

О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. И. Хлопов

ДВУХЧАСТОТНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДОЖДЯ

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: khlopov@ire.kharkov.ua

Рассматривается алгоритм обработки сигналов двухчастотной радиолокационной станции для однозначного измерения характеристик дождей в области слабых интенсивностей (≤ 4 мм/ч) и с учетом влияния ослабления сигналов в интенсивных осадках (≤ 20 мм/ч) на основе предложенной итерационной схемы вычисления микроструктурных характеристик. С помощью численного моделирования восстановления параметров дождя показано, что разработанный алгоритм обеспечивает однозначность измерения и графическую точность восстановления неоднородного профиля параметров дождя в широком диапазоне интенсивностей. Ил. 17. Табл. 3. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния, дифференциальная эффективная поверхность рассеяния, коэффициент ослабления, интенсивность дождя.

Измерение характеристик жидких осадков имеет важное значение при исследовании физических процессов в атмосфере [1] и для решения ряда прикладных задач [2]. При этом радиолокационные методы занимают особое место, так как позволяют оперативно измерять характеристики осадков на больших площадях, в связи с чем разработанные алгоритмы обработки радиолокационных сигналов для восстановления параметров дождей традиционно уделяется большое внимание.

Вплоть до настоящего времени широко применяется так называемое $Z-I$ -соотношение [3] на основе корреляционной связи интенсивности осадков I (мм/ч) с радиолокационной отражаемостью Z ($\text{мм}^6/\text{м}^3$) в виде эмпирического выражения $Z = AI^B$. Однако постоянные коэффициенты A и B , которые определяются экспериментально, существенно отличаются для разных регионов и зависят от происхождения осадков [3–6]. В связи с этим значительный интерес представляет использование двухчастотного радиолокационного зондирования, впервые предложенного в работах [7, 8] и получившего развитие в последние годы [9–11].

Подобный подход основан на параметризации закона распределения частиц дождя по размерам, что позволяет свести обратную задачу теории рассеяния к решению системы уравнений относительно неизвестных параметров распределения. При этом широко используется модель осадков в виде трехпараметрического гамма-распределения [3–13], которое удовлетворительно аппроксимирует экспериментальные данные для больших интервалов усреднения порядка десятков секунд [6]. Однако двухчастотное зондирование позволяет определить только два параметра, поэтому предпринимаются неоднократные попытки [7–10] доопределить систему уравнений путем установления дополнительных корреляционных связей в радиолокационных данных. Чтобы улучшить достоверность измерений,

в [11, 12] предложено использовать данные контактных измерений [13], которые, по понятным причинам, отличаются более высокой точностью и степенью статистической надежности.

Однако распределение микроструктурных параметров дождя обычно неоднородно по пространству, как показано на рис. 1, где приведен фрагмент радиолокационного изображения дождя в системе координат дальность–высота (интенсивность изображения пропорциональна мощности отраженного сигнала).

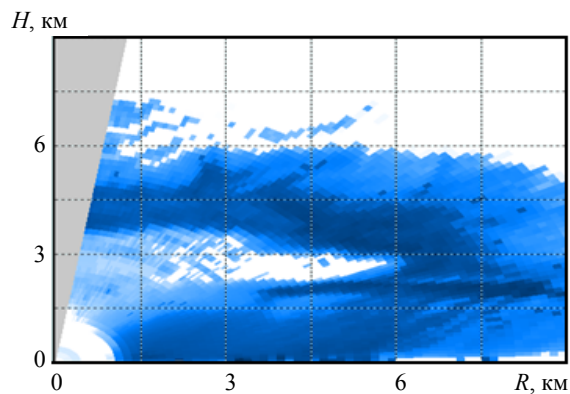


Рис. 1. Радиолокационное изображение дождя

Поэтому для получения достоверных данных о параметрах осадков в пределах исследуемой площади необходимо обеспечить восстановление профиля параметров дождя (профилирование), для чего алгоритм обработки сигналов должен учитывать ослабление радиолокационных сигналов.

Опубликованный в работе [6] подход основан на использовании традиционного $Z-I$ -соотношения и распределения частиц Маршалла-Пальмера [6], что не позволяет использовать полученные результаты при двухчастотном зондировании, а метод, описанный в работах [11, 12], может использоваться только для измерений на

передней кромке дождя. Кроме того, как показано [12], применение разработанных ранее алгоритмов двухчастотного зондирования [6–12] приводит к неоднозначности восстановления параметров дождя при малых значениях интенсивности благодаря особенностям поведения отражаемости капель в разных диапазонах волн.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма обработки сигналов двухчастотного радара для измерения профиля микроструктурных характеристик дождя, который позволяет устранить неоднозначность измерений для дождей малой интенсивности и учитывает ослабление радиоволн при распространении в осадках методом последовательных приближений.

1. Дифференциальная эффективная поверхность рассеяния дождя. Рассмотрим удельное значение эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) дождя ($\text{мм}^2/\text{м}^3$), используя традиционное уравнение радиолокации [3] для объемных рассеивателей в виде, удобном для дальнейших вычислений:

$$\sigma_0(\lambda) = \frac{P_R}{P_T} \frac{(4\pi)^3 R^4}{G_A^2 \lambda^2} \frac{1}{V_{ef} K(\lambda, R)} 10^{24}, \quad (1)$$

где P_R – мощность на входе приемника радиолокационной станции (РЛС), Вт; P_T – мощность передатчика, Вт; G_A – коэффициент усиления антенны; λ – длина волны, мм; R – расстояние до рассеивающего объема, км; V_{ef} – эффективный рассеивающий объем, м^3 ; $K(\lambda, R)$ – коэффициент ослабления сигналов в дожде.

Для полидисперсной среды удельное значение ЭПР, в рамках традиционно используемого приближения некогерентного рассеяния [3], определяется выражением

$$\sigma_0(\lambda) = N_T \int_0^\infty \sigma_p(D, \lambda) F(D, \alpha, \beta) dD, \quad (2)$$

где $N_T = \int_0^\infty dD N(D) = N_0 \Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha+1}$ – концентрация частиц в единице объема, м^{-3} ; $\Gamma(\alpha + 1) = \int_0^\infty dt t^\alpha e^{-t}$ – гамма-функция; $\alpha(R)$, $\beta(R)$ и $N_0(R)$ – параметры гамма-распределения $F(D, \alpha, \beta)$ частиц дождя по размерам D , мм [3–6], которые зависят от расстояния и интенсивности дождя (в дальнейшем зависимость от дистанции опущена); $\sigma_p(D, \lambda)$ – ЭПР отдельной частицы, мм^2 .

