

УДК 551.501.8+551.508.85

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФАЗЫ В КАЧЕСТВЕ
ИНФОРМАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА В МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОЛЯРИМЕТРАХ**

Корбан В.Х., Корбан Д.В., Дегтярева Л.Н.

*Одесская национальная академия связи им.А.С.Попова,
65029, Украина, г.Одесса, ул. Кузнечная, 1.
l.demenko@mail.ru*

**ВИКОРИСТАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНОЇ ФАЗИ ЯК ІНФОРМАЦІЙНОГО ПАРАМЕТРУ
В МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ПОЛЯРИМЕТРАХ**

Корбан В.Х., Корбан Д.В., Дегтярьова Л.М.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м.Одеса, вул. Ковальська, 1.
l.demenko@mail.ru*

**USE DIFFERENTIAL PHASE AS INFORMATION PARAMETERS IN WEATHER
RADAR POLARIMETRY**

Korban V.Kh., Korban D.V., Degtjarjeva L.N.

*O.S.Popov Odessa national academy of telecommunicationcs,
1 Kovalska St., Odessa, 65029, Ukraine.
l.demenko@mail.ru*

Аннотация. В статье теоретически обоснована возможность использования дифференциальной фазы при радиолокационном распознавании выпадающего дождя различной интенсивности и измерении его характеристики. Использована форма частиц ливневых осадков в качестве геометрической модели при расчете ортогональных компонент электромагнитной волны, отраженной от частиц выпадающих осадков. Излучается неполяризованная электромагнитная волна, которая после взаимодействия с частицами выпадающего дождя поляризуется в соответствии с формой и ориентацией капель дождя. Характеристикой взаимосвязи электромагнитной волны с радиолокационным объемом капель выпадающего дождя является поляризационная матрица рассеяния, коэффициенты которой определяются формой, размерами, фазовым состоянием и ориентацией капель дождя. Определены амплитуды и фазы ортогональных компонент отраженной электромагнитной волны, позволяющие получить дифференциальную фазу, чувствительную не только к изменению параметров выпадающего дождя, но и к поляризационным параметрам электромагнитной волны. Получена зависимость дифференциальной фазы от интенсивности выпадающего дождя с учетом ориентации капель дождя.

Ключевые слова: дифференциальная фаза, диэлектрическая проницаемость, параметры поляризационного эллипсоида, интенсивность осадков, углы ориентации капель дождя.

Анотація. У статті теоретично обґрунтована можливість використання диференційної фази при радіолокаційному розпізнаванні дощу, що випадає, різної інтенсивності та вимірювати його характеристики. Використана форма частинок зливових опадів як геометрична модель при розрахунку ортогональних компонент електромагнітної хвилі, відбитої від частинок опадів, що випадають. Випромінюється неполяризована електромагнітна хвиля, яка після взаємодії з частинками дощу, що випає, поляризується у відповідності з формою й орієнтацією крапель дощу. Характеристикою взаємозв'язку електромагнітної хвилі з радіолокаційним об'ємом крапель дощу, що випадає, є поляризаційна матриця розсіювання, коефіцієнти якої визначаються формою, розмірами, фазовим станом і орієнтацією крапель дощу. Визначені амплітуди і фази ортогональних компонент відбитої

електромагнітної хвилі, які дозволяють отримати диференційну фазу, чуттєву не тільки до зміни параметрів дощу, що випадає, але і до поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі. Отримана залежність диференційної фази від інтенсивності дощу, що випадає, з врахуванням орієнтації крапель дощу.

Ключові слова: диференційна фаза, діелектрична проникність, параметри поляризаційного еліпсоїду, інтенсивність опадів, кути орієнтації крапель дощу.

