

УДК 319.61.126

А.М. Линкова, Г.И. Хлопов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПЕРЕБОРА МИКРОСТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ ОСАДКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИХ ИНТЕНСИВНОСТИ

В работе предложен и исследован численный метод решения обратной задачи радиолокационного зондирования жидких осадков, основанный на переборе параметров гамма-распределения капель по размерам. Выполнено численное моделирование одночастотное и двухчастотное радиолокационное зондирование дождей для различных рабочих длин волн радара в диапазоне интенсивности до 25 мм/ч. Показано, что предложенный подход к решению обратной задачи в случае одночастотного зондирования не позволяет восстанавливать интенсивность дождя с достаточной точностью. При этом использование двухчастотного зондирования обеспечивает погрешность восстановления менее 22 %.

Ключевые слова: радар, интенсивность дождя, гамма-распределение.

Введение

Восстановление интенсивности жидких осадков с использованием радиолокационного зондирования относится к классу обратных задач, основанных на решении соответствующих интегральных уравнений путем параметризации закона распределения частиц по размерам. В частности, широко применяется трехпараметрическое гамма-распределение капель по размерам [1, 2], которое достаточно адекватно описывает микроструктуру жидких осадков и позволяет переформулировать задачу восстановления интенсивности дождя к определению параметров распределения.

При решении обратных задач дистанционного зондирования широко применяется численное решение интегральных уравнений путем перебора параметров модели [3]. Поэтому в работах [4, 5] использован подобный подход, одним из недостатков которого является значительная неоднозначность решения. В связи с этим в работах [4, 5] предложен ряд критериев для устранения указанной неоднозначности и показано, что достаточно эффективным является критерий близости, основанный на вычислении минимума среднеквадратического расстояния между измеренными и расчетными данными.

Подобный подход был реализован для активно-пассивного [4, 6] и активного трехчастотного зондирования [5], однако представляет интерес применение предложенного метода для решения обратной задачи восстановления интен-

сивности осадков для одночастотного и двухчастотного радиолокационного зондирования. Это тем более актуально, поскольку одночастотные и двухчастотные радары широко используются в существующей сети гидрометеорологических станций.

Таким образом, настоящая работа посвящена сравнительному анализу эффективности применения предложенного подхода в случае восстановления интенсивности дождя с помощью одночастотного и двухчастотного радиолокационного зондирования.

Восстановление интенсивности жидких осадков с помощью радиолокационного зондирования

В общем виде мощность сигнала, отраженного от пространственной ячейки дождя, описывается следующим выражением [7]:

$$P(R_i, \lambda) = \frac{C_R(\lambda)}{R_i^2} K(R_i, \lambda) \sigma_0(R_i, \lambda), \quad (1)$$

где

$C_R(\lambda) = P_t(\lambda) G_t(\lambda) G_r(\lambda) \lambda^2 \Delta\theta(\lambda) \Delta\varphi(\lambda) \Delta R(\lambda)$ – постоянная радара, которая описывает его энергетический потенциал; P_t – мощность передатчика; $G_{t,r}$ – коэффициент усиления передающей и приемной антенн соответственно; $\Delta\theta$ – ширина диаграммы направленности (ДН) антенны по азимуту; $\Delta\varphi$ – ширина ДН по углу места; $R_i = R_0 + (i-1)\Delta R$ – расстояние от радара до начала i -ой ячейки разрешения по дальности; $i = 1..N_R$ – номер ячейки разрешения по

дальности; $N_R = (R_f - R_0)/\Delta R$ – количество ячеек по дальности; ΔR – разрешение радара по дальности; R_0 – расстояние от РЛС до начала зоны дождя; R_f – расстояние от РЛС до конца зоны дождя $\sigma_0(R_i, \lambda)$ – удельная эффективная поверхность рассеяния (ЭПР); $K(R_i, \lambda)$ – коэффициент ослабления за счет затухания сигналов при распространении вдоль трассы. При этом выражение для коэффициента ослабления имеет следующий вид [8]:

$$K(R_i, \lambda) = \exp \left\{ -2 \int_{R_0}^{R_{i-1}} \alpha_{at}(r, \lambda) dr \right\}, \quad (2)$$

где $\alpha_{at}(R)$ – удельное поперечное сечение ослабления.

