

**В. Л. Костина, Ю. И. Малышенко, А. Н. Роечко**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

*12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: [rk@ire.kharkov.ua](mailto:rk@ire.kharkov.ua)

## ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЙНИЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И ТЕРАГЕРЦЕВЫХ ВОЛН В ДОЖДЯХ

При создании радиотехнических систем миллиметрового (мм) и терагерцевого (ТГц) диапазонов необходимы подробные сведения об угловых характеристиках рассеяния излучения осадками. Измерять индикатрисы рассеяния достаточно сложно, проще получить их расчетным путем. Для микроволнового диапазона удается воспользоваться готовыми таблицами индикатрис рассеяния, но для ТГц диапазона волн такие данные отсутствуют. В работе представлены результаты расчета индикатрис рассеяния волн мм и ТГц диапазонов дождевыми каплями. Расчеты выполнены по точным формулам для всего интервала размеров капель, встречающихся в осадках. На основании полученных результатов создана база данных, которая представляет обширные возможности для вычисления индикатрис рассеяния при разнообразных сочетаниях начальных параметров: длины волны излучения, функции распределения дождевых капель по размерам и значения интенсивности дождя. Полученные результаты могут быть использованы при оценке пространственного распределения мощности излучения мм и ТГц диапазонов. Ил. 3. Библиогр.: 20 назв.

**Ключевые слова:** индикатриса рассеяния, дистанционное зондирование, функция распределения дождевых капель по размерам, терагерцевый диапазон электромагнитных волн.

При прогнозировании работы радиотехнических систем микроволнового диапазона, например систем связи и передачи данных, в районах с высокой вероятностью выпадения осадков необходимы надежные данные о коэффициентах ослабления сигнала дождем, т. е. о коэффициентах передачи в направлении строго вперед ( $\theta = 0^\circ$ ). Для радиолокационных систем необходимо располагать также коэффициентами обратного рассеяния ( $\theta = 180^\circ$ ) дождевыми каплями, находящимися в пределах «освещенного» объема пространства, поскольку они оказывают маскирующее действие при сопровождении цели. Для решения задач, требующих сведения об амплитудах рассеяния излучения и в других возможных направлениях, кроме двух упомянутых, необходимы более подробные угловые характеристики рассеяния. В литературе их часто называют индикатрисами рассеяния, а иногда, при использовании параметров Стокса и матричного представления, именуют фазовыми функциями рассеяния [1]. В частности, для дистанционного зондирования [2, 3] такие угловые характеристики необходимы при решении теоретических задач о переносе микроволнового излучения в разнообразных рассеивающих средах, в том числе в дождях [4]. Одним из примеров практического применения сведений об индикатрисах рассеяния является использование их при оценке влияния дождей на характеристики сопровождения целей двухпозиционными радиолокационными станциями (РЛС) (в этом случае их называют бистатистическими коэффициентами рассеяния), а также при оценке дополнительных помех в линиях связи. Во многих странах с развитой национальной сетью микроволновых линий передачи данных отмечено появление взаимных помех и даже просачивание информации из одного канала связи в другой при выпадении дождя в зоне общего объема пересечения. Это удалось легко

объяснить наличием бокового рассеяния излучения отдельными каплями дождя [5]. В этой работе при оценке уровня таких помех для двух частот микроволнового диапазона как раз и понадобились индикатрисы рассеяния дождевыми каплями под углами пересечения трасс распространения, и эти оценки совпали с реально наблюдаемыми величинами. По рекомендации авторов работы [5] было изменено взаимное расположение некоторых антенн. Подобным образом сигналы на линиях межспутниковой связи могут интерферировать с сигналами приземных линий связи при наличии общего используемого объема пространства в средних высотах тропосферы.

Эти примеры показывают значимость индикатрис рассеяния для теории и практики, и, соответственно, возникает вопрос о методах их получения. Частично индикатрисы рассеяния можно получить путем измерений относительных амплитуд рассеяния под отдельными конкретными углами. Так, например, авторы работы [6] измерили амплитуды рассеяния в дождях на волне 8 мм под углом  $\theta = 90^\circ$  к направлению распространения; есть и другие подобные примеры [7]. Однако измерить индикатрисы рассеяния под всеми возможными углами достаточно сложно, значительно проще получить их расчетным путем.

