

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДВУХЧАСТОТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ДОЖДЯ

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: annlinkova@mail.ru*

Приведены результаты исследования двухчастотного метода измерения интенсивности дождей с использованием трехпараметрического гамма-распределения капель по размерам. Для устранения неоднозначности измерения параметров распределения с помощью двухчастотного радиолокационного зондирования предложено использовать данные контактных измерений зависимости параметров гамма-распределения от интенсивности дождя. Приведены результаты численного моделирования в рамках теории рассеяния Ми, которые позволяют оценить применимость предложенного метода для полидисперсной среды и сформулировать рекомендации по выбору диапазонов частот двухчастотного радара. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 23 назв.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния, дифракция, дифференциальная отражаемость, интенсивность дождя.

Измерение интенсивности дождей имеет важное значение в метеорологии, климатологии, сельском хозяйстве и др. Измерение параметров дождя имеет давнюю историю, которая началась с использования контактных методов на основе датчиков различной конструкции [1]. Однако в случае измерения интенсивности на площади датчики приходится располагать достаточно плотно, что приводит к увеличению их количества и материальных затрат на обслуживание.

В связи с этим целесообразным представляется использование бесконтактных методов дистанционного зондирования, которые позволят оперативно получать данные об интенсивности дождя I на больших территориях [2]. До настоящего времени широко используются одночастотные методы [2], основанные на измерении радиолокационной отражаемости дождей Z с последующей обработкой данных на основе так называемого $Z-I$ -соотношения $Z = AI^B$. Однако, как показала практика, коэффициенты A и B зависят от параметров распределения частиц по размерам (микроструктурные параметры дождя), которые, в свою очередь, определяются происхождением осадков (таяние градин, снега, коагуляция крупных капель и др.). В то же время радиолокационная отражаемость в значительной степени зависит от типа распределения капель дождя по размерам, поэтому одной и той же интенсивности дождя может соответствовать различная отражаемость. В связи с этим результаты радиолокационных измерений интенсивности дождя отличаются большим разбросом, в частности, значения коэффициента A меняются в пределах $50 \div 1000$, а коэффициента B – в пределах $1 \div 2,87$.

В работах [3, 4] было предложено использовать двухчастотный радар для измерения именно микроструктурных характеристик осадков, что позволяет уменьшить неопределенность

в определении вида $Z-I$ -соотношения. При этом наиболее удобно использовать двухпараметрическое экспоненциальное распределение Маршалла-Пальмера [5], которое описывает зависимость количества капель $N(D)$ в интервале диаметров $D \in (D, D + \Delta D)$ в виде $N(D) = N_0 \exp(-\beta D)$, где N_0 и β – параметры распределения, которые в общем случае зависят от интенсивности дождя. При этом измерение радиолокационной отражаемости Z на двух длинах волн λ_1 и λ_2 позволяет вычислить оба параметра [6]. Однако, как показывают многочисленные экспериментальные и теоретические работы (например, [7]), подобное распределение не позволяет описывать изменения в структуре дождя в области малых и крупных капель, которые часто происходят даже в течение отдельного дождя.

В то же время трехпараметрическое гамма-распределение $N(D) = N_0 D^\alpha \exp(-D/\beta)$ [8, 9] обладает достаточной гибкостью для аппроксимации практически любых изменений в структуре дождя [10] и широко используется в метеорологии. Однако измерения радиолокационной отражаемости на двух частотах не позволяют определить все три параметра гамма-распределения, при этом существует две возможности: зафиксировать один из параметров на основе дополнительной информации о свойствах осадков [6] либо использовать статистические связи между двумя параметрами распределения.

Последний подход основан на результатах работы [7], где показано, что параметры гамма-распределения не являются полностью независимыми. В связи с этим в ряде работ исследовались возможности различных упрощающих предположений для измерения микроструктурных параметров дождя путем измерения радиолокационной отражаемости на двух ортогональных поля-

ризациях при одночастотном зондировании [11], а также ослабления на двух частотах [12].