При этом удельная ЭПР и удельное поперечное сечение ослабления зависят от распределения капель по размерам и в случае однократного некогерентного рассеяния записываются следующим образом [9]:

$$\sigma_0(R_i, \lambda) = \int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda) N_0(R_i, D) dD; \quad (3)$$

$$\alpha_{at}(R_i, \lambda) = \int_0^\infty \sigma_{at}(D, \lambda) N_0(R_i, D) dD, \quad (4)$$

где D – диаметр капель; $\sigma_p(D, \lambda)$ – ЭПР одиночной капли; $\sigma_{at}(D, \lambda)$ – сечение ослабления одиночной капли; $N_0(R_i, D)$ – распределение капель по размерам.

Тогда с учетом (2)-(4) выражение для принятой мощности (1) запишется в таком виде:

$$P(R_i, \lambda) = \frac{C_R(\lambda) \int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda) N_0(R_i, D) dD}{R_i^2 \exp \left\{ 2 \int_{R_0}^{R_{i-1}} \int_0^\infty \sigma_{at}(D, \lambda) N_0(R_i, D) dD dR \right\}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) неявно зависит от интенсивности осадков через распределение капель по размерам [10]:

$$I(R_i) = \frac{\pi}{6} \int_0^\infty D^3 V(D) N_0(R_i, D) dD, \quad (6)$$

где $V(D)$ – скорость падения капель дождя.

Таким образом, восстановление интенсивности дождя сводится к решению интегрального уравнения (5). При этом для поиска корней указанного уравнения широко используется параметризация функции распределения капель по размерам, в качестве которой в настоящее время

достаточно часто применяется трехпараметрическое гамма-распределение [2]

$$N_0(R_i, D) = \frac{N(R_i) D^{\alpha(R_i)}}{\Gamma[\alpha(R_i)+1] \beta(R_i)^{\alpha(R_i)+1}} \exp \left(-\frac{D}{\beta(R_i)} \right), \quad (7)$$

где $N(R_i)$ – концентрация капель; $\beta(R_i)$, $\alpha(R_i)$ – микроструктурные характеристики дождя; $\Gamma[\alpha(R_i)+1]$ – гамма-функция.

Это позволяет перейти от интегрального уравнения (5) к трансцендентному уравнению относительно микроструктурных характеристик

$$P(R_i, \lambda, \alpha, \beta, N) = \frac{C_R(\lambda) \int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda) N_0(R_i, D, \alpha, \beta, N) dD}{R_i^2 \exp \left\{ 2 \int_{R_0}^{R_{i-1}} \int_0^\infty \sigma_{at}(D, \lambda) N_0(R_i, D, \alpha, \beta, N) dD dR \right\}}. \quad (8)$$

Таким образом, решая обратную задачу (8) относительно микроструктурных характеристик α, β, N , можно рассчитать интенсивность дождя согласно (6)

$$I(R_i, \alpha, \beta, N) = \frac{\pi}{6} \int_0^\infty D^3 V(D) N_0(R_i, D, \alpha, \beta, N) dD. \quad (9)$$

Численное решение обратной задачи радиолокационного зондирования жидких осадков

Для решения уравнения (8), в работе [4] авторами предложен численный метод, в котором поиск решений сводится к поиску нулей следующего уравнения:

$$P^r(\lambda_i, R_i) - P_{k,l,m}^{DB}(\lambda_i, R_i) = 0, \quad (10)$$

где $i = 1 \dots N_R$ – номер ячейки разрешения по дальности; $P^r(\lambda_i, R_i)$ – значение отраженной мощности, измеренное с помощью радара; $P_{k,l,m}^{DB}(\lambda_i, R_i)$ – значения принятой мощности, рассчитанные для значения параметра α_k , параметра β_l и концентрации N_m ; $k = 1 \dots K$; $l = 1 \dots L$; $m = 1 \dots M$; K, L, M – объем выборки по параметрам α, β, N соответственно.

