

УДК 537 874 6

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ЧИСЛЕННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ОБРАТНОМ РАССЕЯНИИ ВОЛН МЕТЕОРНЫМ СЛЕДОМ

В. А. Пермяков, В. В. Сидоров, Р. Г. Хузяшев

Исследуется поведение разностной фазы волн, рассеянных метеорным следом и принятых на скрещенные антенны, путем строгого решения задачи дифракции. Показано, что экспериментально обнаруженные эффекты не противоречат модели продольно однородного следа.

При исследовании метеорного следа радиометодами большое распространение получило измерение поляризационного отношения амплитуд и разностной фазы сигналов, отраженных от метеорного следа и принятых на скрещенные антенны, при круговой поляризации облучающей след волны. Регистрация амплитуды, фазы и поляризации отраженной волны дает полную информацию о взаимодействии электромагнитного поля с плазмой метеорного следа, позволяя наиболее точно определять не только электродинамические, но и геометрические параметры следа [1,2]. Экспериментально определенное усредненное значение поляризационного отношения близко к двум [3] и согласуется с результатами решения задачи дифракции волн на метеорном следе [4], а максимальные значения, достигающие трех-четырёх, объяснялись в [5] неидентичностью диаграмм направленности ортогональных приемных антенн.

Результаты измерения разностной фазы сигналов в двух скрещенных антеннах [6,7] меньше зависят от аппаратных погрешностей, но и они не полностью нашли объяснение в рамках продольно однородной модели следа, в связи с чем в [6,7] высказано предположение о необходимости учета продольной неоднородности следа в теоретической модели.

Расчетная модель сводится к определению амплитуды и фазы рассеянных от метеорного следа сигналов, принятых на скрещенные линейно поляризованные антенны. Вследствие вращения плоскости поляризации в ионосфере (величина эффекта Фарадея на метеорных высотах может достигать десятков и даже сотен градусов) и неточной ориентации антенн относительно оси следа вектор поляризации одной из приемных антенн будет составлять угол η с нормалью к оси следа. Комплексные амплитуды сигналов, наводимых в антеннах 1 и 2, при облучении следа волной, поляризованной по кругу, запишем в виде

$$A_1 \exp(i\Psi_1) = A^H \exp(i\Psi^H) \cos \eta + A^E \exp(i(\Psi^E + \pi/2)) \sin \eta, \quad (1)$$

$$A_2 \exp(i\Psi_2) = A^H \exp(i\Psi^H) \cos(\eta + \pi/2) + \\ + A^E \exp(i(\Psi^E + \pi/2)) \sin(\eta + \pi/2),$$

где $A^{E,H}$ и $\Psi^{E,H}$ — коэффициент отражения и фаза рассеянного сигнала [4] при E - или H -поляризации облучающей и приемной линейно поляризованных антенн относительно оси следа.

Численные результаты для линейной электронной плотности $\alpha = 5 \times 10^{14}$ эл/м изображены на рис. 1. На нем дана серия зависимостей $\Delta\Psi = \Psi_1 - \Psi_2$ (кривая 3), A_1 и A_2 (кривые 1 и 2) как функций