Abstract. The paper theoretically justified the use of differential phase when radar is detected the drop-down rain of varying intensity and measuring its performance. Used heavy rainfall the particle shape as the geometrical model in the calculation of the orthogonal components of the electromagnetic waves reflected from the particle precipitation. It radiates non-polarized electromagnetic wave, which after interaction with polarized particles drop down rain according to the shape and orientation of the rain. A characteristic of the relationship of the electromagnetic wave from the radar volume drops rain falls is a polarization scattering matrix coefficients are determined by the shape, size, and orientation of the phase state of raindrops. Determined amplitude and phase orthogonal components of the reflected electromagnetic waves, allowing to obtain differential phase-sensitive not only to modify the pull-down rain, but also to an electromagnetic wave polarization parameters. The dependence of the differential phase of the intensity of rain falls in view of the orientation of raindrops.

Key words: differential phase, the dielectric constant and the parameters of the polarization ellipsoid, precipitation intensity, orientation angles rain.

Атмосферные осадки играют существенную роль, с одной стороны, в обеспечении жизнедеятельности населения Земли, а, с другой – с ними связаны опасные погодные ситуации, такие как катастрофические наводнения и градобития обширных сельскохозяйственных территорий. Поэтому вопросам прогноза и измерения их характеристик уделялось и уделяется особое внимание, как метеорологов, климатологов, так и радиометеорологов. К настоящему времени разработаны и используются на сети гидрометслужбы различные виды дождемеров и осадкомеров. Однако радиолокационные дистанционные методы имеют преимущество в связи с получением информации о количестве и интенсивности выпадающих осадков на большой площади до тысяч квадратных километров, в то время как метеорологическая сеть измеряет их характеристики только в одной точке, т.е. в месте установки дождемера.

К настоящему времени разработаны радиолокационные методы и аппаратура, использующие в качестве информативного параметра электромагнитной волны ее амплитуду, т.е. отраженную от частиц осадков мощность, а в качестве предикторов радиолокационную отражаемость или коэффициент ослабления [1, 2, 3, 4, 5]. Однако неопределенность и изменчивость микроструктурных характеристик выпадающих осадков приводит к существенному затуханию радиоволн, деполаризации каплями дождя и частицами льда, дисперсии фазы и амплитуды. В метеорологических радиолокаторах используются полосы частот x , s , c и излучаемая мощность от 200 до 1000 кВт. В национальных сетях различных стран используются как некогерентные, так и когерентные доплеровские МРЛ, разработаны программы интерпретации первичных радиолокационных измерений, в которых использованы последние достижения по радиолокационной метеорологии [6]. Однако в связи с тем, что частицы осадков имеют несферическую форму (кроме морозящих осадков) и существует угол ориентации относительно вертикальной оси в электрическом поле передаваемого сигнала, отраженный сигнал имеется в двух ортогональных плоскостях. Поэтому в настоящее время разрабатываются и внедряются в практику поляризационные методы обнаружения и распознавания выпадающих осадков, и радиолокационные метеорологические поляриметры [7].

Поляризационные методы используют в качестве информативных параметров дифференциальную отражаемость, линейное или круговое деполаризационное отношение. Измерение характеристик выпадающих осадков базируется на измерении эхо-сигнала для

двух ортогонально поляризованных волн, а зондирующие импульсы излучаются последовательно на горизонтальной и вертикальной поляризациях. Поляризационный метод основан на наблюдениях, которые установили несферичность частиц выпадающих осадков, имеющих форму сплюснутого у полюсов эллипсоида вращения. Поэтому направленные вдоль осей сфероида компоненты дипольного момента независимо возбуждаются направленными вдоль этих осей компонентами падающего электрического поля. Дипольный момент пропорциональный напряженности падающего электрического поля, объему, диэлектрическим свойствам сфероидов и коэффициенту, зависящему от формы и ориентации частиц осадков.

Используемые в поляризационном методе информативные параметры обладают существенным недостатком, который заключается в сложности получения распределения капель частиц дождя по размерам измеренных значений дифференциальной отражаемости, что приводит к 25% ошибке в измерении интенсивности дождя. Поэтому возникает необходимость в использовании более информативного параметра поляризационного метода – дифференциальной фазы, что и является **целью данной статьи**, а также обоснование метода измерения интенсивности осадков по радиолокационному измерению дифференциальной фазы радиолокационного сигнала, отраженного от зоны выпадающих осадков.

