

А. Б. Веселовская, О. А. Войтович, Г. И. Хлопов

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

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

E-mail: veselovskaya3@mail.ru

УСТРАНЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ ДОЖДЯ С ПОМОЩЬЮ ДВУХЧАСТОТНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

С использованием численного моделирования проанализирована зависимость эффективной поверхности рассеяния дождевых капель от их диаметра для различных значений используемых длин волн. Показано, что в коротковолновом участке СВЧ-диапазона ($\lambda < 3,2$ см) она имеет немонотонный характер, обусловленный резонансным рассеянием электромагнитных волн на каплях дождя. Использование комбинаций рабочих длин волн $\lambda_1 = 3,2$ см, $\lambda_2 = 10$ см, а также $\lambda_1 = 5,5$ см, $\lambda_2 = 10$ см не позволяет применить двухчастотный метод дистанционного зондирования для восстановления микроструктурных параметров осадков, так как зависимость дифференциальной эффективной поверхности рассеяния от размеров частиц практически отсутствует. Получена система неравенств, позволяющая решить проблему неоднозначности при восстановлении интенсивности дождя по данным двухчастотного зондирования при использовании меньшей длины волны $\lambda_1 = 8$ мм. Показано, что использование длинноволнового участка СВЧ-диапазона приводит к уменьшению значения радиолокационной отражаемости мелкокапельной части осадков, требует существенного повышения энергетического потенциала метеорологической радиолокационной станции и ужесточает требования к точности проведения измерений. Ил. 8. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: теория Ми, дифференциальная эффективная площадь рассеяния, двухчастотное зондирование, интенсивность осадков.

Несмотря на широкое распространение методов одночастотного радиолокационного зондирования дождей [1], их использование часто связано с неоднозначностью получаемых данных. Действительно, интенсивность, водность и другие параметры дождя определяются большим количеством различных факторов, в связи с чем одной и той же интенсивности могут соответствовать различные виды распределения капель по размерам, которые в значительной мере определяют характеристики рассеяния электромагнитных волн на частицах осадков. В частности, интенсивность дождя пропорциональна третьей степени диаметра частиц D^3 , а радиолокационная отражаемость осадков пропорциональна его шестой степени D^6 . Поэтому основной вклад в величину радиолокационной отражаемости вносят крупные капли, а интенсивность (водность) дождя определяется мелкокапельной частью осадков, так как число мелких капель существенно превышает количество крупных капель.

В этой связи представляет значительный интерес разработка методов дистанционного зондирования без указанного недостатка. В частности, значительных успехов достигли методы зондирования осадков одновременно на двух поляризациях [2], которые основаны на зависимости показателя степени несферичности капель от их среднекубического размера. Также были предложены методы, основанные на использовании двухчастотного зондирования [3], когда измеряется значение дифференциальной эффективной площади рассеяния (ДЭПР) $\sigma_{\text{д}}$, равное отношению эффективной площади рассеяния (ЭПР) капли на двух разных длинах волн

$$\sigma_{\text{д}} = \frac{\sigma(\lambda_1)}{\sigma(\lambda_2)}. \quad (1)$$

В данном случае физической основой метода является разный характер частотной зависимости ЭПР капель от их размера, в связи с чем, были специально разработаны МРЛС, работающие на двух частотах с совмещенными антеннами. Однако, в связи с резонансным рассеянием радиоволн на диэлектрических частицах [4], измерение интенсивности осадков связано с неоднозначностью получаемых данных [3].

Целью настоящей работы является анализ свойств ДЭПР в различных диапазонах длин волн и поиск путей обеспечивающих однозначность измерения интенсивности осадков.

Двухчастотное зондирование одиночных капель дождя. Рассмотрим результаты численного анализа электромагнитного рассеяния на диэлектрических каплях сферической формы с использованием строгой теории рассеяния Ми на диэлектрической сфере [4]. На рис. 1 приведены результаты вычисления зависимости ЭПР сферической капли от ее диаметра на длинах волн $\lambda = 8$ мм; 3,2; 5,5; 7; 10 и 35 см (кривые 1–5 соответственно), которые широко используются в современных метеорологических РЛС (МРЛС) [5].

