

**А. М. Линкова, Г. И. Хлопов**

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

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

E-mail: [annlinkova@mail.ru](mailto:annlinkova@mail.ru)

## ТРЕХЧАСТОТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЖИДКИХ ОСАДКОВ

Исследование интегральных и микроструктурных параметров жидких осадков имеет важное практическое значение для решения многих проблем народного хозяйства. Мониторинг интенсивности дождя необходим для проектирования канализационных систем и многих инженерных сооружений, а также оказывает существенное влияние на производительность сельского хозяйства. Радиолокационные методы исследования жидких осадков позволяют измерять параметры дождей на больших площадях в реальном масштабе времени, что более предпочтительно по сравнению с контактными методами на основе дождемеров и пловниографов. В статье предложен и исследован трехчастотный метод радиолокационного зондирования жидких осадков, позволяющий восстанавливать пространственный профиль параметров дождей. Приведены результаты численного моделирования трехчастотного зондирования жидких осадков, полученные для разных наборов рабочих длин волн радара в диапазоне интенсивности 0...30 мм/ч. Показано, что использование миллиметрового диапазона длин волн нецелесообразно в связи с сильным ослаблением мощности сигнала на больших расстояниях и для больших значений интенсивности. Применение более длинноволнового диапазона позволяет снизить влияние ослабления и уменьшить ошибки восстановления параметров дождя (максимальная ошибка восстановления интенсивности не превышает 7%). Ил. 7. Табл. 1. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** интенсивность дождя, эффективная поверхность рассеяния, отраженная мощность излучения радара, гамма-распределение.

Исследование параметров жидких осадков имеет важное практическое значение для решения ряда задач народного хозяйства, включая мониторинг интенсивности дождя для управления гидрологическими и инженерными сооружениями, обеспечения безопасности полетов, а также повышения эффективности сельского хозяйства.

Использование дистанционного зондирования позволяет проводить мониторинг дождей на больших площадях и в реальном масштабе времени, в связи с чем большой интерес представляет разработка методов решения обратных задач. Следует отметить, что наиболее распространены подходы, основанные на измерении двух независимых характеристик рассеянных от дождя сигналов, что повышает надежность результатов дистанционного зондирования. В частности, к ним относятся двухчастотные измерения мощности сигнала [1], поляризационные измерения мощности сигнала на двух поляризациях [2] и активно-пассивное зондирование на основе одновременного измерения мощности отраженного сигнала и радиояркостной температуры осадков [3]. Однако даже в случае декорреляции измеряемых характеристик рассеянных сигналов подобные подходы не обеспечивают однозначного восстановления параметров осадков, что приводит к значительным ошибкам измерения интегральных величин (интенсивность, водность и др.).

В работах [4, 5] предложен метод восстановления микроструктурных характеристик дождя с помощью активно-пассивного зондирования на основе двухчастотного радара и радиометра, в котором в качестве распределения капель по размерам использовалось трехпараметрическое гамма-распределение [6]. При этом предполагалось, что

одновременное измерение трех независимых характеристик сигнала позволит однозначно восстанавливать все параметры распределения. Однако детальный анализ показал, что предложенное решение обратной задачи характеризуется существенной неоднозначностью, для устранения которой предложены и исследованы различные критерии единственности решения. Это позволило уменьшить ошибки восстановления параметров дождя до 5% для интенсивности более 5 мм/ч.

Следует отметить, что указанные результаты получены для модели пространственно-однородного дождя (параметры распределения капель по размерам постоянны во всей зоне дождя), так как радиометр измеряет суммарную радиояркостную температуру всех объектов внутри луча антенны и не обеспечивает, в отличие от радара, разрешение по дальности. Это существенно ограничивает возможности метода, так как интенсивность реальных дождей может существенно меняться с расстоянием, особенно в случае ливневых осадков, для которых необходимо учитывать пространственный профиль их параметров.

Предложенный в [4, 5] подход к решению обратной задачи можно использовать для восстановления пространственного профиля параметров дождя в случае активного радиолокационного зондирования на трех частотах, чему и посвящена настоящая работа.