В бывшем СССР работы по многочастотному зондированию осадков были связаны в основном с определением градоопасности облаков [3, 13] и, в меньшей степени, посвящены измерениям интенсивности осадков [3, 4, 14]. Рассмотренные методы двухчастотного зондирования основаны на фиксации одного из параметров гамма-распределения (N_0 либо α) или использовании трехчастотного радара [3], что позволяет определить все три параметра распределения. При этом рассматривались различные варианты зондирования с использованием результатов измерений радиолокационной отражаемости и ослабления радиоволн. Однако полученные результаты следует понимать в среднестатистическом смысле, так как они основаны на использовании тех или иных усредненных зависимостей, полученных экспериментально.

Настоящая работа посвящена дальнейшим поискам путей повышения надежности измерений интенсивности дождей с применением двухчастотной радиолокационной станции (РЛС) с использованием усредненных данных контактных измерений микроструктурных параметров распределения капель по размерам.

В основе двухчастотного зондирования осадков лежит зависимость дифференциальной радиолокационной отражаемости $Z_D(I)$ [3, 4, 6, 15] от их интенсивности, причем дифференциальная отражаемость равна отношению радиолокационной

$$\text{отражаемости осадков } Z = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{\dot{\epsilon} + 2}{\dot{\epsilon} - 1} \right|^2 \sigma_0, \text{ мм}^6/\text{м}^3,$$

измеренной на двух длинах волн λ_1 и λ_2 :

$$Z_D = \frac{Z(\lambda_1)}{Z(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^4 \left| \frac{\dot{\epsilon}(\lambda_1, T) + 2}{\dot{\epsilon}(\lambda_1, T) - 1} \right|^2 \times \left| \frac{\dot{\epsilon}(\lambda_2, T) - 1}{\dot{\epsilon}(\lambda_2, T) + 2} \right|^2 \frac{k(R, \lambda_1, I) \sigma_0(\lambda_1, I)}{k(R, \lambda_2, I) \sigma_0(\lambda_2, I)}, \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость воды при температуре T , °C; $k(R, \lambda, I)$ – коэффициент ослабления сигналов в осадках, который зависит от расстояния до элемента разрешения R ; σ_0 , $\text{м}^2/\text{м}^3$ – удельное значение эффективной площади рассеяния (ЭПР) полидисперсной среды, состоящей из капель разных размеров.

В рамках традиционно используемого приближения некогерентного рассеяния, которое хорошо выполняется для осадков в виде дождя в диапазоне длин волн $\lambda \leq 3$ см [16], выражение для удельной ЭПР записывается в виде

$$\sigma_0 = N_T \int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda) F(D) dD, \text{ мм}^2/\text{м}^3, \quad (2)$$

где N_T – концентрация капель (количество частиц в единичном объеме), м^{-3} . Для гамма-распределения

$$N_T = \int_0^\infty N(D) dD = N_0 \Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha+1}. \quad (3)$$

В (2) $\sigma_p(D, \lambda)$ – ЭПР отдельной капли, мм^2 ; $F(D) = \frac{N(D)}{N_T}$ – плотность вероятности распределения капель по размерам, $1/\text{мм}$.

В приближении сферической формы капли выражение для ее ЭПР можно записать с использованием решения строгой задачи о дифракции электромагнитных волн на диэлектрической сфере [17] (теория Ми) следующим образом:

$$\sigma_p = \frac{\pi r^2}{\rho^2} \left| \sum_{n=1}^\infty (-1)^n (2n+1) (a_n - b_n) \right|^2, \quad (4)$$

где r – радиус капли, мм ; $\rho = 2\pi r/\lambda$ – параметр дифракции; a_n и b_n – коэффициенты разложения рассеянного поля, выражения для которых приведены в работе [17].

Ослабление сигналов в дождях $k(R, \lambda, I)$ существенно зависит от длины волны [2, 8], поэтому в общем случае в выражении для дифференциальной отражаемости (1) необходимо учитывать дисперсию ослабления с частотой, что существенно усложняет анализ. В рамках настоящего рассмотрения предполагается, что ослабление на обеих длинах волн мало $\frac{k(R, \lambda_1, I)}{k(R, \lambda_2, I)} \approx 1$.

