

УДК 621.3

А.Б. Котов¹, Ю.В. Левадный², Ю.И. Малышенко², Н.Н. Петрушенко³¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков²Институт радиопрофики и электроники НАН Украины, Харьков³Командование Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины, Винница

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ УЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ ДОЖДЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ РЛС МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

Работа посвящена обновлению базы данных по коэффициентам ослабления и радиолокационного рассеяния от дождей радиоволн СВЧ диапазона, которой регулярно пользуется персонал действующей в Украине сети станций радиолокационного наблюдения при оценке степени воздействия дождей на параметры РЛС. С этой целью для типовых рядов частот из участка ЭМ спектра 1-100 ГГц и интенсивностей дождей в работе выполнен более точный расчет указанных коэффициентов с предоставлением результатов в графической форме. Для конкретных используемых на местах рабочих частот РЛС и характерных для места их расположения дождей персоналу предоставлены современные расчетные модели, которые сверены с эмпирическими данными и дополнены новыми аналитическими зависимостями, повышающими точность их применения на практике.

Ключевые слова: микроволновый диапазон радиоволн, РЛС и дожди, удельная ЭПР дождей, вероятность обнаружения в дождях.

Введение

Как известно, грозовые дожди создают ряд существенных помех в работе РЛС. С одной стороны, дожди ослабляют радиосигналы РЛС на пути их следования до цели и обратно, в связи с чем для преодоления вносимого дождем затухания требуется предусматривать запас энергетического 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 ЭПР полезное отражение от малоразмерных целей – они окажутся замаскированными и могут быть потеряны. Очевидно, что для оценки уровня дождевых помех, характерных для каждого конкретного географического района расположения той или иной РЛС, обслуживающий персонал должен располагать не только параметрами самой РЛС, но и метеостатистикой по осадкам в этом районе, а также коэффициентами ослабления γ и удельной отражаемости (удельной ЭПР), т.е. отражаемости одного кубического метра дождя η (его размерность может быть выражена либо в виде $\text{м}^2/\text{м}^3$, либо м^{-1} , либо $\text{мм}^2/\text{м}^3$).

Целью данной публикации является обеспечение обслуживающего персонала РЛС современной и более точной базой данных по указанным коэффициентам. В данной работе они получены путем оригинальных теоретических расчетов для типовых сочетаний рабочих частот, температуры и интенсивностей дождей, а для других возникающих в практике случаев персоналу РЛС отобраны из лите-

ратуры и отредактированы лучшие на сегодняшний день расчетные модели, с помощью которых персонал может самостоятельно получать необходимые данные для конкретных частот обслуживаемых станций и характерных для района их расположения дождей.

1. Ослабление радиоволн микроволнового диапазона в дождях

В расчетно-теоретическом плане оба указанных коэффициента γ , η выражаются как сумма воздействий каждой из дождевых капель, располагающихся в единичном объеме дождя, на проходящее сквозь дождь ЭМ 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 [1]:

$$\gamma = 0,4343 \sum C_{\text{осл}} N(D_i) \Delta D, \text{ дБ/км}; \quad (1)$$

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

где сечения имеют размерность см^2 и суммирование ведется по всем дождевым каплям $N(D)$ в кубическом метре дождя. Следовательно, в этих расчетах необходимо располагать конкретным видом функций распределения дождевых капель по размерам для различной интенсивности дождей R , мм/час. Обычно среди имеющихся в литературе функций распределения выбирают те, которые проверены многолетней практикой и хорошо работают в мик-

роволновом диапазоне. В первую очередь это распределения Лоус-Парсонса (далее будем обозначать L-P), Маршалла-Палмера (далее будем обозначать M-P) и Вейбула (W). Первые два из них представлены в более удобных для вычисления редакциях, а именно: в редакциях деВольфа [2] для распределения L-P и Олсона для распределения M-P [3]. Основная сложность вычисления коэффициентов γ, η по вышеприведенным выражениям связана с трудностями вычисления сечений ослабления и рассеяния отдельных капель, т.к. 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 по оригинальной методике – с помощью разложения в ряд Тейлора, т.е. без использования рекуррентных формул:

$$j_n(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(n+k+1)} \left(\frac{z}{2}\right)^{2k}, \quad (3)$$

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

Функция Ханкеля выражается через функцию Бесселя:

$$h_n^{(2)}(z) = \frac{j_{-n}(z) - e^{i\pi n} j_n(z)}{-i \sin(\pi n)}. \quad (4)$$

Проверку реализованного алгоритма расчета проводили путем сопоставления с результатами расчета по аналогичной методике, приведенными в [4].

В данной НИР вычисления ослабления и рассеяния радиоволн в дожде выполнены для рабочих частот в пределах 1 – 100 ГГц в предположении сферической формы дождевых капель. Часть полученных результатов в виде графиков коэффициентов ослабления представлена на рис. 1, 2 (толстая штрихпунктирная линия) для распределения дождевых капель по размерам L-P, M-P и Вейбула W [5], а графики удельных коэффициентов отражения будут представлены в следующем разделе.