Будем предполагать, что скорость выпадения осадков и направление оси симметрии капель сохраняется по всей траектории распространения волны, векторы поляризации которых направлены параллельно и перпендикулярно плоскости оси симметрии капель.

Радиолокационный метеорологический поляриметр позволяет излучать электромагнитную волну линейной, круговой, эллиптической поляризации, а также неполяризованную волну и производить одновременный прием двух ортогональных компонент отраженной от ливневых осадков электромагнитной волны с измерением их амплитуд и разности фаз между ними. Определенный интерес представляет облучение ливневых осадков неполяризованной волной, для которой

$$\begin{aligned} E_{xu} &= a e^{i(\omega t + \varphi_u)}, \\ E_{yu} &= a' e^{i(\omega t + \varphi_u)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $a^2 + a'^2 = 1$, $a' = \sqrt{1 - a^2}$.

Наведенные в частице ливневых осадков дипольные моменты запишутся в виде:

$$\begin{aligned} P_x &= e^{i\omega t} [(g - g')\alpha_1(\alpha_1 a + \alpha_2 e^{i(\varphi' - \varphi)} a') + g' a], \\ P_y &= e^{i\omega t} [(g - g')\alpha_2(\alpha_1 a e^{i(\varphi' - \varphi)} + \alpha_2 a') + g' a]. \end{aligned} \quad (2)$$

Отраженная волна запишется через свои компоненты следующим образом:

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{|P_x|^2}{|P_y|^2} = \frac{[(g - g')\alpha_1(\alpha_1 a + \alpha_2 \sqrt{1 - a^2} \cos(\varphi' - \varphi) + g' a)]^2 + [(g - g')\alpha_1 \alpha_2 \sqrt{1 - a^2} \sin(\varphi' - \varphi)]^2}{g_{\text{сф}}^2}, \\ I_y &= \frac{|P_x|^2}{|P_y|^2} = \frac{[(g - g')\alpha_1(\alpha_2 a \cos(\varphi' - \varphi) + \alpha_2 \sqrt{1 - a^2}) + g^2 \sqrt{1 - a^2}]^2 + [(g - g')^2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 a^2 \sin^2(\varphi' - \varphi)]^2}{g_{\text{сф}}^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом того, что

$$a'^2 = a^2 = 1, \quad 2a^2 = 1, \quad a = \frac{1}{\sqrt{2}} = \alpha,$$

$$\begin{aligned} \varphi' - \varphi = \Phi, \quad \cos(\varphi' - \varphi) = 0, \quad \sin(\varphi' - \varphi) = 0; \\ \sin^2(\varphi' - \varphi) = \frac{1}{2}, \quad \cos^2(\varphi' - \varphi) = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Соотношения (3) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{(g - g')^2 \alpha_1^2 (\alpha_1 + \alpha_2 \cos \Phi)^2 + 2(g - g') g' \alpha_1 (\alpha_1 + \alpha_2 \cos \Phi)}{g_{\text{сф}}} + \frac{g'^2 + (g - g')^2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \sin^2 \Phi}{2g_{\text{сф}}^2} = \\ &= \frac{1}{2g_{\text{сф}}^2} \left[(g - g')^2 \alpha_1^2 (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) + g'^2 + 2(g - g') \alpha_1 g'^2 \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\left\{ \frac{g}{g_{\text{сф}}} - \frac{g'}{g_{\text{сф}}} \right\}^2 \alpha_1^2 (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) + \left\{ \frac{g'}{g_{\text{сф}}} \right\}^2 + 2 \left\{ \frac{g'}{g_{\text{сф}}} \right\} \left\{ \frac{g}{g_{\text{сф}}} - \frac{g'}{g_{\text{сф}}} \right\} \alpha_1^2 \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I_y &= \frac{1}{2g_{\text{сф}}^2} \left[(g - g')^2 \alpha_2^2 (\alpha_1^2 \cos^2 \Phi) + \alpha_2^2 + 2\alpha_1 \alpha_2 \cos \Phi + g'^2 + 2g'(g - g') \alpha_2^2 + \frac{1}{2} (g - g')^2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\left\{ \frac{g}{g_{\text{сф}}} - \frac{g'}{g_{\text{сф}}} \right\}^2 \alpha_2^2 (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) + \left\{ \frac{g'}{g_{\text{сф}}} \right\}^2 + 2 \left\{ \frac{g}{g_{\text{сф}}} - \frac{g'}{g_{\text{сф}}} \right\} \alpha_2^2 \right], \end{aligned}$$