При расчете отраженной мощности $P^{DB}(\lambda_i, R_i)$ параметры гамма-распределения меняются в таких пределах $\alpha \in (\alpha^{\min}, \alpha^{\max})$, $\beta \in (\beta^{\min}, \beta^{\max})$, $N \in (N^{\min}, N^{\max})$ и с дискретом

$\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta N$, где $\alpha^{\max}, \beta^{\max}, N^{\max}$ – максимальные значения параметров α, β, N соответственно; $\alpha^{\min}, \beta^{\min}, N^{\min}$ – минимальные значения параметров α, β, N соответственно. Тогда количество значений каждого параметра гамма-распределения определяется следующим образом: $K = \text{Int}\left(\frac{\alpha^{\max} - \alpha^{\min}}{\Delta\alpha}\right), L = \text{Int}\left(\frac{\beta^{\max} - \beta^{\min}}{\Delta\beta}\right), M = \text{Int}\left(\frac{N^{\max} - N^{\min}}{\Delta N}\right)$. В свою очередь, полный объем выборочных значений микроструктурных параметров N_{DB} определяется выражением $N_{DB} = KLM$.

В связи с дискретным характером изменения микроструктурных параметров можно найти только приближенное решение уравнения (10). Для этого варьируется значения параметра N , причем интервал $[N_m, N_{m+1}]$, внутри которого лежит искомое решение, определяется переменной $N_s = \frac{N_m + N_{m+1}}{2}$.

Точность решения (10) зависит от шага изменения параметров распределения при расчетах $P^{DB}(\lambda_1, R_i)$, однако уменьшение величины шага приводит к значительному увеличению вычислительных ресурсов и времени решения обратной задачи, в связи с чем определение оптимального шага изменения параметров рас-

пределения, как правило, приходится решать в каждом конкретном случае.

Тем не менее, рассмотренная процедура решения обратной задачи характеризуется существенной неоднозначностью, что требует использования дополнительных признаков для выбора единственного решения. В частности, в работе [4] авторами предложено использовать критерий близости в виде минимума функционала

$$\Delta_i = \min \left\{ \sqrt{[P_j^c(\lambda, R_i) - P^r(\lambda, R_i)]^2} \right\}, \quad (11)$$

который соответствует наилучшему решению в смысле близости j -го расчетного значения отраженной мощности $P_j^c(\lambda, R_i)$ к экспериментально измеренной величине принятой мощности $P^r(\lambda, R_i)$. При этом j -е значение принятой мощности $P_j^c(\lambda, R_i)$ рассчитывается путем подстановки j -го решения уравнения (10) в (8). Под j -м решением понимается свой набор параметров α_s, β_s, N_s , соответствующий значению $P_j^c(\lambda, R_i)$.

Данный критерий позволяет однозначно определить параметры распределения капель по размерам в каждой ячейке разрешения по дальности и рассчитать пространственный профиль интенсивности осадков согласно (9).

Описанный подход может быть использован также в случае многочастотного зондирования жидких осадков. Уравнение (8) описывает одностотное зондирование дождя, а двухчастотное зондирование описывается соответственно системой из двух подобных уравнений для каждой рабочей длины волны:

$$\left\{ \begin{aligned} P(R_i, \lambda_1, \alpha, \beta, N) &= \frac{C_R(\lambda_1) \int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda_1) N_0(R_i, D, \alpha, \beta, N) dD}{R_i^2 \exp \left\{ 2 \int_{R_0}^{R_{i-1}} \int_0^\infty \sigma_{ar}(D, \lambda_1) N_0(R_i, D, \alpha, \beta, N) dD dR \right\}}, \\ P(R_i, \lambda_2, \alpha, \beta, N) &= \frac{C_R(\lambda_2) \int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda_2) N_0(R_i, D, \alpha, \beta, N) dD}{R_i^2 \exp \left\{ 2 \int_{R_0}^{R_{i-1}} \int_0^\infty \sigma_{ar}(D, \lambda_2) N_0(R_i, D, \alpha, \beta, N) dD dR \right\}}, \end{aligned} \right. \quad (12)$$