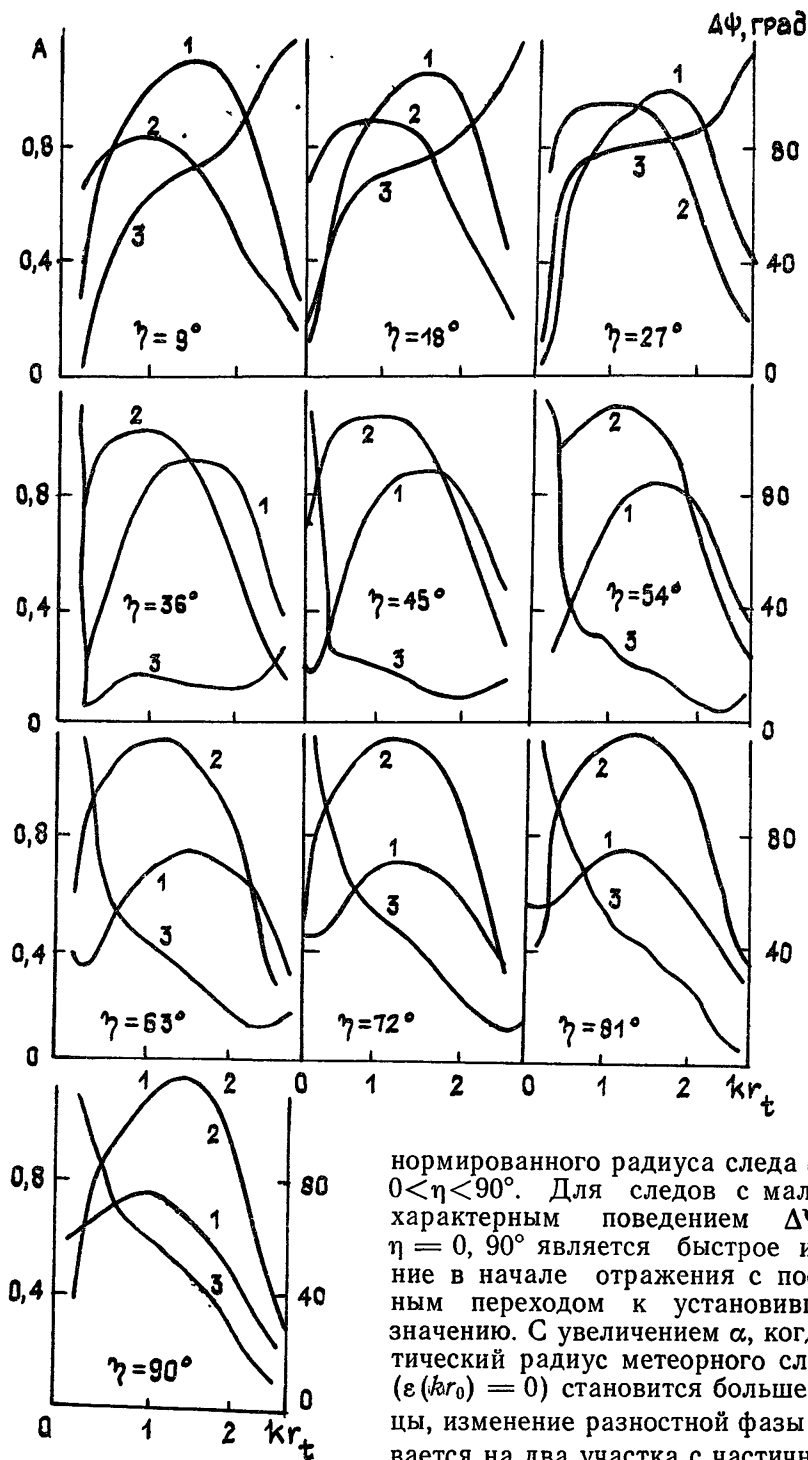


Рис. 1.

нормированного радиуса следа kr_t при $0 < \eta < 90^\circ$. Для следов с малыми α характерным поведением $\Delta\Psi$ при $\eta = 0, 90^\circ$ является быстрое изменение в начале отражения с постепенным переходом к установившемуся значению. С увеличением α , когда критический радиус метеорного следа kr_0 ($\varepsilon(kr_0) = 0$) становится больше единицы, изменение разностной фазы разбивается на два участка с частичной стабилизацией разностной фазы $\Delta\Psi$ между ними. Этот эффект наиболее четко про-

является в поведении разностной фазы E - и H -волн при обратном рассеянии от метеорного следа (рис. 2, кривая 1— $\alpha = 10^{14}$ эл/м, 2— $\alpha = 5 \times 10^{14}$ эл/м, 3— $\alpha = 10^{15}$ эл/м). Необходимо также отметить увели-

чение скорости изменения $\Delta\Psi$ при промежуточных значениях угла η , когда скорость меняет свой знак, и экстремальный характер поведения разностной фазы. Возникновение экстремального характера поведения $\Delta\Psi$ можно объяснить следующим образом. На рис. 1 при переходе от $\eta = 0$ к $\eta = 90^\circ$ величина разностной фазы зеркально отображается относительно оси kr_t , что связано со взаимной сменой направлений скрещенных антенн. При увеличении угла η от 0 до 90° разностная фаза изменяет свое значение на противоположное не скачком, а постепенно. При этом сначала изменяется направление изменения $\Delta\Psi$ для малых kr_t , а затем, с увеличением η , смена направления распространяется на большие значения kr_t .

Поведение $A_{1,2}$ качественно мало отличается от $A^{E,H}$, однако при малых kr_t наблюдается колебание коэффициента отражения A_1 , что заметно увеличивает «кажущееся» поляризационное отношение амплитуд относительно истинной величины, равной двум. Такое поведение A_1 связано с тем, что падающая на след поляризованная по кругу волна при отражении становится эллиптически поляризованной, вследствие неравенства Ψ^E и Ψ^H . Эллипс поляризации отраженной волны при расширении следа изменяет свои характерные размеры, поворачивается относительно оси следа, а при малых kr_t , когда $\Psi^E - \Psi^H \approx 90^\circ$, волна вырождается в линейно поляризованную. Минимум величины A_1 в этот момент обусловлен совпадением направления малой оси эллипса поляризации отраженной волны (которая в некоторый момент по величине становится нулевой) и направления приемной антенны.