**1. Решение обратной задачи дистанционного зондирования жидких осадков с пространственно-однородным профилем интенсивности.** Активное радиолокационное зондирование основано на измерении мощности сигналов, отраженных от зоны дождя [7]:

$$P(R_i, \lambda) = \frac{P_T(\lambda) G_T(\lambda) G_R(\lambda) \lambda^2 V_{ef}(R_i, \lambda) \sigma_0(R_i, \lambda)}{R_i^4 K(R_i, \lambda)}, \quad (1)$$

где  $P_T$  – мощность передатчика;  $V_{ef}(R_i, \lambda)$  – эффективный рассеивающий объем;  $R_i = R_0 + (i-1)\Delta R$  – расстояние от радиолокационной станции (РЛС) до рассеивающего объема;  $i = 1 \dots N_R$ ;  $N_R = (R_1 - R_0)/\Delta R$  – количество ячеек по дальности;  $\Delta R$  – разрешение радара по дальности;  $G_T(\lambda)$  – усиление передающей антенны;  $R_0$  – расстояние от РЛС до начала зоны дождя;  $R_1$  – расстояние от РЛС до конца зоны дождя (рис. 1);  $G_R(\lambda)$  – усиление приемной антенны;  $\lambda$  – длина волны;  $\sigma_0(R_i, \lambda)$  – удельная эффективная поверхность рассеяния (ЭПР);  $K(R_i, \lambda)$  – коэффициент ослабления сигнала при распространении на трассе:

$$K(R_i, \lambda) = \exp \left\{ 2 \int_{R_0}^{R_i} \alpha_{at}(R, \lambda) dR \right\}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{at}(R, \lambda)$  – удельное ослабление сигнала.

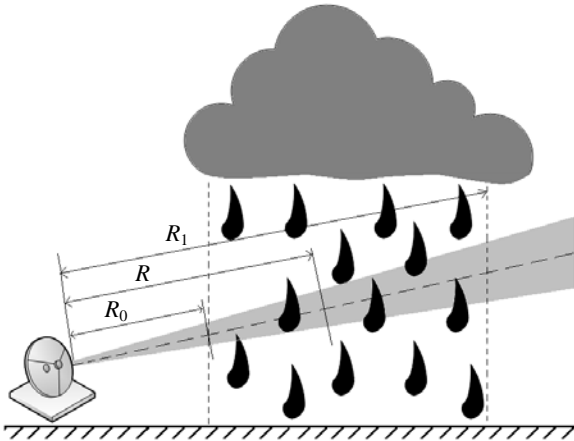


Рис. 1. Радиолокационное зондирование дождя

При этом эффективный рассеивающий объем записывается в следующем виде:

$$V_{ef}(R_i, \lambda) = \int_0^\infty \frac{dR}{R^2} \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi F_T^2(\theta, \varphi) F_R^2(\theta, \varphi) \approx \Delta\theta(\lambda) \Delta\varphi(\lambda) \Delta R(\lambda) R_i^2, \quad (3)$$

где  $F_{T,R}^2(\theta, \varphi)$  – нормированная диаграмма направленности (ДН) передающей и приемной антенн по мощности;  $\theta$  – азимут;  $\Delta\varphi$  – угол места;  $\Delta\theta$  – ширина ДН антенны по азимуту;  $\Delta\varphi$  – ширина ДН по углу места.

В выражениях (1), (2) удельная ЭПР и удельное ослабление зависят от микроструктур-

ных характеристик дождя (параметров распределения капель по размерам) и в случае однократного некогерентного рассеяния записываются в следующем виде [8]:

$$\sigma_0(R_i, \lambda) = \int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda) N(R_i, D) dD; \quad (4)$$

$$\alpha_{at}(R_i, \lambda) = \int_0^\infty \sigma_{at}(D, \lambda) N(R_i, D) dD, \quad (5)$$

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

В результате система интегральных уравнений для трехчастотного радиолокационного зондирования дождя записывается в виде

$$\begin{cases} P(R_i, \lambda_1) = \frac{C_R(\lambda_1) \sigma_0(R_i, \lambda_1)}{R_i^2 K(R_i, \lambda_1)}, \\ P(R_i, \lambda_2) = \frac{C_R(\lambda_2) \sigma_0(R_i, \lambda_2)}{R_i^2 K(R_i, \lambda_2)}, \\ P(R_i, \lambda_3) = \frac{C_R(\lambda_3) \sigma_0(R_i, \lambda_3)}{R_i^2 K(R_i, \lambda_3)}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $C_R(\lambda_i) = P_T(\lambda) G_T(\lambda) G_R(\lambda) \lambda^2 \Delta\theta(\lambda) \Delta\varphi(\lambda) \Delta R(\lambda)$ .

По аналогии с работами [4, 5], в качестве распределения капель по размерам используется трехпараметрическое гамма-распределение [6]:

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

где  $N_T(R_i)$  – концентрация капель;  $\beta(R_i)$ ,  $\alpha(R_i)$  – параметры распределения;  $\Gamma(\alpha(R_i) + 1)$  – гамма-функция [9].