Кроме того, как показано [15], значение дифференциальной отражаемости практически не зависит от температуры в широком диапазоне ее изменения $-30 \text{ °C} \leq T \leq 30 \text{ °C}$, поэтому в дальнейшем все вычисления проводятся для значения температуры $T = 20 \text{ °C}$.

Возвращаясь к выражению для удельной ЭПР объема частиц дождя (2), запишем плотность вероятности гамма-распределения капель по размерам в виде [8, 9]

$$F(D) = \frac{D^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha+1}} \exp\left(-\frac{D}{\beta}\right), \quad D > 0, \quad (5)$$

где $\Gamma(\alpha + 1) = \int_0^\infty dt t^\alpha e^{-t}$ – гамма-функция; $\alpha(I)$ и

$\beta(I)$ – параметры распределения, которые зависят от интенсивности дождя I . Для большей наглядности используем микроструктурные параметры: модальный диаметр D_{mod} и среднеквадратическое отклонение (СКО) распределения D_{ms} , которые связаны с параметрами распределения α и β следующим образом:

$$\alpha = \frac{2D_{mod}}{\sqrt{D_{mod}^2 + 4D_{rms}^2} - D_{mod}},$$

$$\beta = \frac{1}{2}(\sqrt{D_{mod}^2 + 4D_{rms}^2} - D_{mod}), \text{ мм}, \quad (6)$$

$$D_{mod} = \alpha\beta, \text{ мм}, \quad D_{rms} = \beta\sqrt{\alpha + 1}, \text{ мм}.$$

В частности, на рис. 1 приведена зависимость модального диаметра (рис. 1, а) и нормированного СКО распределения D_{rms}/D_{mod} (рис. 1, б) от микроструктурных параметров.

Так как большие капли неустойчивы и, обычно дробятся на более мелкие частицы [1], то изменение микроструктурных параметров, как правило, ограничено пределами $0 < \alpha \leq 7$ и $0 \leq \beta \leq 0,7$ ($0 < D_{mod} < 5$ мм, $0 < D_{rms}/D_{mod} \leq 0,375$), причем нормированное значение ширины распределения частиц не зависит от параметра β (рис. 1, б).

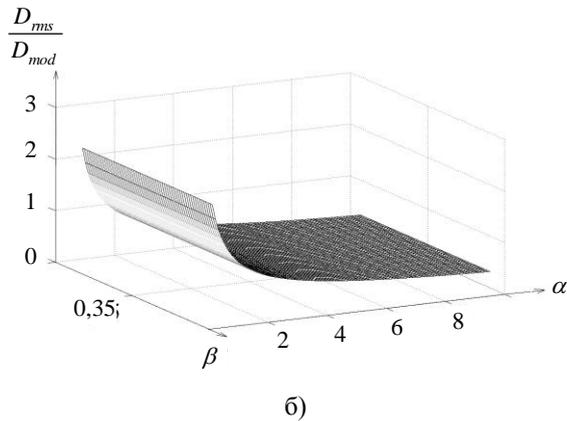
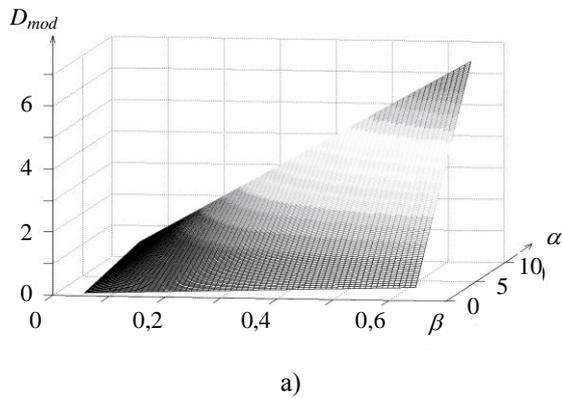


Рис. 1. Зависимость микроструктурных параметров дождя от параметров распределения α и β : а) – D_{mod} ; б) – D_{rms}/D_{mod}

На рис. 2 приведен характерный вид гамма-распределения для различных значений D_{rms} . Как видно, распределение имеет несимметричный вид, причем его ширина растет прежде всего за счет крупнокапельной части распределения.

