

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ КООРДИНАТ МЕТЕОРНОГО РАДИАНТА ПО НЕПОЛНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье рассматривается возможность расчета координат метеорного радианта в тех случаях, когда отсутствует информация об одной из составляющих скорости частицы.

С 1967 по 1972 г. на Метеорной автоматизированной радиолокационной системе (МАРС) Харьковского национального университета радиоэлектроники (ХНУРЭ) станции МАРС производились наблюдения отражений радиосигнала от метеорных следов, причем, регистрация осуществлялась съемкой осциллограмм на фотопленку. Всего было сделано около 2 млн. снимков, которые хранятся в архиве ХНУРЭ. Информация, содержащаяся на них, представляет большую научную ценность, и является уникальной, так как повторить подобные исследования уже невозможно из-за значительно возросшего уровня помех.

МАРС предназначена для сбора информации о метеорных явлениях при решении астрономических и геофизических задач. С ее помощью можно определять, в том числе, координаты радиантов метеорных тел. Антенны МАРС ориентированы на восток, максимум излучения направлен под углом  $45^{\circ}$  к горизонту, ширина диаграммы направленности (ДН)  $30^{\circ}$ , уровень бокового излучения составляет  $-20$  дБ, уровень задних лепестков  $-40$  дБ, коэффициент усиления антенны 250 [1], рабочая частота 31,5 МГц ( $\lambda = 9,52$  м). Частота повторения импульсов локатора 500+100 Гц, длительность импульса 30 мкс. Применение последовательностей 500 и 100 Гц необходимо для устранения неоднозначности при определении дальности до метеорного отражения [2].

В настоящее время в ХНУРЭ ведутся работы по преобразованию этой информации в цифровую форму [4]. Это необходимо, во-первых, с целью сохранения архива в форме, которая будет защищена от внешних деструктивных факторов, а также для того, чтобы иметь возможность обработки имеющихся данных современными вычислительными средствами. В 70-е годы благодаря ручной обработке был получен каталог орбит космических частиц [7]. Но для его создания использовалась лишь малая часть имеющихся данных. В статье рассматривается вопрос о том, как извлечь информацию из не обработанного ранее материала.

Как известно [6], для расчета координат метеорного радианта используются данные об амплитудно-временных характеристиках (АВХ), полученных в пункте размещения радиолокатора и в двух выносных пунктах. Рассмотрим этот алгоритм, называемый импульсно-дифракционным, более подробно.

Скорость метеорной частицы является векторной величиной. Зная модуль скорости и ее разложение по составляющим, можно найти координаты радианта.

АВХ позволяет получить модуль скорости частицы  $|V|$  вблизи зеркальной точки [5].

Временные сдвиги (задержки) АВХ в выносных приемных пунктах относительно центрального позволяют получить проекции скорости на оси, параллельные направлениям на выносные пункты. Физически задержки обусловлены тем, что метеорной частице требуется некоторое время для того, чтобы сформировать след, сделав возможным прием сигнала не только в основном, но и в выносных пунктах. Два пункта позволяют получить две горизонтальные составляющие скорости:  $V_x$  и  $V_y$ . Третьего выносного пункта, расположенного над поверхностью Земли не было, но недостающая вертикальная проекция может быть найдена как:

$$V_z = \sqrt{|V|^2 - V_x^2 - V_y^2}. \quad (1)$$

Тогда по трем известным проекциям скорости могут быть найдены направляющие косинусы радианта с привязкой к местности. По известным формулам [3] они могут быть

пересчитаны в необходимую систему координат, а далее, с учетом времени года и суток, по ним можно определить радиант метеорной частицы. Также может быть внесена поправка на зенитное притяжение и т. д.

Таким образом, для реализации импульсно-дальномерного алгоритма необходимы три АВХ, полученные в трех приемных пунктах [6]. В том случае, если на снимке оказывалось всего две АВХ (рис.2), такой метеор считался неподходящим для дальнейшего анализа и отбраковывался.