В общем случае параметры распределения капель по размерам зависят от расстояния, однако в данной работе рассматривается случай пространственно-однородного дождя, когда микроструктурные параметры распределения не зависят от расстояния и угловых координат:  $\alpha(R) = \alpha_c = \text{const}$ ,  $\beta(R) = \beta_c = \text{const}$ ,  $N(R) = N_{Tc} = \text{const}$ , в связи с чем  $\alpha_{ab}(R) = \alpha_{ab}^c = \text{const}$ ,  $\sigma_0(R) = \sigma_0^c = \text{const}$ , а выражение (2) запишется следующим образом:

$$K(R_i, \lambda) = \exp(2(R_{i-1} - R_0) \alpha_{at}^c(\lambda, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc})). \quad (8)$$

Тогда с учетом (7) и (8) система интегральных уравнений (6) преобразуется в систему следующих трансцендентных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(R_i, \lambda_1) = C_R(\lambda_1) \sigma_0(\lambda_1, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}) \times \\ \times \frac{\exp(-2(R_{i-1} - R_0) \alpha_{at}^c(\lambda_1, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}))}{R_i^2}, \\ P(R_i, \lambda_2) = C_R(\lambda_2) \sigma_0(\lambda_2, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}) \times \\ \times \frac{\exp(-2(R_{i-1} - R_0) \alpha_{at}^c(\lambda_2, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}))}{R_i^2}, \\ P(R_i, \lambda_3) = C_R(\lambda_3) \sigma_0(\lambda_3, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}) \times \\ \times \frac{\exp(-2(R_{i-1} - R_0) \alpha_{at}^c(\lambda_3, \alpha_c, \beta_c, N_{Tc}))}{R_i^2}. \end{array} \right. \quad (9)$$

В результате решение обратной задачи для однородного профиля дождя сведено к решению системы уравнений (9) в каждой ячейке разрешения по дальности относительно микроструктурных параметров с использованием результатов дистанционного зондирования в виде значений мощности отраженных сигналов в каждом из каналов.

**2. Численное моделирование трехчастотного зондирования дождей.** В отличие от активно-пассивного зондирования [4, 5], для которого использовалась база данных значений принятой мощности радара и радиояркостной температуры радиометра, в данном случае для восстановления параметров дождя создана база данных значений удельного ЭПР  $\sigma_0^{БД}(\lambda_n)$  (4) и удельного ослабления  $\alpha_{at}^{БД}(\lambda_n)$  (5), рассчитанных для рабочих частот радара и разных значений параметров гамма-распределения (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_0^{БД}(\lambda_1) = \sigma_0(\lambda_1, \alpha_c^k, \beta_c^l, N_{Tc}^m), \\ \sigma_0^{БД}(\lambda_2) = \sigma_0(\lambda_2, \alpha_c^k, \beta_c^l, N_{Tc}^m), \\ \sigma_0^{БД}(\lambda_3) = \sigma_0(\lambda_3, \alpha_c^k, \beta_c^l, N_{Tc}^m), \\ \alpha_{at}^{БД}(\lambda_1) = \alpha_{at}(\lambda_1, \alpha_c^k, \beta_c^l, N_{Tc}^m), \\ \alpha_{at}^{БД}(\lambda_2) = \alpha_{at}(\lambda_2, \alpha_c^k, \beta_c^l, N_{Tc}^m), \\ \alpha_{at}^{БД}(\lambda_3) = \alpha_{at}(\lambda_3, \alpha_c^k, \beta_c^l, N_{Tc}^m), \end{array} \right. \quad (10)$$

где  $1 \leq k \leq K; \quad 1 \leq l \leq L; \quad 1 \leq m \leq M;$

$$K = \text{Int} \left( \frac{\alpha_c^{\max} - \alpha_c^{\min}}{\Delta \alpha_c} \right), \quad L = \text{Int} \left( \frac{\beta_c^{\max} - \beta_c^{\min}}{\Delta \beta_c} \right),$$

$$M = \text{Int} \left( \frac{N_{Tc}^{\max} - N_{Tc}^{\min}}{\Delta N_{Tc}} \right) - \text{количество значений}$$

параметров  $\alpha_c, \beta_c, N_{Tc}$  соответственно;  $\alpha_c^{\max}, \beta_c^{\max}, N_{Tc}^{\max}$  – максимальные значения параметров  $\alpha_c, \beta_c, N_{Tc}$  соответственно;  $\alpha_c^{\min}, \beta_c^{\min}, N_{Tc}^{\min}$  – минимальные значения параметров  $\alpha_c, \beta_c, N_{Tc}$  соответственно;  $\Delta \alpha_c, \Delta \beta_c, \Delta N_{Tc}$  – шаги изменения параметров  $\alpha_c, \beta_c, N_{Tc}$  соответственно.