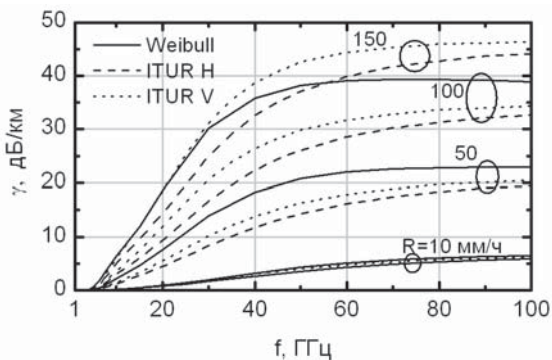


Рис. 1. Зависимость погонного затухания радиоволн в дожде от частоты

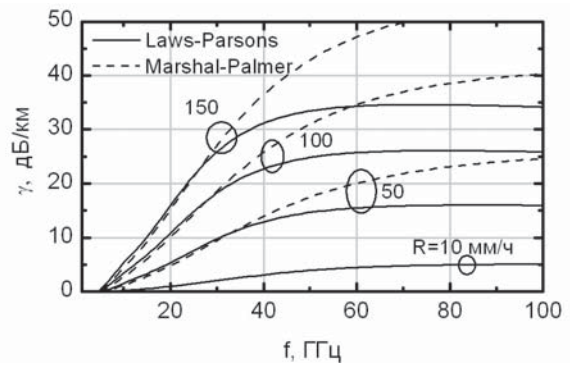


Рис. 2. Зависимость погонного затухания радиоволн в дожде от частоты

Перейдем к освещению инженерных методик получения коэффициентов ослабления радиоволн микроволнового диапазона в дождях. Прежде всего обратимся к рекомендациям международной организации International Telecommunication Union, которая регулярно публикует достоверные (сверенные с экспериментами) значения коэффициентов ослабления радиоволн в дождях в виде зависимостей $\gamma = a \cdot R^b$. Ниже представлена недавно опубликованная таблица ITU-R параметров a и b для двух поляризаций радиоволн – вертикальной V и горизонтальной H.

Таблица 1

Значения параметров a и b на различных частотах

| f, ГГц | Вертикальная поляризация (V) | | Горизонтальная поляризация (H) | |
|--------|------------------------------|-------|--------------------------------|-------|
| | a_V | b_V | a_H | b_H |
| 1 | 3,52 E-5 | 0,880 | 3,87 E-5 | 0,912 |
| 2 | 1,38 E-4 | 0,923 | 1,54 E-4 | 0,963 |
| 4 | 5,91 E-4 | 1,075 | 6,50 E-4 | 1,121 |
| 6 | 1,55 E-3 | 1,265 | 1,75 E-3 | 1,308 |
| 7 | 2,65 E-3 | 1,312 | 3,61 E-3 | 1,332 |
| 8 | 3,95 E-3 | 1,310 | 4,54 E-3 | 1,327 |
| 10 | 8,87 E-3 | 1,264 | 1,01 E-2 | 1,276 |
| 12 | 1,68 E-2 | 1,200 | 1,88 E-2 | 1,217 |
| 15 | 3,35 E-2 | 1,128 | 3,67 E-2 | 1,154 |
| 20 | 6,91 E-2 | 1,065 | 7,51 E-2 | 1,099 |
| 25 | 1,13 E-1 | 1,030 | 1,24 E-1 | 1,061 |
| 30 | 1,67 E-1 | 1,000 | 1,87 E-1 | 1,021 |
| 35 | 2,33 E-1 | 0,963 | 2,63 E-1 | 0,979 |
| 40 | 3,10 E-1 | 0,929 | 3,50 E-1 | 0,939 |
| 45 | 3,93 E-1 | 0,897 | 4,42 E-1 | 0,903 |
| 50 | 4,79 E-1 | 0,868 | 5,36 E-1 | 0,873 |
| 60 | 6,42 E-1 | 0,824 | 7,07 E-1 | 0,826 |
| 70 | 7,84 E-1 | 0,793 | 8,51 E-1 | 0,793 |
| 80 | 9,06 E-1 | 0,769 | 9,75 E-1 | 0,769 |
| 90 | 9,99 E-1 | 0,754 | 1,06 | 0,753 |
| 100 | 1,06 | 0,744 | 1,12 | 0,743 |

Для частот, не включенных в табл. 1, можно получить частотный ход ослабления радиоволн одним из следующих способов:

- графически – построив частотные графики

коэффициентов a и b от ITU-R. По этим графикам можно посчитать погонное ослабление $\gamma = a \cdot R^b$. Результаты такого расчета нанесены на рис. 1;

- аналитически – воспользовавшись формулами из статей [6] и [7] для вычисления частотного хода тех же 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.

2. Сведения об удельной радиолокационной отражаемости дождей на частотах микроволнового диапазона

Вначале мы рассмотрим представленные в литературе результаты измерений удельной радиолокационной отражаемости η (они имеются лишь для ограниченного набора частот), далее приведем некоторые результаты расчетно-теоретических вычислений η , полученные в данной работе для широкого набора частот 1 – 100 ГГц, а затем дадим отобранные в литературе и проверенные нами полезные в практической работе персонала РЛС простые расчетные формулы. 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 Lab.-далее будем обозначать BRL и US Army Harry Diamond Lab.), а также работы гражданского Технологического института штата Джорджия (Georgia technology– будем обозначать GT). Наиболее полно результаты измерений опубликовала именно последняя организация: имеется открытый и выставленный в Интернет отчет [8] и опубликована книга-справочник [9]. По результатам измерений второй вышеназванной лаборатории найдена всего лишь одна публикация [10] 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 [11]. Имеются также журнальные публикации результатов измерений этой лаборатории в двух статьях, написанных сотрудниками BRL [12, 13]. Краткий перечень параметров их измерительных комплексов содержится в [8, 12]. Запись отраженных сигналов от дождя и от калибровочного уголкового отражателя в лаб. BRL производилась кинокамерой с экрана индикатора типа А, 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 [11]), а в данной работе они не воспроизведены, поскольку такие графики актуальны лишь тем, кто непосредственно измеряет γ_d путем сопоставления посланных и принятых в дождях импульсов. Вторая разновидность – обычные усредненные удельные отражаемости. Последние представлены на рис. 3 [13]. В этой же статье для каждой из четырех представленных на этом рисунке графических зависимостей приводится также аналитическая аппроксимация следующего вида с коэффициентами, приведенными в табл. 2:

$$\eta = \alpha R^\beta . \quad (5)$$

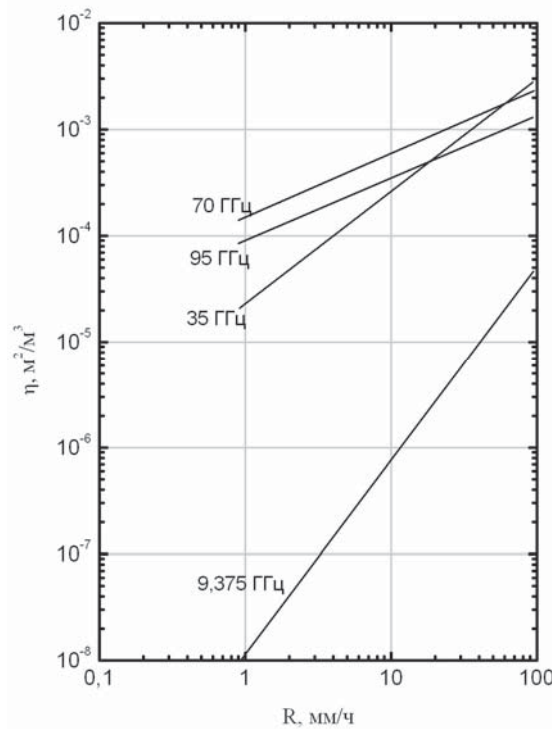


Рис. 3. Усредненные η , полученные в BRL для четырех частот микроволнового диапазона

Таблица 2
Значения параметров α и β на различных частотах

| f, ГГц | 9,375 | 35 | 70 | 95 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| α | 1,04E(-8) | 8,49E(-5) | 5,55E(-4) | 3,42E(-4) |
| β | 1,52 | 1,05 | 0,59 | 0,57 |

Приведенная выше аналитическая формула (5) с коэффициентами, вошедшими в табл. 2, весьма удобна в практических вычислениях, в связи с чем значения этих коэффициентов включены также в сводный график рис. 4 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 [11] (рис. 10 – 13), и в книге [9] (рис. 3.8 – 3.10), за исключением рис. 5, взятого из книги [9], на котором производится сравнение с результатами BRL. Как видно из этого рисунка, и особенно наглядно из рис. 4 – эмпирические данные GT в несколько раз ниже. Как показала история последовавших за этим других измерений и теоретических расчетов, предпочтение в этом конфликте должно быть отдано результатам измерений лаб. BRL, а данные измерений GT должны быть отброшены как содержащие систематическую ошибку в обработке результатов измерений.

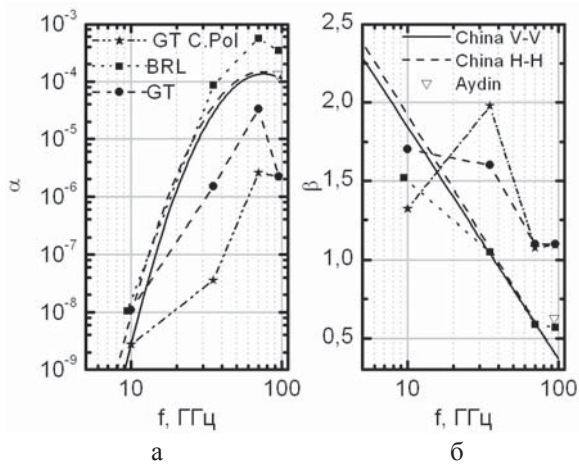


Рис. 4. Сводный график частотных зависимостей коэффициентов α и β

Все выше приведенные эмпирические данные относились к линейным поляризациям излучения РЛС, а теперь взглянем на результаты измерений на круговой поляризации, как известно, обеспечивающей заметный выигрыш в снижении мешающих отражений от сферических капель в среднем порядка 15 дБ – этот вывод взят из статьи сотрудников BRL [13]. С учетом того, что форма реальных капель отличается от сферической, указанная цифра не остается постоянной по всему микроволновому диапазону: существуют участки длин волн, где выигрыш еще больше (где 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, где располагается область резонансов Ми на наиболее крупных – а значит заведомо асферичных дождевых каплях). Лаб. GT в своих измерениях тоже подтвердила наличие упомянутого выигрыша от использования круговой поляризации – именно из книги их сотрудников [9] взят следующий рис. 6 с графиками величин удельной отражаемости дождей на круговой поляризации. Для удобства пользования этими графика-

ми нами подобраны аппроксимирующие зависимости типа (5) и для круговой поляризации, коэффициенты которых приведены в табл. 3.

