

Р.З. ГРИНШПУН

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ НЕНАСЫЩЕННЫХ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ

При изучении ионизированных метеорных следов методом радиолокации важнейшей характеристикой является амплитудно-временная характеристика (АВХ) рассеянных сигналов. По виду АВХ можно найти скорость метеорного тела, коэффициент амбиполярной диффузии следа и, значит, приближенно определить высоту, на которой образован метеорный след [1]. На практике обычно задача одностанционной метеорной РЛС этим и ограничивается. Однако в АВХ отраженного сигнала заложена косвенная информация о физических характеристиках метеороида, в частности о его структурной устойчивости. Использование этой информации позволяет не только оценить минералогическую плотность метеорного тела, но и, привлекая модели строения возможных родительских тел метеороидов (ядер комет или астероидов), сделать с определенной степенью достоверности вывод о происхождении метеорной частицы.

Накопленные данные наблюдений позволяют разделить АВХ сигналов, отраженных от ненасыщенных метеорных следов, на две группы.

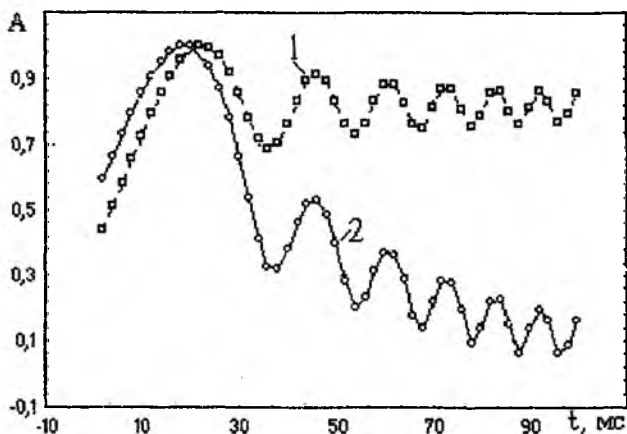


Рис. 1

К первой группе можно отнести АВХ, которые обладают регулярным характером отражений без каких-либо особенностей, достаточно адекватно описываются классической моделью отражения радиоволн от ионизированного метеорного следа, образовавшегося при входе в атмосферу Земли единого недробящегося тела (метеороида).

При расчете мощности сигнала, отраженного от ненасыщенного метеорного следа, без учета дробления метеороида, используется выражение [1]

$$P = \frac{P_t G_r G_f \lambda^3 \alpha^2}{32\pi^2 R_0^3} \left( \frac{e^2}{mc^2} \right) I(x_0). \quad (1)$$

Здесь  $P_t$  — мощность передатчика;  $G_r, G_f$  — коэффициенты направленного действия приемной и передающей антенн (по отношению к изотропному излучателю);  $\lambda$  — длина волны РЛС;  $\alpha$  — линейная электронная плотность следа;  $R_0$  — наклонная дальность от РЛС до точки зеркального отражения на следе;  $e, m$  — заряд и масса электрона;  $c$  — скорость света;  $I(x_0)$  — дифракционный интеграл, описываемый интегралом Френеля,

$$I(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} e^{i \frac{\pi}{2} x^2} e^{-\Delta(x-x_0)} dx,$$

где  $\Delta = \frac{8\pi^2 D \sqrt{R_0}}{V \lambda^{3/2}}$  — параметр затухания сигнала, связанный с процессом диффузии следа;  $D$  — коэффициент амбиполярной диффузии;  $V$  — скорость метеорного тела;

$x = \frac{2s}{\sqrt{R_0 \lambda}}, x_0 = \frac{2s_0}{\sqrt{R_0 \lambda}}$  — нормированные расстояния от точки зеркального отражения до текущего положения метеороида на следе и до головы следа.

На рис. 1 показаны АВХ, рассчитанные для двух параметров затухания сигнала:  $1 - \Delta = 0$ ;  $2 - \Delta = 0,5$ . По оси ординат отложена мощность сигнала, нормированная к значению в главном максимуме  $P_m$ :  $A = P/P_m$ . Такие АВХ имеют экспоненциальный спад и используются для определения скоростей метеоров, коэффициента амбиполярной диффузии метеорных следов. Однако, как показывают результаты наблюдений, только 30 % регистрируемых АВХ укладываются в

рамки классической модели. Вероятно, эта группа включает в себя лишь метеороиды астероидного происхождения. Таким образом, анализ АВХ метеорных сигналов, осуществляемый в рамках классической модели единого недробящегося тела, нельзя считать удовлетворительным.