В рассматриваемом случае гамма-распределение записывается в виде

$$F(D) = \frac{D^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha+1}} \exp\left(-\frac{D}{\beta}\right), \quad D > 0, \quad (3)$$

а его параметры также могут быть выражены через модальный размер частиц $D_{mod} = \alpha\beta$ и ширину распределения $\sigma_D = \beta\sqrt{\alpha+1}$, которые наглядно характеризуют его вид [11].

Для двухчастотной РЛС, работающей на длинах волн λ_1 и λ_2 , большая часть частиц не удовлетворяет условиям рэлеевского рассеяния в коротковолновом диапазоне $\lambda_1 < \lambda_2$, (дифракционный параметр $\rho = \pi D \sqrt{|\hat{\epsilon}|} / \lambda_1 \geq 1$, где $\hat{\epsilon}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость воды). Поэтому необходимо использовать строгую теорию Ми [14] и предположение о сферической форме частиц, что позволяет записать выражение для ЭПР одиночной частицы $\sigma_p(D, \lambda)$ в резонансной области, которое хорошо выполняется [11] при двухчастотном зондировании вплоть до диапазона $\lambda = 8$ мм:

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

где a_n и b_n – коэффициенты разложения рассеянного поля, выражения для которых приведены в работе [14].

В соответствии с законом Бугера [14], выражение для коэффициента ослабления отраженных сигналов в дожде записывается в виде $K(\lambda, R) = \exp\{-2\gamma(\lambda, R)\}$,

где $\gamma(\lambda, R) = 10^{-3} \int_{R_0}^R \chi(R) dR$ – коэффициент затухания, R_0 – расстояние до ячейки дождя, км (рис. 2), $\chi(R)$ – удельное ослабление, $\text{мм}^2/\text{м}^3$.

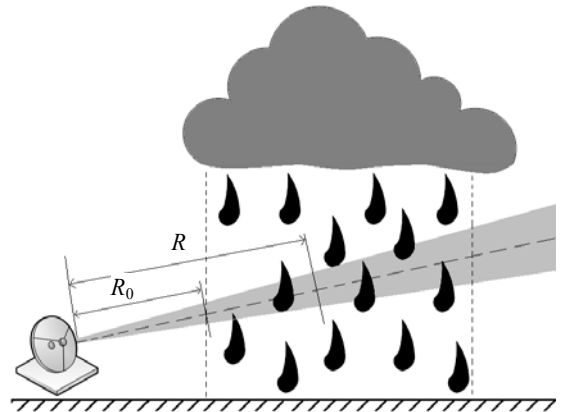


Рис. 2. Радиолокационное зондирование ячейки дождя

Удельное ослабление для рассеивающей среды записывается аналогично (2) в виде

$$\chi(R) = N_T \int_0^\infty \sigma_{AT}(D, \lambda) F(D, \alpha, \beta) dD, \quad (5)$$

где $\sigma_{AT}(\lambda, D)$ – поперечное сечение ослабления одной частицы, мм², которое в рамках теории Ми [14] записывается в симметричной с (4) форме

$$\sigma_{AT} = \frac{\pi D^2}{2\rho^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n), \quad (6)$$

а коэффициенты a_n и b_n совпадают с (4).

Двухчастотное зондирование осадков основано на вычислении дифференциального значения ЭПР (ДЭПР) в виде отношения удельных ЭПР на разных длинах волн путем измерения дифференциального значения принятой мощности

$$P_D(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{P_R(\lambda_1)}{P_R(\lambda_2)}; \quad \sigma_D(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\sigma_0(\lambda_1)}{\sigma_0(\lambda_2)} = \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{C_r(\lambda_1, \lambda_2) K_D(\lambda_1, \lambda_2, R)}; \quad (7)$$

$$C_r = \frac{P_T(\lambda_1) G_A^2(\lambda_1) \lambda_1^2 V_{ef}(\lambda_1)}{P_T(\lambda_2) G_A^2(\lambda_2) \lambda_2^2 V_{ef}(\lambda_2)}, \quad (8)$$

где C_r – постоянная РЛС, которая описывает характеристики используемого радара; $K_D(\lambda_1, \lambda_2, R)$ – дифференциальное значение коэффициента ослабления

$$K_D(\lambda_1, \lambda_2, R) = \frac{K(\lambda_1)}{K(\lambda_2)} = \exp\{-2 \cdot 10^{-3} \int_{R_0}^R dl N_T(l) \times \int_0^{\infty} dD F(D, \alpha) [\sigma_{AT}(D, \lambda_1) - \sigma_{AT}(D, \lambda_2)]\}. \quad (9)$$

Так как выражение для коэффициента ослабления (8) содержит концентрацию частиц $N_T(R)$, то уравнение (7) относительно трех неизвестных α , β и N_0 не имеет решения. Поэтому в ряде работ [7, 10–12] рассматривались различные подходы для привлечения дополнительных данных, чтобы связать остальные параметры. В частности, в работах [11, 12] предложено использовать данные контактных измерений зависимости параметров $\alpha(I)$ и $\beta(I)$ от интенсивности дождя. При этом наиболее полные результаты приведены в работе [13], аппроксимация которых с помощью метода наименьших квадратов позволяет получить эмпирические выражения для параметров распределения в виде $\alpha = aI^{-b}$ и $\beta = cI^d$ (мм) ($a = 3,8$; $b = 0,42$; $c = 0,148$ и $d = 0,38$). Исключая интенсивность дождя, нетрудно получить связь между первыми двумя параметрами $\beta = \beta(\alpha)$, что позволяет дополнить (7) и получить систему уравнений в виде

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\int_0^{\infty} \sigma_p(D, \lambda_1) F(D, \alpha, \beta) dD}{\int_0^{\infty} \sigma_p(D, \lambda_2) F(D, \alpha, \beta) dD} K_D(\alpha, \beta, N_0, R) = \\ & = \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{C_r(\lambda_1, \lambda_2)}; \\ & \beta = c \left(\frac{a}{\alpha} \right)^{\frac{d}{b}}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Чтобы доопределить систему (10) в общем виде, необходимо сформулировать еще одно уравнение для параметра распределения N_0 , что возможно лишь в некоторых частных случаях, которые рассмотрены ниже.