При построении базы данных использовались следующие пределы изменения параметров гамма-распределения, которые соответствуют полному диапазону реальных интенсивностей дождя:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_c^{\min} = 0, \quad \alpha_c^{\max} = 7, \quad \beta_c^{\min} = 0, \quad \beta_c^{\max} = 0,7 \text{ мм}, \\ N_{Tc}^{\min} = 0, \quad N_{Tc}^{\max} = 500 \text{ м}^{-3}. \end{array} \right. \quad (11)$$

Размер базы данных зависит от диапазона и шага изменения параметров распределения и определяется выражением:

$$N_{БД} = 3KLM. \quad (12)$$

Поиск решения системы уравнений (9) сводится к поиску общих нулей трех уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{изм}}(\lambda_1, R_i) - P_{k,l,m}(\lambda_1, R_i) = 0, \\ P_{\text{изм}}(\lambda_2, R_i) - P_{k,l,m}(\lambda_2, R_i) = 0, \\ P_{\text{изм}}(\lambda_3, R_i) - P_{k,l,m}(\lambda_3, R_i) = 0, \end{array} \right. \quad (13)$$

где  $i = 1 \dots N_R; \quad k = 1 \dots K; \quad l = 1 \dots L; \quad m = 1 \dots M;$   
 $P_{\text{изм}}(\lambda, R_i)$  – измеренное значение отраженной мощности радара для  $R_i$ ;  $P_{k,l,m}(\lambda, R_i)$  – значения принятой мощности, рассчитанные согласно сформированной базе данных удельных ЭПР и удельных ослаблений для соответствующего расстояния  $R_i$ .

Отметим, что из-за дискретности базы данных можно найти только приближенное решение системы уравнений (13), которое определяется путем вычисления среднего значения между двумя соседними точками разного знака для функций в левой части уравнений (13). При этом точность решения указанной системы уравнений зависит от шага изменения параметров распределения базы данных. Однако следует учитывать, что уменьшение величины шага приводит к увеличению размеров базы данных (12), что требует значительного увеличения вычислительных ресурсов при решении обратной задачи.

С учетом приведенных выражений численное моделирование трехчастотного зондирования жидких осадков проводилось в диапазоне интенсивностей от 1 до 30 мм/ч для зоны дождя протяженностью 1 км, а для решения системы (9) использовалась база данных со следующими параметрами:  $\Delta \alpha_c = 0,001, \Delta \beta_c = 0,0001, \Delta N_{Tc} = 20$  и  $L = M = 7000, K = 26$ .

Измеренные значения мощности радара рассчитывались путем решения прямой задачи радиолокационного зондирования (9) для следующих рабочих длин волн радара:  $\lambda_1 = 8,2$  мм,  $\lambda_2 = 3,2$  см и  $\lambda_3 = 5,5$  см, а остальные параметры гипотетического радиолокатора приведены в таблице.

Параметры радара

Параметр	Длина волны		
	8,2 мм	3,2 см	5,5 см
Мощность передатчика, кВт	20	90	150
Усиление антенны, дБ	60	45	43
Ширина ДН по углу места на уровне – 3дБ, град	0,2	0,7	1,1
Ширина ДН по азимуту на уровне – 3дБ, град	0,2	0,7	1,1
Разрешение по дальности, м	75	75	75
Постоянная радара	0,409	0,519	1,362

Как показали результаты вычислений, рассматриваемая обратная задача характеризуется большим количеством решений, как и в случае активно-пассивного зондирования [4, 5]. В частности, на рис. 2 приведена зависимость количества решений  $n_s$  от расстояния для нескольких значений интенсивности.

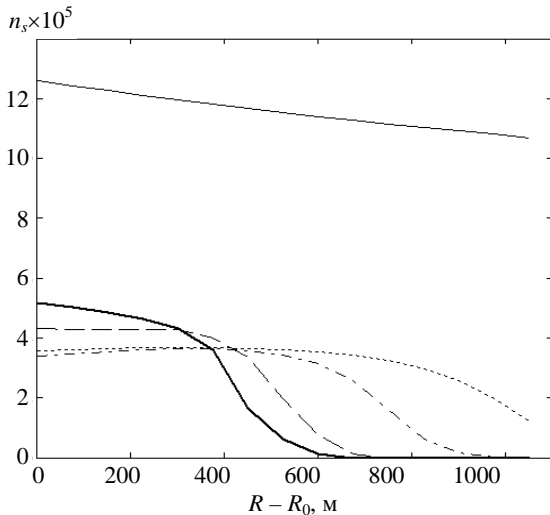


Рис. 2. График зависимости количества решений системы (12) от расстояния  $R$ : сплошная кривая –  $I = 1$  мм/ч; пунктирная –  $I = 7$  мм/ч; штрихпунктирная –  $I = 11$  мм/ч; штриховая –  $I = 21$  мм/ч; сплошная жирная –  $I = 29$  мм/ч