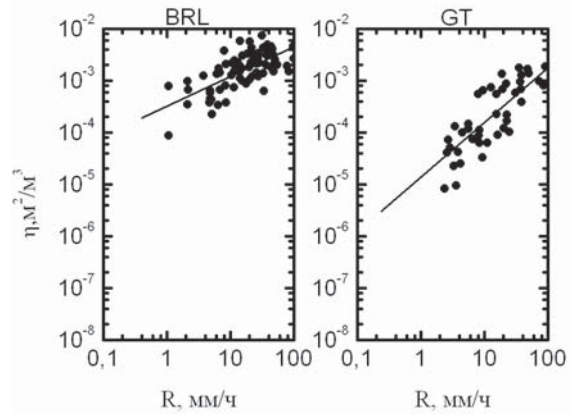


Рис. 5. Сопоставление пиковых η , полученных в BRL и GT на частоте 95 ГГц

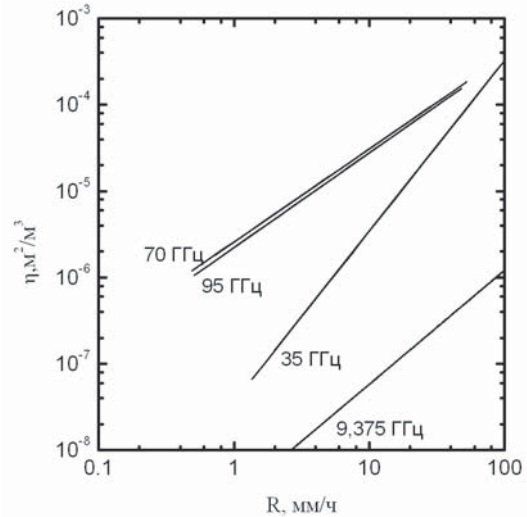


Рис. 6. Усредненные η , полученные в GT для правой круговой поляризации

Таблица 3

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. 4), на котором особенно наглядно виден выигрыш 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 Lab. Но из их измерений мы смогли найти лишь одну цифру в статье сотрудников этой лаборатории

[10] для отражаемости дождей на вертикальной поляризации на частоте 95 ГГц: $\eta = -35$ дБ при интенсивностях дождей 4 – 6 мм/час, что означает $\eta = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{м}^3$. Эта цифра также говорит в пользу правильности данных лаб. BRL.

Далее перейдем к освещению результатов теоретических расчетов удельной отражаемости дождей. Выше упоминалось, что в данной работе выполнены вычисления удельной отражаемости дождей (см. рис. 7, 8) для частот 1 – 100 ГГц, интенсивностей 0,1 – 100 мм/час с использованием модели сферических капель и наиболее популярных функций распределения дождевых капель по размерам M-P, L-P и W, которые хорошо согласуются с данными BRL.

В литературе имеются многочисленные примеры и других расчетных работ. В частности, в книге [1] на стр. 59 в табл. 2.2, а также в статьях [14] на рис. 7, 8 для 35 и 95 ГГц и в [15] для 94 ГГц (график отражаемостей из последней нанесен на рис. 7) – во всех случаях кривые практически совпадают с результатами наших расчетов и близки к результатам измерений лаб. BRL. Такое же совпадение наблюдается и с коэффициентами α , β из [15] и из китайских работ [16, 17], которые нанесены на сводный график рис. 4, а, б треугольным значком и пунктирной линией соответственно. Правда, на частотах сантиметрового диапазона (частоты менее 10 ГГц) китайские формулы для $\alpha(f)$ перестают работать (в то же время формулы для $\beta(f)$ сохраняют здесь свою работоспособность). В последней работе также много опечаток и неточностей в таблице коэффициентов α , β . В данной работе они исправлены и помещены в табл. 4.

Таблица 4

Скорректированная таблица коэффициентов α , β

| f, ГГц | α^{V-V} | β^{V-V} | α^{H-H} | β^{H-H} |
|--------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| 3 | 1,7027E-10 | 2,61009 | 2,47742E-9 | 2,72692 |
| 5 | 4,96992E-7 | 2,3035 | 3,55043E-6 | 2,3831 |
| 7,5 | 1,05539E-4 | 2,0444 | 4,64686E-4 | 2,1102 |
| 10 | 2,80049E-3 | 1,8605 | 9,13363E-3 | 1,9165 |
| 20 | 1,2676 | 1,4175 | 2,3251 | 1,4500 |
| 30 | 14,0881 | 1,1584 | 20,3262 | 1,1771 |
| 35 | 20,0643 | 1,0599 | 37,6580 | 1,0733 |
| 70 | 133,2433 | 0,6169 | 146,5728 | 0,6067 |
| 95 | 118,8953 | 0,4218 | 128,0239 | 0,4012 |
| 100 | 111,1740 | 0,3889 | 119,7553 | 0,3667 |

Данные табл. 4 позволяют оперативно получать величины отражаемости дождей на частотах микроволнового диапазона.

Еще проще получать оперативные данные по отражаемости дождей в его низкочастотной части ($f \leq 10$ ГГц), где не требуется ни полных формул Ми, ни данных последней таблицы, ибо там исполь-

зуемые в РЛС длины волн значительно превышают размеры дождевых капель, что позволяет применить для этих целей упрощенные (релеевские) формулы типа:

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

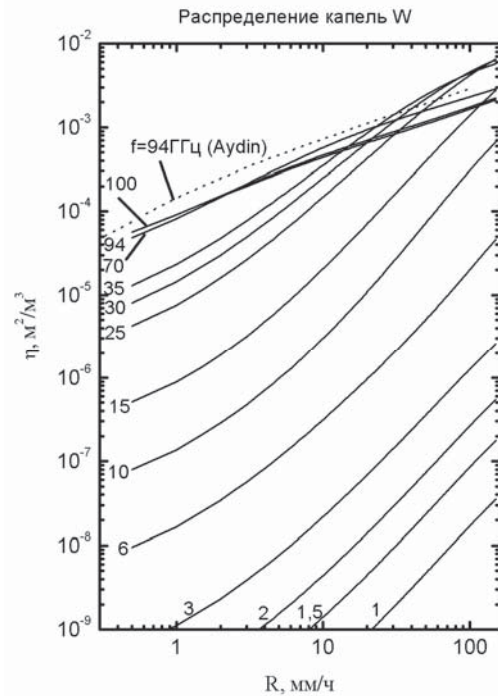


Рис. 7. Результаты теоретических расчетов удельной отражаемости дождей для распределения капель по размерам Weibull