2. Двухчастотное зондирование дождей при слабом ослаблении сигналов. Если рабочие длины волн двухчастотной РЛС выбраны таким образом, что ослабление радиолокационных сигналов достаточно мало $K(\lambda_{1,2}) \cong 1$, то дифференциальный коэффициент ослабления (9) также мало отличается от единицы $K_D(\lambda_1, \lambda_2, R) \cong 1$. В этом случае система уравнений (10) полностью определена, что позволяет найти зависимость параметров $\alpha(R)$ и $\beta(R)$ от дистанции в результате численного решения уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\int_0^{\infty} \sigma_p(D, \lambda_1) F(R, D, \alpha, \beta) dD}{\int_0^{\infty} \sigma_p(D, \lambda_2) F(R, D, \alpha, \beta) dD} = \frac{P_D(R, \lambda_1, \lambda_2)}{C_r(\lambda_1, \lambda_2)}; \\ & \beta(R) = c \left(\frac{a}{\alpha(R)} \right)^{\frac{d}{b}}. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

В качестве недостающего уравнения для третьего параметра распределения N_0 можно использовать выражение для удельного значения ЭПР (2) для одного из каналов РЛС, например для $\lambda = \lambda_2$:

$$N_0(R) = \sigma_0(R, \lambda_2) \frac{\beta^{-(\alpha+1)}}{\Gamma(\alpha+1)} \times \frac{1}{\int_0^{\infty} dD \sigma_p(D, \lambda_2) F(R, D, \alpha, \beta)}. \quad (12)$$

Это позволяет определить профиль основных характеристик дождя по дальности, в том числе концентрацию капель

$$N_T(R) = N_0 \Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha+1}, \quad (13)$$

интенсивность дождя

$$I(R) = \left[\frac{a}{\alpha(R)} \right]^{\frac{1}{\beta(R)}} \quad (14)$$

и размеры частиц, используя выражение (3).

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты численного моделирования зависимости ДЭПР σ_D от интенсивности ($\lambda_1 = 8,2$ мм; $\lambda_2 = 3,2$ см) для равномерного распределения микроструктурных параметров внутри ячейки дождя.

Как видно, в области малых интенсивностей ДЭПР имеет характерный экстремум, что является следствием поведения удельной ЭПР полидисперсной среды в 8-мм и 3-см диапазонах (рис. 4), когда разность ЭПР (в децибелах относительно $1 \text{ мм}^2/\text{м}^3$) немонотонно зависит от интенсивности дождя. Это приводит (рис. 5) к неоднозначности обратной зависимости $I(\sigma_D)$, когда одному значению ДЭПР соответствует два значения интенсивности (участки A-B и B-C, точка A соответствует значениям $I = 0$ мм/час и $\sigma_D = 23,63$ дБ; точка B – $I = 0,86$ мм/ч и $\sigma_D = 25,3$ дБ, а точка C – $I = 4,28$ мм/ч и $\sigma_D = 23,63$ дБ) в диапазоне интенсивностей дождя $0 < I \leq 4,28$ мм/ч.

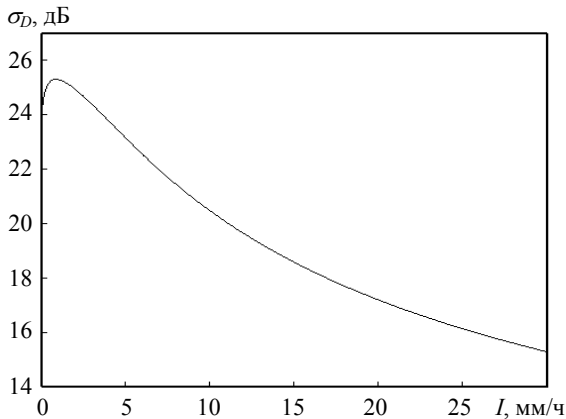


Рис. 3. Зависимость ДЭПР от интенсивности дождя

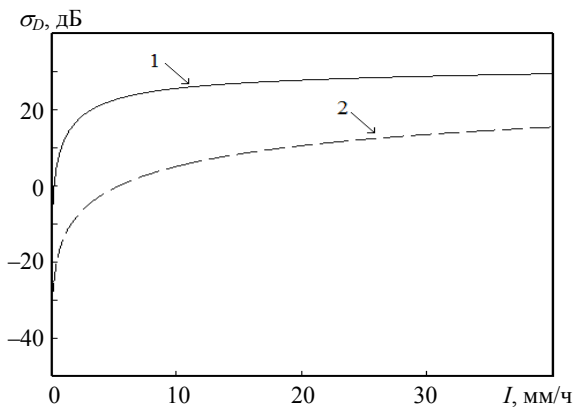


Рис. 4. Зависимость удельной ЭПР от интенсивности дождя: 1 – $\lambda_1 = 8,2$ мм; 2 – $\lambda_2 = 3,2$ см

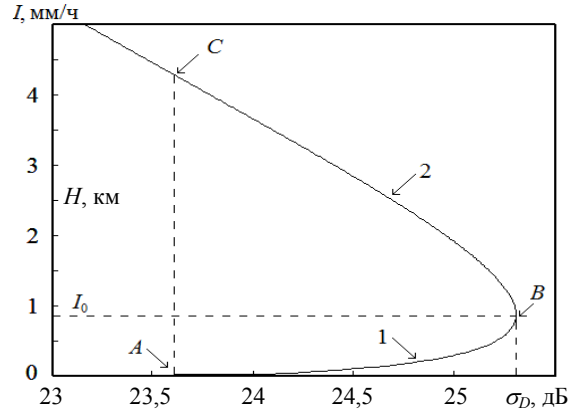


Рис. 5. Зависимость интенсивности дождя от ДЭПР

Для устранения неоднозначности (рис. 5) можно использовать зависимость удельной ЭПР $\sigma_0(\lambda)$ (рис. 4), которая монотонно возрастает с увеличением интенсивности дождя в обоих диапазонах, хотя и с разной скоростью. Это позволяет использовать характерные точки роста зависимости интенсивности дождя от удельного значения ЭПР I_0 , σ_{01} и σ_{02} (рис. 6, кривая 1 – $\lambda_1 = 8$ мм, кривая 2 – $\lambda_2 = 3,2$ см) и сформулировать следующее условие для однозначного определения интенсивности дождя:

$$\begin{cases} I \leq I_0, \text{ мм/ч, если } \sigma_0(\lambda_1) \leq \sigma_{01}, \sigma_0(\lambda_2) \leq \sigma_{02}; \\ I > I_0, \text{ мм/ч, если } \sigma_0(\lambda_1) > \sigma_{01}, \sigma_0(\lambda_2) > \sigma_{02}. \end{cases} \quad (15)$$

Здесь $I_0 = 0,86$ мм/ч, $\sigma_{01} = 1,94 \text{ мм}^2/\text{м}^3$, $\sigma_{02} = 0,035 \text{ мм}^2/\text{м}^3$, что позволяет разделить две ветви зависимости $I(\sigma_D)$. На рис. 7 приведен пример, который иллюстрирует использование соотношений (15) для вычисления интенсивности дождя по данным измерения дифференциальной ЭПР, где рис. 7, а соответствует ветви $I \leq 0,86$ мм/ч, а рис. 7, б – значениям $I > 0,86$ мм/ч.