Для выбора единственного решения в работе [4] предложен критерий близости, основанный на вычислении минимального среднеквадратичного расстояния между измеренными значениями принятой мощности и значениями мощности, рассчитанными с использованием базы данных (12) в каждой ячейке разрешения по дальности:

$$\Delta_i = \min \sqrt{\begin{matrix} (P_{k,l,m}(R_i, \lambda_1) - P_{изм}(R_i, \lambda_1))^2 + \\ + (P_{k,l,m}(R_i, \lambda_2) - P_{изм}(R_i, \lambda_2))^2 + \\ + (P_{k,l,m}(R_i, \lambda_3) - P_{изм}(R_i, \lambda_3))^2, \end{matrix}} \quad (14)$$

где  $i = 1 \dots N_R$ ;  $k = 1 \dots K$ ;  $l = 1 \dots L$ ;  $m = 1 \dots M$ .

Данный критерий позволяет однозначно определить параметры распределения капель по размерам и рассчитать интенсивность осадков согласно [10]:

$$I(R_i) = \frac{\pi}{6} \int_0^\infty D^3 V(D) N(R_i, D) dD, \quad (15)$$

где  $V(D)$  – скорость падения капель дождя [11]  $V(D) = 9,65 - 10,3 \exp(-600D)$ , причем диаметр капели измеряется в метрах, а скорость – в метрах в секунду.

На рис. 3 приведена погрешность восстановления интенсивности дождя  $\delta_I = \left( \frac{I_r - I_m}{I_m} \right) \cdot 100 \%$

после использования критерия близости (14), где  $I_r$  – восстановленные значения интенсивности,  $I_m$  – заданные значения интенсивности для модели дождя.

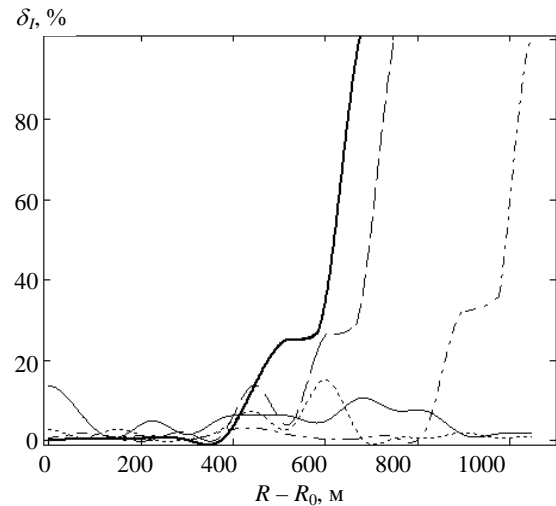


Рис. 3. График зависимости ошибки восстановления интенсивности от расстояния: сплошная кривая –  $I = 1$  мм/ч, пунктирная –  $I = 7$  мм/ч, штрихпунктирная –  $I = 11$  мм/ч, штриховая –  $I = 21$  мм/ч, сплошная жирная –  $I = 29$  мм/ч

Из графика видно, что с ростом интенсивности и расстояния в дожде ошибка измерений резко возрастает. Как показал проведенный анализ, увеличение погрешности пропорционально ослаблению сигнала за счет затухания в осадках на длине трассы. Действительно, как показано на рис. 4, где приведена зависимость ослабления сигнала от расстояния для рабочих длин волн и интенсивности дождя  $I = 29$  мм/ч, использование миллиметрового диапазона для многочастотного зондирования дождя связано с определенными ограничениями в связи с влиянием затуханием сигнала в дожде.

Сделанные выводы подтверждаются результатами моделирования, показанные на рис. 5,

где приведена аналогичная зависимость ошибок восстановления интенсивности от расстояния без учета ослабления ( $K(\lambda_{1,2,3}, R) = 1$ ). Как видно, ошибка восстановления не превышает 5% и не зависит от расстояния в зоне дождя, в связи с чем форма профиля интенсивности дождя воспроизводится без искажений.

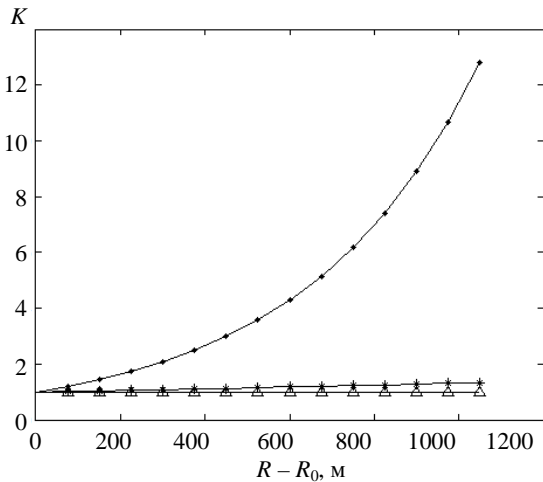


Рис. 4. График зависимости ослабления сигнала от расстояния для трех длин волн радара и для интенсивности  $I = 29$  мм/ч: точки –  $\lambda = 8,2$  мм, звездочки –  $\lambda = 3,2$  см, треугольники –  $\lambda = 5,5$  см