Концентрация капель дождя N_T сложным образом зависит от его интенсивности, как показано на рис. 3.

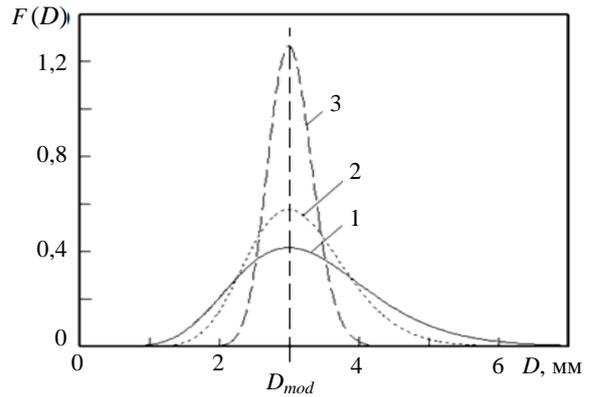


Рис. 2. Форма гамма-распределения: 1 – $D_{rms} = 1$ мм; 2 – $D_{rms} = 0,707$ мм; 3 – $D_{rms} = 0,316$ мм

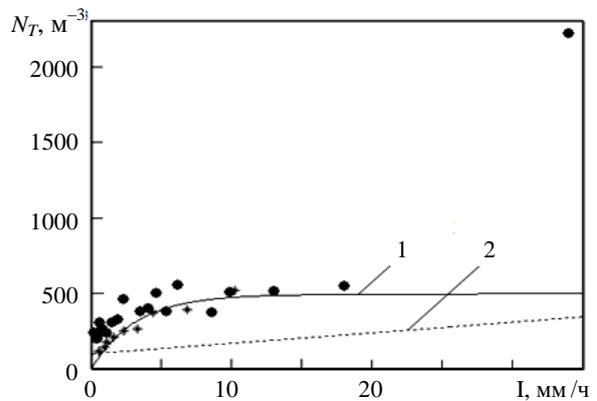


Рис. 3. Зависимость концентрации капель дождя от интенсивности

Черные кружки соответствуют данным контактных измерений для Индии [18], а звездочки – измерениям для средней полосы Европы [19].

Используя метод наименьших квадратов, можно получить эмпирическое соотношение для зависимости концентрации капель от интенсивности для умеренных дождей $I \leq 5$ в виде

$$N_T = 495,45[1 - \exp(-I/3,17)], \quad (7)$$

которая соответствует кривой 1 на рис. 3.

Как видно, концентрация капель сначала монотонно растет с увеличением интенсивности дождя, а в дальнейшем рост замедляется ($I > 5$ мм/час), так как увеличение интенсивности дождя происходит, в основном, за счет укрупнения капель.

Однако, как было отмечено выше, капли большого размера очень неустойчивы и дробятся на частицы меньших размеров, поэтому для дождей большой интенсивности $I \geq 20$ мм/час (ливни) характерно резкое увеличение количества частиц (рис. 3), которое не описывается (7). Тем не менее, данные на рис. 3 позволяют оценить рамки применимости известного приближения $N_T = 500 \text{ м}^{-3}$, которое часто используется в ряде работ в качестве фиксированного параметра при измерении интенсивности дождя с помощью

двухчастотного зондирования [3]. Как видно, указанное приближение удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными в области умеренных дождей $5 \div 7 \leq I \leq 20$ мм/ч и не может быть рекомендовано в области слабых $I \leq 5$ мм/ч и ливневых осадков $I \geq 20$ мм/ч. В то же время необходимо отметить, что эти данные существенно отличаются от эмпирической зависимости, приведенной в работе [20] для сильных дождей $N_T = 100 + 7I$ (рис. 3, кривая 2). В этом смысле применение двухчастотного зондирования весьма привлекательно, так как выражение для дифференциальной отражаемости (1) не зависит от концентрации капель N_T , что понижает порядок неопределенности при измерении параметров дождя.