где $g = K \frac{\varepsilon - 1}{1 + (\varepsilon - 1)n}$; $g' = K \frac{\varepsilon - 1}{1 + (\varepsilon - 1)n'}$; $K = \frac{a^2 c}{3}$; a и c – оси эллипсоида; ε – диэлектрическая проницаемость; n – параметр, который определяется через фактор формы ρ частиц осадков следующим образом:

1) для вытянутого эллипсоида ($\rho < 1$)

$$n = n_a = \frac{\rho^2}{2\sqrt{(1 - \rho^2)^3}} \left[\ln \frac{1 + \sqrt{1 - \rho^2}}{1 - \sqrt{1 - \rho^2}} - 2\sqrt{1 - \rho^2} \right];$$

2) для сплюснутого эллипсоида ($\rho > 1$)

$$n' = n_a = \frac{\rho^2}{\sqrt{(1 - \rho^2)^3}} \left[\sqrt{\rho^2 - 1} - \arctg \sqrt{\rho^2 - 1} \right],$$

$$\lim_{\substack{p \rightarrow 1 \\ p < 1}} n = \lim_{\substack{p \rightarrow 1 \\ p > 1}} n_a = \frac{1}{3};$$

3) для сферы $n_a = n_b = n_c = 1$.

Исходя из комплексной поляризационной матрицы рассеяния, определим дифференциальную фазу между ортогональными компонентами отраженной волны

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_1^2 (g - g') + g' & \alpha_1 \alpha_2 (g - g') \\ \alpha_1 \alpha_2 (g - g') & \alpha_2^2 (g - g') + g' \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $g - g' = \frac{K(\varepsilon - 1)^2(n' - n)}{[1 + (\varepsilon - 1)n][1 + (\varepsilon - 1)n']}$; $\alpha_i^2(g - g') + g' = K(\varepsilon - 1) \frac{(\varepsilon - 1)[\alpha_1^2(n' - n) + n] + 1}{[1 + (\varepsilon - 1)n][1 + (\varepsilon - 1)n']}$; $i = 1, 2$.

Тогда (5) запишется в виде:

$$A = \frac{K(\varepsilon - 1)}{1 + (\varepsilon - 1)(n + n') + (\varepsilon - 1)^2 nn'} \begin{bmatrix} (\varepsilon - 1)[\alpha_1^2(n' - n) + n] + 1 & \alpha_1 \alpha_2 (\varepsilon - 1)(n' - n) \\ \alpha_1 \alpha_2 (\varepsilon - 1)(n' - n) & (\varepsilon - 1)[\alpha_2^2(n' - n) + n] + 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Эхо-сигнал можно представить комплексным вектором:

$$A \cdot E = \begin{bmatrix} \{(\varepsilon - 1)[\alpha_1^2(n' - n) + n] + 1\} E_x + \alpha_1 \alpha_2 (\varepsilon - 1)(n' - n) E_y \\ \alpha_1 \alpha_2 (\varepsilon - 1)(n' - n) E_x + \{(\varepsilon - 1)[\alpha_2^2(n' - n) + n] + 1\} E_y \end{bmatrix} L, \quad (7)$$

где $E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$, $L = \frac{K(\varepsilon - 1)}{1 + (\varepsilon - 1)(n - n') + (\varepsilon - 1)^2 nn'}$.