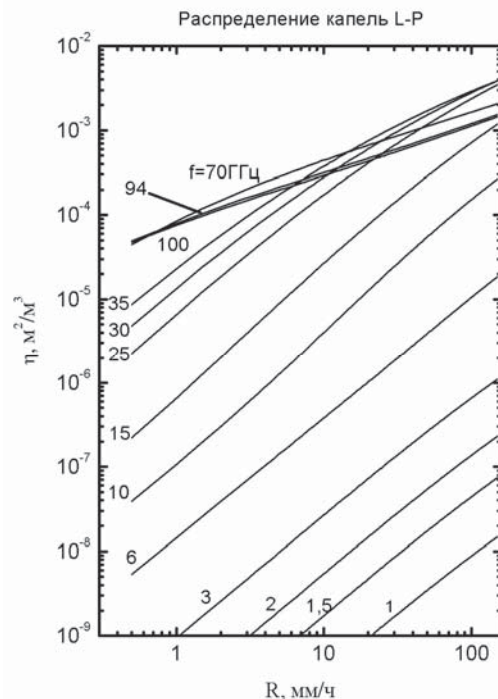


Рис. 8. Результаты теоретических расчетов удельной отражаемости дождей для распределения капель по размерам Laws-Parsons

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 М-Р, 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 ГГц), 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 (например, [1]), но всю зависимость в литературе обнаружить не удалось. Поэтому в рамках выполнения данной работы расчетно-теоретическим путем получен более универсальный ее вид, пригодный для всех частот низкочастотной части микроволнового диапазона и практически важных температур в интервале $-10 \dots +25^\circ$. Эти новые результаты представлены в виде аналитической зависимости от частоты:

$$M = A + B_1 f + B_2 f^2 + B_3 f^3, \quad (7)$$

где все коэффициенты в зависимости от температуры принимают значения, приведенные в табл. 5.

Таблица 5

Значения коэффициентов

| | 25°С | 20°С | 10°С | 0°С | -10°С |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| A | 0,92666 | 0,92823 | 0,9313 | 0,93483 | 0,94183 |
| B ₁ | 3,8382 (-5) | 5,031 (-5) | 7,48549 (-5) | 1,49034 (-5) | -6,58391 (-4) |
| B ₂ | -1,4026 (-5) | -1,7637 (-5) | -2,9106 (-5) | -4,92877 (-5) | -7,52845 (-5) |
| B ₃ | 3,53042 (-8) | 5,06184 (-8) | 1,08338 (-7) | 2,34927 (-7) | 4,54384 (-7) |

Примечание: цифры в скобках указывают, на сколько порядков надо уменьшать табличные данные.

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 в данной работе более универсальный вид зависимости $M(f, t)$ позволяет заменить ранее приведенную формулу (5) с параметрами $\alpha = 7,5f^4 \cdot 10^{-12}$ и $\beta = 1,6$ (частота в ГГц) на форму-

лу (8) с расширенными возможностями.

$$\eta = 7,556 \cdot 10^{-12} f^4 M(f, t) R^{1,6}, \quad (8)$$

где f – частота в ГГц; η – в m^2/m^3 ; t – в °С. Хотя графики для M на рис. 9 продлены до частот порядка 100 ГГц (для пояснения хода температурной зависимости), в расчетах по формуле (8) применяется лишь левая часть рисунка. В таком виде последняя формула обеспечивает возможность оперативно вычислять отражаемость дождей на частотах ниже 10 – 15 ГГц для любых указанных в табл. 5 температур. В общем же случае надо помнить, что для расчетов на всех частотах микроволнового диапазона выше рекомендовались еще два варианта:

- для дискретного набора частот (10, 35, 70 и 95 ГГц) можно применить вариант, предложенный лаб. BRL (уравнение (5) и коэффициенты из табл. 2);
- для непрерывного набора частот выше 10 ГГц можно применить формулы работы [17] и уравнение (5), но коэффициенты из табл. 4;
- во многих же практических ситуациях можно легко оценить удельную отражаемость дождей той или иной интенсивности по графикам рис. 3, 7, 8.

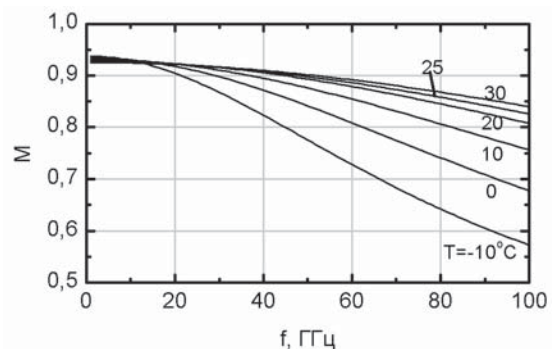


Рис. 9. Зависимость M от частоты

3. Примеры оценок влияния дождей на дальность действия РЛС и вероятность правильного обнаружения

Как отмечалось, влияние дождей наиболее существенно сказывается на таких важнейших параметрах РЛС как дальность действия и вероятность обнаружения цели, что особенно проявляется при выборе рабочих частот в коротковолновой части сантиметрового и в миллиметровом диапазонах. Рассмотрим ряд примеров для РЛС трехсантиметрового диапазона волн.