Действительно, имея в распоряжении измеренное значение дифференциальной отражаемости (1), необходимо определить два параметра распределения α и β , для чего можно использовать корреляционные связи между параметрами [7]. В настоящей работе предлагается использовать усредненные данные контактных измерений параметров гамма-распределения в зависимости от интенсивности дождя, которые получены на территории Украины [21] в следующем виде:

$$\alpha = 2,24I^{-0,46}, \beta = 0,25I^{0,42}. \quad (8)$$

Как показано на рис. 4, параметры распределения (8) меняются в довольно широких пределах и со значительной скоростью, в связи с чем рекомендации, приведенные в ряде работ, относительно выбора фиксированного значения параметра $\alpha = 2$ [3] или $\alpha = 6$ [22] вряд ли можно признать удовлетворительными.

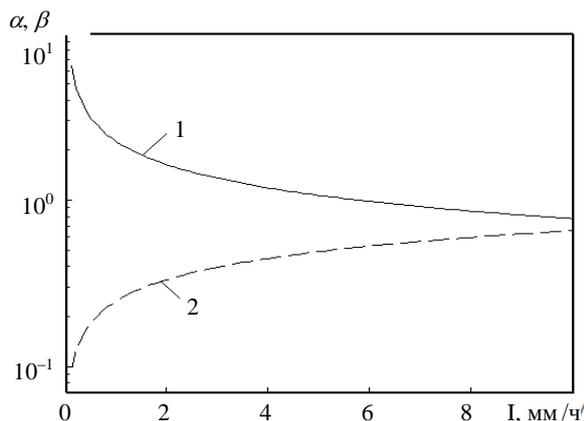


Рис. 4. Зависимость параметров распределения от интенсивности дождя: 1 – параметр α ; 2 – параметр β

Исключая интенсивность дождя I в соотношениях (8), можно получить связь между параметрами распределения в виде $\alpha = 10,22\beta^{-1,095}$, что позволяет уточнить рамки применимости

двухчастотного метода зондирования диапазоном значений $0,5 \leq \alpha \leq 7$ и $0,1 \leq \beta \leq 0,7$, вне которых, что будет видно далее, реализация необходимой точности измерений становится проблематичной.

Таким образом, наличие подобной связи позволяет уменьшить число независимых параметров в задаче измерения интенсивности дождя [7] и численно найти зависимость $I = I(Z_D)$, обратную (1), используя соотношения (1)–(5), (8).

Для оценки возможностей предложенного подхода нами проводилось численное моделирование двухчастотного измерения интенсивности дождя для нескольких комбинаций длин волн, которые традиционно используются в метеорологических РЛС: $\lambda_1 = 8,15$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см (РЛС МРЛ-1), $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 10$ см (РЛС МРЛ-5), а также $\lambda_1 = 8,15$ мм и $\lambda_2 = 10$ см.

Результаты моделирования приведены на рис. 5. При этом согласно значению дифференциальной отражаемости весь диапазон измерения интенсивности можно разбить на два участка:

$$I = \begin{cases} > 1,1 \text{ мм/ч}, Z_D > 0, \\ \leq 1,1 \text{ мм/ч}, Z_D \leq 0. \end{cases} \quad (9)$$

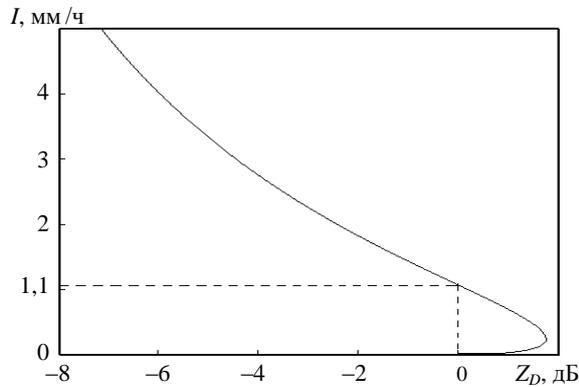
Однозначное измерение интенсивности дождей лежит в диапазоне $I > 1,1$ мм/ч. При этом верхний предел измерений ограничен $I = 20$ мм/ч, так как зависимости (8), положенные в основу метода, получены для интенсивностей $I < 20$ мм/ч, что соответствует умеренным осадкам в соответствии с общепринятой классификацией [22] для слоистообразных (St) и конвективных облаков (Cu) (таблица). В области малых интенсивностей $I \leq 1,1$ мм/ч имеется участок неоднозначной зависимости $I(Z_D)$, который обусловлен специфическим характером рассеяния капель в резонансной области для более короткой длины волны λ_1 .