Вторая группа АВХ носит нерегулярный характер и отличается большим количеством искажений на дифракционной картине отраженного сигнала, причину которых нельзя объяснить только влиянием помех в радиоканале. В этой группе наблюдаются следующие отличия от классического случая: нарушение закона экспоненциального спада; изменение глубины размаха; нарушение соотношений между максимумами и т.д. Примеры представлены на рис. 2, где АВХ 1 соответствует метеорному следу, находившемуся на расстоянии 170 км от главного пункта системы МАРС, АВХ 2 — 190 км.

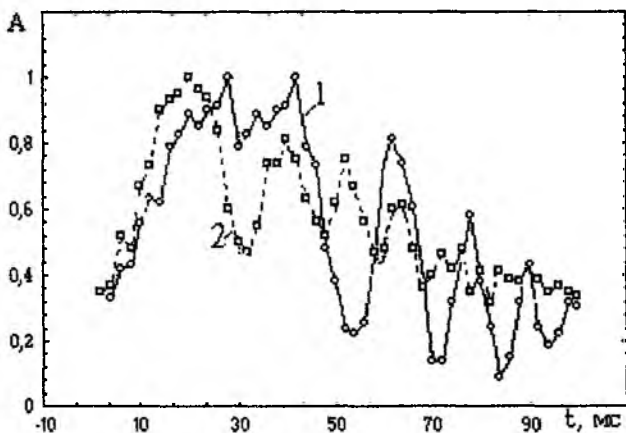


Рис. 2

Учет дробления метеороида в модели образования следа и отражения от него радиоволн позволяет объяснить многообразие форм АВХ таких сигналов, а также решить обратную задачу радиолокации метеоров, сводящуюся, в первом приближении, к выявлению различных типов дробления по виду сигнала, отраженного от метеорного следа.

## Физические аспекты дробления метеорных тел

Известно, что факт дробления метеорных тел в атмосфере Земли подтверждается не только результатами фотографических и телевизионных наблюдений, но и радиолокационными наблюдениями. В частности, ионизационные кривые оказываются значительно короче, чем это следовало бы из классической теории недробящихся метеорных тел [ 1 ]. Анализ участков ионизационных кривых, полученных радиолокационным методом, свидетельствует о том, что у радиометеоров существует четыре формы дробления (типа вспышки, осколочное, прогрессивное и квазинепрерывное). Исследование модели квазинепрерывного дробления из-за вычислительной сложности здесь не рассматривается.

Дробление типа вспышки проявляется в резком возрастании амплитуды отраженного сигнала на подлете к зеркальной точке либо после ее пролета. Решение задачи о влиянии дробления типа вспышки на АВХ отраженного сигнала дает следующее выражение дифракционного интеграла [2]:

$$I = \left\langle \begin{aligned} & \int_{-\infty}^{x_0} \alpha_p(x) e^{i \frac{\pi}{2} x^2 - \Delta(x_0 - x)} \theta(y_0 - x) dx + \\ & + \int_{y_0}^{x_0} \alpha_{pf}(x) e^{i \frac{\pi}{2} x^2 - \Delta(x_0 - x)} \theta(y_0 + z_0 - x) dx + \frac{n_0}{p} \times \\ & \times \int_{y_0}^{x_0} \alpha_k(x) e^{i \frac{\pi}{2} x^2 - \Delta(x_0 - x)} \sin p(x - y_0) \theta(z_k + y_0 - x) \frac{dx}{x - y_0} \end{aligned} \right\rangle. \quad (2)$$

Здесь  $\theta(x)$  — единичная функция Хевисайда;  $\alpha_p(x)$ ,  $\alpha_{pf}(x)$  — ионизация, произведенная родительским метеорным телом до и после дробления;  $\alpha_k(x)$  — ионизация, произведенная фрагментами дробления;  $y_0$  — нормированное расстояние от точки зеркального отражения до точки возникновения дробления;  $z_0 = 2V\tau_0/\sqrt{R_0\lambda}$  — нормированное расстояние от точки зеркального отражения до точки исчезновения родительского метеорного тела, где  $\tau_0$  — время жизни родительского метеорного тела;  $z_k = 2V\tau/\sqrt{R_0\lambda}$  — нормированное расстояние от точки зеркального отражения до точки исчезновения фрагментов, отделившихся во время вспышки, где  $\tau$  — время жизни фрагментов;

$p = 2\pi \frac{U}{V} \sqrt{\frac{R_0}{\lambda}}$  — относительная интенсивность вспышки, где  $U$  — скорость фрагментов.

Ожидаемая АВХ будет отлична от АВХ для случая (1) из-за наличия двух дополнительных слагаемых: второе слагаемое выражения (2) должно описывать отражение сигнала за счет ионизации, произведенной родительским метеорным телом, а третье — за счет ионизации, произведенной фрагментами вспышки.