Как видно, в коротковолновом диапазоне СВЧ ($\lambda = 8$ мм) наблюдается немонотонный ход зависимости ЭПР от диаметра капель, что является следствием резонансного рассеяния (дифракционный параметр $kD \sim 1,6$), в то время как в длинноволновых диапазонах, далеких от резонансной области рассеяния, зависимость носит монотонный характер.

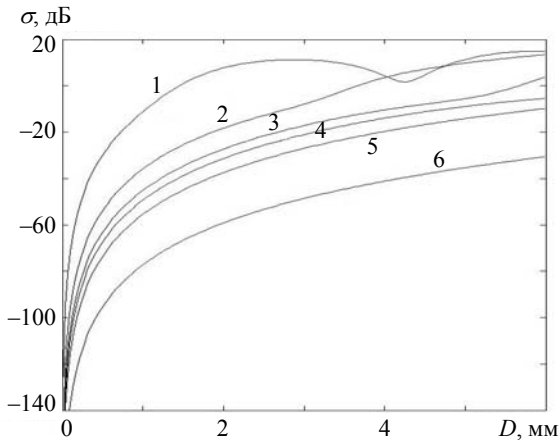


Рис. 1. Зависимость ЭПР сферической капли от ее диаметра ($\lambda = 8$ мм; 3,2; 5,5; 7; 10 и 35 см (кривые 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответственно))

Указанные особенности решающим образом сказываются на характере поведения ДЭПР в зависимости от диаметра капель, что показано на рис. 2 (кривая 1 соответствует дифференциальной ЭПР для длин волн $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см, кривая 2 – $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 5,5$ см, кривая 3 – $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 10$ см; кривая 4 – $\lambda_1 = 5,5$ см и $\lambda_2 = 10$ см).

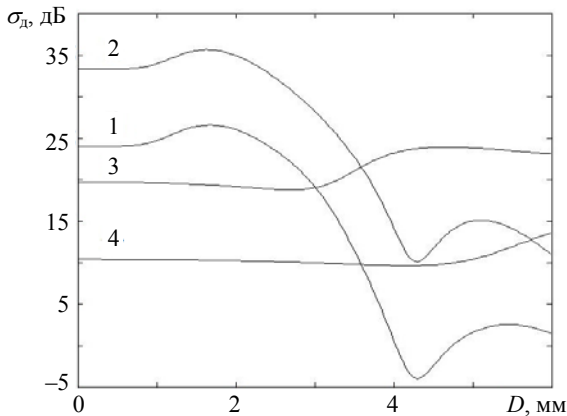


Рис. 2. Зависимость ДЭПР одиночной сферической капли от ее диаметра: (кривая 1 – $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см; кривая 2 – $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 5,5$ см; кривая 3 – $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 10$ см; кривая 4 – $\lambda_1 = 5,5$ см и $\lambda_2 = 10$ см)

Как видно, в области малых диаметров частиц $D \leq 1$ мм ДЭПР неоднозначно зависит от диаметра частиц (одному и тому же значению ДЭПР соответствуют два значения диаметра частиц). При этом в длинноволновом участке диапазона ($\lambda_{1,2} \geq 3$ см, кривые 3 и 4) ДЭПР вообще слабо зависит от размеров частиц, что не позволяет использовать двухчастотный метод зондирования для восстановления параметров осадков. Кажется бы, можно избежать неоднозначной зависимости дифференциальной ЭПР частиц, выбирая

достаточно большие длины волн. Однако в рэлеевской области рассеяния значение ЭПР пропорционально $\sigma \approx D^6/\lambda^4$, в связи с чем ДЭПР практически не зависит от размеров частиц $\sigma_d \approx (\lambda_2/\lambda_1)^4$ и применение двухчастотного зондирования не представляется возможным.