Как известно, уравнение радиолокации в свободном пространстве имеет вид [18]:

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{\text{ясн}} = \frac{P_{\text{ясн}}}{N_{\text{пр}}} = \frac{K_1 \sigma_{\text{ц}} / \Gamma_{\text{ясн}}^4}{N_{\text{пр}}}, \quad (9)$$

где $K_1 = P_t G^2 \lambda^2 / (4\pi)^3$, G – коэффициент усиления приемопередающей антенны; $N_{\text{пр}} = k T_N B$ – тепловые шумы приемника, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К –

постоянная Больцмана; T_N – шумовая температура приемника; B – полоса пропускания приемника; σ_{ψ} – ЭПР цели; $r_{\text{ясн}}$ – дальность до цели в ясную погоду.

Как видно из уравнения (9) при фиксированных параметрах РЛС и заданной ЭПР цели ее дальность действия (и как далее увидим, вероятность обнаружения) зависят от соотношения сигнал/шум. Но это отношение мгновенно ухудшается, как только воздушная цель оказывается внутри зоны дождя, ибо шумовые сигналы от окружающих ее капель дождя складываются в приемнике с его собственными шумами. Следовательно, прежде чем оценивать изменение дальности и вероятности обнаружения в дождях, необходимо оценить изменение отношения сигнал/шум. В данной работе это сделано (рис. 10) следующим образом. Как известно [18], уравнение радиолокации в дожде имеет вид:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_d = \frac{P_d}{N_{\text{пр}} + N_d} = \frac{K_1 \sigma_{\psi} \psi / r_d^4}{N_{\text{пр}} + N_d}, \quad (10)$$

где $\psi = e^{-2\gamma r_d}$, $\gamma = 0,4343 \sum C_{\text{осл}} N(D_i) \Delta D$ (см. разд. 1); r_d – дальность до цели во время дождя;

$$N_d = \frac{K_1 \pi}{r_d^4} \frac{\psi r_d^2 \theta_a \theta_{\text{ум}} c \tau \eta}{8}, \quad (11)$$

где $\eta = 10^{-4} \sum C_{\text{рлс}} N(D_i) \Delta D$ – удельная ЭПР дождя; c – скорость света; τ – длительность зондирующего импульса РЛС; θ_a и $\theta_{\text{ум}}$ – ширина диаграммы направленности антенны по азимуту и углу места соответственно. Входящие в эти уравнения величины γ , η были вычислены в данной работе (см. разделы 1, 2) по формулам Ми с использованием распределения капель по размерам L - P и W (для η см. рис. 3, 7, 8 и рис. 6 для линейной и круговой поляризаций соответственно, и см. рис. 1 для γ). Это позволило построить на рис. 10 графики изменения отношения сигнал-шум от интенсивности дождя с помощью формулы (10) для параметров РЛС из [12] и для цели с ЭПР 10 м^2 , находящейся на расстоянии 5 км.

Для того чтобы оценить изменение дальности действия РЛС можно использовать подход, предложенный Сколником [18], а именно – приравнять отношения сигнал/шум приемника РЛС в ясную погоду (9) и при наличии дождя (10). Проводя несложные математические преобразования, получаем следующее уравнение:

$$r_{\text{ясн}}^4 = \frac{1 + C_2 r_d^{-2} \psi}{\psi r_d^{-4}}, \quad (12)$$

где $C_2 = \pi K_1 \eta h \theta_a \theta_{\text{ум}} / (8 N_r)$.

Уравнение (12) нельзя решить непосредственно относительно r_d , однако можно задаваться величи-

нами r_d (дальность действия в дожде) и по ним вычислять соответствующие значения $r_{\text{ясн}}$. Таким образом, были построены графики зависимости дальности действия РЛС от интенсивности дождя, которые приведены на рис. 11, используя вышеупомянутые параметры радара.

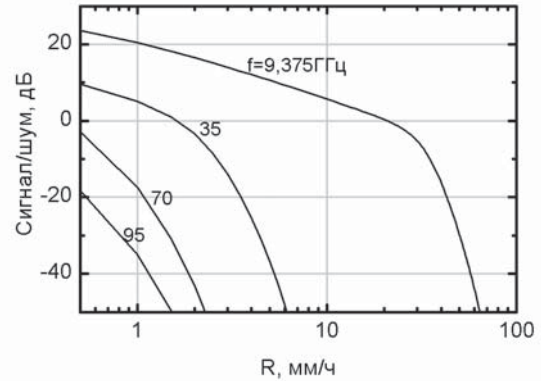


Рис. 10. Зависимость отношения сигнал/шум от интенсивности дождя при облучении цели с ЭПР 10 м^2 на расстоянии 5 км

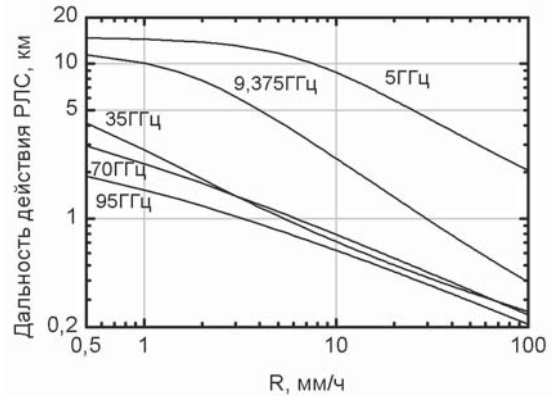


Рис. 11. Уменьшение дальности действия РЛС в зависимости от интенсивности дождя

Видно, что дальность действия радиолокатора трехсантиметрового диапазона с параметрами из [12] для целей с ЭПР 10 м^2 и при отношении сигнал-шум для одиночного импульса 12 дБ, снижается с десяти км до единиц км в дожде с интенсивностью более 10 мм/ч. Для РЛС с рабочими частотами в нижней части микроволнового диапазона (1 – 8 ГГц) уменьшение дальности действия РЛС будет менее существенным.

