

НЕКОТОРЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ МЕТЕОРОВ ДИФРАКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Г. В. АВРААМОВА

(Представлено научным семинаром радиотехнического факультета)

В настоящее время существует три основных метода измерения скорости метеоров, основанных на явлении отражения радиоволн от ионизированного метеорного следа. Первый или дальностно-временной метод использует изменение во времени наклонной дальности до „головы“ метеора и применим только к очень крупным метеорам, способным давать незеркальное отражение. Второй метод основан на дифракции радиоволн от метеорного следа и использует изменение во времени амплитуды и фазы отраженного сигнала.

Наблюдения показывают, что этот метод применим ко много большему числу отражений, так как он требует наличия отражения только в непосредственной близости точки нормального падения радиолуча на метеорный след. Третий метод рассмотрен только теоретически. Этот метод использует изменение частоты сигнала, отраженного от движущегося переднего края метеорного следа. Так же, как и первый, этот метод применим только для очень крупных метеоров.

Маннинг [3] показал, что изменение частоты сигнала, отраженного от движущегося переднего края метеорного следа вблизи точки А (рис. 1), наименее удаленной от радиолокационной станции, равно

$$F = \frac{2V^2}{\lambda R_0} t, \quad (1)$$

где V — скорость метеора в км/сек,

R_0 — минимальная величина дальности до следа,

t — время, отсчитанное от момента пролета метеором точки А (рис. 1).

Ввиду того, что зафиксировать момент t_0 пролета метеором середины первой зоны Френеля с необходимой точностью представляет значительные трудности, при практическом вычислении скорости обычно пользуются несколько иным выражением, которое получается из уравнения (1) после его интегрирования

$$V = \frac{V_m - V_n}{\Delta t} \sqrt{\lambda R_0}. \quad (2)$$

В этом выражении m и n есть номера периодов колебаний, между которыми производится отсчет времени Δt , причем начало периодов совпадает с моментом t_0 .

Точно такие же выражения для скорости были получены Мак-Живли [2], хотя в основе его рассуждений лежало явление дифрак-

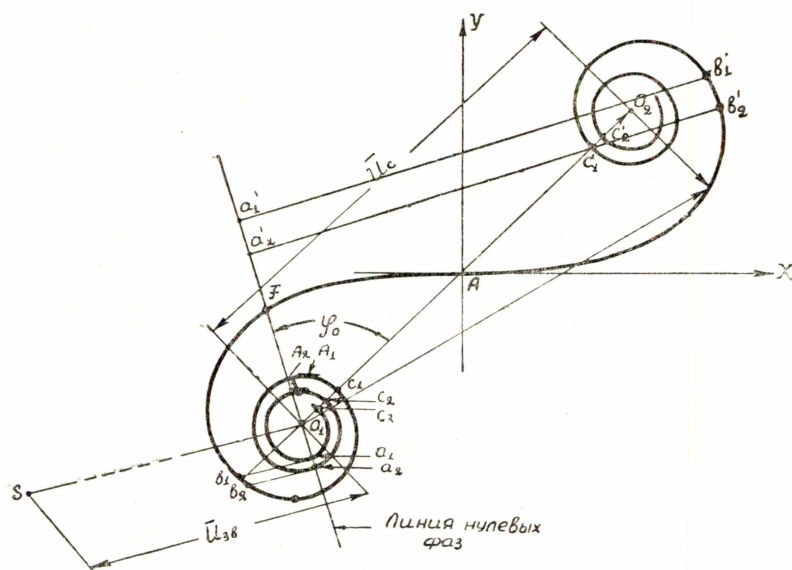


Рис. 1.

ции радиоволн от формирующегося метеорного следа. Как указывает автор [2], при наличии дифракционного отражения уравнение (1) остается справедливым только в том случае, если исключить около десяти периодов колебаний вблизи момента времени t_0 . В литературе [1] также встречаются некоторые замечания относительно того, что скорость метеора, найденная из уравнения (1) или (2), будет различна в зависимости от того—является ли данное отражение отражением дифракционного типа или типа движущейся точечной цели; однако численного значения в различии скоростей нигде не приводится.

Дифракционный метод измерения скорости метеоров использует изменение во времени амплитуды сигнала, отраженного от формирующегося метеорного следа. При этом огибающая амплитуд отраженного сигнала характеризуется модулем и фазой вектора, начало которого расположено в некоторой точке O (рис. 1), а конец скользит по виткам спирали Корню.

Из рис. 1 следует, что время, за которое фаза огибающей амплитуд отраженного сигнала изменится на 360° , будет пропорционально длинам дуг спирали Корню $\cup C_1 C_2; \cup C_2 C_3$, т. е. времени прохождения метеором последовательных зон Френеля. Зонами Френеля принято считать расстояние между такими двумя точками, расположенными на метеорном следе, для которых фаза огибающей амплитуд отраженного сигнала в моменты пролета метеором этих точек будет отличаться на 360° .