Вектор Джонса для неполяризованной волны запишем в виде:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = A e^{i\delta} \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta - I \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta + I \cos \alpha \sin \beta \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где α и β , A и δ – являются функциями t .

Считаем, что α и β случайные величины, которые равномерно распределены на интервале $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ и $\left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right)$, причем α – азимут; β – угол эллиптичности; A – полная амплитуда, δ – абсолютная фаза $\left(-\frac{\pi}{4} \leq \beta \leq \frac{\pi}{4}\right)$.

С учетом вектора Джонса, уравнение (7) запишется в виде:

$$A \cdot E = L \cdot \begin{bmatrix} \{(\varepsilon - 1)[\alpha_1^2(n' - n) + n] + 1\}(\cos \alpha \cos \beta - j \sin \alpha \sin \beta) + \\ \alpha_1 \alpha_2 (\varepsilon - 1)(n' - n)(\cos \alpha \cos \beta) - j \sin \alpha \sin \beta + \\ + \alpha_1 \alpha_2 (\varepsilon - 1)(n' - n)(\sin \alpha \cos \beta + j \cos \alpha \sin \beta) \\ + \{(\varepsilon - 1)[\alpha_2^2(n' - n) + n] + 1\}(\sin \alpha \cos \beta + j \cos \alpha \sin \beta) \end{bmatrix} \cdot A e^{i\delta}. \quad (9)$$

Запишем вектор $F = (A e^{i\delta} L)^{-1} A E$ в своих компонентах F_x и F_y :

$$F_x = \{(\varepsilon_1 - 1)[\alpha_1^2(n' - n) + n] + 1\} \cos \alpha \cos \beta + \varepsilon_2 [\alpha_1^2(n' - n) + n] \sin \alpha \sin \beta + \\ + \alpha_1 \alpha_2 (\varepsilon_1 - 1)(n' - n) \sin \alpha \cos \beta - \varepsilon_2 \alpha_1 \alpha_2 (n' - n) \cos \alpha \sin \beta + \\ + \varepsilon_2 [\alpha_1^2(n' - n) + n] \cos \alpha \cos \beta + \alpha_1 \alpha_2 (\varepsilon_1 - 1)(n' - n) \cos \alpha \sin \beta + \\ + \varepsilon_2 [\alpha_1 \alpha_2 (n' - n) \sin \alpha \cos \beta]; \\ F_y = (\varepsilon_1 - 1) \alpha_1 \alpha_2 (n' - n) \cos \alpha \cos \beta + \varepsilon_2 \alpha_1 \alpha_2 (n' - n) \sin \alpha \sin \beta + \\ + \{(\varepsilon_1 - 1)[\alpha_2^2(n' - n) + n] + 1\} \sin \alpha \cos \beta - \varepsilon_2 [\alpha_2^2(n' - n) + n] \cos \alpha \sin \beta + \\ + j [(\varepsilon_1 - 1) \alpha_1 \alpha_2 (n' - n)] \sin \alpha \sin \beta + \varepsilon_2 \alpha_1 \alpha_2 (n' - n) \cos \alpha \cos \beta + \\ + \{(\varepsilon_1 - 1)[\alpha_2^2(n' - n) + n] + 1\} [\cos \alpha \sin \beta + \varepsilon_2 [\alpha_2^2(n' - n) + n] \sin \alpha \cos \beta], \quad (10)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_1 + j \varepsilon_2$.