При этом поиск корней системы (12) осуществляется аналогично решению уравнения (10):

$$\begin{cases} P^r(\lambda_1, R_i) - \{P_{k,l,m}^{DB}(\lambda_1, R_i)\} = 0, \\ P^r(\lambda_2, R_i) - \{P_{k,l,m}^{DB}(\lambda_2, R_i)\} = 0, \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta_i = \min \left\{ \sqrt{[P_j^c(\lambda_1, R_i) - P^r(\lambda_1, R_i)]^2 + [P_j^c(\lambda_2, R_i) - P^r(\lambda_2, R_i)]^2} \right\}. \quad (14)$$

Численное моделирование радиолокационного зондирования жидких осадков

Для оценки эффективности описанного метода восстановления интенсивности осадков по результатам радиолокационного зондирования рассмотрим в качестве примера результаты численного моделирования для одночастотного и двухчастотного зондирования дождей в диапазоне интенсивности от 1 мм/ч до 25 мм/ч и протяженностью зоны дождя 1 км.

При этом в качестве первого приближения рассматривается пространственно-однородный профиль дождя, когда его параметры не зависят от дальности $I(R) = \text{const}$, $\alpha(R) = \text{const}$, $\beta(R) = \text{const}$, $N(R) = \text{const}$.

Для расчета значений принятой мощности $P^{DB}(\lambda_i, R_i)$ использовали такие значения шага изменения микроструктурных характеристик $\Delta\alpha = 0,001$, $\Delta\beta = 0,0001$ мм, $\Delta N = 20$ м⁻³ и диапазон их изменения $\alpha^{\min} = 0$, $\alpha^{\max} = 7$, $\beta^{\min} = 0$, $\beta^{\max} = 0,7$ мм, $N^{\min} = 0$, $N^{\max} = 500$ м⁻³.

Моделирование измеренных значений принятой мощности $P^r(\lambda, R_i)$ с выхода радара проводили путем решения прямой задачи радиолокационного зондирования (8) для различных длин волн ($\lambda = 8,2$ мм, 3,2 см, 5,5 см, 10 см). Параметры гипотетического радиолокатора выбирали на основании опубликованных данных [11] и приведены в табл. 1. При этом микроструктурные параметры дождя α , β , N , соответствующие заданной интенсивности, определялись на основе модели [12] в виде зависимости параметров гамма-распределения от интенсивности, полученной с использованием данных контактных измерений [13, 14]:

$$\alpha = 3,8I_c^{-0,42}, \beta = 0,148I_c^{0,38} \text{ (мм)},$$

$$N = 495,45(1 - \exp(-I_c/3,17)) \text{ (м}^{-3}\text{)}, \quad (15)$$

где I_c – заданные значения интенсивности для модели дождя.

В результате, задавая значение интенсивно-

сти дождя I_c , можно рассчитать модельные значения параметров гамма-распределения α , β , N , на основе которых вычисляются удельные значения ЭПР (3) и ослабления (4). При этом ЭПР $\sigma_p(D, \lambda)$ и поперечное сечение ослабления $\sigma_{at}(D, \lambda)$ одиночной капли рассчитывается в приближении сферической формы с использованием известной теории Ми [15].

Для расчета интенсивности дождя (6) использовали выражение для скорости падения капель [16]:

$$V(D) = 9,65 - 10,3 \exp(-600D), \quad (16)$$

где диаметр капель измеряется в метрах, а скорость – в метрах в секунду, а погрешность восстановления интенсивности рассчитывалась согласно выражению:

$$\delta_I(R_i) = \left(\frac{I_r(R_i) - I_c(R_i)}{I_c(R_i)} \right) \cdot 100\%, \quad (17)$$

где $I_r(R_i)$ – восстановленные значения профиля интенсивности.