Так как в реальном эксперименте невозможно получить поляризованную по кругу радиоволну для всех направлений излучения и она, в общем случае, поляризована эллиптически, то, пользуясь численным решением, посмотрим, к чему это приводит. Пусть след облучается, как крайний случай, линейно поляризованной волной с плоскостью поляризации, расположенной под углом γ относительно нормали к метеорному следу. Тогда аналогично (1) будем иметь

$$A_1 \exp(i\Psi_1) = A^H \exp(i\Psi^H) \cos \gamma \cos \eta + A^E \exp(i\Psi^E) \sin \gamma \sin \eta, \quad (2)$$

$$A_2 \exp(i\Psi_2) = A^H \exp(i\Psi^H) \cos \gamma \cos (\eta + \pi/2) + \\ + A^E \exp(i\Psi^E) \sin \gamma \sin (\eta + \pi/2).$$

На рис. 3 изображено поведение $\Delta\Psi$ (кривая 3), $A_{1,2}$ (кривые 1, 2) для линейной электронной плотности $\alpha = 5 \times 10^{14}$ эл/м. Падающая на след линейно поляризованная волна при отражении от следа также становится эллиптически поляризованной. При малых kr_t , когда $\Psi^E - \Psi^H \approx 90^\circ$, поляризация отраженной волны эллиптическая, а при больших kr_t ($\Psi^E - \Psi^H \approx 0$) поляризация рассеянной волны вырождается в линейную. В последнем случае также наблюдается колебание коэффициента отражения из-за несовпадения направления малой оси эллипса поляризации отраженной волны и направления приемной антенны.

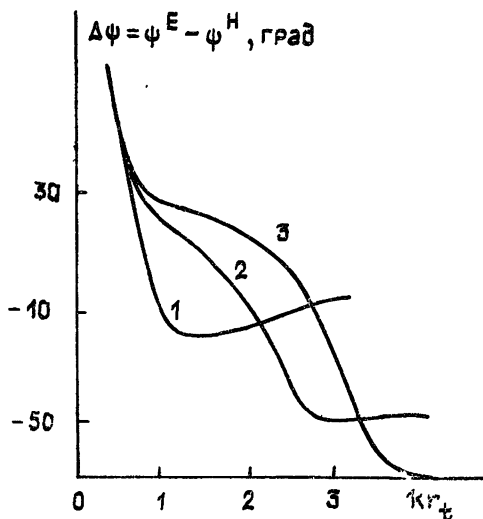


Рис. 2.

Рис. 1, 3 отражают динамику поведения разностной фазы при повороте антенн относительно оси следа и представлены в наиболее информативной форме. Необходимо отметить, что в [2] рассматривается аналогичный случай, когда метеорный след облучается волной линейной поляризации, и приводится зависимость параметров эллипса поляризации рассеянной волны от ориентации поляризации облучающей волны, что наглядно поясняет наши рассуждения о колебании коэффициента отражения.