Более того, важно, чтобы значение ЭПР частиц на наиболее короткой длине волны нелинейно зависело от их диаметра и не попадало в область резонансного рассеяния, что как раз и приводит к неоднозначной зависимости ДЭПР от размеров частиц. Как показывает численное моделирование, значение $\lambda_1 = 7$ см является наиболее короткой длиной волны, для которой отсутствует резонансное рассеяние для капель максимально возможного размера $D = 6,5$ мм. В этой связи на рис. 3 приведены результаты вычисления ДЭПР для $\lambda_1 = 7$ см ($\lambda_2 = 15$ см – кривая 1, $\lambda_2 = 21$ см – кривая 2, $\lambda_2 = 35$ см – кривая 3). Как видно, выбор длин волн $\lambda_1 = 7$ см и $\lambda_2 = 35$ см является наилучшим вариантом, когда, с одной стороны, ДЭПР монотонно зависит от диаметра капель, а с другой стороны, изменение значения ДЭПР максимально и достигает $\Delta\sigma_d \geq 3$ дБ в диапазоне размеров капель $0,1 < D < 6,5$ мм.

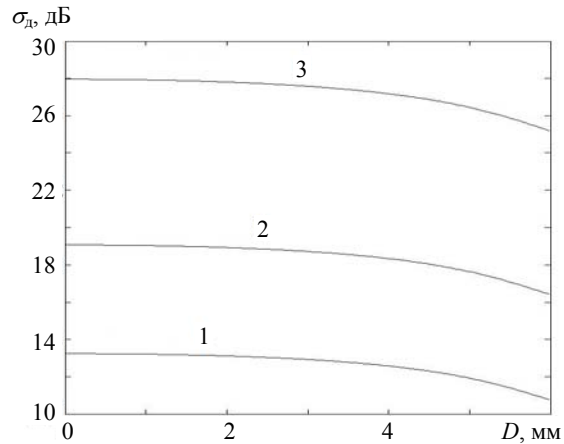


Рис. 3. Зависимость ДЭПР одиночной сферической капли от ее диаметра для $\lambda_1 = 7$ см ($\lambda_2 = 15$ см – кривая 1; $\lambda_2 = 21$ см – кривая 2; $\lambda_2 = 35$ см – кривая 3)

Сделанные предположения относительно использования длинноволнового СВЧ-диапазона подтверждаются результатами анализа (рис. 4), когда одна из длин волн равна $\lambda_1 = 3$ см, а другая – принимает значения $\lambda_2 = 15$ см – кривая 1; $\lambda_2 = 21$ см – кривая 2; $\lambda_2 = 35$ см – кривая 3. Как видно, зависимость ДЭПР от диаметра капли носит ярко выраженный немонотонный характер, что неприемлемо для восстановления интенсивности осадков по данным двухчастотного зондирования.

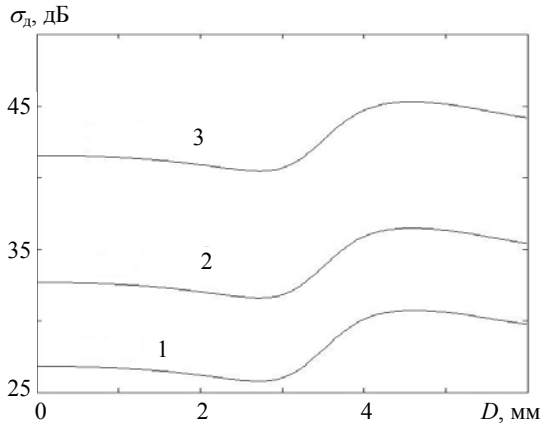


Рис. 4. Зависимость ДЭПР одиночной сферической капли от ее диаметра для $\lambda_1 = 3$ см ($\lambda_2 = 15$ см – кривая 1; $\lambda_2 = 21$ см – кривая 2; $\lambda_2 = 35$ см – кривая 3)

Таким образом, несмотря на уменьшение относительного размера частиц $\lambda/D \leq 0,1$, использование длинноволновых диапазонов СВЧ ($\lambda_1 = 7$ см и $\lambda_2 = 35$ см) открывает новые возможности при двухчастотном зондировании осадков, в отличие от традиционно используемых длин волн $\lambda = 0,8 \div 10$ см.

Двухчастотное зондирование полидисперсной среды капель дождя. Реальные дожди представляют собой полидисперсную среду, состоящую из капель разных размеров. В этом случае удельная ЭПР дождя (ЭПР единичного объема) в приближении некогерентного рассеяния записывается в виде [4, 6]

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

где $N_T = \int_0^{\infty} N(D) dD$, м^{-3} – концентрация капель

(количество частиц в единичном объеме); σ_p – ЭПР отдельной капли, мм^2 [7], $F(D)$ – закон распределения частиц по размерам, мм^{-1} ; $N(D) = N_T F(D)$ – количество капель с размерами $D \in D, D + \Delta D$ в единичном объеме.