В микроволновом диапазоне волн обычно не возникает проблем с выполнением расчетов угловых характеристик рассеяния дождями. Более того, во многих случаях удается воспользоваться имеющимися в литературе готовыми таблицами индикатрис для рабочих частот электромагнитного спектра вплоть до 100 ГГц [8–11]. Однако для более высоких частот (терагерцевого (ТГц) диапазона волн) такие данные отсутствуют. Затем они приведены лишь для частот оптического и ближнего инфракрасного диапазонов (например, [12]). Наличие пробела в ТГц диапа-

зоне обусловлено рядом причин. С одной стороны, в них не было надобности, поскольку до недавнего времени этот диапазон не использовался в практических приложениях из-за отсутствия необходимых технических средств. Однако последние 20 лет наблюдается активное освоение этой области частот [13]. Кроме того, отсутствие упомянутых табличных данных для указанного диапазона волн объясняется также тем, что вычисление индикатрис рассеяния каплями воды в этом диапазоне сопровождается наибольшими трудностями не только по сравнению с микроволновым диапазоном, но и с оптическим. Так, в микроволновом диапазоне длины волн излучения значительно превышают размеры дождевых капель, и достаточно воспользоваться простыми (приближенными) формулами, содержащими лишь первые несколько слагаемых рядов Ми или даже одно слагаемое (рэлеевское приближение). В оптике наблюдается обратное соотношение между размерами капель и длиной волны, что также позволяет воспользоваться простыми (асимптотическими) формулами. А в промежуточном, ТГц диапазоне, длины волн излучения сравнимы с размерами дождевых капель, начиная со средних и до самых мелких. В связи с этим в этой области частот наблюдаются известные резонансы Ми и, соответственно, излучение волн этого диапазона подвержено наибольшему воздействию дождей [14]. Это приводит к тому, что именно здесь в бесконечных рядах Ми приходится учитывать наибольшее число слагаемых [9].

**1. Методика вычисления индикатрис рассеяния.** Формулы для вычисления индикатрис рассеяния можно найти, в частности, в работах [1, 9–11, 15]. Все они базируются на решениях Ми векторного волнового уравнения в задаче о рассеянии электромагнитного излучения на частицах сферической формы.

Нормированная индикатриса рассеяния определяется следующим выражением [1]:

$$\alpha(\theta, \varphi) = \frac{F(\theta, \varphi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}, \quad (1)$$

где  $F(\theta, \varphi)$  – угловое распределение интенсивности излучения, рассеянного частицей радиуса  $a$  с комплексной диэлектрической проницаемостью  $m = \sqrt{\varepsilon} = n_1 - jn_2$  и волновым параметром  $x = ka$ ,

$$\alpha_{\text{дождя}} = \frac{\sum_{d_{\min}}^{d_{\max}} (i_1(\theta) \sin^2(\varphi) + i_2(\theta) \cos^2(\varphi)) N(d, R) \Delta d}{\sum_{d_{\min}}^{d_{\max}} k^2 C_{\text{расс}} N(d, R) \Delta d}, \quad (5)$$

где  $R$  – интенсивность дождя;  $d$  – диаметр капли.

$k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны;  $\theta$  – угол рассеяния по отношению к направлению распространения волны. Согласно теории Ми  $F(\theta, \varphi)$  можно представить в виде [15]

$$F(\theta, \varphi) = i_1(\theta) \sin^2(\varphi) + i_2(\theta) \cos^2(\varphi). \quad (2)$$

Здесь

$$i_1(\theta) = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \right|^2, \quad (3)$$

$$i_2(\theta) = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \pi_n + a_n \tau_n) \right|^2,$$

где  $a_n$  и  $b_n$  – коэффициенты разложения рассеянных полей по сферическим гармоникам в задаче Ми;  $\pi_n$  и  $\tau_n$  – угловые коэффициенты, являющиеся функциями только от  $\cos(\theta)$ . Выражения для  $a_n$ ,  $b_n$ ,  $\pi_n$  и  $\tau_n$  подробно раскрыты в работе [9].

Формулу (1) можно представить в виде

$$\alpha(\theta, \varphi) = \frac{i_1(\theta)}{k^2 C_{\text{расс}}} \sin^2(\varphi) + \frac{i_2(\theta)}{k^2 C_{\text{расс}}} \cos^2(\varphi), \quad (4)$$

где  $C_{\text{расс}}(m, x) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2)$  – сечение рассеяния.