Тогда фазы компонент E_x и E_y запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi_x &= \arctg \frac{\{(\varepsilon_1 - 1)[(n' - n)\alpha_1(\alpha_2 \cos \alpha - \alpha_1 \sin \alpha) - n \sin \alpha] - \sin \alpha\} \cdot \\ &\quad \{(\varepsilon_1 - 1)[(n' - n)\alpha_1(\alpha_1 \cos \alpha + \alpha_2 \sin \alpha) + n \cos \alpha] + \cos \alpha\}}{\cdot \sin \beta + \varepsilon_2 \cos \beta [(n' - n)\alpha_1(\alpha_1 \cos \alpha + \alpha_2 \sin \alpha) + n \cos \alpha]} \\ &\quad \cdot \cos \beta + \varepsilon_2 \sin \beta [(n' - n)\alpha_1(\alpha_1 \sin \alpha - \alpha_2 \cos \alpha) + n \sin \alpha]} \\ \varphi_y &= \arctg \frac{\{(\varepsilon_1 - 1)[(n' - n)\alpha_2(\alpha_2 \cos \alpha - \alpha_1 \sin \alpha) - n \cos \alpha] + \cos \alpha\} \cdot \\ &\quad \{(\varepsilon_1 - 1)[(n' - n)\alpha_2(\alpha_1 \cos \alpha + \alpha_2 \sin \alpha) + n \sin \alpha] + \sin \alpha\}}{\cdot \sin \beta + \varepsilon_2 \cos \beta [(n' - n)\alpha_2(\alpha_1 \cos \alpha + \alpha_2 \sin \alpha) + n \sin \alpha]} \\ &\quad \cdot \cos \beta + \varepsilon_2 \sin \beta [(n' - n)\alpha_2(\alpha_1 \sin \alpha - \alpha_2 \cos \alpha) + n \cos \alpha]} \end{aligned} \quad (11)$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} (n' - n)\alpha_1(\alpha_2 \cos \alpha - \alpha_1 \sin \alpha) - n \sin \alpha &= j_1; \\ (n' - n)\alpha_1(\alpha_1 \cos \alpha + \alpha_2 \sin \alpha) + n \cos \alpha &= j_2; \\ (n' - n)\alpha_2(\alpha_2 \cos \alpha - \alpha_1 \sin \alpha) + n \cos \alpha &= j_3; \\ (n' - n)\alpha_2(\alpha_1 \cos \alpha + \alpha_2 \sin \alpha) + n \sin \alpha &= j_4. \end{aligned}$$

Тогда φ_x и φ_y запишем в виде:

$$\begin{aligned} \varphi_x &= \arctg \frac{[(\varepsilon_1 - 1)j_1 - \sin \alpha] \sin \beta + \varepsilon_2 j_2 \cos \beta}{[(\varepsilon_1 - 1)j_2 + \cos \alpha] \cos \beta - \varepsilon_2 j_1 \sin \beta}; \\ \varphi_y &= \arctg \frac{[(\varepsilon_1 - 1)j_3 + \cos \alpha] \sin \beta + \varepsilon_2 j_4 \cos \beta}{[(\varepsilon_1 - 1)j_4 + \sin \alpha] \cos \beta - \varepsilon_2 j_3 \sin \beta}. \end{aligned} \quad (12)$$

Тогда дифференциальная фаза определяется из условия:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \arctg \frac{\{[(\varepsilon_1 - 1)j_3 + \cos \alpha] \sin \beta + \varepsilon_2 j_4 \cos \beta\} \cdot \{[(\varepsilon_1 - 1)j_2 \cos \alpha] \cos \beta - \varepsilon_2 j_1 \sin \beta\} - \\ &\quad - \{[(\varepsilon_1 - 1)j_1 \sin \alpha] \sin \beta + \varepsilon_2 j_2 \cos \beta\} \cdot \{[(\varepsilon_1 - 1)j_4 \sin \alpha] \cos \beta - \varepsilon_2 j_3 \sin \beta\}}{\{[(\varepsilon_1 - 1)j_2 + \cos \alpha] \cos \beta - \varepsilon_2 j_1 \sin \beta\} \cdot \{[(\varepsilon_1 - 1)j_4 \sin \alpha] \cos \beta - \varepsilon_2 j_3 \sin \beta\} + \\ &\quad + \{[(\varepsilon_1 - 1)j_1 \sin \alpha] \sin \beta + \varepsilon_2 j_2 \cos \beta\} \cdot \{[(\varepsilon_1 - 1)j_3 + \cos \alpha] \sin \beta + \varepsilon_2 j_4 \cos \beta\}}. \end{aligned} \quad (13)$$