В настоящее время для описания распределения частиц дождя по размерам широко используется трехпараметрическое гамма-распределение в виде [8]

$$F(D) = \frac{N_0 D^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha + 1}} \exp\left(-\frac{D}{\beta}\right), \quad D > 0, \quad (3)$$

где α, β – параметры распределения (микроструктурные параметры), которые определяют среднекубический диаметр капель, а третий параметр N_0 определяется концентрацией капель N_T следующим образом:

$$N_T = N_0 \Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha + 1}, \quad (4)$$

Представляют интерес эмпирические зависимости параметров гамма-распределения от интенсивности дождя, которые получены в результате обширных метеорологических экспериментов [6, 9]:

$$\alpha = 3,8I^{-0,42}, \quad \beta = 0,148I^{0,38}, \quad (5)$$

$$N_T = 495,45 \left[1 - \exp\left(-\frac{I}{3,17}\right)\right] \quad (6)$$

и хорошо описывают результаты измерений для умеренных дождей с интенсивностью $I \leq 20$ мм/ч.

Рассмотрим зависимость величины измеряемой ДЭПР от интенсивности осадков, используя соотношения (1)–(6). На рис. 5 кривая 1 соответствует длинам волн $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см; кривая 2 – $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 5,5$ см; кривая 3 – $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 10$ см, а кривая 4 – $\lambda_1 = 5,5$ см и $\lambda_2 = 10$ см.

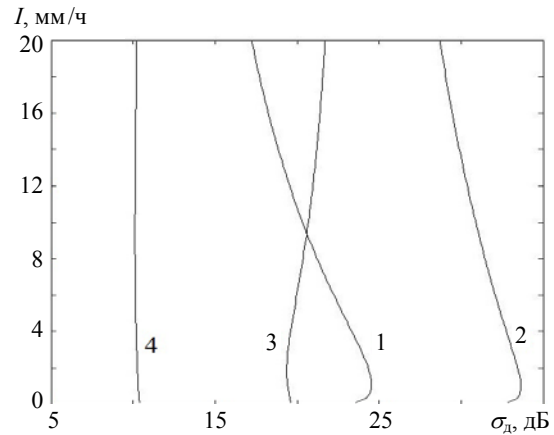


Рис. 5. Восстановление интенсивности дождя по значениям удельной ДЭПР полидисперсной среды (кривая 1 – $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см; кривая 2 – $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 5,5$ см; кривая 3 – $\lambda_1 = 3,2$ см и $\lambda_2 = 10$ см; кривая 4 – $\lambda_1 = 5,5$ см и $\lambda_2 = 10$ см)

Как видно, использование двухчастотного зондирования возможно далеко не всегда, например кривые 3 и 4 отличаются очень высокой крутизной, в связи с чем большие изменения интенсивности осадков соответствуют очень малым изменениям ДЭПР, что предъявляет не реально высокие требования к точности радиолокационных измерений. С другой стороны, в области малых значений интенсивностей осадков кривые 1 и 2 содержат участки неоднозначного измерения интенсивности (одному и тому же значению ДЭПР соответствуют два значения интенсивности дождя), что является следствием немонотонного характера зависимости ДЭПР одиночных капель от их размеров (см. рис. 2).

В то же время проблема неоднозначности при двухчастотном зондировании интенсивности осадков в диапазонах длин волн, которые широко

используются в радиометеорологии [10], может быть решена с помощью специальной обработки отраженных сигналов. Действительно, в работах [7, 11] предложена система неравенств, решение которой, в принципе, обеспечило однозначность измерения для рабочих длин волн $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см.