В отличие от индикатрис рассеяния отдельных капель, для вычисления индикатрис рассеяния полидисперсной среды (дождя) выражение (4) необходимо дополнить функцией распределения дождевых капель по размерам  $N(d)\Delta d$ . Для микроволнового диапазона это может быть одно из известных распределений, например Маршалла-Пальмера, Лауса-Парсонса, Гамма или логнормальное распределение. В ТГц диапазоне, где требуется учет мелких капель, по нашему мнению, лишь в первом приближении допустимо использование распределений Беста и Маршалла-Пальмера, но предпочтительнее – распределение, предложенное авторами работы [16]. Таким образом, учитывая конкретное распределение дождевых капель по размерам  $N(d)$ , для вычисления индикатрисы рассеяния полидисперсной среды (дождя) получаем следующее выражение:

Для вычислений по формулам (4, 5) требуются также сведения о комплексных показателях преломления воды, содержащейся в дождевых каплях,  $m = \sqrt{\epsilon} = n_1 - jn_2$  для всех необходимых длин волн и температур. В связи с этим в работе [17] в дополнение к известным и хорошо работающим в микроволновом и миллиметровом (мм) диапазонах дебаевским формулам предложена расчетная модель для вычисления комплексной диэлектрической проницаемости воды и в субмиллиметровом (субмм) диапазоне, что позволяет охватить диапазон частот  $0,03 \div 3$  ТГц и интервал температур  $-10 \div 70$  °С. К этой расчетной модели прилагается удобная номограмма для быстрого пересчета значений диэлектрической проницаемости воды от одной температуры к другой. Из нее следует, что в ТГц диапазоне частот температурная зависимость значительно слабее (примерно на два порядка), чем в микроволновом. В связи с этим в вычислениях индикатрис рассеяния нет необходимости применять подробный шаг по температуре. Ко времени завершения этой работы была опубликована еще одна подобного типа расчетная модель Эллисона [18], охватывающая более широкие частотный и температурный интервалы и базирующаяся на лорентцовской форме резонансных линий. Проведенное сравнение расчетных значений комплексной диэлектрической проницаемости воды по обеим моделям [17, 18] дало практически совпадающие результаты в субмм диапазоне волн. Следует отметить, что в этом диапазоне более правомерно использование сферической модели дождевых капель, а для расчетов по формулам Ми можно использовать усовершенствованный алгоритм [19], позволяющий сократить время вычислений при сохранении достаточной точности.

**2. Индикатрисы рассеяния отдельных капель.** На рис. 1 в качестве примера приведены индикатрисы рассеяния излучения отдельной каплей диаметром 1,0 мм в плоскости поляризации  $\varphi = 0^\circ$  на нескольких длинах волн. Индикатрисы в ортогональной плоскости ( $\varphi = 90^\circ$ ) подобны и в целях сокращения объема публикации здесь и далее не представлены.

Отметим, что индикатрисы отдельных дождевых капель не имеют существенного практического применения, но их вычисление является необходимым этапом для перехода к индикатрисам полидисперсных сред, широко используемым во многих практических приложениях. В то же время анализ индикатрис отдельных капель интересен для понимания некоторых физических закономерностей рассеяния электромагнитных волн гидрометеорами.

В сантиметровом и дециметровом диапазонах, где длины волн радиоизлучения  $\lambda$  заметно

превышают размеры дождевых капель (в этом случае волновой параметр  $x = 2\pi a / \lambda$  значительно меньше 1), индикатрисы рассеяния отдельных дождевых капель близки к рэлеевским, напоминающим восьмерку в плоскости поляризации и круг в ортогональной плоскости. При этом интенсивность рассеяния падающего на каплю излучения в направлениях вперед и назад примерно одинакова. В ряде случаев рассеяние в заднюю полусферу даже превышает рассеяние в переднюю, проявляется так называемый эффект Томсона.

