

## ЛОКАЦИЯ И НАВИГАЦИЯ

УДК 523.682:621.396.969.14

### МОДЕЛИРОВАНИЕ АППАРАТУРНОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СКОРОСТЕЙ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ ДИФРАКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Ю.В. ЧЕРКАС, Ю.И. ВОЛОЩУК

Аппаратурный фактор замечаемости определяет вероятность регистрации наземными методами наблюдения метеорного тела с данной амплитудо-временной характеристикой (дифракционной картиной). В данной статье рассматривается влияние скорости метеороида и расстояния до зеркальной точки на амплитудо-временную характеристику. Определяются параметры аппаратуры, которые позволяют определять скорость метеорных тел во всем их диапазоне.

This article highlights meteoroid velocity impact on the amplitude-temporal characteristic. Unit selectivity procures a shooting star diffraction registration via the early warning earth stations. Reflection point affects the amplitude-temporal characteristic. The unit parameters were defined. The above-mentioned appliance secures meteoroid group velocity calculation.

#### ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения метеоров любым из наземных методов являются косвенными, т.е. информацию о физических и динамических параметрах метеорных тел (метеороидов) получают путем обработки сигналов (оптических, телевизионных, радиолокационных и др.), являющихся результатом взаимодействия метеороидов с атмосферой Земли. Очевидно, что при этом доступны наблюдениям только те метеоры, метеороиды которых движутся по орбитам, пересекающимся с орбитой Земли.

Радиолокационные наблюдения позволяют определять как скорость, так и положение радиантов метеоров, знание которых необходимо для расчета орбит метеорных тел (метеороидов). Наиболее информативной кинематической характеристикой метеороида является его скорость [1]. В настоящее время при радионаблюдениях на волнах  $\lambda \geq 4$  м скорость метеоров определяется обычно дифракционным методом. При этом находится оценка скорости в момент прохождения метеороидом, породившего ионизированный след в атмосфере Земли, точки зеркального отражения на этом следе.

Отличие видимых распределений параметров метеороидов в атмосфере Земли от истинных распределений в околоземном и, тем более, в межпланетном пространстве определяется тремя факторами: астрономическим, геометрическим и физическим. Астрономический фактор – вероятность встречи метеорных тел с Землей от параметров орбит, по которым они движутся. Геометрический фактор характеризует замечаемость метеоров с различными координатами радиантов, при вычислении которой учитывается геометрия

отражения радиоволн от метеорных следов и диаграмма направленности антенной системы. Физический фактор характеризует замечаемость метеоров с различными скоростями, при вычислении которой учитывается зависимость коэффициента ионизации, высоты испарения и распределения ионизации вдоль следа метеора от скорости, зависимость коэффициента амбиполярной диффузии от высоты, а также зависимость начального радиуса следа от скорости и высоты.

Кроме вышеуказанных факторов свои искажения в распределения параметров метеороидов вносит аппаратура – аппаратурный фактор.

Данная статья рассматривает характер влияния параметров метеорного тела на дифракционную картину и как следствие избирательность метеоров по их дифракционным картинам. Рассматривается характер влияния аппаратурного фактора на статистическое распределение метеороидов по скоростям. Приведены параметры «идеальной» аппаратуры, позволяющие определять скорости метеоров во всем их диапазоне.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дифракционный метод базируется на том, что во время движения метеорного тела происходят флуктуации амплитуды сигнала рассеянного на ненасыщенном следе, образованного этим метеороидом. Амплитудно-временная характеристика (АВХ) сигнала описывается интегралом Френеля [11] вида [9]:

$$I = \exp\left(-\frac{16\pi^2 Dt}{\lambda^2}\right) \int_{-\infty}^{x_0} e^{i\pi x^2/2} dx, \quad (1)$$

где  $x_0 = 2Vt/\sqrt{R_0\lambda}$ ,  $D$  – коэффициент амбиполярной диффузии,  $\lambda$  – рабочая длина волны

РЛС,  $V$  – скорость метеороида,  $R_0$  – расстояние от РЛС до точки зеркального отражения на следе,  $t$  – время, прошедшее с момента пролета метеорного тела через эту точку.