Указанный подход основан на различном поведении зависимости измеряемой удельной ЭПР от интенсивности дождя для разных длин волн [7, 11]. В частности, на рис. 6, а в качестве примера приведена зависимость ДЭПР от интенсивности дождя для длин волн $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см, где характерные точки *A*, *B* и *C* соответствуют минимальной интенсивности дождя ($I = 0,1$ мм/ч, $\sigma_d = 23,3$ дБ), точке перегиба

B ($I = 1,1$ мм/ч, $\sigma_d = 24,55$ дБ) и точке неоднозначности *C* ($I = 4,2$ мм/ч, $\sigma_d = 23,3$ дБ).

Используя монотонный характер зависимости удельной ЭПР от интенсивности дождя для соответствующих длин волн (рис. 6, б; кривые 1 и 2 соответствуют длинам волн $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см), можно предложить следующую систему неравенств для выделения необходимой ветви (1 или 2 на рис. 6, а) однозначной зависимости:

$$\begin{cases} I \leq I_0 \text{ мм/ч, если } \sigma_0(\lambda_1) \leq \sigma_{01}; \sigma_0(\lambda_2) \leq \sigma_{02}, \\ I > I_0 \text{ мм/ч, если } \sigma_0(\lambda_1) > \sigma_{01}; \sigma_0(\lambda_2) > \sigma_{02}, \end{cases} \quad (7)$$

где константы I_0 , σ_{01} , σ_{02} определяются выбором рабочих длин волн, а их значения приведены в таблице.

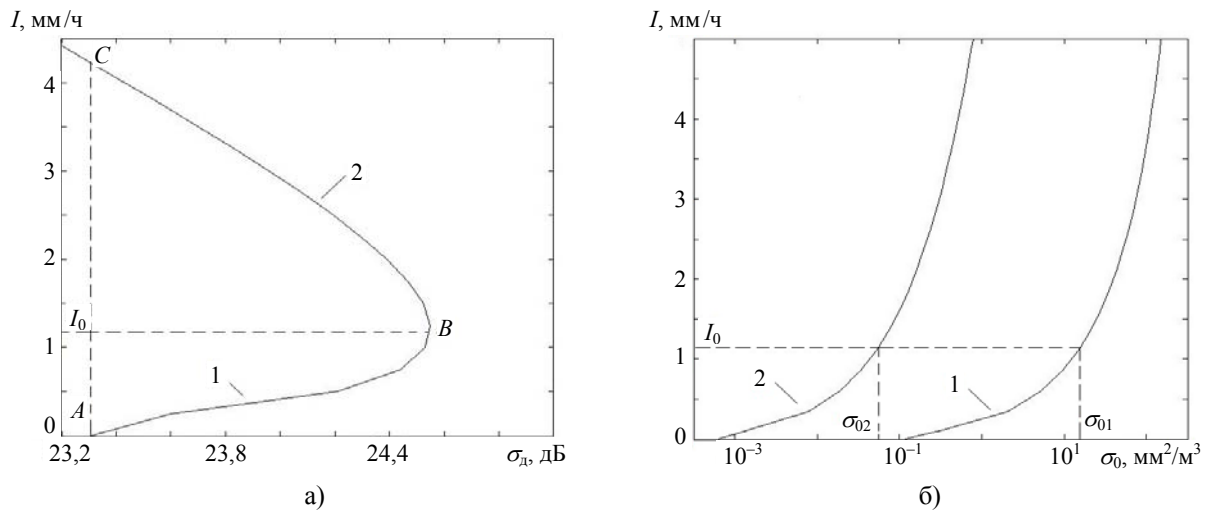


Рис. 6. Зависимость ДЭПР (а) и удельной ЭПР (б) от интенсивности дождя (кривые 1 и 2 – соответствуют $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см)

Значения параметров для системы неравенств (7)

Рабочие длины волн	Точка <i>A</i>	Точка <i>B</i>	Точка <i>C</i>	σ_{01} , мм ² /м ³	σ_{02} , мм ² /м ³
$\lambda_1 = 8$ мм $\lambda_2 = 3,2$ см	$I = 0,1$ мм/ч $\sigma_d = 23,3$ дБ	$I = 1,1$ мм/ч $\sigma_d = 24,55$ дБ	$I = 4,2$ мм/ч $\sigma_d = 23,3$ дБ	15,85	0,05
$\lambda_1 = 8$ мм $\lambda_2 = 5,5$ см	$I = 0,1$ мм/ч $\sigma_d = 32,7$ дБ	$I = 1,1$ мм/ч $\sigma_d = 33,65$ дБ	$I = 4,2$ мм/ч $\sigma_d = 32,7$ дБ	15,85	0,006
$\lambda_1 = 8$ мм $\lambda_2 = 10$ см	$I = 0,1$ мм/ч $\sigma_d = 43,24$ дБ	$I = 0,85$ мм/ч $\sigma_d = 43,97$ дБ	$I = 3,2$ мм/ч $\sigma_d = 43,24$ дБ	9,55	0,0004