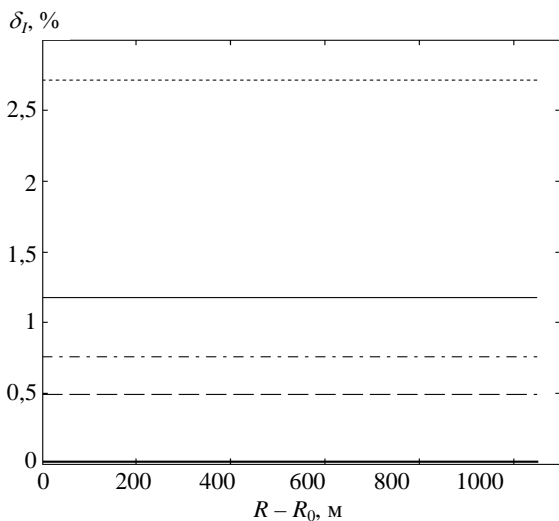


Рис. 5. График зависимости ошибки восстановления интенсивности от расстояния без учета ослабления: сплошная кривая –  $I = 1$  мм/ч, пунктирная –  $I = 7$  мм/ч, штрихпунктирная –  $I = 11$  мм/ч, штриховая –  $I = 21$  мм/ч, сплошная жирная –  $I = 29$  мм/ч

Также получены аналогичные зависимости для параметров распределения капель по размерам  $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ ,  $N_{Tc}$ , которые подтвердили нецелесообразность использования диапазона радиоволн с большим затуханием в осадках для предложенного метода дистанционного зондирования.

Одним из путей уменьшения влияния ослабления на результаты решения обратной зада-

чи является использование более длинноволновых диапазонов радиоволн. В частности, проведено численное моделирование с использованием рабочих длин волн  $\lambda_1 = 3,2$  см,  $\lambda_2 = 5,5$  см и  $\lambda_3 = 10$  см, результаты которого приведены на рис. 6 в виде графика зависимости ошибки восстановления интенсивности от расстояния. Как видно, использование более длинных длин волн позволяет снизить влияние ослабления и тем самым уменьшить ошибки восстановления интенсивности.

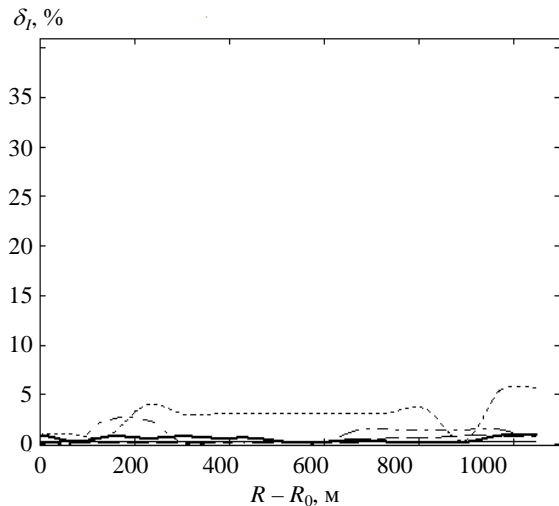


Рис. 6. График зависимости ошибки восстановления интенсивности дождя от расстояния с учетом ослабления: сплошная кривая –  $I = 1$  мм/ч, пунктирная –  $I = 7$  мм/ч, штрихпунктирная –  $I = 11$  мм/ч, штриховая –  $I = 21$  мм/ч, сплошная жирная –  $I = 29$  мм/ч

При этом предложенная процедура обработки отраженных сигналов трехчастотного зондирования позволяет восстанавливать не только интенсивность дождя, но также его микроструктурные характеристики (7). На рис. 7 приведены результаты восстановления параметров гамма-распределения капель по размерам (рис. 7, а – параметр  $\alpha_c$ , рис. 7, б – параметр  $\beta_c$ , рис. 7, в – концентрация  $N_{Tc}$ ). В отличие от интенсивности дождя, которая является интегральной характеристикой и измеряется с достаточной для практики точностью (рис. 6), восстановление микроструктурных характеристик связано с особенностями используемой модели и отличается большей погрешностью (рис. 7). Тем не менее, в отличие от активно-пассивного зондирования [4, 5], предложенный метод трехчастотного зондирования позволяет измерять пространственный профиль микроструктурных параметров, интенсивности и водности дождя. В данном случае не требуется использование априорных данных в виде усредненной эмпирической модели (например, [12, 13]), что важно с точки зрения достоверности получаемых данных.