Осколочное дробление наблюдается с помощью как фотографического метода, так и радиолокационного. В этом случае получается следующее выражение дифракционного интеграла [ 2 ]:

$$I = \left\langle \begin{array}{l} \int_{-\infty}^{x_0} \alpha_p(x) e^{i\frac{\pi}{2}x^2 - \Delta(x_0 - x)} \theta(y_0 - x) dx + \\ + 2 \int_{y_0}^{x_0} \alpha_k(x) e^{i\frac{\pi}{2}x^2 - \Delta(x_0 - x)} \cos p(x - y_0) \cdot \theta(y_0 + z_k - x) dx \end{array} \right\rangle \quad (3)$$

Здесь  $x_0 = 2Vt/\sqrt{R_0\lambda}$  — нормированное расстояние от точки зеркального отражения до родительского тела.

Видно, что выражение (3) отличается от выражения (1) для случая когда дробление отсутствует, наличием дополнительного слагаемого. Последнее описывает возникновение дополнительного источника электронов и изменение фазы отраженного сигнала за счет разлета осколков.

Некоторые метеоры, судя по монотонному уменьшению их объемной плотности, могут испытывать прогрессивное дробление, для которого выражение дифракционного интеграла отраженного сигнала имеет вид [ 2 ]

$$I = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{i=0}^n q_i \int_{-\infty}^{x_0} \alpha_i(x) e^{i\frac{\pi}{2}x^2 - \Delta(x_0 - x)} \theta(x - x_{0i}) \theta(x_{0(i+1)} - x) dx \right|, \quad (4)$$

где  $x_{0i} = 2Vt_i/\sqrt{R_0\lambda}$ ,  $x_{0(i+1)} = 2Vt_{i+1}/\sqrt{R_0\lambda}$  — нормированные расстояния от головы следа до  $i$ -го и  $(i+1)$ -го актов дробления.

## Исследование моделей дробления метеорных тел

Результаты численного интегрирования дробления типа вспышки представлены на рис. 3. Показаны следующие АВХ сигналов, отраженных от ненасыщенных метеорных следов: 1 — базовая; 2, 3 — АВХ при дроблении в моменты  $t = 0$  и  $t = 40$  мс. На всех кривых значения дифракционного интеграла нормированы к значению главного максимума  $P_m$  в случае отсутствия дробления (базовая АВХ). Во всех случаях радиометеорное тело дробится на 200 осколков без остаточной массы, начальная скорость осколков при разлете  $U = 10$  м/с. Видно, что полученные АВХ лежат выше базовой и искажены: изменились глубина модуляции, закон изменения амплитуды во времени. Однако расстояние между максимумами и минимумами остается приблизительно таким же, как на кривой 1.

АВХ с учетом дробления на два осколка для случая  $U_0 = 100$  м/с изображены на рис. 4. Обозначения те же, что и на рис. 3. При проведении численных расчетов параметры выбирались следующими:  $V = 40$  км/с,  $M_0 = 1$  мг,  $\cos z = 0,6$ ,  $R = 150$  км,  $\lambda = 9$  м. В случае  $U_0 = 100$  м/с положение дифракционных максимумов и расстояние между ними резко изменяются по сравнению с параметрами базовой АВХ. Подобные АВХ с резкими изменениями амплитуды после образования главного дифракционного максимума часто наблюдаются при радиолокации следов ненасыщенного типа.