Данные, приведенные в таблице, и система неравенств (7) позволяют, в принципе, решить проблему неоднозначности при двухчастотном зондировании жидких осадков с помощью метеорологических РЛС, использующих длины волн $\lambda_1 = 8$ мм, $\lambda_2 = 3,2$ см, $\lambda_3 = 5,5$ см и $\lambda_4 = 10$ см. В то же время, выбирая рабочие длины волн специальным образом, можно решить проблему неоднозначности при восстановлении интенсивности дождя по результатам двухчастотных измере-

ний. Действительно, как показано выше, причиной неоднозначности является резонансное рассеяние падающего поля для минимальной длины волны λ_1 , что можно устранить, выбирая значение рабочих длин волн в длинноволновой части сантиметрового и дециметрового диапазонов. В частности, следуя приведенным выше рекомендациям, выбор короткой длины волны $\lambda_1 \geq 7$ см обеспечивает не только монотонный характер зависимости ЭПР одиночных капель от их разме-

ров (см. рис. 3), но также монотонную зависимость ДЭПР полидисперсной среды.

На рис. 7 приведены результаты решения обратной задачи по восстановлению интенсивности дождя для разных комбинаций длин волн, включая: $\lambda_1 = 7$ см и $\lambda_2 = 15$ см (кривая 1), $\lambda_1 = 7$ см и $\lambda_2 = 21$ см (кривая 2), а также $\lambda_1 = 7$ см и $\lambda_2 = 35$ см (кривая 3).

Как и в случае одиночных частиц, использование СВЧ-диапазона позволяет избавиться от неоднозначности при восстановлении интенсивности осадков в широких пределах (минимум до 20 мм/ч). В первую очередь это относится к комбинации длин волн $\lambda_1 = 7$ см и $\lambda_2 = 35$ см, для которой изменение интенсивности дождя в пределах $I = 0 \div 20$ мм/ч соответствует вариациям ДЭПР на 1 дБ.

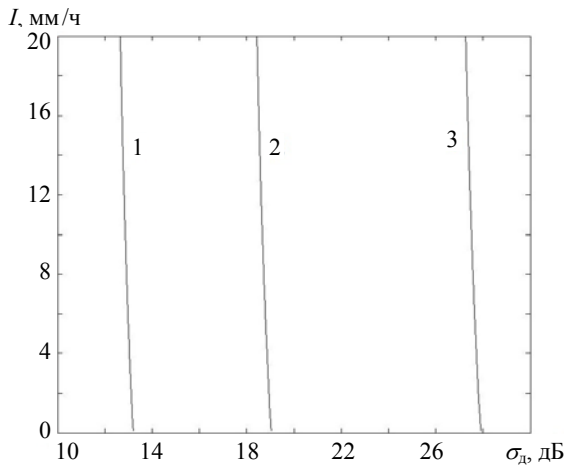


Рис. 7. Восстановление интенсивности дождя по дифференциальным значениям удельной ЭПР полидисперсной среды для длины волны $\lambda_1 = 7$ см ($\lambda_2 = 15$ см – кривая 1; $\lambda_2 = 21$ см – кривая 2; $\lambda_2 = 35$ см – кривая 3)

При этом, как показывает анализ, выбор длины волны $\lambda_1 \geq 7$ см является достаточно критичным, что подтверждается вычислениями по восстановлению интенсивности дождя с использованием диапазона $\lambda_1 = 3$ см (рис. 8, кривая 1 – $\lambda_2 = 15$ см; кривая 2 – $\lambda_2 = 21$ см; кривая 3 – $\lambda_2 = 35$ см).