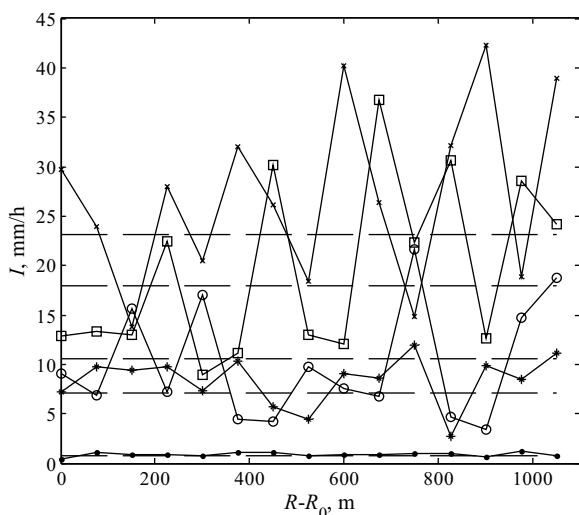
На рис. 1 приведен пример восстановленной зависимости интенсивности дождя в каждой ячейке дальности (сплошная) для равномерного профиля осадков (штриховая) при одночастотном зондировании в диапазонах рабочих длин волн 3,2 см (рис. 1, а) и 10 см (рис. 1, б). Как видно, в этом случае даже в сантиметровом диапазоне длин волн, когда ослабления радиоволн на трассе относительно мало, восстановление интенсивности дождя с достаточной для практики точностью не представляется возможным (максимальная погрешность в отдельных случаях превышает 100 %).

На рис. 2-3 показаны результаты восстановления интенсивности дождя с помощью двухчастотного зондирования на разных длинах волн радара. Как видно, применение двухчастотного зондирования позволяет повысить точность решения обратной задачи за счет увеличения количества измеряемых некоррелированных характеристик рассеянного сигнала.

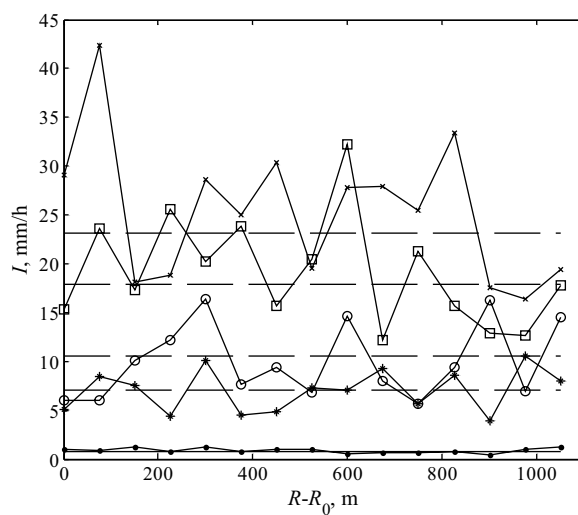
Таблица 1

Параметры радара

Параметр	$\lambda = 8,2 \text{ мм}$	$\lambda = 3,2 \text{ см}$	$\lambda = 5,5 \text{ см}$	$\lambda = 10 \text{ см}$
Мощность передатчика, кВт	20	90	150	200
Усиление антенны, дБ	60	45	42	36,5
Ширина ДН по углу места на уровне -3дБ, град	0,2	0,7	1,1	2
Ширина ДН по азимуту на уровне -3дБ, град	0,2	0,7	1,1	2
Разрешение по дальности, м	75	75	75	75
Постоянная радара	0,409	0,519	1,362	1,817

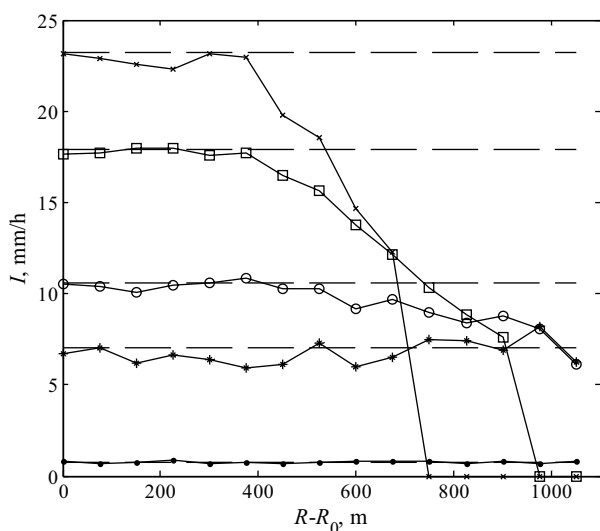


а)