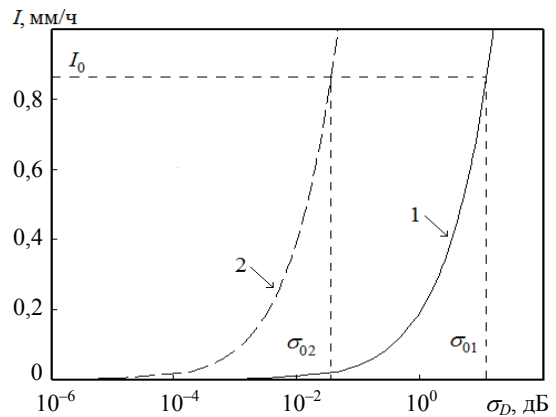


Рис. 6. Зависимость интенсивности дождя от удельной ЭПР: 1 – $\lambda = 8,2$ мм; 2 – $\lambda = 3,2$ см

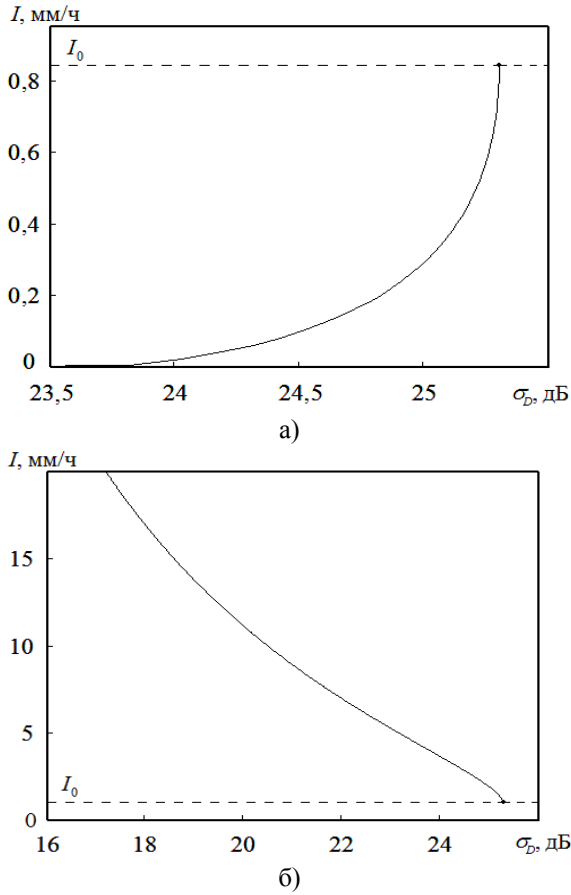


Рис. 7. Зависимость интенсивности дождя от ДЭПР: а) – $\sigma_0(\lambda_1) \leq \sigma_{01}, \sigma_0(\lambda_2) \leq \sigma_{02}$; б) – $\sigma_0(\lambda_1) > \sigma_{01}, \sigma_0(\lambda_2) > \sigma_{02}$

При этом следует отметить, что сформулированная система неравенств (15) справедлива только для использованных данных контактных измерений параметров гамма-распределения $\alpha(I)$ и $\beta(I)$ [13], а для других значений микроструктурных характеристик требуется уточнение соответствующих данных.

3. Двухчастотное зондирование дождей с равномерным профилем интенсивности и сильном ослаблении сигналов. Однако для дождей заметной интенсивности ($I \geq 1$ мм/ч) пренебрежение ослаблением радиоволн в осадках может привести к значительным ошибкам измерения характеристик дождя. Поэтому необходимо добавить еще одно уравнение в (10) на основе дополнительной информации, использующей начальные условия для ячейки дождя – рис. 8.

Действительно, слева от границы дождя значение его интенсивности $I(R)|_{R < R_0} = 0$, что позволяет построить итерационную процедуру для определения всех микроструктурных параметров жидких осадков $\alpha^{(p)}, \beta^{(p)}$ и $N_0^{(p)}$ (3), где верхний индекс p – соответствует порядку итераций. В случае, если область выпадения дождя включает расположение РЛС, то начальное значение

интенсивности $I(0)$ можно измерить с помощью контактных методов, поэтому, не уменьшая общности, будем считать $I(R_0) = 0, K_D(R_0) = 1$.

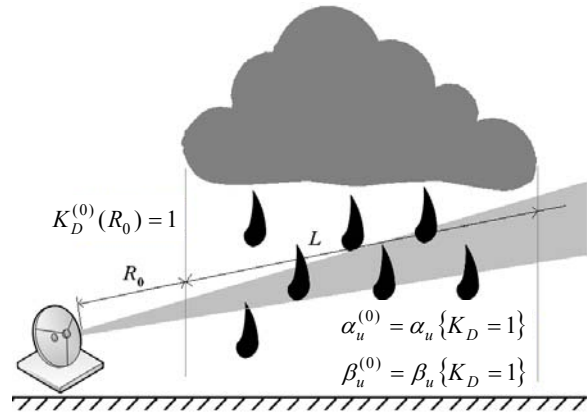


Рис. 8. Начальные значения параметров распределения

Рассмотрим итерационную процедуру на примере модели однородной ячейки дождя протяженностью L с равномерным профилем интенсивности $I(R) = I_r$, когда параметры распределения $\alpha = \alpha_u, \beta = \beta_u$ и $N_0 = N_{0u}$, а также значения ЭПР $\sigma_0(R) = \sigma_{0u}$ и ослабления $K(R) = K_u$ сохраняют свои значения вдоль луча РЛС. Несмотря на определенную искусственность подобной модели, полученные результаты будут полезны в дальнейшем при построении алгоритма обработки сигналов в случае произвольного профиля интенсивности дождя.

Задав начальное значение дифференциального коэффициента ослабления $K_D(R_0, \lambda_1, \lambda_2) = 1$ и его компонент $K(R_0, \lambda_{1,2}) = 1$, исходные значения остальных параметров $\alpha_u^{(0)}$ и $\beta_u^{(0)}$ можно найти в результате решения системы уравнений для среды без ослабления аналогично (11)

$$\begin{cases} \sigma_D(\alpha_u^{(0)}, \beta_u^{(0)}) = \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{\tilde{N}_r(\lambda_1, \lambda_2)}; \\ \beta_u^{(0)} = \tilde{n} \left(\frac{a}{\alpha_u^{(0)}} \right)^{\frac{d}{b}}, \end{cases} \quad (16)$$

а параметр $N_{0u}^{(0)}$ – в результате использования уравнения (12):

$$N_{0u}^{(0)} = \sigma_{0u}(R_0, \lambda_2) \frac{\beta_u^{-(\alpha_u^{(0)}+1)}}{\Gamma(\alpha_u^{(0)}+1)} \times \frac{1}{\int_0^\infty dD \sigma_p(D, \lambda_2) F(D, \alpha_u^{(0)}, \beta_u^{(0)})}. \quad (17)$$