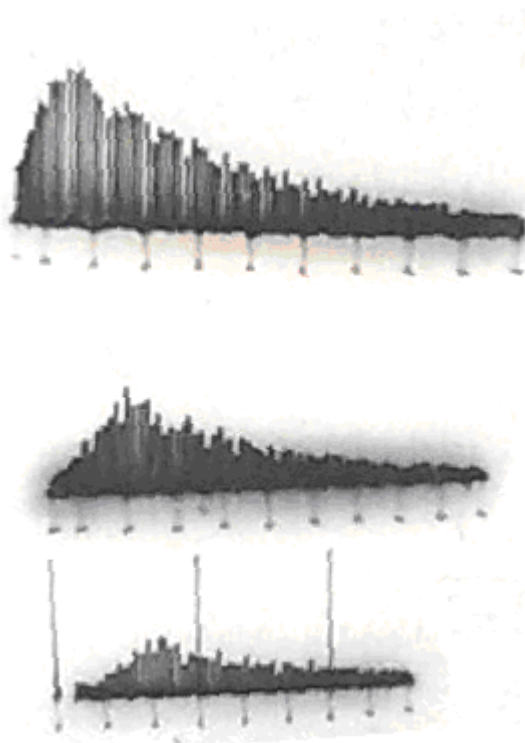


Рис. 1

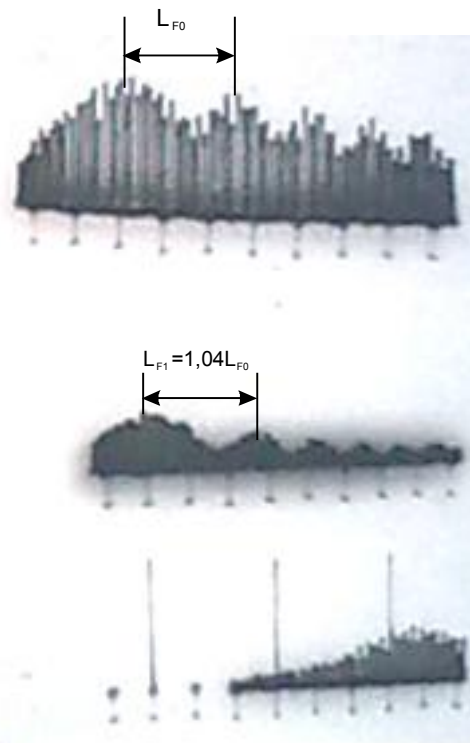


Рис. 2

Теперь рассмотрим, какую информацию можно извлечь из 2 АВХ.

Во-первых, АВХ и наклонная дальность  $R$  в основном пункте позволяют получить модуль скорости  $|V|$ . АВХ во втором или в третьем пункте позволяют найти всего одну из трех ее проекций. Этого, на первый взгляд, недостаточно для продолжения вычислений. Можно всего лишь сказать, что

$$V_z^2 + V_y^2 = |V|^2 - V_x^2. \quad (2)$$

Но известна наклонная дальность  $R$ , определяющая сферу соответствующего радиуса, а также высоты метеорной области 80 – 105 км, которые «вырезают» из этой сферы участок сверху и снизу. Слева и справа эта сфера ограничена ДН антенны (рис. 3).

Оценим погрешность аппроксимации сферической поверхности плоскостью. Из рис. 4 и несложных тригонометрических преобразований можно найти величину угла  $\phi$ , между сферой и секущей плоскостью (для «плоской» модели угол  $\phi$  между окружностью и хордой):

$$\phi = \frac{1}{2} \left( \arcsin \frac{h_2}{R} - \arcsin \frac{h_1}{R} \right), \quad (3)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – нижняя и верхняя границы метеорной зоны.

На рис. 5 показана зависимость (3) при  $h_1 = 80$  км и  $h_2 = 105$  км.