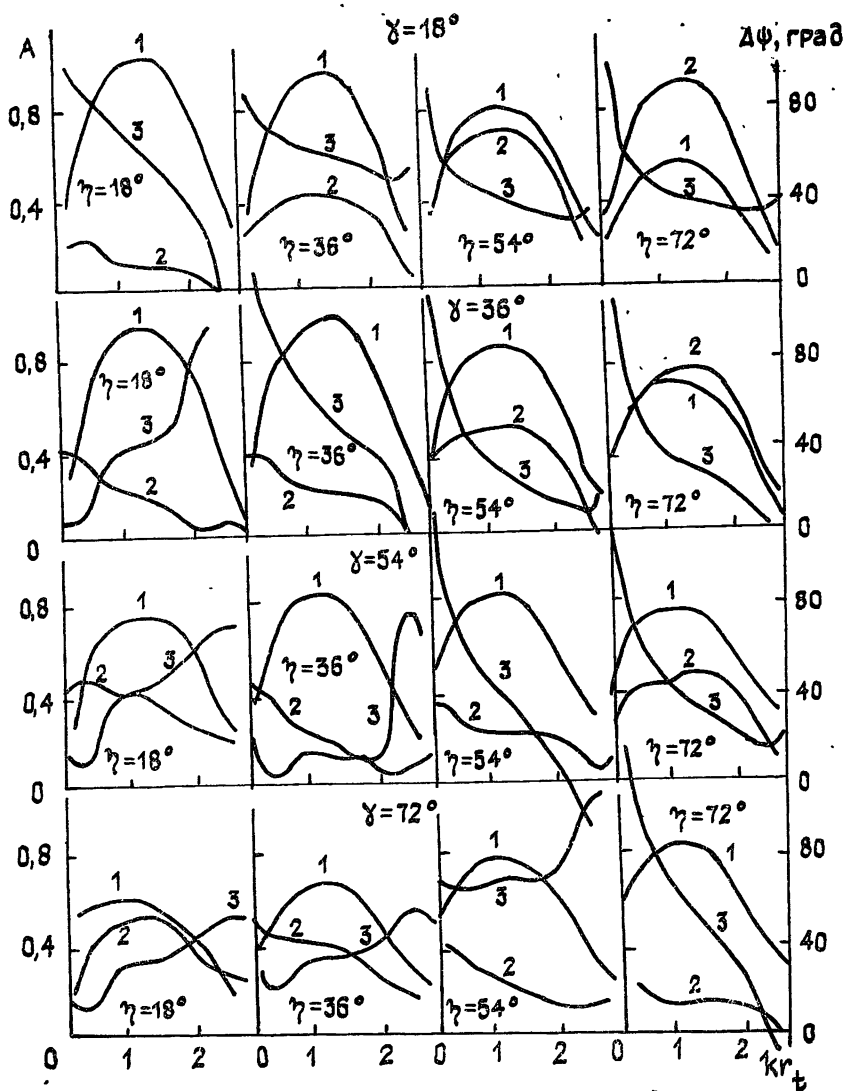


Рис. 3.

На рис. 4 приведены экспериментально полученные зависимости $\Delta\psi$ от времени [7], классифицированные на пять групп. Сравнение рис. 1, 3 и рис. 4 показывает их полное качественное согласие. Величина изменения разностной фазы (рис. 4) также хорошо согласуется с расчетами. Так, зависимость изменения разностной фазы в пределах погрешности измерения (рис. 4а) объясняется рассеянием волн от недоуплотненных следов, резонансный участок изменения фазы которых скрыт начальным радиусом [4], или близостью направления электрического вектора падающей линейно поляризованной волны к продольному или поперечному относительно оси следа направлениям, в результате чего на скрещенные антенны принимаются рассеянные волны одной и

той же поляризации с одинаковыми фазовыми характеристиками, но разных амплитуд.

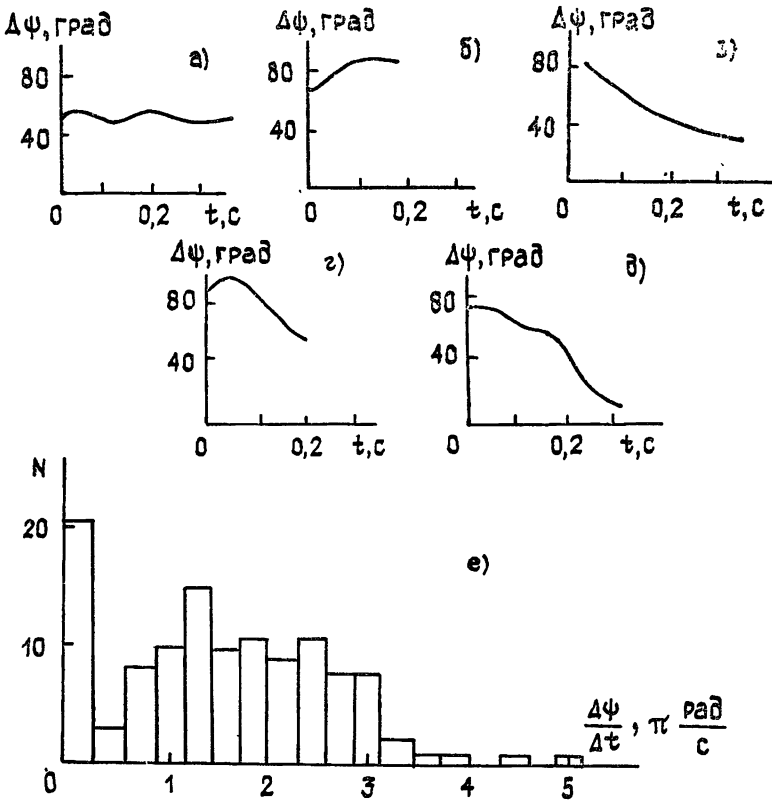


Рис. 4.