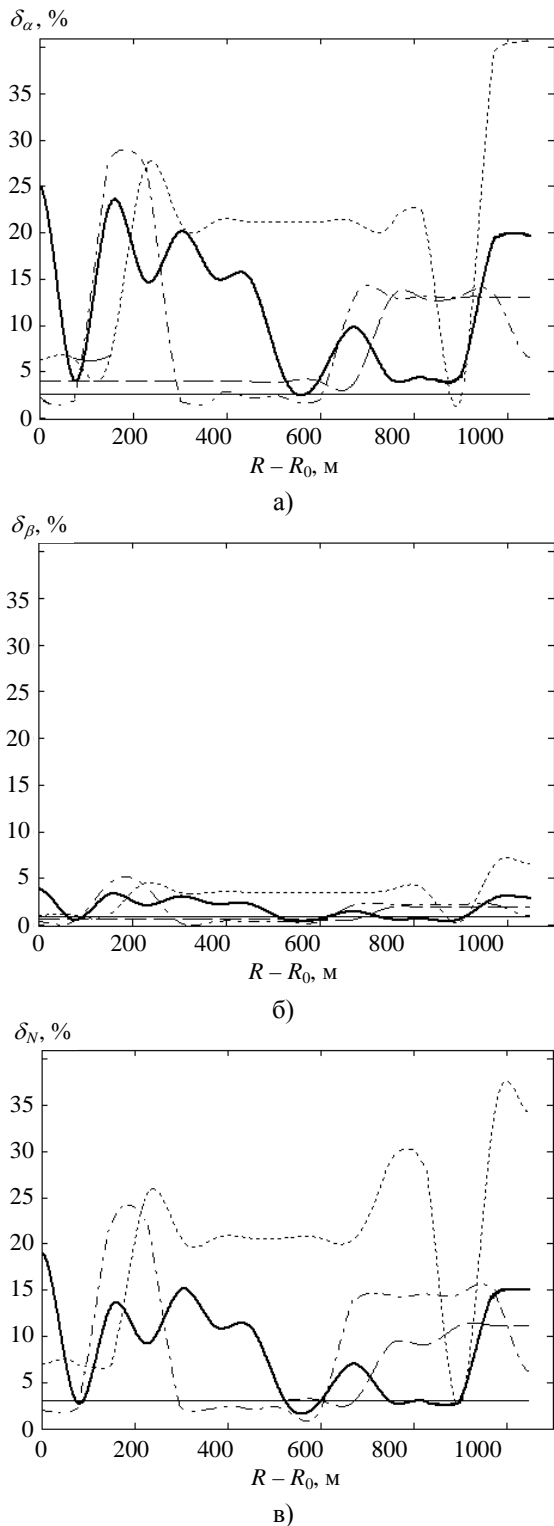


Рис. 7. График зависимости ошибки восстановления параметров распределения от расстояния с учетом ослабления: а) параметр  $\alpha_c$ ; б) параметр  $\beta_c$ ; в) концентрация  $N_{Tc}$  (сплошная кривая –  $I = 1$  мм/ч, пунктирная –  $I = 7$  мм/ч, штрихпунктирная –  $I = 11$  мм/ч, штриховая –  $I = 21$  мм/ч, сплошная жирная –  $I = 29$  мм/ч)

**Выводы.** Таким образом, проведенное исследование трехчастотного метода зондирования жидких осадков показало следующее:

– использование рабочих длин волн  $\lambda_1 = 8,2$  мм,  $\lambda_2 = 3,2$  см и  $\lambda_3 = 5,5$  см целесообразно только для дождей малой интенсивности и протяженности ( $\leq 1$  км) в связи с существенным влиянием ослабления сигналов миллиметрового диапазона на результаты дистанционного зондирования;

– использование длин волн  $\lambda_1 = 3,2$  см,  $\lambda_2 = 5,5$  см и  $\lambda_3 = 10$  см позволяет снизить влияние ослабления и уменьшить максимальную ошибку восстановления интенсивности дождя до 7 %;

– предложенный метод также позволяет измерять микроструктурные характеристики осадков с достаточной для практики точностью, в частности, максимальная погрешность восстановления параметра  $\alpha_c$  не превышает 40 %, параметра  $\beta_c$  – 7 %, а концентрации  $N_{Tc}$  – 40 %.