На следующем этапе можно уточнить параметры, рассматривая полученные результаты

как начальные значения для второй итерации, включая процедуру исключения неоднозначности решения (15):

$$\left\{ \begin{aligned} & \sigma_D(\alpha_u^{(p)}, \beta_u^{(0)}) K_D(\alpha_u^{(p-1)}, \beta_u^{(p-1)}, N_{0u}^{(p-1)}) = \\ & = \frac{P_D(\lambda_1, \lambda_2)}{C_r(\lambda_1, \lambda_2)}, \\ & \beta_u^{(p)} = c \left(\frac{a}{\alpha_u^{(p)}} \right)^{\frac{d}{b}}; \\ & N_{0u}^{(p)} = \sigma_{0u}(\lambda_2) \frac{[\beta_u^{(p)}]^{-(\alpha_u^{(p)}+1)}}{\Gamma(\alpha_u^{(p)}+1)} \times \\ & \times \frac{1}{\int_0^\infty dD \sigma_p(D, \lambda_2) F(D, \alpha_u^{(p)}, \beta_u^{(p)})}; \\ & N_{0u}^{(-1)} = 0; p = 0, 1, \dots, \end{aligned} \right. \quad (18)$$

причем выражение для дифференциального коэффициента ослабления (9) в однородно поглощающей среде вычисляется в упрощенном виде:

$$K_D(\lambda_1, \lambda_2, R) = \exp\{-2 \cdot 10^{-3} N_T L \times \int_0^\infty dD F(D, \alpha, \beta) [\sigma_{AT}(D, \lambda_1) - \sigma_{AT}(D, \lambda_2)]\}. \quad (19)$$

Рассмотрим сходимость предложенной итерационной схемы путем численного моделирования двухчастотного зондирования дождей разной интенсивности. Для этого в качестве параметров РЛС использовались характеристики метеорологической РЛС типа МРЛ-1 [7], для которой значение постоянной РЛС равно $C_r = 0,0908$, а основные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики метеорадиолокатора МРЛ-1

Параметр	Канал 1	Канал 2
Длина волны λ , мм	8,2	32
Мощность передатчика P_T , кВт	70	250
Коэффициент усиления антенны G_A , дБ	58	48
Ширина диаграммы направленности антенны $\Delta\theta = \Delta\varphi$, град	0,22	0,7
Разрешение по дальности ΔR , км	0,075	0,15

Для расчета дифференциального значения принятой мощности P_D в (18) использовались 4 модели с протяженностью зоны дождя $L = 1$ км, микроструктурные характеристики которых [13] приведены в табл. 2 совместно с результатами расчетов удельной ЭПР и коэффициента ослабления.

Результаты моделирования приведены на рис. 9 в виде зависимости измеренной интенсивности дождя (18), (19) от количества итераций p для четырех перечисленных моделей дождя – гладкие кривые, при этом пунктирные линии соответствуют интенсивности дождя для соответствующей модели I_n (табл. 2).

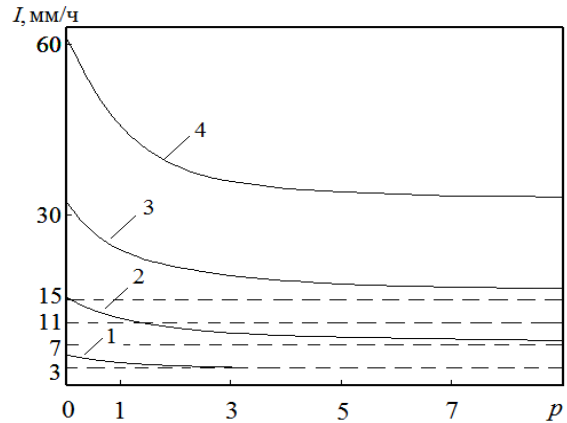


Рис. 9. Сходимость вычислений интенсивности дождя

Таблица 2
Параметры моделей дождей

Параметр	Модель дождя			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Интенсивность дождя, мм/ч	3	7	11	15
Параметр распределения α , мм	2,39	1,68	1,39	1,22
Параметр распределения β , мм	0,23	0,31	0,37	0,42
Параметр распределения N_T , м ⁻³	303	441	480	491
Удельная ЭПР в диапазоне 8 мм $\sigma(\lambda_1)$, мм ² /м ³	88,4	252,6	381,32	480,27
Удельная ЭПР в диапазоне 3 см $\sigma(\lambda_2)$, мм ² /м ³	0,32	1,6	3,77	6,65
Погонное затухание в диапазоне 8 мм $\gamma_0(\lambda_1)$, дБ/км	1,46	3,68	5,4	6,8
Погонное затухание в диапазоне 3 см $\gamma_0(\lambda_2)$, дБ/км	0,05	0,19	0,35	0,53
Дифференциальная мощность $P_D(\lambda_1, \lambda_2)$, дБ	12,6	8,1	4,58	1,9

Как видно, для слабого дождя ($I_1 = 3$ мм/ч) даже сравнительно небольшое количество итераций ($p \leq 5$) приводит к достаточно малой ошибке измерений $\Delta I_1 \leq 0,1$ мм/ч. Однако при возрастании интенсивности дождя количество итераций,

необходимых для получения удовлетворительной точности измерений, быстро растет, например, для $I_2 = 7$ мм/ч: $p = 10$, $\Delta I_2 \leq 0,74$ мм/ч; $I_3 = 11$ мм/ч: $p = 20$, $\Delta I_3 \leq 5,6$ мм/ч, а для интенсивности $I_4 \geq 15$ мм/ч сходимость итерационной схемы вообще не достигается. При этом, начиная со значения интенсивности $I \geq 10$ мм/ч, относительная погрешность измерений (рис. 10) практически не убывает и остается неприемлемо большой ≥ 100 %.

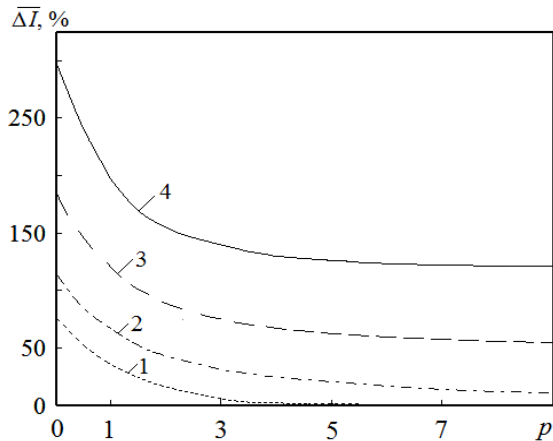


Рис. 10. Зависимость погрешности измерений от порядка итераций: 1 – для $I_1 = 3$ мм/ч; 2 – $I_2 = 7$ мм/ч; 3 – $I_3 = 11$ мм/ч; 4 – $I_4 = 15$ мм/ч

Как показывает анализ, ошибка измерений растет с увеличением ослабления радиолокационного сигнала в ячейке дождя пропорционально размерам его ячейки L . Поэтому при уменьшении зоны дождя (рис. 11) точность измерений остается в приемлемых пределах даже для дождей значительной интенсивности $I_3 = 11$ мм/ч и $I_4 = 15$ мм/ч (пунктир – интенсивность модели дождя), что говорит в пользу применения РЛС с высокой разрешающей способностью по дальности.