При этом комбинация длин волн 8,15 мм и 3,2 см обеспечивает максимальный диапазон изменения дифференциальной отражаемости $\Delta Z_D^{\max} \leq 13$ дБ (рис. 5, а), а использование длин волн 8,15 мм и 10 см приводит к близким результатам $\Delta Z_D^{\max} \leq 10$ дБ. В то же время для длин волн 3,2 и 10 см характерно существенное уменьшение диапазона изменения дифференциальной отражаемости $\Delta Z_D^{\max} \leq 3$ дБ (рис. 5, б), так как значительная часть капель в распределении (5) соответствует рэлеевской области рассеяния $\rho|\dot{m}| \ll 1$, $|\dot{m}| = \sqrt{\text{Re } \dot{\epsilon} - j \text{Im } \dot{\epsilon}}$ (\dot{m} – комплексный показатель преломления), особенно для малых интенсивностей осадков. Поэтому величина радиолокационной отражаемости слабо зависит от длины волн, что в свою очередь накладывает ограничения на точность измерений. Действительно, согласно рис. 5, б, величина производной

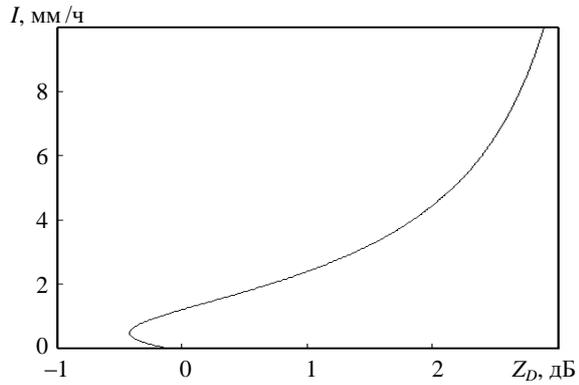
dI/dZ_D существенно выше для комбинации волн 3,2 и 10 см, чем для пары волн 8,15 мм и 3,2 см. С учетом реально достижимой точности измерений отражаемости с помощью РЛС $\Delta Z = 1 \pm 2$ дБ [20], это значительно ухудшает точность измерения интенсивности осадков.

Градации интенсивности осадков

Качественная оценка		Тип осадков	
		St, I, мм/ч	Su, I, мм/ч
Обложные		<2,5	<5
Ливневые	Умеренные	2,5...5	5...27,5
	Сильные	12,5...25	27,5...55
	Очень сильные	25...50	55...112,5
	Интенсивные	50...125	112,5...177,5
	Экстремальные	>125	>177,5



а)



б)

Рис. 5. Зависимость интенсивности дождя от дифференциальной отражаемости: а) – для $\lambda_1 = 8,15$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см; б) – $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 10$ см

Также необходимо отметить разный характер зависимости $I(Z_D)$ (рис. 5) для двух вариантов двухчастотной РЛС (8,16 мм/3,2 см и 3,2 см/10 см), что обусловлено частотной дисперсией отражаемости дождя $Z(D, \lambda)$. Действительно, в диапазоне 8,15 мм отражаемость всегда

меньше, чем в 3,2 см диапазоне (за счет уменьшения величины диэлектрической проницаемости [7]), поэтому $Z_D = \frac{Z(\lambda_1 = 8 \text{ мм})}{Z(\lambda_2 = 3,2 \text{ см})} \leq 1$, а увели-

чение интенсивности дождя приводит к уменьшению дифференциальной отражаемости. В диапазоне 3,2 см отражаемость всегда больше чем в диапазоне 10 см, т. е. $Z_D = \frac{Z(\lambda_1 = 3,2 \text{ см})}{Z(\lambda_2 = 10 \text{ см})} \geq 1$ (ди-

электрическая проницаемость капель практически не отличается), а увеличение интенсивности приводит к увеличению дифференциальной отражаемости.