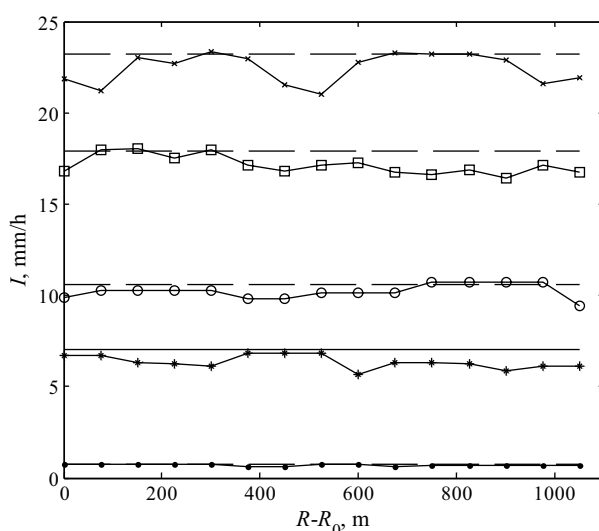


б)

Рис. 1. Восстановленный (сплошная) и заданный (штриховая) профили интенсивности, полученные с помощью одночастотного зондирования на длинах волн $\lambda_1 = 3,2 \text{ см}$ (а) и $\lambda_2 = 10 \text{ см}$ (б): точки – $I = 1 \text{ мм/ч}$, звездочки – $I = 7 \text{ мм/ч}$, кружочки – $I = 11 \text{ мм/ч}$, квадратики – $I = 18 \text{ мм/ч}$, крестики – $I = 23 \text{ мм/ч}$



а)



б)

Рис. 2. Восстановленный (сплошная) и заданный (штриховая) профили интенсивности, полученные с помощью двухчастотного зондирования на длинах волн $\lambda_1 = 8,2 \text{ мм}$ и $\lambda_2 = 3,2 \text{ см}$ (а) и $\lambda_1 = 3,2 \text{ см}$ и $\lambda_2 = 5,5 \text{ см}$ (б): точки – $I = 1 \text{ мм/ч}$, звездочки – $I = 7 \text{ мм/ч}$, кружочки – $I = 11 \text{ мм/ч}$, квадратики – $I = 18 \text{ мм/ч}$, крестики – $I = 23 \text{ мм/ч}$