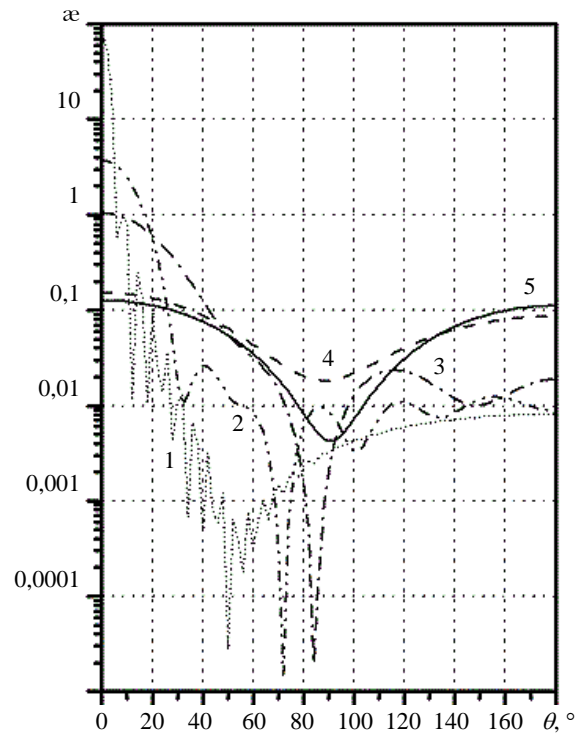


Рис. 1. Индикатрисы рассеяния отдельной каплей диаметром 1,0 мм на длинах волн 0,1; 0,5; 1,0; 3,0 и 8,3 мм (соответственно кривые 1–5)

На рис. 1 это частично видно на волне  $\lambda = 8$  мм. В целом же излучение этих диапазонов умеренно страдает от дождей. В мм диапазоне наблюдается другое: длины волн излучения в нем практически полностью совпадают с размерами дождевых капель, что приводит к сильному резонансному взаимодействию. По этой причине мм диапазон совместно с примыкающим к нему субмм оказался наиболее подверженным ослабляющему и рассеивающему воздействию дождей. Здесь же происходит и существенное изменение вида индикатрис рассеяния. По мере продвижения в субмм диапазон в них появляется и быстро растет сильно вытянутый узкий передний лепесток, они становятся похожими на диаграммы направленности больших зеркальных антенн (рис. 2). Этот лепесток окружен значительно более слабыми боковыми лепестками. Их положения в

угловой плоскости для капель разного размера не совпадают, что приводит к перекрытию провалов между ними и сглаживанию индикатрис полидисперсных сред.

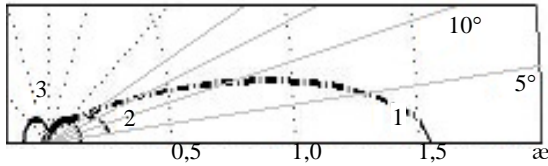


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния в полярной системе координат

Величина переднего лепестка индикатрисы рассеяния растет с увеличением волнового параметра отдельных капель и при его значениях  $x \geq 20$  легко может быть оценена по предельной формуле К. С. Шифрина для капельных индикатрис в направлении вперед [20]

$$\alpha(\theta^\circ = 0^\circ) = \frac{x^4}{4k^2 C_{\text{расс}}} \equiv \frac{x^2}{8\pi\xi},$$

где сечение рассеяния  $C_{\text{расс}}$  принимает свое предельное значение

$$C_{\text{расс}} = \pi a^2 \left[ 1 + \left| \frac{m-1}{m+1} \right|^2 \right],$$

$m = n_1 - jn_2$  – комплексный показатель преломления дождевой воды [17] и  $\xi = \frac{n_1^2 + n_2^2 + 1}{(n_1 + 1)^2 + n_2^2}$ .

Проведенная по этой формуле оценка амплитуды переднего лепестка индикатрисы рассеяния для волн средней части субмм диапазона для капли диаметром 2,86 мм (при этом волновой параметр  $x = 20$ ) дает значение 28, а точное вычисление – 31,2. В коротковолновой части субмм диапазона (на частоте 3 ТГц) для капель с диаметрами 1 и 2 мм величины передних лепестков индикатрис рассеяния соответственно равны 70 и 280, а точный расчет дает значения 76 и 290. Таким образом, формула К. С. Шифрина обеспечивает точность оценки порядка единиц процентов. Она полезна при отладке программы расчета индикатрис рассеяния, поскольку позволяет быстро получить значения индикатрис в контрольных точках.

Как было отмечено ранее, в рэлеевских индикатрисах рассеяния отсутствует боковое излучение в плоскости поляризации. Это же свойство, но в более ослабленном виде, продолжает сохраняться в капельных индикатрисах во всем мм диапазоне. Именно на них присутствуют наиболее глубокие минимумы рассеяния вблизи боковых углов 80–100° (рис. 1 для  $\lambda = 8,3; 3$  и 1 мм. Но с дальнейшим ростом частоты (к средней части субмм диапазона и выше) эта особенность индикатрис одиночных капель постепенно исчезает.