После преобразования, получим:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \arctg \frac{\{[(\varepsilon_1 - 1)^2 + \varepsilon_2^2](j_2 j_3 - j_1 j_4) + (\varepsilon_1 - 1)[(j_3 + j_2) \cos \alpha + (j_4 - j_1) \sin \alpha] + 1\} \sin \beta \cos \beta + \\ &\quad + \varepsilon_2 [(j_4 \cos \alpha - j_2 \sin \alpha) \cos^2 \beta - (j_1 \cos \alpha + j_3 \sin \alpha) \sin^2 \beta]}{[(\varepsilon_1 - 1)^2 + \varepsilon_2^2](j_1 j_3 \sin^2 \beta + j_2 j_4 \cos^2 \beta) + (\varepsilon_1 - 1)[(j_2 \sin \alpha + j_4 \cos \alpha) \cos^2 \beta + \\ &\quad + (j_1 \cos \alpha - j_3 \sin \alpha) \sin^2 \beta] + \varepsilon_2 [(j_2 - j_3) \cos \alpha - (j_1 + j_4) \sin \alpha] \sin \beta \cos \beta + \sin \alpha \cos \alpha (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta)} \end{aligned} \quad (14)$$

Среднее значение дифференциальной фазы определяется из условия:

$$\langle \Delta\Phi \rangle = \frac{2}{\pi^2} \iint_D \Delta\Phi(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = \frac{2}{\pi^2} \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} d\beta \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} \Delta\Phi(\alpha, \beta) d\alpha. \quad (15)$$

Дифференциальная фаза чувствительна к эллиптичности и азимуту частиц осадков, которые определяют скорость их падения, т.е. интенсивность, а также к их фазовому состоянию и ориентации относительно вертикали. Получена зависимость дифференциальной

фазы от интенсивности выпадающих осадков при различных углах наклона вертикальной оси эллипсоидальных капель (рис.1).

