен ряд новых научных результатов, а именно:

- выполнен расчет коэффициентов ослабления и удельной отражаемости радиоволн микроволнового диапазона (1...100 ГГц) для дождей различной интенсивности с использованием современных редакций функций распределения дождевых капель по размерам $W, M-P$ и $L-P$;

- при этом в расчете коэффициентов рядов Ми для сечений ослабления и рассеяния был использован новый алгоритм вычисления сферических функций старших порядков: не по рекуррентным формулам, как известно, накапливающим заметную ошибку при большом числе рекурренций, а с использованием разложений указанных функций в ряд Тейлора, что повысило точность вычислений;

- для ряда приведенных в литературе экспериментальных данных для коэффициентов ослабления и отражаемости дождей в микроволновом диапазоне даны новые аналитические аппроксимации, что облегчит их использование на практике;

– для вычисления отражаемости дождей на частотах, относящихся к рэлеевской области, выполнен расчет необходимого при этом характерного диэлектрического параметра в наиболее полном виде (для всех частот микроволнового диапазона и широкого набора температур), что отсутствовало в литературе в таком объеме, с предоставлением удобных аналитических аппроксимаций указанных зависимостей;

– при подборе оперативных инженерных методик расчета отражаемости дождей внесены исправления ошибок в одной из полезных обслуживающему персоналу РЛС литературных статей.

1. Currie N. C. Analysis of a radar rain return at frequencies of 9.375, 35, 70, and 95 GHz / N. C. Currie, F. B. Dyer, R. D. Hayes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA007254](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA007254).
2. Румянцев В. А. Оценка точности выборочных параметров функции распределения вероятностей и пространственной интерполяции годового и весеннего стока: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Румянцев; Гос. гидрол. ин-т. – Л., 1975. – 22 с.
3. Быстров П. П. Дальность действия миллиметровых радиолокационных станций в дождях / П. П. Быстров, А. В. Соколов, Р. Н. Чеканов // Радиотехника. – М., 2005. – № 1. – С. 19–23.
4. Harden B. N. Estimation of attenuation by rain on terrestrial radio-links in the U.K. at frequencies from 10 to 100 GHz / B. N. Harden, Y. R. Norbury, W. J. K. White // Microwave, Optics and Acoustics. – 1978. – 2, N 4. – P. 97–104.
5. Weibel G. E. Propagation studies in millimeter-wave link systems / G. E. Weibel, H. O. Dressel // Proc. of IEEE. – 1967. – 55, N 4. – P. 497–513.
6. Bodtmann W. F. The Measurement of 1 min Rain Rates from Weighing Raingage Recordings / W. F. Bodtmann, C. L. Ruthroff // J. Appl. Meteor. – 1976. – 15, N 11. – P. 1160–1166.
7. Huang J. Y. A study of effects induced by rain for 3mm wave band / J. Y. Huang, Y. P. Wang // Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. – 1992. – 13, N 3. – P. 341–349.
8. Recommendation ITU-R P.676-5 Attenuation by atmospheric gases [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-8-200910-I!!PDF-E.pdf – R-REC-P.676-8-200910-I!!PDF-E.
9. Сколник М. Введение в технику радиолокационных систем / М. Сколник; пер. с англ. под ред. К. Н. Трофимова. – М.: Мир, 1965. – 747 с.
10. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии / В. Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. – 343 с.
11. Wolf D. A. de On the Laws-Parsons distribution and raindrop sizes / D. A. de Wolf // Radio Sci. – 2001. – 36, N 4. – P. 639–642.
12. Olsen R. L. The aR^b relation in the calculation of rain attenuation / R. L. Olsen, D. V. Rodgers // IEEE Trans. Antennas and Prop. – 1978. – 26, N 2. – P. 318–329.
13. Sadiku M. N. O. Numerical techniques in electromagnetics / M. N. O. Sadiku. – Boca Raton: CRC Press, 2001. – 750 p.
14. Jiang H. Weibull raindrop-size distribution and its application to rain attenuation / M. Sano, M. Sekine // IEE Proc., Microwaves, Antennas and Propagation. – 1997. – 144, N 3. – P. 197–200.
15. Recommendation ITU-R P. 838-3. Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf) – R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.