Кривые изменения $\Delta\psi$ на рис. 4 б, в регистрируются наиболее часто и проявляются на всех зависимостях рис. 2, 3, где направление изменения разностной фазы зависит от взаимной ориентации следа и антенн. Например, рост разностной фазы имеет место для случая (рис. 1) $\eta = 0 \div 36^\circ$, а спад (рис. 1) — $\eta = 63^\circ \div 90^\circ$.

Изменение разностной фазы на рис. 4г обобщает случаи экстремального поведения разностной фазы (т. е. включает ситуации с минимумом и максимумом $\Delta\psi$) и объясняется интерференционными явлениями, проявляющимися и в поляризационных колебаниях амплитуды на рис. 1, 3. Такие зависимости имеют место в более узком диапазоне углов между осями антенн и следа по сравнению с рис. 4б, в и поэтому наблюдаются менее часто. Экстремальное поведение разностной фазы мы видим на рис. 1 ($\eta = 45^\circ \div 63^\circ$), рис. 3 $\gamma = 36^\circ$ ($\eta = 18^\circ$), $\gamma = 54^\circ$ ($\eta = 18^\circ, 36^\circ$), $\gamma = 72^\circ$ ($\eta = 18^\circ \div 54^\circ$).

Кривая на рис. 4д, включающая и зеркально симметричные (относительно временной оси) зависимости, имеет четко выраженный участок стабилизации разностной фазы и экспериментально наблюдается редко по сравнению с зависимостями рис. 4а—г. Участок стабилизации хорошо виден на рис. 1, 2, 3.

На рис. 4е показано распределение средней скорости изменения $\Delta\psi/\Delta t$, где Δt — время существования метеорного отражения. Следы, у которых отсутствовало изменение разностной фазы (они, при данной энергетике канала, составляли около 20% от общего числа регистраций), не были исключены, поэтому на гистограмме появился большой выброс, соответствующий нулевой скорости изменения разностной фазы.

Следует отметить, что на измерения при поляризационном разnose не влияет конечность следа, т. е. $\Delta\psi$ определяется сформировавшейся

первой зоной Френеля, подтверждением чего является отсутствие дифракционных колебаний разностной фазы при пролете метеорной частицы (рис. 4).

Данная работа наиболее полно моделирует поведение разностной фазы сигналов, принятых на скрещенные антенны, на основе численного решения задачи дифракции волн на метеорном следе. Предыдущие работы киевских и харьковских исследователей ограничивались анализом лишь наиболее общих характеристик (угол наклона) поведения разностной фазы, что не позволило дать правильную интерпретацию экспериментально наблюдавшимся в [6,7] зависимостям.

Полученное выше объяснение экспериментальных данных на основе сравнительно простой продольно однородной электродинамической модели метеорного следа является вполне удовлетворительным и освобождает нас от необходимости рассматривать более сложные модели метеорного следа, что предлагалось сделать в работах [6,7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Соляник О. А., Олейников В. Н. В кн.: Метеорные исследования. — М.: Сов. радио, 1984. № 11. С. 43.
2. Соляник О. А. В кн.: Метеорные исследования. — М.: Сов радио, 1984. № 11. С. 48.
3. Billam E. R., Browne J. C // Proc. Phys. Soc. 1956. V. B69. № 433. P. 98.
4. Чумаков Ю. В., Мойся Р. И. // Радиофизика. 1977. Т. 20. № 1. С. 51 (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Соляник О. А., Ткачук Л. А. В кн.: Метеорные исследования. — М.: Сов. радио, 1983. № 8. С. 67.
6. Сидоров В. В., Павлов А. Ф., Фахрутдинова Р. Ю. // Радиофизика. 1965. Т. 8. № 2. С. 234 (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Михайлов Б. К., Сидоров В. В. Метеорное распространение радиоволн. — Казань: Гос. ун-т, 1971. № 8. С. 3.

Казанский государственный
университет

Поступила в редакцию
13 марта 1987 г.,
после доработки
11 сентября 1987 г.

THE COMPARISON OF THE EXPERIMENTAL DATA WITH THE NUMERICAL MODEL OF POLARIZATION EFFECTS IN BACK SCATTERING BY METEOR TRAIL

V. A. Permyakov, V. V. Sidorov, R. G. Huzyashev

The behavior of difference in phase scattered by meteor trail waves and received by turnstile antenna has been studied by rigorous investigation of the wave diffraction problem. It is shown, that experimentally observed effects is not opposed to the longitudinally homogeneous model of the meteor trail.