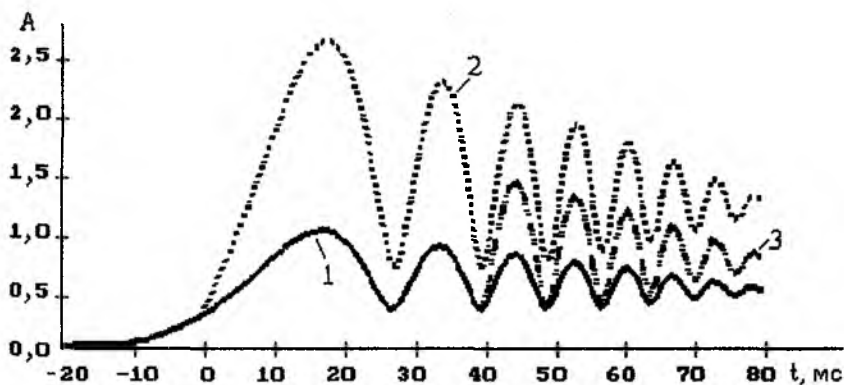


Рис. 3

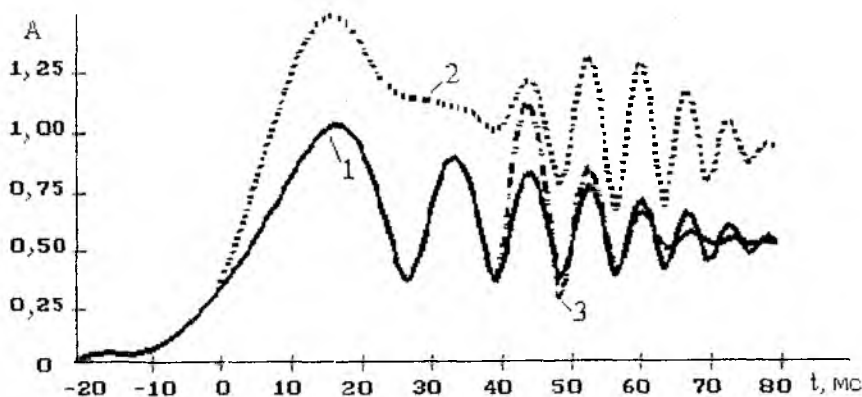


Рис. 4

На рис. 5 построены дифракционные картины для случаев отсутствия дробления (кривая 1) и прогрессивного дробления с различным временем  $t$  начала дробления. Число актов дробления выбиралось равным пяти: кривая 2 соответствует  $t$ , равному -10, -8, -6, -4, -2 мс; кривая 3 —  $t$ , равному 0, 2, 4, 6, 8 мс.

Видно, что теоретически рассчитанные АВХ не искажены, но лежат несколько выше базовой характеристики. Положение дифракционных максимумов и минимумов изменилось незначительно, и минимумы расположены практически так же, как при отсутствии дробления, но лежат выше базовых.

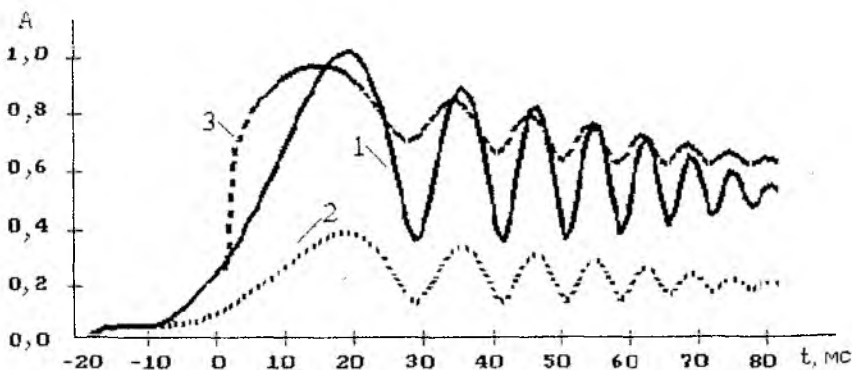


Рис. 5

## Результаты сравнения форм АВХ сигналов, полученных по моделям дробления и зарегистрированных метеорной РЛС

Метод подбора был применен к регистрациям системы МАРС. Эти регистрации являются заснятыми на фотопленку дискретными представлениями отраженных радиолокационных сигналов (расстояние между отсчетами сигналов равняется 2 мс). Чтобы обеспечить лучшее согласование теоретических и экспериментальных результатов, во всех предлагаемых моделях использовался множитель, учитывающий спад ионизационной кривой [3]. Множитель выражается зависимостью  $e^{-Mx}$ , где  $M$  — коэффициент демодуляции АВХ.

В качестве примеров приведены результаты подбора параметров моделей дробления метеороидов для метеоров, зарегистрированных в Харькове сотрудниками проблемной научно-исследовательской лаборатории Харьковского технического университета радиоэлектроники.

Первый пример относится к метеорному следу, зарегистрированному на расстоянии 170 км от главного пункта системы (см. кривую 1 на рис. 2). На рис. 6 показаны результаты подбора параметров модели АВХ для случая дробления типа вспышки. Для данного метеорного следа были получены следующие параметры: скорость метеороида  $v = 27$  км/с, начало вспышки  $X_0 = 1,5$ , коэффициент демодуляции  $M = 0,2$ .