Расположение максимумов и минимумов АВХ зависит от трех параметров:  $V$ ,  $R_0$  и  $\lambda$ . Поскольку длина волны известна, а расстояние до точки зеркального отражения найти при использовании импульсной РЛС просто, то, имея АВХ, можно однозначно оценить скорость метеорного тела. Задачи минимизации случайных погрешностей оценок скорости, вызванные влиянием шумов радиоканала, выбором алгоритма идентификации экстремумов АВХ, их количества на интервале времени развертки, метода подгонки результатов наблюдений к теоретической зависимости (1) и др., достаточно полно рассмотрены в литературе [1, 9, 6, 7 и др.]. Однако, как это всегда случается в таких исследованиях, астрономическая интерпретация результатов наблюдений сводится к решению обратной задачи радиолокации метеоров [1]. Решение этой задачи обычно выполняется весовым методом. Сами веса учитывают неслучайные ошибки, связанные с особенностями метода наблюдений и физики метеорных явлений (физический фактор замечаемости) [1, 9, 5]; расположением и формой диаграммы направленности антенны (геометрический фактор) [1, 9, 4]; вероятностью попадания метеороида в атмосферу Земли (астрономический фактор замечаемости) [1, 9, 3]. В общем случае при решении обратной задачи необходимо учитывать еще один фактор замечаемости – аппаратурный (АФ). Постановка задачи идентификации АФ и некоторые оценки его приведены в [1, 10, 2]. Здесь мы, воспользовавшись методом математического моделирования, проведем некоторые исследования этого фактора.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ МЕТЕОРНОГО ТЕЛА И ДАЛЬНОСТИ ДО ЗЕРКАЛЬНОЙ ТОЧКИ НА АВХ

Влияние аппаратурного фактора приводит к искажению статистических результатов измерения скорости метеорных тел. Вероятность того, что по зарегистрированным АВХ можно получить оценки скоростей метеороидов с разными скоростями различна. Следовательно, и распределение метеорных тел по скоростям будет отличаться от истинного.

Исследуем влияние АФ на результаты наблюдений, выполненных на комплексе МАРС [8]. Параметры комплекса, необходимые в расчетах:  $\lambda = 9.646$  м; углы места, ограничивающие диаграмму направленности антенны в вертикальной плоскости  $\alpha_{\min} = 20^\circ$ ,  $\alpha_{\max} = 70^\circ$ , максимум диаграммы направленности антенны  $\alpha_0 = 45^\circ$ ; частота посылки импульсов  $F = 500$  Гц; интервал времени развертки регистрирующего прибора  $t = 0,2$  с.

Из трех параметров, влияющих на АВХ, независимыми от аппаратуры являются два – скорость метеора и расстояние от РЛС до точки

зеркального отражения на следе. Их различные комбинации приводят к формированию различных АВХ. При некоторых значениях скорости метеороида и дальности до зеркальной точки на следе, невозможно по имеющейся АВХ с необходимой точностью определить скорость метеорного тела. Ограничение состоит в том, что при заданных параметрах аппаратуры (время развертки регистрирующего прибора и частота посылки импульсов) количество экстремумов на АВХ, при котором возможно ее использовать в дальнейших расчетах, ограничено сверху и снизу некоторыми значениями. Нижняя граница возникает из самого метода определения скоростей, для его реализации на дифракционной картине должно быть как минимум два максимума или минимума (рис. 1). Причем первый максимум без специальной корректировки, как правило, не используется, поскольку его положение на временной оси подвержено наибольшему искажению в связи с влиянием амбиполярной диффузии и начального радиуса следа [9]. Ограничения количества экстремумов сверху вызвано необходимостью точного определения временного расположения используемых максимумов и минимумов (рис. 2). Она будет разной для медленно- и быстрофлуктуирующих АВХ.