Отметим, что использование длинноволновой части СВЧ-диапазона связано, как правило, с ухудшением пространственной разрешающей способности ($\Delta\theta \sim \lambda/D_A$) и радиолокационной отражаемости мелкокапельной части осадков ($\text{ЭПР} \sim D^6/\lambda^4$). Это требует существенного увеличения энергетического потенциала МРЛС и предъявляет значительные требования к точности проведения измерений в связи с небольшими изменениями дифференциального значения ($\Delta\sigma_d \leq 1$ дБ) в диапазоне интенсивностей дождя $I = 0 \div 20$ мм/ч.

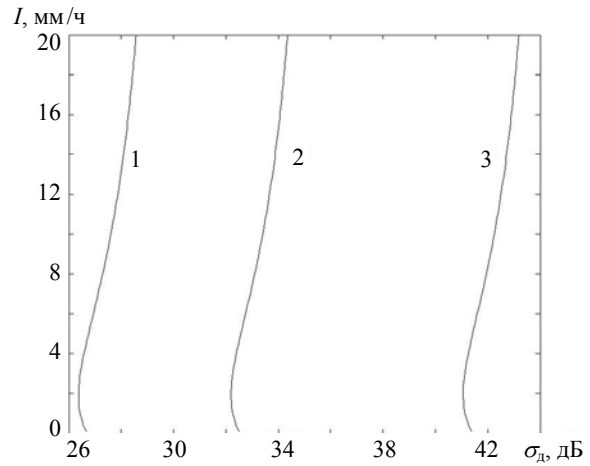


Рис. 8. Восстановление интенсивности дождя по удельному значению ДЭПР для $\lambda_1 = 3$ см (кривая 1 – $\lambda_2 = 15$ см; кривая 2 – $\lambda_2 = 21$ см; кривая 3 – $\lambda_2 = 35$ см)

Выводы. Таким образом, показано, что используя специальную вычислительную процедуру или выбирая оптимальным образом рабочие длины волн, можно в значительной мере ослабить ограничения, связанные с неоднозначностью решения обратной задачи по восстановлению интенсивности дождя с помощью двухчастотного радиолокационного зондирования.

Зависимость ЭПР капель от их диаметра в коротковолновом участке СВЧ-диапазона ($\lambda < 3,2$ см) носит немонотонный характер, что приводит к неоднозначной зависимости ДЭПР от диаметра частиц в связи с резонансным рассеянием падающего электромагнитного поля (дифракционный параметр $kD \geq 1,6$).

Использование комбинаций рабочих длин волн $\lambda_1 = 3,2$ см, $\lambda_2 = 10$ см, а также $\lambda_1 = 5,5$ см, $\lambda_2 = 10$ см не позволяет использовать двухчастотный метод зондирования для восстановления микроструктурных параметров осадков, так как зависимость ДЭПР от размеров частиц практически отсутствует.

Получена система неравенств для восстановления интенсивности дождя по данным двухчастотного зондирования, использование которой обеспечивает однозначное решение задачи для комбинаций длин волн $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 3,2$ см; $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 5,5$ см, $\lambda_1 = 8$ мм и $\lambda_2 = 10$ см. При этом лучшие результаты соответствуют комбинации длин волн $\lambda_1 = 8$ мм/ $\lambda_2 = 3,2$ см.

Использование длинноволнового участка СВЧ-диапазона приводит к уменьшению радиолокационной отражаемости мелкокапельной части осадков, требует существенного увеличения энергетического потенциала МРЛС и предъявляет значительные требования к точности проведения измерений.