**3. Индикатрисы рассеяния полидисперсной среды.** При работе в дождях линии связи или РЛС излученные антеннами радиоволны освещают одновременно множество капель, имеющих широкий спектр размеров. В этом случае, как уже отмечалось, положения основного и боковых лепестков индикатрис отдельных капель разного размера в угловой плоскости не совпадают, что приводит к перекрытию провалов между ними и сглаживанию индикатрисы рассеяния полидисперсной среды. Поэтому на практике наблюдаются более сглаженные результирующие индикатрисы рассеяния дождей. Такие индикатрисы также рассчитаны нами для мм и ТГц диапазонов при температуре 25 °С и нескольких значений интенсивности дождей  $R$  от 1,25 до 100 мм/ч, а также для всех известных и широко применяемых в настоящее время распределений дождевых капель по размерам. В число последних входят как классические распределения Беста, Маршалла-Пальмера, Лауса-Парсонса, Гамма и логнормальное распределение, так и оригинальное распределение, предложенное авторами этой работы специально для ТГц диапазона [16]. Его особенность состоит в том, что оно позволяет охватить в расчетах наиболее мелкие дождевые капли (с диаметрами 0,05÷0,6 мм), ранее не учитываемые классическими распределениями, но достаточно существенные для ТГц диапазона. Появление в практике метеорологических измерений современных дидрометров подтвердило их присутствие в дождях во многих географических районах земного шара, отдаленных от экваториального пояса.

В качестве примера на рис. 3 показаны индикатрисы рассеяния излучения дождем с интенсивностью  $R = 50$  мм/ч и распределением капель по размерам из работы [16]. Для сравнения приведена индикатриса рассеяния дождем такой же интенсивности с распределением капель по размерам Лауса-Парсонса из работы [8]. Видно, что основная энергия субмм радиоволн, освещающих дождевой объем, уходит из него строго в направлении вперед узким пучком (см. рис. 2). Отметим, что это явление вносит существенную коррекцию в решения уравнений переноса лучистой энергии, снижая в этом диапазоне роль многократного рассеяния, а также уровень перекрестных помех в системах связи во время дождей. Кроме того, улучшает здесь работу РЛС по сравнению с микроволновым диапазоном, где из-за эффекта Томсона дождь значительно сильнее маскирует воздушные цели. Использование в том диапазоне излучения с круговой поляризацией лишь частично подавляет эту помеху. Сравнение полученных результатов с известными литературными данными показало вполне хорошее соответствие. Для частот субмм диапазона нам не

удалось найти результаты подобных вычислений индикатрис рассеяния в дождях.

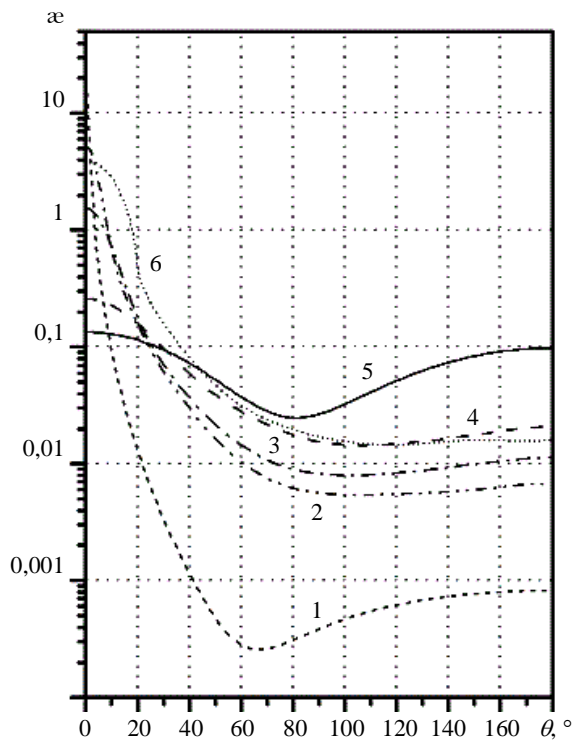


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния дождем с интенсивностью 50 мм/ч и распределением капель по размерам из работы [16] для вертикальной поляризации на волнах 0,1; 0,5; 1,0; 3,0 и 8,3 мм (соответственно кривые 1–5); 6 – на волне 1,0 мм для распределения Лауса-Парсонса [8]