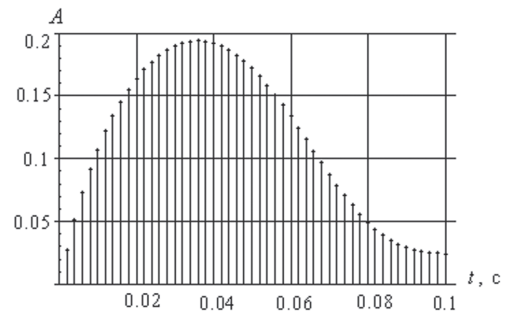


Рис. 1. АВХ при  $V = 12$  км·с<sup>-1</sup> и  $R_0 = 141$  км

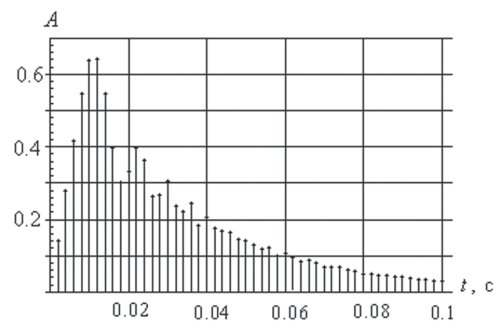


Рис. 2. АВХ при  $V = 60$  км·с<sup>-1</sup> и  $R_0 = 141$  км

Если учесть диапазон высот появления подавляющего большинства метеоров  $h = 95 \div 110$  км и углы, ограничивающие диаграмму направленности антенны в вертикальной области  $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{\max}$ , можно определить границы изменения наклонной дальности –  $R_{0\min} \approx 101$  км,  $R_{0\max} \approx 322$  км.

Покажем характер влияния скорости метеороида и расстояния до зеркальной точки на форму АВХ. На рис. 3 и 4 приведены трехмерные графики зависимости АВХ от скорости при  $R_0 = const$

(рис. 3) и дальности при  $V = const$  (рис. 4) без учета влияния амбиполярной диффузии и начального радиуса следа.

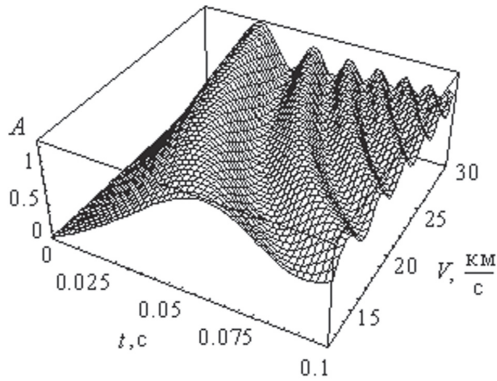


Рис. 3. Зависимость АВХ от  $V$  при  $R_0 = 141$  км

Как следует из анализа рис. 3, при малых значениях скорости на АВХ нет необходимого для расчета скорости количества максимумов и минимумов. При высоких значениях скорости той частоты посылки импульсов РЛС, которая использована в комплексе МАРС, может оказаться не достаточно, чтобы с необходимой точностью оценить положение экстремумов АВХ (рис. 3).

Изменение расстояния до зеркальной точки в отличие от скорости метеороида влияет обратным образом на количество экстремумов АВХ. Ее уменьшение приводит к увеличению количества максимумов и минимумов на заданном интервале времени, увеличение – к уменьшению (рис. 4).

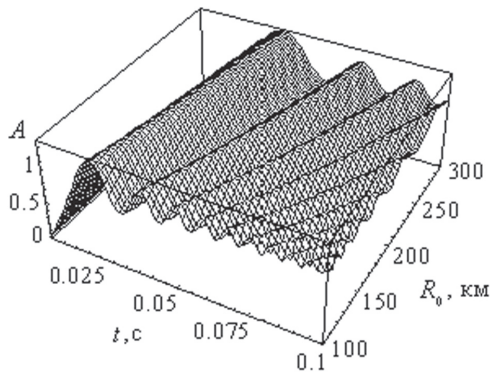


Рис. 4. Зависимость АВХ от  $R_0$  при  $V = 30$  км/с

### СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ СКОРОСТЕЙ

Нами рассчитан и построен контурный график зависимости количества максимумов и минимумов от скорости и наклонной дальности при времени регистрации  $t = 0.1$  с (рис.5). На графике скорость изменяется с шагом 1 км/с, дальность – 10 км. Вследствие этого контурные линии имеют «ломаными» характер.

Из-за влияния аппаратного фактора принципиально не могут быть зарегистрированы метеоры, расположенные в верхнем левом и нижнем правом углах диаграммы рис. 5 (охватывающей весь диапазон скоростей и дальностей).