Библиографический список

1. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии / Д. Атлас. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 194 с.
2. Yanovsky F. J. Doppler-Polarimetric Radar Meteorological Applications / F. J. Yanovsky, Yu. A. Averyanova // Proc. Fourth World Congress “Aviation in the XXI Century – Safety in Aviation and Space Technologies” (RMSW-2010). – 2010. – Vol. 2. – P. 22.16–22.18.
3. Khlopov G. Profiling of rain parameters by double frequency radar / G. Khlopov, A. Linkova, O. Voitovych // Proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symp. (MRRS’2011). – Kiev, 2011. – P. 213–216.
4. Хюлст Г. ван де. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван де Хюлст; пер. с англ. под ред. В. В. Соболева. – М.: Изд. иностр. лит., 1961. – 536 с.
5. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Т. А. Базлова, Н. В. Бочарников, Г. Б. Брылев и др. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 333 с.
6. Литвинов И. В. Структура атмосферных осадков / И. В. Литвинов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 153 с.
7. Двухчастотное зондирование водяных капель эллипсоидальной формы / А. Б. Веселовская, О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. И. Хлопов // Радиофизика и электрон. – 2012. – 3(17), № 4. – С. 37–43.
8. Haddad Z. S. Parameterizing the raindrop distribution / Z. S. Haddad, S. L. Durden, E. Im // J. Appl. Meteor. – 1996. – 35, N 1. – P. 3–13.
9. Linkova A. Use of microstructure parameters for data processing of double frequency measurement of rain intensity / A. Linkova // Telecommunications and Radio Engineering. – 2012. – 71, N 5. – P. 423–433.
10. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии / В. Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 344 с.
11. Войтович О. А. Двухчастотное профилирование параметров дождя / О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. И. Хлопов // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), N 3. – С. 51–60.

Рукопись поступила 16.07.2014.

G. Khlopov, G. Veselovska, O. Voitovych

DISAMBIGUATION FOR SOLVING THE INVERSE PROBLEM OF RECONSTRUCTION OF RAIN INTENSITY USING DOUBLE-FREQUENCY RADAR SOUNDING

We analyzed the radar cross section dependence of raindrops on their diameter for different wavelengths by using numerical simulation. It is shown that in the short microwave

range ($\lambda < 3.2$ cm), the dependence has nonmonotonic character due to resonant scattering of electromagnetic waves by raindrops. Using combination of operating wavelengths $\lambda_1 = 3.2$ cm, $\lambda_2 = 10$ cm, and $\lambda_1 = 5.5$ cm, $\lambda_2 = 10$ cm does not allow to use a double-frequency method of remote sensing for recovery of microstructural parameters of precipitation, because the dependence of the differential radar cross section on size of particle is practically absent. We obtained the system of inequalities, which allows to solve the problem of ambiguity when recovering rain intensity according to the double-frequency sensing by using shorter wavelength $\lambda_1 = 8$ mm. It is shown that the use of the long-wavelength range of microwave band leads to decrease of the radar reflectivity value for small raindrops and it requires a significant increasing of energy potential of weather radar and tightens the requirements for the accuracy of the measurement.

Key words: Mie theory, radar cross section, double-frequency sounding, rain intensity.

Г. Б. Веселовська, О. А. Войтович, Г. І. Хлопов

УСУНЕННЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТІ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗВОРотної ЗАДАЧІ З ВІДНОВЛЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ДОЩУ ЗА ДОПОМОГОЮ ДВОЧАСТОТНОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

З використанням числового моделювання проаналізовано залежність ефективної площі розсіювання дощових крапель від їх діаметра для різних значень використовуваних довжин хвиль. Показано, що в короткохвильовій частині діапазону НВЧ ($\lambda < 3,2$ см) вона має немонотонний характер, зумовлений резонансним розсіюванням електромагнітних хвиль на краплях дощу. Використання комбінацій робочих довжин хвиль $\lambda_1 = 3,2$ см, $\lambda_2 = 10$ см, а також $\lambda_1 = 5,5$ см, $\lambda_2 = 10$ см не дозволяє застосувати двочастотний метод дистанційного зондування для відновлення мікроструктурних параметрів опадів, тому що залежність диференційної ефективної площі розсіювання від розмірів частинок практично відсутня. Отримано систему нерівностей, яка дозволяє вирішити проблему неоднозначності при відновленні інтенсивності дощу за даними двочастотного зондування при використанні меншої довжини хвилі $\lambda_1 = 8$ мм. Показано, що використання довгохвильової смуги НВЧ-діапазону призводить до зменшення значення радіолокаційної відбиваності дрібнокрапельної частини опадів, а також потребує суттєвого підвищення енергетичного потенціалу метеорологічної радіолокаційної станції та робить більш жорсткими вимоги до точності проведення вимірювань.

Ключові слова: теорія Мі, диференційна ефективна площа розсіювання, двочастотне зондування, інтенсивність опадів.