16. Zhao Z.-W. Analytical specific attenuation model for rain for use in prediction methods / Z.-W. Zhao, M.-G. Zhang, Z.-S. Wu // Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. – 2001. – 22, N 1. – P. 113–120.
17. Yan Y. A new formula of specific rain attenuation for use in prediction methods / Y. Yan, Z. X. Wang // Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. – 2003. – 24, N 9. – P. 1577–1584.
18. Currie N. C. Millimeter-Wave Radar Clutter / N. C. Currie, R. D. Hayes, R. N. Trebits. – Norwood: Artech House, 1992. – 250 p.
19. Nemarich J. Backscatter and attenuation by falling snow and rain at 96, 140, and 225 GHz / J. Nemarich, R. J. Wellman, J. Lacombe // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. – 1988. – 26, N 3. – P. 319–329.
20. Crane R. K. The evaluation of models for atmospheric attenuation and backscattering characteristic estimation at 95 GHz / R. K. Crane, H. K. Burke [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA088332](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA088332).
21. Wallace H. B. Millimeter wave propagation measurements at the Ballistic research laboratory / H. B. Wallace // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. – 1988. – 26, N 3. – P. 253–258.
22. Richard V. W. Rain backscatter measurements at millimeter wavelengths / V. W. Richard, J. E. Kammerer, H. B. Wallace // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. – 1988. – 26, N 3. – P. 244–252.
23. Huang J. Rain backscattering properties and effects on the radar performance at mm wave band / J. Huang, S. Jiang, X. Lu // Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. – 2001. – 22, N 6. – P. 917–922.
24. Aydin K. Millimeter wave scattering and propagation in rain: a computation study at 94 and 140 GHz for oblate spheroidal and spherical raindrops / K. Aydin, Y.-M. Lure // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. – 1991. – 29, N 4. – P. 593–601.
25. Lhermitte R. Attenuation and Scattering of Millimeter Wavelength Radiation by Clouds and Precipitation / R. Lhermitte // J. Atmos. Oceanic Technol. – 1990. – 7, N 3. – P. 464–479.
26. Guanxi Y. The effects of rain clutter on millimeter radar performance / Y. Guanxi, H. Jiyang // Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. – 1993. – 14, N 10. – P. 2059–2068.

Yu. I. Malysenko, Yu. V. Levadnyi

ESTIMATION OF RAIN EFFECTS ON MICROWAVE RADAR PARAMETERS TAKING INTO ACCOUNT THE CUMULATIVE DISTRIBUTIONS OF RAIN RATE

It is known that short-term effects induced by heavy rain on microwave radar parameters have a few percent against the year duration. This allows radar developers to decrease additional energy potential which is intended for overcoming of rain-induced attenuation depending only on permissible radar outage time owing to the typical rains for region of radar disposal. According to this, the method for estimating probability of uninterrupted radar functioning in rains is given on examples of particular 10, 35, 70 and 95 GHz radars attracting rain rate statistical distribution for one Ukrainian province. The necessary for this methods specific rain attenuation and radar reflectivity dataset were also summarized in this work partially by means of original calculations and partially by means of analysis and generalization of published data. As results the modern computational models tested on empirical data and complemented by more precise original analytical dependencies are given to radar personnel for practical applications.

Key words: microwaves, radar and rain, the specific effective area of rain scattering.

Ю. І. Малишенко, Ю. В. Левадний

ОЦІНКА ВПЛИВУ ДОЩІВ НА ПАРАМЕТРИ
РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ
МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ
З УРАХУВАННЯМ МЕТЕОСТАТИСТИЧНИХ
ВІДОМОСТЕЙ ПРО ТРИВАЛІСТЬ
ВИПАДІННЯ ДОЩІВ

Відомо, що тривалість сильних дощів, які створюють ряд суттєвих перешкод в роботі радіолокаційних станцій (РЛС) мікрохвильового діапазону, становить лише малий відсоток по відношенню до тривалості року. Це дозволяє розробникам РЛС обмежитися помітно меншим запасом енергетичного потенціалу на подолання додаткового загасання в опадах, величина якого визначається за конкретними значеннями допустимої сумарної тривалості збоїв у роботі РЛС через

дощі, характерні для району їх розташування. На конкретних прикладах РЛС з частотами 10, 35, 70 і 95 ГГц викладено методику прогнозування величини ймовірності їхньої безперебійної роботи в дощах в одному з районів України з залученням характерних для нього метеостатистичних даних про тривалість їх випадіння. Для вирішення цього завдання також узагальнено сучасні дані за коефіцієнтами послаблення та відбиваності дощів частково шляхом оригінальних розрахунків, частково шляхом аналізу літературних даних. Таким чином персоналу штатних РЛС надано сучасні розрахункові моделі, які звірені з емпіричними даними і доповнені новими аналітичними залежностями, що підвищують точність їх застосування на практиці.

Ключові слова: мікрохвильовий діапазон радіохвиль, радіолокаційна станція і дощі, питома ефективна площа розсіяння дощів.

Рукопись поступила 10.06.11 г.