Перейдем к оценке вероятности правильного обнаружения цели в дожде. Выше отмечалось, что ее изменение в этом случае происходит вследствие ухудшения отношения сигнал/шум из-за появления дополнительных мешающих отражений от дождевых капель.

Вопросу оценки вероятности правильного обнаружения посвящено большое количество работ [19 – 21], в которых рассматриваются, взятые из реальной практики различные модели целей, с опре-

деленной долей достоверности, описывающей реальные объекты. Однако для того, чтобы проследить влияние осадков на вероятность правильного обнаружения достаточно рассмотреть пример с наиболее простой моделью, не флуктуирующей цели, которая должна быть обнаружена одиночным импульсом РЛС (т.е. без накопления импульсов). В литературе такую модель называют – моделью Маркума [19]. В данном случае вероятность правильного обнаружения определяется следующим выражением [20]:

$$P_{\text{ПО}} = \int_{V_T} \frac{x}{A_{\text{ш}}^2} I_0 \left(\frac{x A}{A_{\text{ш}}^2} \right) \exp \left(-\frac{x^2 + A^2}{2 A_{\text{ш}}^2} \right) dx, \quad (13)$$

где $A_{\text{ш}}^2$ – суммарная мощность шумов приемника и вносимых дождем.

Предположим, что сигнал, принятый РЛС, имеет синусоидальную форму с амплитудой A , тогда его мощность равна $\frac{A^2}{2}$. Таким образом, $\frac{S}{N} = \frac{A^2}{2 A_{\text{ш}}^2}$

и $\frac{V_T^2}{2 A_{\text{ш}}^2} = \ln \left(\frac{1}{P_{\text{ЛТ}}} \right)$, где V_T – установленный в РЛС

порог запираания приемника, с помощью которого выбирается вероятность ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}}$. Следовательно, уравнение (30) может быть переписано в следующем виде [20]:

$$P_{\text{ЛТ}} = \int_{\sqrt{2 A_{\text{ш}}^2 \ln(1/P_{\text{ЛТ}})}}^{\infty} \frac{x}{A_{\text{ш}}^2} I_0 \left(\frac{x A}{A_{\text{ш}}^2} \right) \exp \left(-\frac{x^2 + A^2}{2 A_{\text{ш}}^2} \right) dx = Q \left[\sqrt{\frac{A^2}{A_{\text{ш}}^2}}, \sqrt{2 \ln(1/P_{\text{ЛТ}})} \right], \quad (14)$$

где $Q[m, n] = \int_n^{\infty} \zeta I_0(m \zeta) e^{-\zeta^2} d\zeta$ – Q-функция

Маркума, пропорциональная вероятности обнаружения.

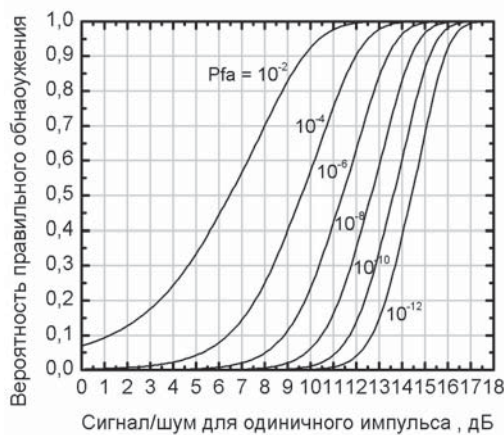


Рис. 12. Зависимость вероятности правильного обнаружения целей, обеспечивающих указанные значения вероятности ложной тревоги, от отношения сигнал/шум

Таким образом, задаваясь вероятностью ложной тревоги и изменяя соотношение сигнал-шум, были построены графики зависимости вероятности правильного обнаружения, которые приведены на рис. 12. Комбинируя рис. 10 и 12 можно сказать, что РЛС трехсантиметрового диапазона с параметрами из [12] сможет обнаружить одиночным импульсом цель с ЭПР 10 м^2 на расстоянии 5 км с вероятностью 0,9 при допустимой вероятности ложной тревоги 10^{-4} лишь в слабых дождях (с интенсивностью менее 5 мм/ч). При накоплении десятков (сотен) импульсов ситуация значительно улучшится [19], но этот случай мы здесь не рассматриваем.

Выводы

Одной из важнейших целей данной статьи является предоставление обслуживающему персоналу штатных РЛС Украины современной справочно-информационной базы данных, открывающей им возможность самостоятельного выполнения оценок степени воздействия дождей на рабочие параметры тех конкретных РЛС, которые они обслуживают. С точки зрения полноты охвата затрагиваемых в этой области радиофизических аспектов эта база является самодостаточной и в то же время краткой и современной, т.к. охватывает свежие публикации экспериментальных данных и расчетно-теоретических моделей.