Рассмотрим теперь метод измерения скорости, основанный на определении величины частотного сдвига сигнала, отраженного от движущейся точечной цели.

Обратимся снова к рис. 1. Изменение фазы отраженного сигнала при прохождении целью некоторого расстояния AA_1 характеризуется изменением угла наклона касательной, проведенной к спирали в точках, соответствующих началу и концу данного участка пути.

Следовательно, участки следа, от концов которых отраженные сигналы приходят в приемник в одинаковой фазе, будут пропорциональны дугам AA_1 ; A_1A_2 и т. д.

Из рис. 1 видно, что $\sphericalangle AA_1$ не равна $\sphericalangle AC_1$. Это приводит к тому, что периоды биений сигнала, отраженного от движущейся точечной цели (при подаче опорного напряжения), отличаются от периодов колебаний огибающей сигнала, имеющих место при дифракционном отражении. За счет этого скорость, вычисленная по формулам (1) и (2), при использовании дифракционного отражения будет отличаться от своей действительной величины.

Разница между действительной и вычисленной скоростью уменьшается с ростом номеров периодов колебаний, по которым производится отсчет времени Δt . Величина этой разницы приведена в табл. 1.

Таблица 1

Значение δ_1 в процентах

$m \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-5,75	-3,0	-2,02	-1,53	-1,23	-1,02	-0,87	-0,76	-0,68	-0,62
1	—	3,63	3,08	2,70	2,43	2,24	2,10	1,94	1,85	1,67
2	—	—	2,35	2,05	1,82	1,69	1,54	1,45	1,39	1,32
3	—	—	—	1,68	1,50	1,40	1,31	1,18	1,14	1,08
4	—	—	—	—	1,27	1,22	1,12	1,02	1,00	0,99
5	—	—	—	—	—	1,17	0,98	0,92	0,91	0,90
6	—	—	—	—	—	—	1,00	0,92	0,82	0,79
7	—	—	—	—	—	—	—	0,82	0,77	0,71
8	—	—	—	—	—	—	—	—	0,73	0,62
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,62

Примечание. Знак минус означает, что действительное значение скорости меньше величины, определяемой по формуле (2).

Как следует из таблицы, при грубом определении скорости или при использовании больших номеров m и n поправку δ_1 , обусловленную нелинейной зависимостью изменения частоты колебаний огибающей амплитуд отраженного сигнала от времени, можно не учитывать.

Однако при использовании импульсной техники, когда рабочими являются первые периоды колебаний, поправку необходимо учитывать.

При измерении метеорных скоростей в режиме незатухающих колебаний обработка данных несколько усложняется еще и тем, что начальная фаза биений выходного сигнала φ_0 , а следовательно, и номера m и n будут зависеть от сдвига фаз ψ между напряжением „земной волны“ $\bar{U}_{з,в}$ и напряжением сигнала \bar{U}_c в момент пролета метеором середины первой зоны Френеля.

Чтобы определить начальную фазу биений, необходимо знать момент t_0 , что, как уже говорилось выше, практически бывает сделать очень трудно. Попытаемся установить, как можно определить фазу φ_0 , не зная времени t_0 , и как φ_0 влияет на точность измерения скорости.

Если напряжение „земной волны“ приблизительно на порядок выше максимального значения сигнала, то дифракционная картина име-

ет вид, симметричный относительно момента t_0 (рис. 2) так, что фаза φ_0 может быть найдена довольно просто.

Если амплитуды напряжения сигнала и „земной волны“ имеют примерно одинаковую величину, то дифракционная картина является несимметричной, и начальная фаза биений зависит как от сдвига фаз между векторами \overline{U}_c и $\overline{U}_{зв}$, так и от отношения их модулей $|\overline{U}_c|/|\overline{U}_{зв}|$. Чтобы определить угол φ_0 для какого-либо отражения, необходимо сравнить вид дифракционной картины, полученный на экране индикатора с рядом заранее построенных дифракционных картин для определенных значений отношения $|\overline{U}_c|/|\overline{U}_{зв}|$ и различных фазовых сдвигов между \overline{U}_c и $\overline{U}_{зв}$. Начальная фаза напряжения земной волны определяется углом наклона вектора $\overline{O}_1 S$ и горизонтальной оси. Вид дифракционных картин и соответствующие им углы φ_0 могут быть определены аналитическим или графическим методом. При использовании аналитического метода возникают большие трудности, так как уравнение спирали Корню выражается только через интегралы Френеля. Поэтому практический интерес представляет только графический метод. Суть его заключается в следующем.