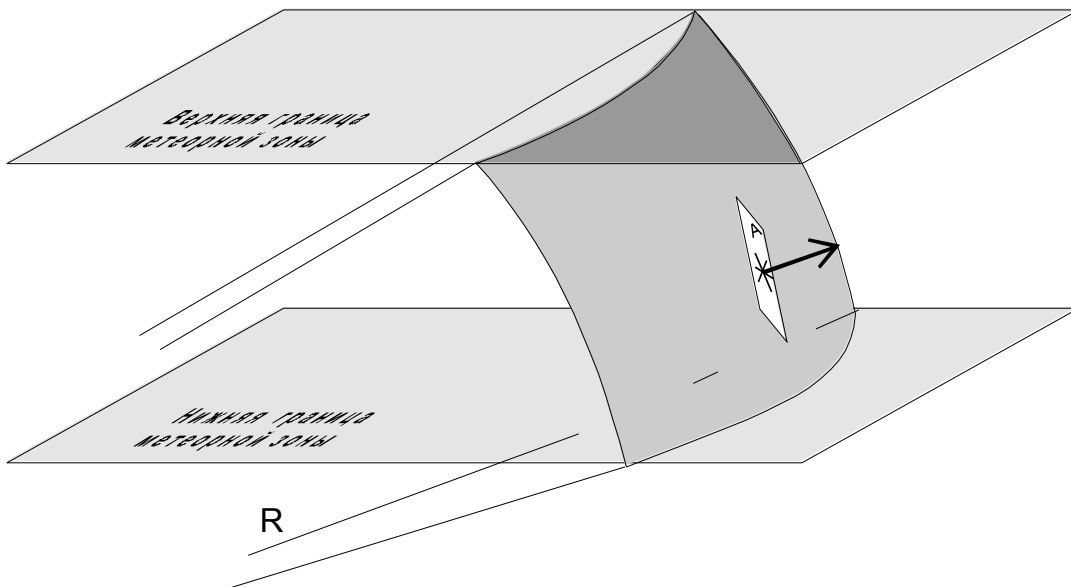


Рис. 3

Предположим, что касание имело место в некоторой точке  $M$  посередине участка сферы (рис. 4). Тогда, исходя из условия зеркальности отражения, можно утверждать, что радиант лежит в плоскости  $A$ , касательной к поверхности в точке  $M$  (с погрешностью  $\phi$ , которая не превышает  $4^\circ$ , если рассматривать  $R > 200$  км).

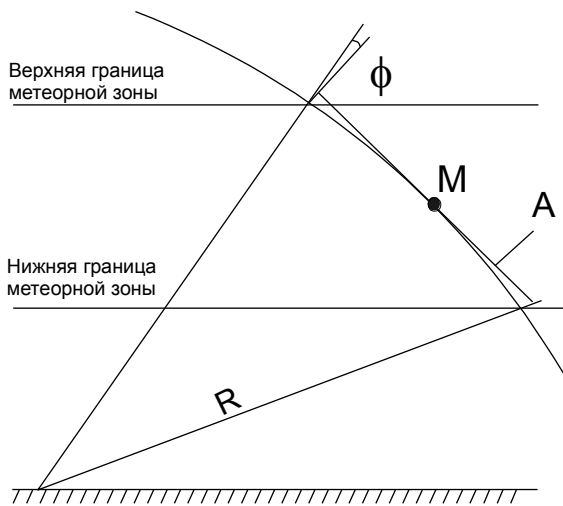


Рис. 4

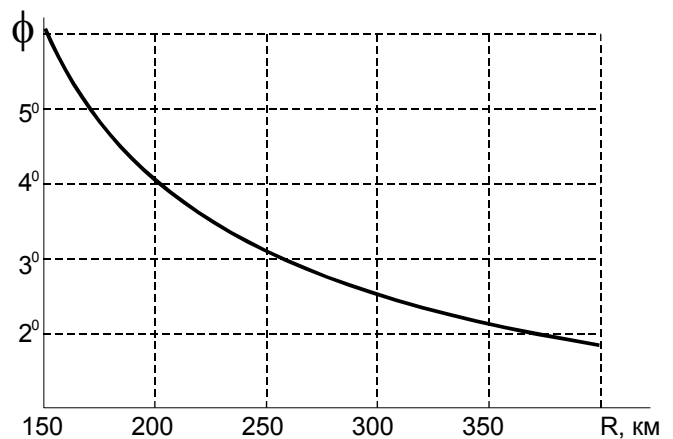


Рис. 5

Положение следа в данной плоскости пока не известно, но в нашем распоряжении есть одна проекция скорости на земную поверхность и абсолютное значение (модуль) скорости. Зная проекцию скорости на одну земную ось (например,  $X$ ) восстановим значение скорости в плоскости  $A$

$$V_{A1} = \frac{V_x}{\cos \gamma}, \quad (3)$$

$\gamma$  – угол между плоскость  $A$  и осью  $X$ .