В то же время, в данном отчете содержится 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 Вейбула, Маршала-Палмера и Лоуса-Парсонса;
- 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 релейской 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

літературе в такому об'ємі, с предоставлением удобных аналитических аппроксимаций указанных зависимостей;

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

Список литературы

1. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 343 с.
2. De Wolf D.A. On the Laws-Parsons distribution and raindrop sizes / D.A. de Wolf // *Radio Sci.* – 2006. – N 4, V 36. – P. 639-642.
3. 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. – N 2, V 26. – P. 318-329.
4. Sadiku M.N.O. Numerical techniques in electromagnetics / M.N.O. Sadiku. – CRC Press, 2001. – 750 p.
5. Jiang H. Weibull raindrop-size distribution and its application to rain attenuation / H. Jiang, M. Sano, M. Sekine // *IEE Proc., part Microwave Antennas and Propagation* – 1997. – P. 197-200.
6. Zhao Z.-W. Analytical specific attenuation model for rain for use in prediction methods / Z.-W. Zhao, M.-G. Zhang, Z.-S. Wu // *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves* – 2001. – N 1, V 22. – P. 113-120.
7. Yan Y. A new formula of specific rain attenuation for use in prediction methods / Y. Yan, Z.X. Wang // *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves* – 2003. – N 9, V 24. – P. 1577-1584.
8. 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. – Atlanta, Georgia, Georgia Institute of Technology. – 1975. – Technical Report 2 EES/GIT Project A-1485.
9. Currie N.C. Millimeter-Wave Radar Clutter / N.C. Currie, R.D. Hayes, R.N. Trebits. – Artech House, 1992. – 250 p.
10. Nemanich J. Backscatter and attenuation by falling snow and rain at 96, 140, and 225 GHz / J. Nemanich, R.J. Wellman, J. Lacombe // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* – 1988. – N 3, V 26. – P. 319-329.
11. Crane R.K. The evaluation of models for atmospheric attenuation and backscattering characteristic estimation at 95 GHz / R.K. Crane, H.K. Burke – Massachusetts, Environmental Research & Technology Inc. – 1978. – ERT Document No. P-3606.
12. Wallace H.B. Millimeter wave propagation measurements at the Ballistic research laboratory / H.B. Wallace // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* – 1988. – N 3, V 26. – P. 253-258.
13. 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. – N 3, V 26. – P. 244-252.
14. Lhermitte R. Attenuation and Scattering of Millimeter Wavelength Radiation by Clouds and Precipitation / R. Lhermitte, J. Atmos // *Oceanic Technol.* – 1990. – V 7. – P. 464-479.
15. 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. – N 4, V 29. – P. 593-601.
16. Guanxi Y. The effects of rain clutter on millimeter radar performance / Y. Guanxi, H. Jiyang // *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves* – 1993. – N 10, V 14. – P. 2059-2068.
17. Huang J. Rain backscattering properties and effects on the radar performance at mm wave band / J. Huang, S. Jiang, X. Lu // *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves* – 2001. – N 6, V. 22. – P. 917-922.
18. Скольник М. Введение в технику радиолокационных систем / М. Скольник – М.: МИР, 1965. – 747 с.
19. Nathanson F.E. Radar design principles. Signal processing and environment / F.E. Nathanson, J.P. Reilly, M.N. Cohen – SciTech publishing, 1999. – 720 p.
20. Mahafza B.R. Radar system analysis and design using MATLAB / B.R. Mahafza – Chapman & Hall/CRC, 2000. – 532 p.
21. Kang E.W. Radar system analysis, design and simulation / E.W. Kang – Artech House, 2008. – 364 p.

Поступила в редколлегию 1.11.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ДОЩІВ НА ПАРАМЕТРИ РЛС МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ

О.Б. Котов, Ю.В. Левадний, Ю.І. Малишенко, М.М. Петрушенко

Робота присвячена поновленню бази даних по коефіцієнтам поглинання та радіолокаційного розсіювання від дощів радіохвиль НВЧ діапазону, якій регулярно користується персонал діючої в Україні мережі станцій радіолокаційного спостереження при оцінці ступеня дії дощів на параметри РЛС. З цією метою для типових рядів частот в межах ЕМ спектру 1-100 ГГц та інтенсивностей дощів в роботі виконано більш точний розрахунок вказаних коефіцієнтів з наданням результатів в графічній формі. Для конкретних робочих частот РЛС, що використовуються на місцях, і характерних для місця їх розташування дощів персоналу надані крапці розрахункові моделі, що перевірені на співпадіння з експериментальними даними та доповнені новими аналітичними залежностями, що підвищують точність їх використання на практиці.

Ключові слова: мікрохвильовий діапазон радіохвиль, РЛС і дощ, удільна ЕПР дощів, вірогідність виявлення у дощах.

TO QUESTION ABOUT IMPROVING PRECISION FOR ACCOUNTING OF RAIN INFLUENCE ON MICROWAVE RADAR

A.B. Kotov, Yu.V. Levadnyi, Yu.I. Malysenko, N.N. Petrusenko

This work is devoted to renovate of extinction and radar scattering coefficients database which is regularly used by personnel of working in Ukraine radar surveillance network for estimations of rain effects on radar parameters. With this aim more precision calculations of these coefficients there were made for standard sets of frequency in 1-100 GHz range and of rain intensity in 1-150 mm/hour range and obtained results is displayed in graphical form. For local rain statistics and local radar working frequencies the tested on empirical data modern calculation models is given to radar personnel. Simultaneously new analytical expressions were inserted in mentioned models to increase their precision in everyday using.

Keywords: microwave, radar and rain, specific scattering cross-section of rain, probability of detection in rain.