#### Библиографический список

1. *Mardiana R.* A dual-frequency rain profiling method without the use of a surface reference technique / R. Mardiana, T. Iguchi, N. Takahashi // IEEE Trans. Geosc. and Remote Sens. – 2004. – 42, N 10. – P. 2214–2225.
2. *Mott H.* Remote Sensing with Polarimetric Radar / H. Mott. - Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. – 309 p.
3. *Olson W. S.* A Method for Combined Passive Active Microwave Retrievals of Cloud and Precipitation Profiles // W. S. Olson, L. Giglio // J. Appl. Met. – 1996. – 35, Iss. 10. – P. 1763–1789.
4. *Линкова А. М.* Восстановление интенсивности жидких осадков с помощью многочастотного активно-пассивного зондирования / А. М. Линкова, Г. И. Хлопов // Радиофизика и электрон. – 2014. – 5(19), № 3. – С. 26–32.
5. *Линкова А. М.* Восстановление микроструктурных характеристик жидких осадков с помощью активно-пассивного зондирования / А. М. Линкова, Г. И. Хлопов // Тр. Главной геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2015. – Вып. 576. – С. 62–80.
6. *Айвазян Г. М.* Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в облаках / Г. М. Айвазян. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 480 с.
7. *Довиак Р.* Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Р. Довиак, Д. Зрнич. – Л.: Гидрометеоздат, 1981. – 512 с.
8. *Розенберг В. И.* Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами / В. И. Розенберг. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 348 с.
9. *Арсенин В. Я.* Математическая физика: основные уравнения и специальные функции / В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1966. – С. 225–233.
10. *Атлас Д.* Успехи радарной метеорологии / Д. Атлас. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 194 с.
11. *Gunn R.* The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air / R. Gunn, G.D. Kinzer // J. Appl. Met. – 1949. – 6, Iss. 4. – P. 243–248.
12. *Литвинов И. В.* Структура атмосферных осадков / И. В. Литвинов. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 153 с.
13. *Goldrich J.* Improved error analysis in estimation of raindrop spectra, rain rate, liquid water content using multiple wavelength radar / J. Goldrich // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1975. – 23, Iss. 5. – P. 718–720.

Рукопись поступила 20.05.2016.

A. Linkova, G. Khlopov

### THREE-FREQUENCY REMOTE SENSING OF LIQUID PRECIPITATION

The study of integral and microstructure characteristics of liquid precipitation is of great practical interest for solution of many problems of national economy. Particularly, monitoring rain intensity is important for design of collecting systems and engineering structures, as well as it essentially influences productivity of agriculture. Radar methods for study of liquid precipitation permit to measure rain parameters over the large areas in real time. That is why they are more preferable in comparison with contact methods based on raingauges and disdrometers. A three-frequency method for radar remote sensing of liquid precipitation is proposed and studied in this paper, which allows restoring spatial profile of rain parameters. The results of numerical simulation of three-frequency radar remote sensing of liquid precipitation are presented; they were obtained for different sets of operating wavelengths of radar for the range of rain intensity 0...30 mm/h. It is shown that the usage of millimeter wavelengths is not reasonable due to strong attenuation of signal power at large distances and for large rain intensities. However, application of longer wavelengths permits to reduce influence of attenuation and to decrease measurement errors of rain parameters. The maximal measurement error of rain intensity is not more than 7 %.

**Key words:** rain intensity, radar cross-section, radar reflected power, Gamma-distribution.

А. М. Лінкова, Г. І. Хлопов

### ТРИЧАСТОТНЕ ЗОНДУВАННЯ РІДКИХ ОПАДІВ

Дослідження інтегральних та мікроструктурних параметрів рідких опадів має важливе практичне значення для вирішення багатьох проблем народного господарства. Моніторинг інтенсивності дощу необхідний для проектування каналізаційних систем і багатьох інженерних споруд, а також істотно впливає на продуктивність сільського господарства. Радіолокаційні методи дослідження рідких опадів дозволяють вимірювати параметри дощів на великих площах в реальному масштабі часу, що є переважним в порівнянні з контактними методами на основі дощомірів і пловіографів. У статті запропоновано і досліджено тричастотний метод радіолокаційного зондування рідких опадів, що дозволяє відновлювати просторовий профіль параметрів дощів. Наведено результати числового моделювання тричастотного зондування рідких опадів, отримані для різних наборів робочих довжин хвиль радара в діапазоні інтенсивності 0...30 мм/год. Показано, що використання міліметрового діапазону довжин хвиль недоцільно у зв'язку з сильним ослабленням потужності сигналу на великих відстанях і для великих значень інтенсивності. Застосування більш довгих довжин хвиль дозволяє знизити вплив ослаблення і зменшити помилки відновлення параметрів дощу (максимальна похибка відновлення інтенсивності не перевищує 7 %).

**Ключові слова:** інтенсивність дощу, ефективна площа розсіяння, відбита потужність випромінювання радара, гамма-розподіл.