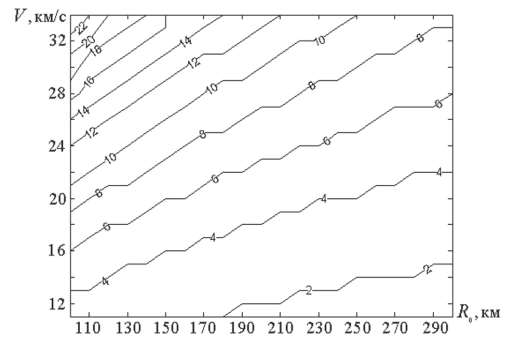


Рис. 5. Зависимость количества экстремумов АВХ от  $V$  и  $R_0$

Для того, чтобы убедиться в правильности сделанных выводов, мы проанализировали результаты наблюдений метеоров на комплексе МАРС. На рис. 6 приведено в качестве примера двумерное распределение  $(V, R_0)$  около 56000 метеоров, зарегистрированных в Харькове в 1973 г. Здесь мы не будем останавливаться на объяснении некоторой явной структурированности распределения. Отметим только то, что в выборку, по которой построено распределение, приведенное на рис. 6, включены только те метеоры, по которым были рассчитаны орбиты метеороидов. А для этого необходимо, чтобы один и тот же метеор был зарегистрирован в трех разнесенных пунктах и АВХ отраженного сигнала во всех пунктах были такими, что позволяли получить оценки скорости соответствующего метеороида, а это уже приводит к появлению еще одного аппаратного фактора замечаемости или усложнению того фактора, который мы здесь рассматриваем. Важно подчеркнуть, что в распределении, приведенном на рис. 6, четко проявляются те эффекты, которые были выявлены при математическом моделировании.

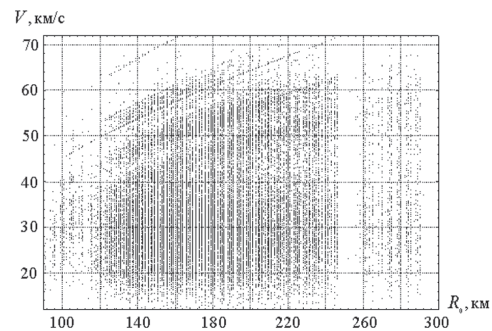


Рис. 6. Распределение метеоров, зарегистрированных системой МАРС в 1973 г.

### ПАРАМЕТРЫ «ИДЕАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ»

Для определения скоростей метеороидов, чьи АВХ не имеют необходимого количества экстремумов, требуется увеличивать время развертки регистрирующих приборов. Необходимое время развертки для одного из крайних случаев параметров метеороидов, которому соответствует самое медленное изменение АВХ ( $V = 12$  км,  $R_0 = R_{0max} = 322$  км) –  $t \approx 0,25$  с (рис.7). Однако увеличение времени развертки имеет свои ограничения. Чем больше времени проходит с мо-

мента образования ионизированного следа, тем в большей степени он подвергается амбиполярной диффузии и разносится ветром. Также возрастает вероятность появления двух или более метеорных следов, регистрируемых РЛС одновременно.

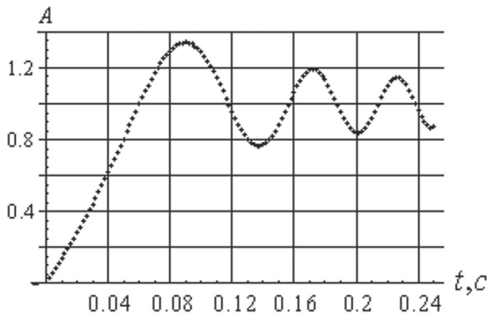


Рис. 7. Самая «медленная» АВХ

Чтобы иметь возможность определять скорость метеороидов, которым соответствует АВХ с большим количеством экстремумов, необходимо увеличить частоту посылки зондирующих импульсов РЛС.

Определим необходимую частоту посылки импульсов, которая позволит получать оценки скорости метеороидов, АВХ которых имеют максимальное количество экстремумов ( $V = 72$  км/с,  $R_0 = R_{0\min} = 101$  км). Примем, что для нахождения скорости мы будем использовать второй и третий максимумы. Поскольку длительность зон между экстремумами уменьшается с удалением от первого, найдем частоту, которая даст возможность использовать в расчетах зону, содержащую третий максимум.