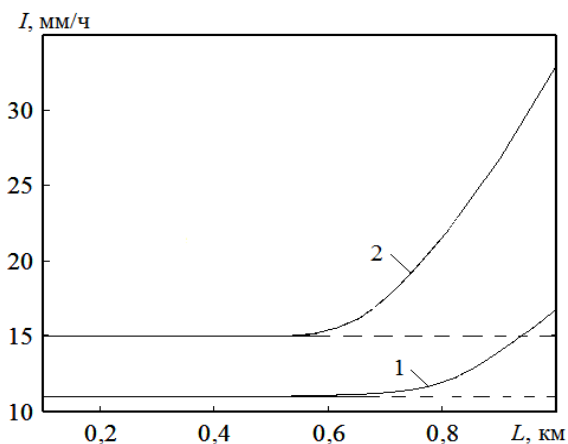


Рис. 11. Интенсивность дождя в зависимости от размера ячейки (сплошные кривые); пунктир – интенсивность модели дождя

Также представляет интерес сравнение полученных данных с результатами вычислений без учета ослабления радиолокационных сигналов в дождях – табл. 3 ($L = 1$ км). Как видно, вычисления без учета ослабления сигналов РЛС даже в слабых дождях $I \geq 3$ мм/ч приводят к значительной погрешности измерений интенсивности осадков ≥ 70 %. В то же время учет ослабления сигналов с помощью описанной выше итерационной процедуры обеспечивает хорошую точность ≤ 2 % даже для дождей заметной интенсивности $I \leq 7$ мм/ч.

Таблица 3
Влияние ослабления сигналов в дожде на измерение его интенсивности

Характеристика	Модель дождя			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Интенсивность модели дождя, мм/ч	3	7	11	15
Интенсивность дождя с учетом ослабления, мм/ч	3,02	7,12	16,6	33
Погрешность измерений с учетом ослабления, %	0,67	1,7	51,1	120
Интенсивность дождя без учета ослабления, мм/ч	5,28	15,34	32	61
Погрешность измерений без учета ослабления, %	76	119	192	307

Однако для сильного дождя ($I \geq 10$ мм/ч) приемлемая точность может быть достигнута только для осадков небольшой протяженности (рис. 11), что, впрочем, не является серьезным ограничением для современных метеолокаторов, которые, как правило, имеют достаточно высокую разрешающую способность по дальности ≤ 150 м [3].

4. Двухчастотное зондирование дождей с произвольным профилем интенсивности и сильным ослаблением сигналов. Описанный выше подход может быть использован для построения полигональной аппроксимации параметров дождя с произвольным профилем, когда передняя граница осадков расположена на определенном расстоянии R_0 (см. рис. 8) или в месте расположения РЛС интенсивность дождя известна. При этом высокое пространственное разрешение современных метеорологических РЛС ($\Delta R = 50 \div 150$ м) позволяет считать однородным распределение параметров дождя внутри импульсного объема пространства и, как следствие, использовать рассмотренную выше итерационную схему вычисления микроструктурных параметров α , β и N_0 .

Рассмотрим зону осадков протяженностью L в виде совокупности ячеек разрешения по дальности $1 \leq m \leq M = \text{Int}\left(\frac{L}{\Delta R}\right)$, $R_m = R_0 + (m-1)\Delta R$

(рис. 12), слева от которых располагается область, свободная от дождя (ослабление сигналов отсутствует $K_D(R_0) = 1$). При этом дифференциальный коэффициент ослабления в m -й ячейке разрешения может быть представлен в виде произведения коэффициентов ослабления в отдельных ячейках

$$K_D(R_m) = \prod_{q=1}^m \exp\{-2 \cdot 10^{-3} \Delta R N_{Tq} \times \int_0^\infty dD F(D, \alpha_q, \beta_q) [\sigma_{AT}(D, \lambda_1) - \sigma_{AT}(D, \lambda_2)]\}, \quad (20)$$

где $\alpha_q = \alpha(R_q)$, $\beta_q = \beta(R_q)$, $N_{Tq} = N_T(R_q)$, $q \in [1...m]$.

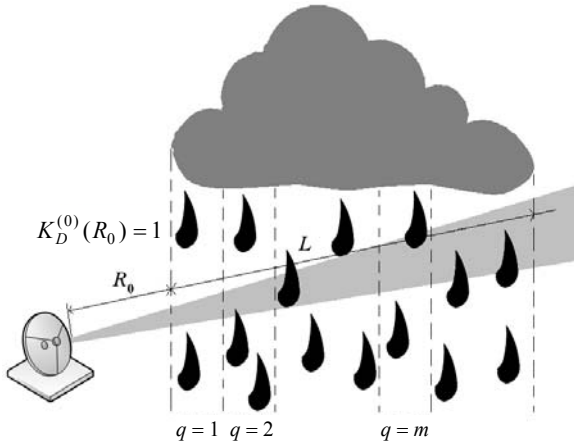


Рис. 12. Полигональная аппроксимация профиля дождя

Тогда, применяя описанную выше итерационную схему (16)–(19) последовательно к каждому отдельному элементу разрешения и рассматривая результаты вычислений в $(m-1)$ элементе разрешения как начальные условия для m -го элемента, можно получить полигональную аппроксимацию профиля дождя.

Чтобы оценить возможности предложенного алгоритма, в работе проводилось численное моделирование двухчастотного зондирования дождей на примере использования метеолокатора типа МРЛ-1 (см. табл. 1). На рис. 13 показаны результаты моделирования на примере модели ячейки дождя с равномерным профилем интенсивности (см. табл. 2).

В отличие от предыдущего случая (см. рис. 11), когда итерационная схема вычислений обеспечивает удовлетворительную точность для ячейки дождя протяженностью $L = 1$ км только для слабых дождей, рассматриваемый алго-

ритм для РЛС с высокой разрешающей способностью ($\Delta R \leq 150$ м) позволяет восстанавливать характеристики дождей с графической точностью вплоть до интенсивности дождя $I = 15$ мм/ч.