Найденное значение интенсивности дождя $I(Z_D)$ (рис. 5, а) позволяет восстановить параметры распределения (8), а затем определить остальные параметры дождя, в том числе:

– модальный диаметр капель D_{mod} и СКО распределения ΔD согласно (6);

– концентрацию капель (m^{-3}), используя результаты измерения отражаемости, например, на длине волны λ_2

$$N_T = Z(\lambda_2) \frac{\pi^5}{\lambda_2^4} \left| \frac{\hat{\epsilon} - 1}{\hat{\epsilon} + 2} \right|^2 \times \frac{\Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha+1}}{\int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda_2) D^\alpha \exp\left(-\frac{D}{\beta}\right) dD}; \quad (10)$$

– параметр распределения N_0 (3)

$$N_0 = \frac{N_T}{\Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha+1}}; \quad (11)$$

– водность дождя [11], $г/м^3$

$$W = \frac{10^{-9} \pi \rho_w N_T \Gamma(\alpha + 4) \beta^3}{6 \Gamma(\alpha + 1)}, \quad (12)$$

где ρ_w – плотность воды, $г/м^3$.

При этом полученные результаты, безусловно, следует рассматривать в среднестатистическом смысле, так как они базируются на использовании усредненных данных контактных измерений зависимости параметров гамма-распределения от интенсивности дождя (8) [21]. Сделанное замечание относится в равной степени и к другим методам зондирования [3, 4, 6, 7, 14, 23], которые в той или иной мере также используют усредненные данные, чтобы измерить три параметра гамма-распределения с помощью двухчастотной РЛС.

Выводы. Предложено использовать усредненные данные контактных измерений микроструктурных параметров трехпараметрического гамма-распределения капель дождя по размерам в зависимости от интенсивности дождя [21] для обработки результатов двухчастотного зондиро-

вания осадков.

В результате численного моделирования измерения интенсивности дождя с использованием полученных соотношений показано, что рассмотренный двухчастотный метод позволяет измерять интенсивность, водность, концентрацию частиц, а также микроструктурные параметры дождя в диапазоне изменения интенсивности $1,1 \text{ мм/ч} \leq I \leq 15\text{--}20 \text{ мм/ч}$.

Использование РЛС в диапазонах 8,15 мм и 3,2 см обеспечивает лучшую точность измерения параметров дождя, чем 8,15 мм и 10 см и тем более 3,2 и 10 см.

1. Ровинский Ф. Я. Новые методы регистрации водных капель / Ф. Я. Ровинский // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. – 1959. – № 7. – С.1076–1078.
2. Радиолокационные измерения осадков / А. М. Боровиков, В. В. Костарев, И. П. Мазин и др. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 140 с.
3. Сулаквелидзе Г. Л. Измерение интенсивности осадков мультисканером / Г. Л. Сулаквелидзе, М. Т. Абшаев // Тр. Высокоточного геофизического ин-та. – 1968. – Вып. 11. – С. 198–214.
4. Абшаев М. Т. О возможностях радиолокационного исследования микроструктуры облаков и осадков / М. Т. Абшаев, Ю. А. Дадали // Тр. Высокоточного геофизического ин-та. – 1966. – Вып. 5. – С. 124–132.
5. Marshall J. S. The distribution of raindrops with size / J. S. Marshall, W.M. Palmer // J. Meteor. – 1948. – 5. – P. 165–166.
6. Goldhirsh J. Estimation of raindrop size distribution using multiple wavelength radar systems / J. Goldhirsh, I. Katz // Radio Science. – 1974. – 9. – P. 439–446.
7. Munchak S. J. Retrieval of Raindrop Size Distribution from Simulated Dual-Frequency Radar Measurements / S. J. Munchak // J. Appl. Meteor. and Climatology. – 2008. – 47. – P. 223–239.
8. Шупяцкий А. Б. Радиолокационное измерение интенсивности и некоторых других характеристик осадков / А. Б. Шупяцкий. – М.: Гидрометеоздат, 1960. – 119 с.
9. Левин Л. М. Исследование по физике грубодисперсных аэрозолей / Л. М. Левин. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 267 с.
10. Ulbrich C. W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution / C. W. Ulbrich // J. Clim. Appl. Meteor. – 1983. – 22. – P. 1764–1775.
11. Brandis E. A., Zhang G., Vivekanandan J. An elevation of a drop distribution-based polarimetric radar rainfall estimator / E. A. Brandis, G. Zhang, J. Vivekanandan // J. Appl. Meteor. – 2003. – 42. – P.652–660.
12. Rincon R. F. Microwave link dual-wavelength measurements of path-average attenuation for the estimation of drop size distribution and rainfall / R. F. Rincon, R. H. Lang // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2002. – 40, N 4. – P. 750–770.
13. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты / М. Т. Абшаев, И. И. Бурцев, С. И. Ваксенбург, Г. Ф. Шевела. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 247 с.
14. Бибилашвили Н. Ш. О возможности измерения водности облаков и интенсивности осадков с помощью радиолокатора, работающего на двух длинах волн / Н. Ш. Бибилашвили, Г. К. Сулаквелидзе // Тр. Высокоточного геофизического ин-та. – 1966. – Вып. 3. – С. 205–208.
15. Double frequency sounding of liquid precipitation / A. Linkova, G. Khlopov, S. Khomenko, O. Voitovich // 11th Intern. Radar Symp. (IRS 2010): Proc. – Vilnius, 2010. – V. 1. – P. 322–325.

16. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии / В. Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. – 343 с.
17. Хюлст Г. К. ван де. Рассеяние света малыми частицами / Г. К. ван де Хюлст; пер. с англ. под ред. В. В. Соболева. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 536 с.
18. Kelkar V. N. Size distribution of raindrops, III / V. N. Kelkar // Indian J. Meteorol. Geophys. – 1961. – 12, N 4. – P. 553.
19. Литвинов И. В. Структура атмосферных осадков / И. В. Литвинов. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 153 с.
20. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии / Д. Атлас. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 194 с.
21. Заболоцкая Т. Н. Связь параметров гамма-распределения по размерам с характеристиками осадков / Т. Н. Заболоцкая // Тр. Укр. науч.-исслед. гидрометеорологического ин-та. – 1970. – 86. – С. 127–131.
22. Брылёв Г. Б. Радиолокационные характеристики облаков и осадков / Г. Б. Брылёв, С. Б. Гашина, Г. Л. Низдойминова. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 232 с.
23. Differential frequency Doppler weather radar: Theory and Experiment / R. Meneghini, S. W. Bidwell, R. Rincon, G. M. Heymsfield // Radio Science. – 2003. – 8, N 3. – P. 1–10.

A. M. Linkova

USE OF MICROSTRUCTURE PARAMETERS FOR DATA PROCESSING OF DOUBLE FREQUENCY MEASUREMENT OF RAIN INTENSITY

Results of study of double frequency method for measurement of rain intensity using three-parameter gamma distribution of drop sizes are presented. For elimination of measurement ambiguity of distribution parameters using data of double frequency sounding the use of data of contact measurement of connection between rain intensity and gamma distribution parameters was proposed. The results of calculations performed by Mie theory were presented, they allow to estimate applicability of proposed method for polydisperse medium and to give references for choice of frequency range for double frequency radar.

Key words: radar cross-section, diffraction, differential reflectivity, rain intensity.

A. M. Linkova

ВИКОРИСТАННЯ МІКРОСТРУКТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ ДВОЧАСТОТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ДОЩУ

Наведено результати дослідження двочастотного методу вимірювання інтенсивності дощів з використанням трипараметричного гамма-розподілу крапель за розміром. Для усунення неоднозначності вимірювання параметрів розподілу за допомогою двочастотного радіолокаційного зондування запропоновано використовувати дані контактних вимірювань залежності параметрів гамма-розподілу від інтенсивності дощу. Наведено результати числового моделювання в межах теорії розсіяння Мі, які дозволяють оцінити застосованість запропонованого методу для полідисперсного середовища і сформулювати рекомендації щодо вибору діапазонів частот двочастотного радара.

Ключові слова: ефективна поверхня розсіяння, дифракція, диференціальна відбиваність, інтенсивність дощу.

Рукопись поступила 22.11.10 г.