На рис. 8 приведена теоретическая АВХ отраженного сигнала для этого случая (частота дискретизации  $F = 4000$  Гц). Легко подсчитать, что отрезок DE, приведенный на рисунке АВХ, имеет длительность приблизительно 4,25 мс. Далее, чтобы аппроксимировать АВХ методом, например, наименьших квадратов в окрестности экстремумов полиномом второй степени, необходимо иметь как минимум 9 отсчетов. Это позволит достаточно точно найти положение соответствующего экстремума во времени. Легко подсчитать, что для этого необходима частота следования зондирующих импульсов не менее 2 кГц. Однако такое увеличение частоты зондирования при условии, что средняя мощность передатчика величина постоянная, приведет к соответствующему уменьшению импульсной мощности и, следовательно, эффективной чувствительности комплекса, повлечет уменьшение количества регистрации метеоров и т.д.

### ВЫВОДЫ

Выбор параметров метеорной РЛС является сложной задачей, требующей учитывать множество различных факторов. Не всегда оптимальные параметры по одному критерию будут такими же по другому. Но знание того, каким образом влияет аппаратурный фактор на замечаемость, дает возможность вносить необходимые коррективы в полученные результаты.

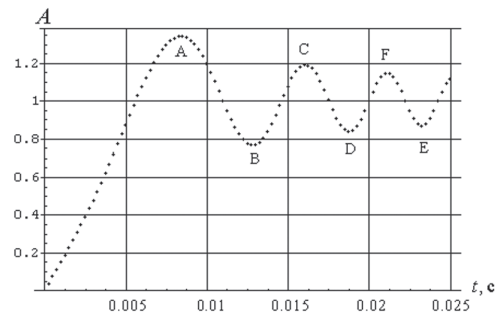


Рис. 8. АВХ при  $V = 72$  км/с и  $R_0 = 101$  км

### Литература.

- [1] Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г. Метеоры и метеорное вещество. — Киев: Наук. Думка, 1989. — 296 с.
- [2] Волощук Ю.И., Назаренко Н.Б. Аппаратурная избирательность радиолокационного метода наблюдений метеоров // Метеорные исследования. — 1985, №10 — М: Радио и связь. — С. 42-52.
- [3] Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. Новый метод расчета астрономического фактора замечаемости в задаче определения истинных распределений параметров орбит радиометеоров // Радиотехника. Вып. 151. — Харьков: ХНУРЭ, 2007. — С. 246-252.
- [4] Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. Оценка геометрического фактора замечаемости в задаче определения истинных распределений параметров орбит радиометеоров // Прикладная радиоэлектроника. 2006. — Т. 5, — №4. — Харьков: ХНУРЭ, 2006. — С. 519-527.
- [5] Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. Уточнение методики учета физического фактора замечаемости при построении истинных распределений параметров радиометеоров // Радиотехника. Вып. 149. — Харьков: ХНУРЭ, 2007. — С. 62-68.
- [6] Дьяков А.А. Исследование алгоритма вычисления скорости метеора по данным радионаблюдений. Респ. научно-техн. сб. «Радиотехника», вып. 16, 1971.
- [7] Дьяков А.А., Кащеев Б.Л. Определение скорости радиометеора с минимальной среднеквадратичной ошибкой. // Астрономический вестник, т. VI, №2, 1972.
- [8] Кащеев Б.Л., Волощук Ю.И., Ткачук А.А. и др. Метеорная автоматизированная радиолокационная система // Метеорн. исслед. — 1977, №4. — С. 11-61.
- [9] Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Наука, 1967. — 260 с.
- [10] Черкас Ю.В. Аппаратурная избирательность при определении скоростей метеорных тел радиолокационным методом // XII Международный молодежный форум «Радиотехника и молодежь в XXI веке». — Харьков: ХНУРЭ, 2007. — С. 38.
- [11] Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции (Формулы, графики, таблицы). — М.: Наука, 1968. — 344 с.

Поступила в редколлегию 5.11.2008



**Волощук Юрий Иванович**, доктор технических наук, профессор, ХНУРЭ. Область научных интересов: радиолокация метеоров, малые тела солнечной системы, обработка радиосигналов.



**Черкас Юрий Васильевич**, студент, ХНУРЭ. Область научных интересов: метеорная астрономия.