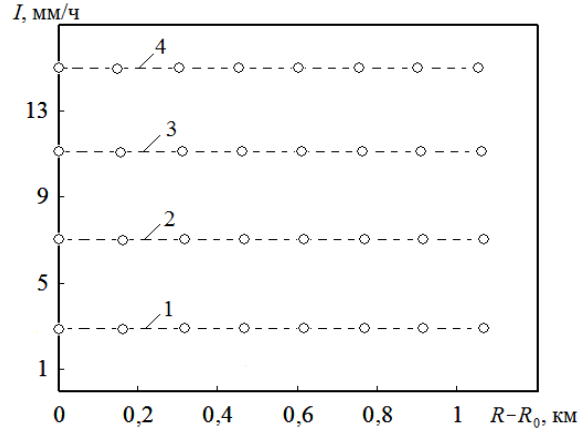


Рис. 13. Профиль интенсивности дождя для модели с равномерным распределением (пунктир – модель; точки – результаты моделирования): 1 – $I_1 = 3$ мм/ч; 2 – $I_2 = 7$ мм/ч; 3 – $I_3 = 11$ мм/ч; 4 – $I_4 = 15$ мм/ч

Для оценки возможностей предложенного метода при измерении характеристик дождя с неоднородным профилем интенсивности рассмотрим следующую модель. Как показано в результате многочисленных экспериментов [15], интенсивность дождя $I(R)$ экспоненциально убывает на периферии зоны дождя (рис. 14), а максимальное значение I_{\max} [16] обратно пропорционально протяженности дождя L , как показано на рис. 15.

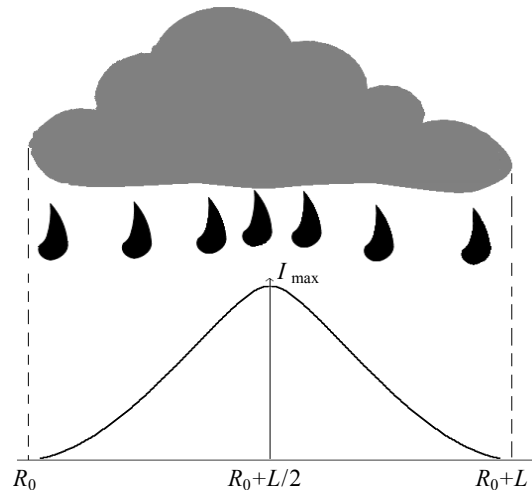


Рис. 14. Неоднородный профиль дождя

Здесь приведены результаты аппроксимации (гладкая кривая) экспериментальных данных (звездочки) методом наименьших квадратов. Комбинируя приведенные в работах [15, 16]

эмпирические соотношения, можно предложить модель неоднородного профиля дождя в виде системы уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} & I(R) = I_{\max} \exp \left[-a_p \left| R - \left(R_0 + \frac{L}{2} \right) \right| \right] \times \\ & \times \begin{cases} \left(2 \frac{R - R_0}{L} \right)^{\frac{2}{b_p}} & \text{при } R \leq R_0 + \frac{L}{2}; \\ \left[2 \frac{(R_0 + L) - R}{L} \right]^{\frac{2}{b_p}} & \text{при } R > R_0 + \frac{L}{2}; \end{cases} \\ & L = 17,87 I_{\max}^{-0,775}, \end{aligned} \right. \quad (21)$$

где I_{\max} – максимальное значение интенсивности дождя (рис. 14), параметры a_p и b_p определяют форму профиля интенсивности, а рекомендованные значения [15] соответствуют $a_p = 0,65$ и $b_p = 1,54$.

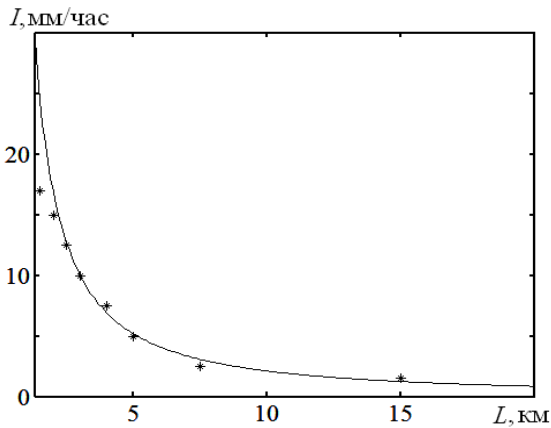


Рис. 15. Зависимость интенсивности от размеров ячейки

На рис. 16 показано сравнение профиля интенсивности дождя для предложенной модели неоднородной ячейки дождя (гладкие кривые) и результаты восстановления профиля интенсивности с учетом ослабления сигналов в дожде (точки): 1 – $I_{\max} = 3$ мм/ч; 2 – $I_{\max} = 7$ мм/ч; 3 – $I_{\max} = 11$ мм/ч; 4 – $I_{\max} = 15$ мм/ч. Несмотря на значительную крутизну изменения интенсивности дождя с расстоянием, особенно для дождей значительной интенсивности ($I_{\max} = 15$ мм/ч), использование двухчастотного метеолокатора с высокой разрешающей способностью по дальности ($\Delta R = 150$ м) и описанного алгоритма обработки сигналов позволяет восстанавливать профиль интенсивности дождя с графической точностью. При этом количество итераций не превышает $p \leq 4$ даже для сильного дождя $I_{\max} = 15$ мм/ч.

Полученные данные также подтверждают необходимость учета ослабления сигналов в осадках, как это следует из рис. 17, где приведено сравнение модельного (гладкая кривая) и восста-

новленного профилей интенсивности дождя $I_{\max} = 15$ мм/ч без учета ослабления (звездочки). При этом результаты восстановления интенсивности дождя хорошо соответствуют исходным данным для модели только на передней кромке дождя ($R - R_0 \leq 1 \div 2$ км, когда влиянием ослабления можно пренебречь).

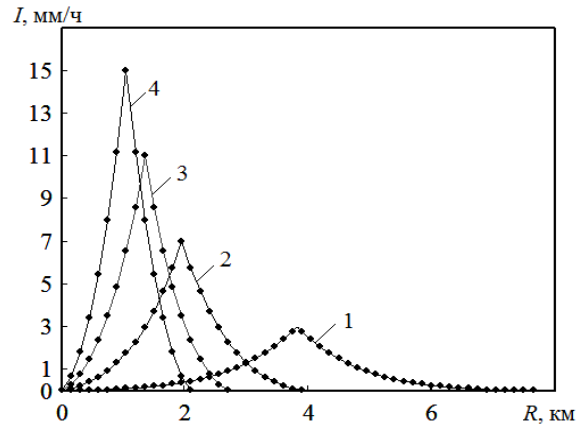


Рис. 16. Сравнение модельного профиля интенсивности дождя (гладкие кривые) с восстановленным профилем и с учетом ослабления сигналов