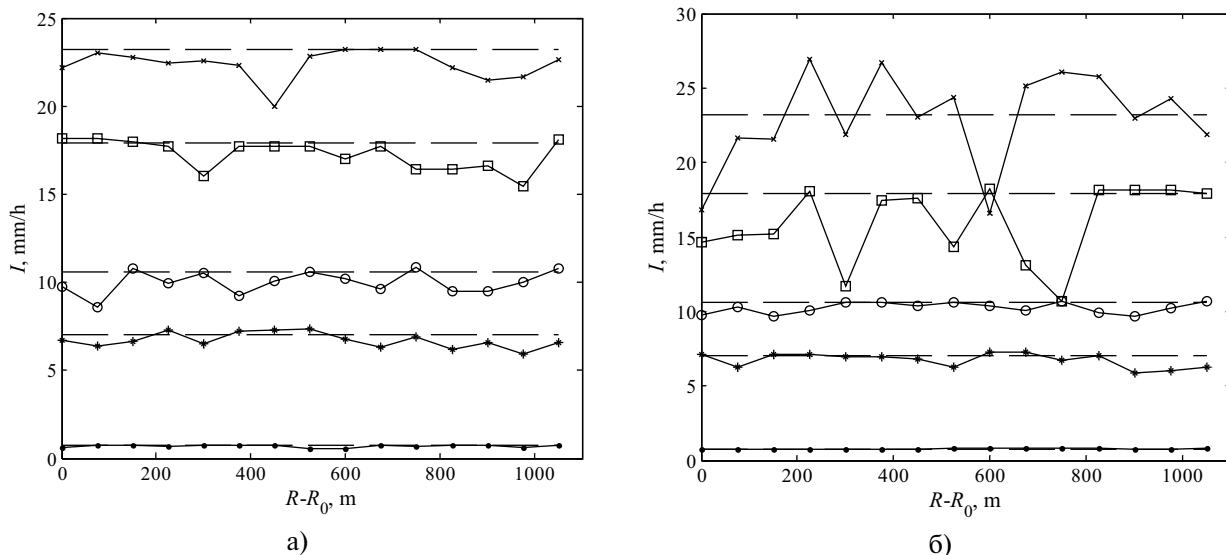


Рис. 3. Восстановленный (сплошная) и заданный (штриховая) профили интенсивности, полученные с помощью двухчастотного зондирования на длинах волн $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 10$ см (а) и $\lambda_1 = 5,5$ см и $\lambda_2 = 10$ см (б): точки – $I = 1$ мм/ч, звездочки – $I = 7$ мм/ч, кружочки – $I = 11$ мм/ч, квадратики – $I = 18$ мм/ч, крестики – $I = 23$ мм/ч

Как и в случае трехчастотного зондирования [5], использование миллиметрового диапазона для многочастотного зондирования приводит к сильному возрастанию ослабления сигнала на больших дальностях и для интенсивных осадков, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на результатах восстановления интенсивности. Например, на рис. 2, а показано, что погрешность измерения интенсивности с использованием рабочих длин волн $\lambda_1 = 8,2$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см начинает резко возрастать на дальностях больше 500 м при интенсивности более 10 мм/ч.

Поэтому применение более длинноволновых диапазонов позволяет снизить влияние ослабления и уменьшить ошибку восстановления интенсивности, как показано на рис. 2, б и рис. 3, а, где приведены результаты восстановления интенсивности для длин волн $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 5,5$ см (рис. 2, б), а также $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 10$ см (рис. 3, а).

Видно, что в обоих случаях результаты практически одинаковы и максимальная ошибка восстановления интенсивности не превышает 20 % (рис. 2, б) и 22 % (рис. 3, а). Кроме того, численное моделирование двухчастотного зондирования было проведено для длин волн $\lambda_1 = 5,5$ см и $\lambda_2 = 10$ см (рис. 3, б). В этом случае максимальная ошибка восстановления интенсивности достигает 40 %, что связано с рэлеевским характером рассеяния сигналов в обоих частотных диапазонах, когда отношение сигнал-шум обратно пропорционально четвертой степени

длины волны, что приводит к ухудшению точности восстановления интенсивности.

Сравнение результатов двухчастотного зондирования (рис. 2, б и рис. 3, а) с данными трехчастотного зондирования [5] ($\lambda_1 = 3,2$ см, $\lambda_2 = 5,5$ см и $\lambda_3 = 10$ см) показывает, что в случае двухчастотного зондирования максимальная ошибка восстановления интенсивности увеличивается примерно в 3 раза, однако остается в допустимых для практики пределах (22 %). Это говорит о том, что использование предложенного подхода к решению обратной задачи при двухчастотном зондировании вполне оправдано и представляет значительный практический интерес, если учесть, что большинство штатных метеолокаторов работает в двухчастотном режиме (типовые радары МРЛ-1 – МРЛ-5).

Выводы

Проведенное исследование решения обратных задач радиолокационного зондирования жидких осадков с помощью метода перебора их микроструктурных характеристик позволяет сделать следующие выводы:

- использование предложенного метода при одночастотном зондировании не обеспечивает достаточной точности восстановления интенсивности жидких осадков (ошибки превышают 100 %).

- двухчастотное зондирование с использованием длин волн $\lambda_1 = 8,2$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см приводит к возрастанию погрешности восстановления

на больших дальностях и для интенсивных дождей в связи с сильным ослаблением сигналов миллиметрового диапазона.

- использование комбинаций длин волн $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 5,5$ см, а также $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 10$ см позволяет снизить влияние ослабления сигналов и обеспечивает максимальную ошибку восстановления интенсивности не более 22 %, которая, тем не менее, хуже в 3 раза, чем погрешность при трехчастотном зондировании.