Теоретическая (рис. 6, а) и экспериментальная (рис. 6, б) кривые достаточно похожи, что свидетельствует о близости значений их параметров. Вместе с тем имеются и различия. Они выражены в следующем:

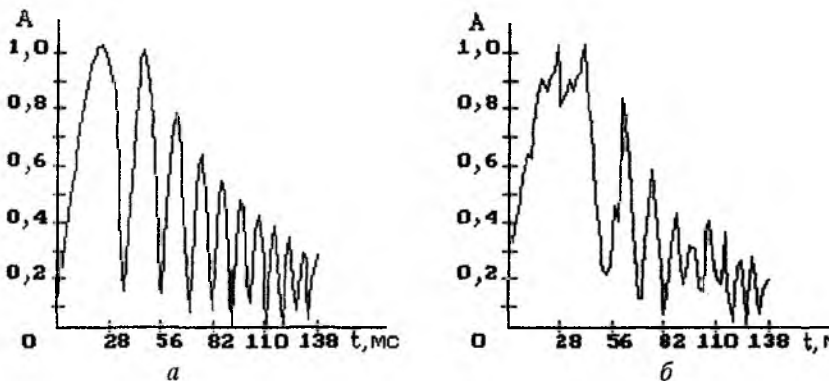
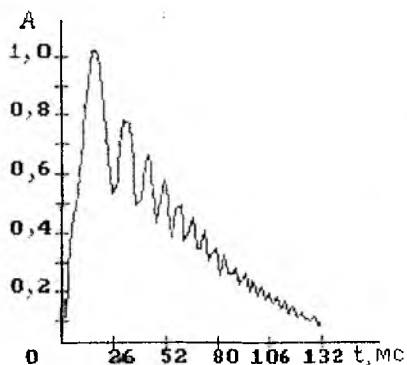
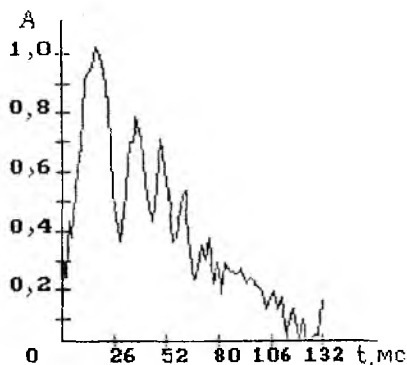


Рис. 6



*a*



*б*

Рис. 7

- 1) у реального сигнала более высокая интенсивность вблизи точки отражения и более быстрый спад по мере удаления от нее;
- 2) увеличена глубина модуляции отраженного сигнала;
- 3) имеется всплеск второго максимума, который сложно аппроксимировать моделью.

Это позволило отнести данную регистрацию к случаю дробления типа вспышки.

Второй пример относится к метеорному следу, зарегистрированному на расстоянии 190 км от главного пункта системы (см. кривую 2 на рис. 2). Рассматриваемый след отнесен к случаям прогрессивного дробления.

На рис. 7 показаны результаты подбора параметров модели АВХ для случая дробления типа вспышки. Для данного метеорного следа были получены следующие параметры: скорость метеороида  $v = 40$  км/с, начало вспышки  $X_0 = 1$ , коэффициент демодуляции  $M = 0,3$ . Теоретическая (рис. 7, *a*) и экспериментальная (рис. 7, *б*) кривые близки по форме.

### Выводы

Проведенные исследования позволяют дополнить алгоритм работа метеорной РЛС. Теперь могут определяться:

1. Высота отражающей точки следа, которая влияет на спад АВХ (увеличение высоты метеора приводит к более быстрому затуханию отраженного сигнала).
2. Положение отражающей точки и точки начала дробления тела на оси метеорного следа.
3. Скорость метеороида и характер его дробления в атмосфере.

Эта информация дает возможность классифицировать сигналы, регистрируемые на метеорных РЛС.

В течение второй половины XX в. была установлена прямая связь многих метеорных потоков с кометами, которые, распадаясь и рассеиваясь вдоль орбит, дали начало метеорным роям. Но сегодня предполагается, что не менее важным источником пополнения пылевой составляющей могут являться астероиды. По статистике результатов классификации метеоров можно будет сделать важный вывод о средней минералогической плотности метеорных роев и, таким образом, определить источники происхождения и пополнения пылевой составляющей Солнечной системы.

**Список литературы:** 1. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1967. 260 с. 2. *Новиков Г.Г.* Метеорные явления с учетом эффектов дробления и сложного ионного состава: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Душанбе, 1989. 351 с. Машинопись. 3. *Костылев К.В.* Математическое моделирование метеорных явлений и метеорного распространения радиоволн: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Казань, 1971. 290 с. Машинопись. 4. *Метеоры и метеорное вещество / Ю.И. Волощук, Б.Л. Кащеев, В.Г. Кручиненко; АН УССР. Гл. астрон. обсерватория. К.: Наук. думка, 1989. 296 с.*

*Харьковский государственный технический университет радиозлектроники*

*Поступила в редколлегию 30.12.97*