#### 4. База данных индикатрис рассеяния.

В процессе выполнения работы создан пакет программ, позволяющий вычислять индикатрисы рассеяния на любой длине волны микроволнового, мм и субмм диапазонов как для отдельных капель, в полном интервале изменения их диаметров 0,05÷7,0 мм, так и для дождя, для всех широко используемых в настоящее время в микроволновом и мм диапазонах видов распределений капель по размерам, а для субмм диапазона – распределения с расширенным спектром размеров капель из работы [16]. Для демонстрации возможностей этого пакета программ были рассчитаны индикатрисы рассеяния обоих типов (отдельных капель и полидисперсной среды) для конкретного набора длин волн  $\lambda = 8,3; 5,0; 3,19; 3,0; 2,14; 1,0; 0,83; 0,5; 0,3$  и 0,1 мм. Полученные результаты дали возможность создать базу данных индикатрис рассеяния волн мм и ТГц диапазонов дождевыми каплями и массивом дождя.

База данных обеспечивает оперативный доступ к массивам данных и рациональное управление ими, выбор согласно функции запроса и их обработку. Используемый комплект программ прост и удобен в применении, не требует от пользователя каких-либо особых навыков

программирования или специального опыта в области обработки данных.

**Выводы.** Таким образом, выполнены расчеты индикатрис рассеяния волн микроволнового, мм и ТГц диапазонов дождевыми каплями. Расчеты выполнены по точным формулам для всего интервала размеров капель, встречающихся в осадках. Рассчитаны индикатрисы рассеяния волн микроволнового, мм и ТГц диапазонов полидисперсной средой (дождем) с различными видами распределения капель по размерам и значениями интенсивности дождя. Результаты вычислений могут быть использованы для решения теоретических задач и практических применений в радиолокации и радиосвязи. Для повышения эффективности применения полученных результатов они оформлены в виде базы данных индикатрис рассеяния.

#### Библиографический список

1. Ван-де-Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван-де-Хюлст; пер. с англ. под ред. В. В. Соболева. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 536 с.
2. Tsang L. Theory of microwave remote sensing / L. Tsang, J. A. Kong, R. T. Shin. – N.Y.: J. Wiley and sons, 1985. – 613 p.
3. Исимару А. Распространение волн в случайно-неоднородных средах: в 2 т. Т. 1 / А. Исимару; пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1981. – 280 с.
4. Kutuza B. G. Physical modeling of passive polarimetric microwave observations of the atmosphere with respect to third Stokes parameter / B. G. Kutuza, G. K. Zagorin, A. Hornbostel // Radio Sci. – 1998. – 33, N 3. – P. 677–695.
5. Hubbard R. W. An experimental study of the temporal statistics of radio signals scattered by rain / R.W. Hubbard // Antennas and Propagation Soc. Intern. Symp. – Los-Angeles, N. Y.: 1971. – P. 258–261.
6. Mink J. W. A technique for simultaneous measurement of attenuation and bistatic scattering due to rain at millimeter waves / J. W. Mink // Radio Sci. – 1976. – 11, N 11. – P. 915–920.
7. Li Tingue. Forward scattering due to rain at 11 GHz / Tingue Li, W. C. Jakes, J. A. Morrison // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1977. – AP-25, N 5. – P. 646–649.
8. Setzer D. E. Anisotropic scattering due to rain at radio-relay frequencies / D. E. Setzer // Bell System Technical J. – 1971. – 50, N 3. – P. 861–868.
9. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами / Д. Дейрменджан; пер. с англ. под ред. К. Я. Кондратьева. – М.: Мир, 1971. – 165 с.
10. Шифрин К. С. Индикатрисы рассеяния сантиметровой радиации каплями воды / К. С. Шифрин, М. М. Черняк // Тр. Главной геофиз. обсерватории. – 1967. – Вып. 203. – С. 123–136.
11. Угловое распределение рассеяния дождем излучения волн миллиметрового диапазона / И. Я. Гущина, В. Г. Малинкин, А. В. Соколов, Е. В. Сухонин. – М., 1981. – 31 с. – (Препр. / ИПЭ АН СССР; №19/322).
12. Denman H. Angular scattering functions for water spheres / H. Denman, W. Keller, W. J. Pangonis. – Detroit: Wayne State University Press, 1966. – 280 p.
13. Proc. 2004 Joint 29<sup>th</sup> Intern. Conf. on IR and Millimeter waves and 12<sup>th</sup> Intern. Conf. on Terahertz Electronics, Karlsruhe, Germany. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
14. Ваксеп И. Х. О влиянии дождя на распространение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов /

- И. Х. Ваксер, Ю. И. Мальшенко, Л. Е. Копилович // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. – Т.6. – 1970. – С. 956–959.
15. Стреттон Дж. Теория электромагнетизма / Дж. Стреттон; пер. с англ. под ред. С. М. Рытова. – М.–Л.: Гостехиздат, 1948. – 539 с.
  16. *Malyshenko Yu. I.* Terahertz radio waves specific attenuation due to rain with small raindrops / Yu. I. Malyshenko, A. N. Roenko // *J. Atmospheric Electricity*. – 2014. – 34, N 1. – P. 9–19.
  17. *Мальшенко Ю. И.* Модель диэлектрической проницаемости воды в микроволновом и терагерцовом диапазонах волн / Ю. И. Мальшенко, В. Л. Костина, А. Н. Роенко // *Укр. физ. журн.* – 2007. – 52, № 2. – С. 155–164.
  18. *Ellison W. J.* Permittivity of pure water at standard atmospheric pressure over the frequency range 0–25 THz and temperature range 0–100 °C / W. J. Ellison // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. – 2007. – 36, N 1. – P. 1–18.
  19. *Wiscombe W. J.* Improved Mie scattering algorithms / W. J. Wiscombe // *Appl. Opt.* – 1980. – 19, N 9. – P. 1505–1509.
  20. *Шифрин К. С.* Рассеяние в мутных средах / К. С. Шифрин. – М.: Гостехиздат, 1951. – 288 с.

*Рукопись поступила 15.08.2014.*

V. L. Kostina, Yu. I. Malyshenko, A. N. Roenko

#### MILLIMETER AND TERAHERTZ WAVE SCATTERING DIAGRAMS IN RAINS

Detailed information about millimeter and terahertz wave scattering diagrams in rains is needed to develop millimeter and terahertz range radio engineering systems. It is rather difficult to measure scattering diagrams, the easier way is to calculate them. The prepared tables of scattering diagrams can be used for microwave range, but there are no such data for the terahertz one. This paper presents the results of scattering diagram calculation of millimeter and terahertz waves by raindrops. The calculations were using the exact formulas for all interval of raindrop sizes appeared

in precipitation. Data base of scattering diagrams was developed on the basis of obtained results. It gives a wide opportunity for calculation scattering diagrams at various combination of initial data, i.e. radiation wave length, raindrop size distribution function and rain intensity value. The obtained results may be used for estimation of radiation power spatial distribution in millimeter and terahertz ranges.

**Key words:** scattering diagram, remote sensing, rain drop size distribution function, terahertz frequency range.

В. Л. Костина, Ю. І. Малишенко, О. М. Роенко

#### ІНДИКАТРИСИ РОЗСІЯННЯ МІЛІМЕТРОВИХ І ТЕРАГЕРЦОВИХ ХВИЛЬ У ДОЩАХ

При створенні радіотехнічних систем міліметрового (мм) і терагерцового (ТГц) діапазонів потрібні детальні відомості про кутові характеристики розсіяння випромінювання опадами. Вимірювати індикатриси розсіяння досить складно, простіше отримати їх через розрахунки. Для мікрохвильового діапазону вдається скористатися готовими таблицями індикатрис розсіяння, але для ТГц діапазону хвиль такі дані відсутні. У роботі подано результати розрахунку індикатрис розсіяння хвиль мм і ТГц діапазонів дощовими краплями. Розрахунки виконано по точних формулах для всього інтервалу розмірів крапель, що зустрічаються в опадах. На підставі отриманих результатів створено базу даних, яка надає великі можливості для обчислення індикатрис розсіяння при різноманітних поєднаннях початкових параметрів: довжини хвилі випромінювання, функції розподілу дощових крапель за розміром і значення інтенсивності дощу. Отримані результати можуть бути використані при оцінюванні просторового розподілу потужності випромінювання мм і ТГц діапазонів.

**Ключові слова:** індикатриси розсіяння, дистанційне зондування, функція розподілу дощових крапель за розмірами, терагерцовий діапазон електромагнітних хвиль.