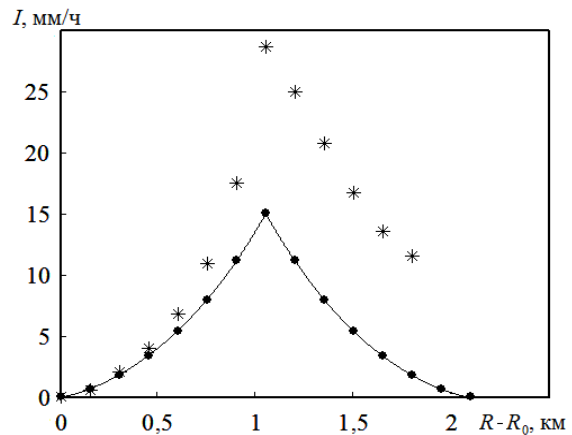


Рис. 17. Восстановление профиля интенсивности дождя $I_{\max} = 15$ мм/ч без учета ослабления

Таким образом, рассмотренный двухчастотный метод зондирования профиля параметров дождя позволяет однозначно измерять дистанционную зависимость микроструктурных параметров дождя $\alpha(R)$, $\beta(R)$, и $N_0(R)$, а также интенсивность дождя $I(R)$, его водность $W(R)$ и концентрацию частиц $N_T(R)$ с учетом ослабления сигналов в дожде.

Выводы. Получены выражения для дифференциальной ЭПР полидисперсной среды с учетом ослабления сигналов РЛС в дождях.

Предложен метод исключения неоднозначности при восстановлении интенсивности слабых дождей ($I \leq 4$ мм/ч).

Предложена итерационная схема восстановления интенсивности дождя с учетом ослабления сигналов РЛС для трехпараметрического гамма-распределения частиц дождя по размерам.

Показано, что рассмотренная итерационная схема вычисления микроструктурных параметров дождя обеспечивает восстановление неоднородного профиля дождя с графической точностью.

1. Скорер Р. С. Аэродинамика окружающей среды / Р. С. Скорер; пер. с англ. под ред. А. Я. Пресмана. – М.: Мир, 1980. – 549 с.
2. Применение данных метеорадиолокаторов для прогноза поступления дождевых вод в систему водоотведения Санкт-Петербурга / М. И. Алексеев, Ф. В. Кармазинов, В. Д. Степаненко и др. // Тр. Главной геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2007. – Вып. 556. – С. 202–214.
3. Горелик А. Г. О взаимосвязи радиолокационной отражаемости и интенсивности дождя / А. Г. Горелик, С. Ф. Коломиец // Успехи современной радиоэлектрон. – 2006. – № 11. – С. 56–68.
4. Коломиец С. Ф. Новые подходы к изучению жидкокапельных осадков / С. Ф. Коломиец // Тр. III-й Всероссийской конф. «Радиолокация и радиосвязь» / Ин-т радиотехники и электрон. РАН. – М., 2009. – С. 706–711.
5. Горелик А. Г. Влияние микроструктуры дождя на достоверность и точность определения скорости вертикальных воздушных потоков / А. Г. Горелик, С. Ф. Коломиец // Успехи современной радиоэлектрон. – 2006. – № 11. – С. 16–27.
6. Арманд Н. А. Особенности радиолокации дождя и снегопада в миллиметровом диапазоне радиоволн / Н. А. Арманд, В. Н. Пожидаев // Радиотехника и электрон. – 2010. – 55, № 5. – С. 553–558.
7. Абшаев М. Т. О возможностях радиолокационного исследования микроструктуры облаков и осадков / М. Т. Абшаев, Ю. А. Дадали // Тр. Высокотгорного геофиз. ин-та. – 1956. – Вып. 5. – С. 71–85.
8. Сулаквелидзе Г. Л. Измерение интенсивности осадков мультисекторным / Г. Л. Сулаквелидзе, Ю. А. Абшаев // Тр. Высокотгорного геофиз. ин-та. – 1968. – Вып. 11. – С. 198–214.
9. Munchak S. Joseph. Retrieval of Raindrop Size Distribution from Simulated Dual-Frequency Radar Measurements / S. Joseph Munchak // J. Appl. Meteor. and Climatology. – 2008. – 47, N 1. – P. 223–239.
10. Differential frequency Doppler weather radar: Theory and Experiment / R. Meneghini, S. W. Bidwell, R. Rincon, G. M. Heymsfield // Radio Sci. – 2003. – 8, N 3. – P. 1–10.
11. Double frequency sounding of liquid precipitation / A. Linkova, G. Khlopov, S. Khomenko, O. Voitovych // Proc. of 11th Intern. Radar Symp. (IRS 2010). – Vilnius, 2010. – 1. – P. 322–325.
12. Линкова А. М. Использование микроструктурных параметров для обработки данных двухчастотного измерения интенсивности дождя / А. М. Линкова // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 1. – С. 33–38.
13. Литвинов И. В. Структура атмосферных осадков / И. В. Литвинов. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 153 с.
14. Ван-де-Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван-де-Хюлст; пер. с англ. под ред. В. В. Соболева. – М.: Изд. иностр. лит., 1961. – 536 с.
15. Сальман У. М. Радиолокационное исследование структуры ливней и гроз / У. М. Сальман // Тр. Главной геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. – 1967. – Вып. 72. – С. 46–65.
16. Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах / под ред. М. А. Колосова. – М.: Наука, 1977. – 122 с.

O. A. Voitovych, A. M. Linkova, G. I. Khlopov

DOUBLE FREQUENCY PROFILING OF RAIN PARAMETERS

The algorithm for signal processing of double frequency radar is considered which allows single-valued measuring of rain parameters in the area of small intensities (≤ 4 mm/h) and takes into account influence of signal attenuation in the rain with large intensities (≤ 20 mm/h) using proposed iterative scheme of calculation of microstructure rain parameters. It was shown by numerical simulation that developed algorithm provides recovery of heterogeneous profile of rain parameter with good accuracy in wide range of rain intensities.

Key words: radar cross-section, differential radar cross-section, attenuation coefficient, rain intensity.

O. A. Войтович, А. М. Лінкова, Г. І. Хлопов

ДВОЧАСТОТНЕ ПРОФІЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДОЩУ

Розглядається алгоритм обробки сигналів двочастотної радіолокаційної станції для однозначного вимірювання характеристик дощів в області слабких інтенсивностей (≤ 4 мм/ч) з урахуванням впливу послаблення сигналів в інтенсивних опадах (≤ 20 мм/ч) на основі запропонованої ітераційної схеми обчислення микроструктурних характеристик. За допомогою числового моделювання відновлення параметрів дощу показано, що розроблений алгоритм забезпечує однозначність вимірювання та графічну точність відновлення неоднорідного профілю параметрів дощу в широкому діапазоні інтенсивностей.

Ключові слова: ефективна поверхня розсіяння, диференціальна ефективна поверхня розсіяння, коефіцієнт послаблення, інтенсивність дощу.

Рукопись поступила 10.03.11 г.