Зная модуль скорости и одну из ее составляющих в плоскости  $A$ , находим вторую (ортогональную) составляющую скорости в этой же плоскости:

$$V_{A2} = \sqrt{|V|^2 - V_{A1}^2}. \quad (4)$$

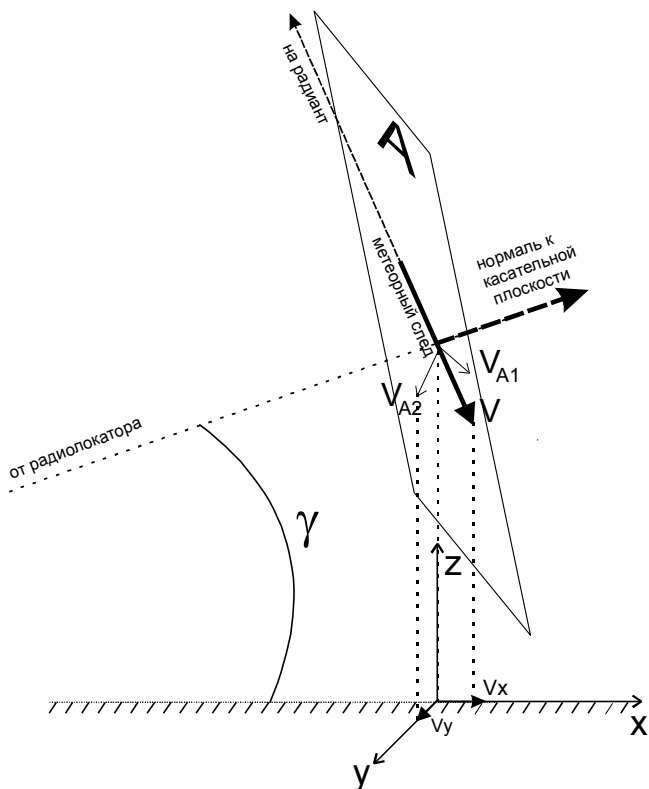


Рис. 6

Действительно, расстояние, а значит и время распространения отраженного сигнала до выносного пункта (отрезок  $MB$ ), будет отличаться от времени распространения до основного ( $MO$ ), а с учетом времени ретрансляции на отрезке  $BO$  последнее всегда будет меньше, поэтому импульсы на фотографиях (рис. 2) должны быть взаимно смещены.

Но разность длин  $MO$  и  $MB + BO$  составляет менее 7 км (взаимная задержка менее 20 мкс), а длительность одного только зондирующего импульса 30 мкс. Кроме того, неизвестны задержки в ретрансляторах, что не только не уменьшает, а напротив, увеличивает неопределенность. Поэтому взаимные задержки импульсов практически невозможно использовать для уточнения координаты метеорного следа.

Другую возможность уточнения координат отражающей точки предоставляет форма имеющихся АВХ. Как известно, в режиме локации длина первой зоны Френеля определяется выражением:

$$L_{FO} = \sqrt{\frac{R_1 \lambda}{2}}. \quad (5)$$

Прием сигнала в выносном пункте, по сути, является радиосвязью через метеорный след. В этом случае длина первой зоны Френеля определяется другим выражением [8]:

Поскольку ориентация плоскости в пространстве известна, то имеем достаточно информации для расчета направляющих косинусов радианта с погрешностью в  $4^\circ$  (рис. 6).

Несколько большую погрешность может вызывать неопределенность горизонтальной координаты метеорного следа. Если ширина ДН в азимутальной плоскости составляет  $30^\circ$ , то область неопределенности при фиксированной наклонной дальности можно представить на рис. 7. Величина погрешности в этом случае составит  $15^\circ$ .

Рассмотрим пути уменьшения этой погрешности. Уточнить положение следа в пространстве позволил бы разностно-дальномерный метод определения координат, если бы он изначально был предусмотрен в алгоритме измерений.

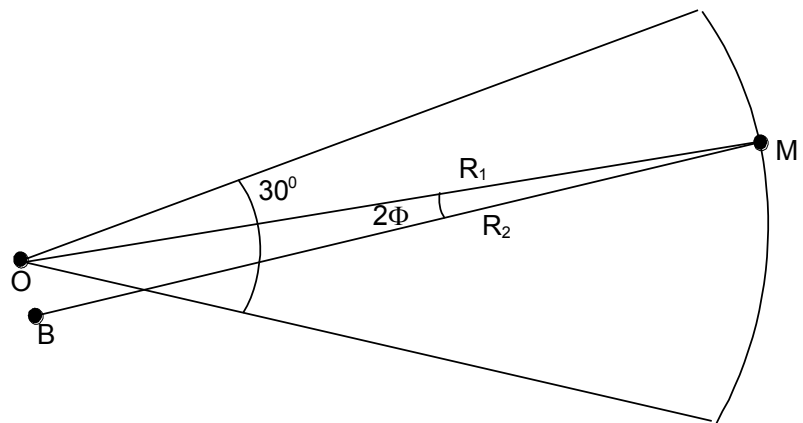


Рис. 7

$$L_{FB} = \sqrt{\frac{R_1 R_2 \lambda}{(R_1 + R_2)(1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \Phi)}} \quad (6)$$