- использование длин волн $\lambda_1 = 5,5$ см и $\lambda_2 = 10$ см при двухчастотном зондировании приводит к возрастанию ошибки восстановления интенсивности в связи с ухудшением отношения сигнал-шум для этих диапазонов длин волн (ЭПР частиц $\sim 1/\lambda^4$).

* *

1. Айвазян Г.М. Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в облаках. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 480 с.
2. Zang G, Vivekanandan J., Brandes E.A. The shape-slope relation in observed gamma rain drop size distribution: statistical error or useful information? // J. of Atmospheric and Ocean Technology. – 2003. – V. 20. – P. 1106-1119.
3. Olson W.S., Kummerow C.D., Heymsfield G.M., Giglio L. A method for combined passive-active microwave retrievals of cloud and precipitation profiles // J. of Applied Meteorology. – 1994. – Vol. 35. – P. 1763-1789.
4. Линкова А.М., Хлопов Г.И. Восстановление микроструктурных характеристик жидких осадков с помощью активно-пассивного зондирования // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2015. – Вып. 576. – С. 62-80.
5. Линкова А. М., Хлопов Г.И. Трехчастотное зондирование жидких осадков // Радиофизика и электроника. – 2016 (в печати).
6. Линкова А. М., Хлопов Г.И. Восстановление интенсивности осадков с помощью многочастотного активно-пассивного зондирования // Радиофизика и электроника. – 2014. – Вып. 5(19), №3. – С. 26-32.
7. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. – 344 с.
8. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. и др. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 232 с.
9. Розенберг В. И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. – Л.: Гидрометеоздат, 1972 г.
10. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеоздат, 1981. – 512 с.
11. Бочарников Н.В., Брылев Г.Б., и др. «Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка». – С.Пб: Гидрометеоздат. – 2007. – 236 с.
12. Линкова А. М. Использование микроструктурных параметров для обработки данных двухчастотного измерения интенсивности дождя // Радиофизика и электроника. – X., 2011. – Т. 2 (16), №1. – С. 33-38.
13. Литвинов И. В. Структура атмосферных осадков. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 153 с.
14. Kelkar V.N. Size distribution of raindrops, III // Indian J. Meteorol. Geophys. – 1961. – V. 12, № 4. – P. 553
15. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. – М.-Л.: ГИТЛ, 1951. – 288 с.
16. Gunn R., Kinzer G.D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air // J. Appl. Met. – 1949. – V. 6. – P. 243-248.

Институт радиофизики и электроники им А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

А.М. Лінкова, Г.І. Хлопов

Використання методу перебору мікроструктурних параметрів рідких опадів для розв'язання обернених задач відновлення їх інтенсивності

Запропоновано й досліджено чисельний метод розв'язання оберненої задачі радіолокаційного зондування рідких опадів, який засновано на переборі параметрів гамма-розподілу крапель за розмірами. Виконано чисельне моделювання одночастотного й двочастотного радіолокаційного зондування дощів для різних робочих довжин хвиль радара в діапазоні інтенсивності до 25 мм/год. Показано, що запропонований підхід до розв'язання оберненої задачі в разі одночастотного зондування не дозволяє відновлювати інтенсивність дощу з достатньою точністю. А використання двочастотного зондування забезпечує похибку відновлення менше ніж 22 %.

Ключові слова: радар, інтенсивність дощу, гамма-розподіл.

A.M. Linkova, G.I. Khlopov

Usage of exhaustive search of microstructure parameters of liquid precipitation for solution of inverse problem of rain intensity retrieval

Numerical method for solution of inverse problem of radar remote sensing of liquid precipitation is proposed and studied, which is based on exhaustive search of parameters of Gamma drop size distribution. Numerical simulation of monofrequency and double frequency remote sensing of rains

is performed for different operating wavelengths of radar in the range of intensity up to 25 mm/h. It is shown that proposed approach for solution of inverse problem in the case of monofrequency remote radar sensing does not permit to retrieve rain intensity with adequate accuracy. At that double frequency radar sensing provides retrieval error less than 22 %.

Keywords: radar, rain intensity, Gamma distribution.