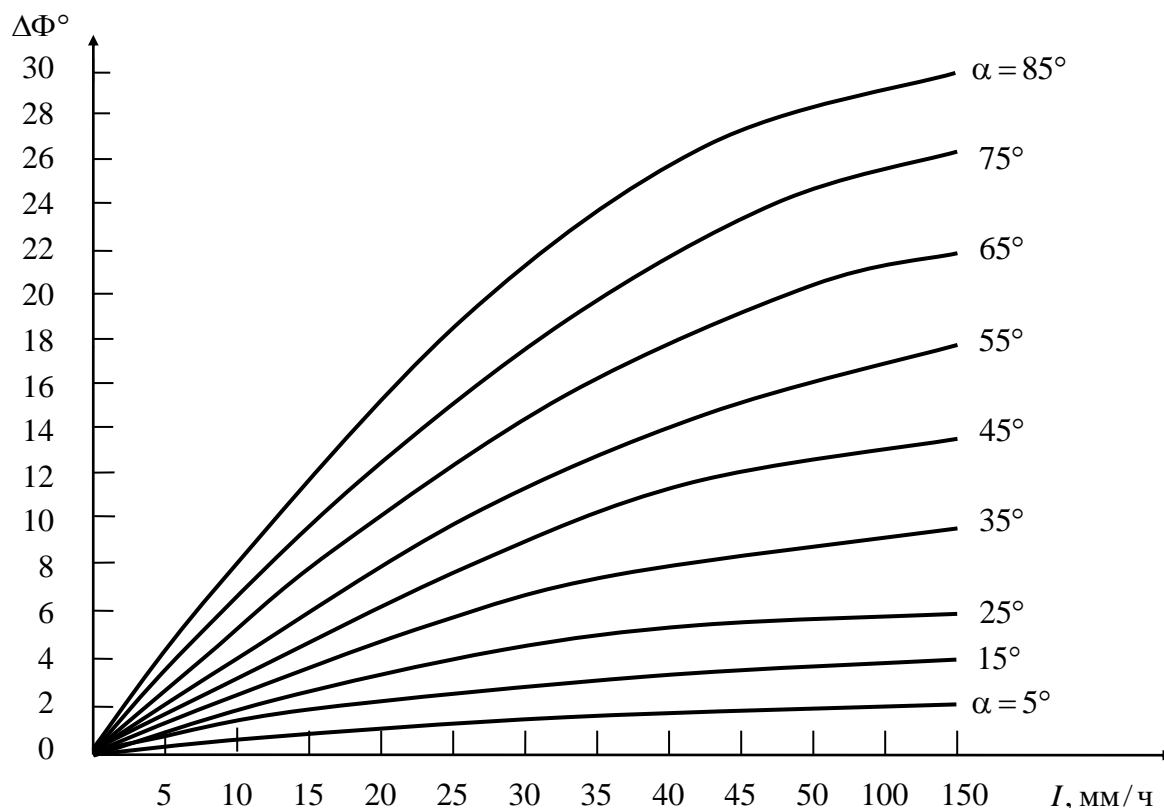


Рисунок 1 – Зависимость дифференциальной фазы от интенсивности выпадающих осадков при различных углах наклона вертикальной оси эллипсоидальных капель

Выводы:

1. Установлена зависимость дифференциальной фазы от интенсивности выпадающих осадков, формы эллипсоидальных частиц, их ориентации и фазового состояния.
2. Дифференциальная фаза позволяет проводить радиолокационное распознавание осадков различной интенсивности и фазового состояния.
3. Дифференциальная фаза является прогностическим радиолокационным предиктором, позволяющим с высокой вероятностью прогнозировать продолжительность выпадения дождя на наблюдаемой территории.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии / Степаненко В.Д.. – Л.:Гидрометеиздат, 1973. – 350 с.
2. Павлов Н.Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности / Павлов Н.Ф. – Л.:Гидрометеиздат, 1980. – 430 с.
3. Базлова Т.А. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / [Т.А.Базлова и др.] – С.-П.:Гидрометеиздат, 2002. – 331 с.

4. Шупяцкий А.Б. Радиолокационное измерение интенсивности и некоторых других характеристик осадков / Шупяцкий А. Б. – Л.:Гидрометеиздат, 1961. – 190 с.
5. Брылев Г.Б. Радиолокационные характеристики облаков и осадков / Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. – Л.:Гидрометеиздат, 1986. – 231 с.
6. Borrows P.F., Haggelt C.M. The impact of weather radar on aspects of operational management in the Thames region. – COST 73, 1989. – P. 495-504.
7. Pointin Y., Husson D., Founet-Fayard I., Messaoud M. Urban Hydrology and Hail detection experiments made with a raingage-hailpad network with a dual polarization radar. – COST 73, 1989. – P. 529-538.

REFERENCES:

1. Stepanenko V.D. Radar in Meteorology. (1973). 350.
2. Pavlov N.F. Aerology, radio meteorology and safety. (1980). 430.
3. Bazlova T.A. Automated meteorological radar network / T.A.Bazlova et al // (2002). 331.
4. Shupyatsky A. B. The radar measurement of the intensity and other characteristics of the rain. (1961). - 190 p.
5. Brylev GB Radar characteristics of clouds and precipitation / G.B.Brylev, S.B.Gashina, G.L.Nizdoymynoga // (1986). 231.
6. Borrows P.F., Haggelt C.M. The impact of weather radar on aspects of operational management in the Thames region. – COST 73, 1989, P. 495-504.
7. Pointin Y., Husson D., Founet-Fayard I., Messaoud M. Urban Hydrology and Hail detection experiments made with a raingage-hailpad network with a dual polarization radar. – COST 73, 1989, P. 529-538.