где  $\gamma$  – угол между следом и плоскостью распространения радиоволны, который, как отмечено выше, считаем равным  $90^\circ$ , а угол  $\Phi$  показан на рис. 7.

Максимальное значение этого угла при расстоянии ОВ равном 7 км не превышает  $1^\circ$ , что позволяет переписать выражение (6) в виде

$$L_F = \sqrt{\frac{R_1 R_2 \lambda}{(R_1 + R_2)}} \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) несложно получить значение расстояния:

$$R_2 = \frac{2 \frac{L_F}{L_{F0}} R_1}{\lambda \left( 2 - \frac{L_F^2}{L_{F0}^2} \right)} \approx \frac{2 R_1}{\lambda \left( 2 - \frac{L_F^2}{L_{F0}^2} \right)} \quad (8)$$

Таким образом, задача определения  $R_2$  сводится к определению длины первой зоны Френеля при измерениях в двух пунктах. Ожидаемая величина разности составляет менее 100 м, что составляет не более 4 % ее длины. Измерить такую небольшую разность на фотоснимках невысокого качества не всегда возможно, но анализ выражения (8) показывает, что даже определение того, какая из зон Френеля больше, позволит найти знак знаменателя, а значит и то, какое из расстояний больше:  $R_2$ , или  $R_1$ . (На рис. 7 точка  $M$  находится на равном удалении от обоих пунктов.) Это позволит вдвое снизить погрешность определения положения следа в пространстве.

Если проанализировать фотографии (рис. 2), то можно заметить, что длина первой зоны Френеля различна для АВХ принятых в разных приемных пунктах. А это значит, что уточнение координат отражающей точки, по форме АВХ вполне возможно.

Таким образом, имея всего две АВХ сигнала отраженного от метеорного следа, с помощью рассмотренных математических методов можно восстановить полную информацию о положении метеора и его радианте с приемлемой погрешностью. Приведенный метод позволит обработать гораздо больше информации об отражениях, чем было возможно ранее.

Снизить погрешность можно, если косвенно оценить высоту следа по времени рассеяния и горизонтальное отклонение, используя информацию о том, в каком именно пункте сигнал отсутствовал.

**Список литературы:** 1. Дистанционные методы исследования процессов в атмосфере Земли / Под общ. ред. Б. Л. Кашеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков : Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. – 416 с. 2. *Современные средства и методы радиолокационных метеорных исследований* / И. Е. Антипов, А. А. Костыря, А. И. Шкарлет // Радиотехника : Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2010. – Вып. 160. – С. 39-46. 3. *Астапович, И. С.* Метеорные явления в атмосфере Земли. – М. : Гос. Изд-во физ.-мат. лит., 1958. – 640 с. 4. *Баранчиков, Д. А., Шандренко, Р. В., Сорох, Н. О.* Создание автоматизированного стенда для оцифровки данных с фотопленки // Сб. науч. тр. 4-го Междунар. радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Перспективы и развитие». – Харьков : АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011. – 352-354 с. 5. *Д. Мак-Кинли.* Методы метеорной астрономии. – М. : Мир, 1964. – 383 с. 6. *Кашеев, Б.Л., Волощук, Ю.И., Дудник, Б.С. и др.* Метеорная автоматизированная система // Метеорные исследования. – 1977. – №4. – С. 11 – 61. 7. *Волощук, Ю. И., Горелов, Д. Ю.* Метеорные потоки и ассоциации, выявленные по результатам многолетних радиолокационных наблюдений метеоров. – Харьков : Изд-во «НТМТ», 2011. – 383 с. 8. *Антипов, И. Е.* Оптимизация ориентации диаграмм направленности антенн метеорных радиотехнических систем с целью повышения их пропускной способности в условиях коротких трасс : дис... канд. техн. наук. – Харьков, 1996. – 144 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.03.2012