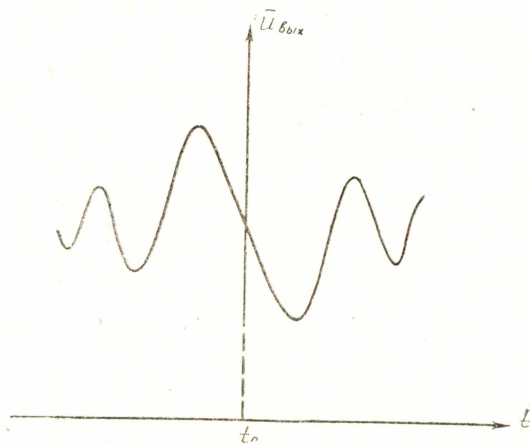


Рис. 2.

1. Строится спираль для данного значения $|\overline{U}_c|$.

2. Строится окружность для заданного значения $\overline{U}_{зв}$ ($r = |\overline{U}_{зв}|$;

начало координат окружности отстоит от точки O_1 на величины $r \sin \psi$ и $r \cos \psi$ по осям X и Y соответственно).

3. Находятся отрезки $a_1 b_1$, $a_2 b_2$, $a_1' b_1'$ и т. д.

4. Строится дифракционная кривая, ординатами которой служат найденные отрезки, а абсциссами — длины дуг спирали, отсчитанные от точки A до точек a_1 , a_2 и т. д. соответственно.

5. φ_0 находится как угол, на который нужно повернуть вектор $\overline{O}_1 A_1$, чтобы его конец попал на линию нулевых фаз (точка F).

Линией нулевых фаз является дуга окружности радиуса r , если $|\overline{U}_c| \approx |\overline{U}_{зв}|$; если $|\overline{U}_c| \ll |\overline{U}_{зв}|$, то такой линией можно считать прямую, перпендикулярную вектору $\overline{U}_{зв}$.

6. Подобные построения производятся для различных $|\overline{U}_c|/|\overline{U}_{зв}|$ и ψ .

При измерении скорости метеоров импульсно-дифракционным методом начальная фаза биений (как следует из рис. 1) постоянна и равна $\frac{\pi}{2}$.

Величина погрешности δ_2 , обусловленная неточностью определения номеров m и n , приведена в таблицах 2—5 для нескольких значений ψ .

Нужно сказать, что за счет погрешности определения m и n , вызванной незнанием точного значения φ_0 , мы будем вносить еще некоторую ошибку δ_3 , которая обусловлена тем, что вместо $\delta_1 \varphi$, соответствующей m_φ и n_φ , мы берем δ_{10} , соответствующую m_0 и n_0 .

Значение δ_2 в процентах для $\varphi_0 = \pi/4$

Таблица 2

$m \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	41,3	28,1	22,5	19,2	17,0	15,6	14,3	13,4	12,5	11,8
1	—	4,50	3,50	3,00	2,74	2,54	2,36	2,29	2,09	1,93
2	—	—	2,25	2,09	1,86	1,67	1,60	1,53	1,47	1,32
3	—	—	—	1,90	1,61	1,48	1,40	1,33	1,28	1,13
4	—	—	—	—	1,29	1,24	1,21	1,15	1,11	0,97
5	—	—	—	—	—	1,18	1,16	1,09	1,06	0,87
6	—	—	—	—	—	—	1,13	1,06	0,92	0,81
7	—	—	—	—	—	—	—	0,94	0,84	0,68
8	—	—	—	—	—	—	—	—	0,83	0,61
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,72

Таблица 3

Значение δ_2 в процентах для $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$

$m \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	61,8	41,4	33,0	27,8	24,8	22,2	20,6	19,3	18,0	17,0
1	—	8,4	7,0	6,0	5,4	4,9	4,6	4,2	4,0	3,8
2	—	—	5,0	4,7	4,2	3,5	3,1	3,07	2,92	2,76
3	—	—	—	4,10	3,15	2,86	2,77	2,56	2,42	2,15
4	—	—	—	—	2,60	2,52	2,32	2,18	2,14	1,19
5	—	—	—	—	—	2,25	2,04	1,96	1,86	1,75
6	—	—	—	—	—	—	1,93	1,83	1,70	1,67
7	—	—	—	—	—	—	—	1,66	1,53	1,47
8	—	—	—	—	—	—	—	—	1,54	1,51
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,23

$(m_\varphi = m_0 + \frac{\varphi_0}{2\pi}; n_\varphi = n_0 + \frac{\varphi_0}{2\pi})$, а m_0 и n_0 — число периодов

биений для случая, когда начальная фаза равна нулю).

Как упоминалось выше, действительная величина скорости метеора равна

$$V_d = \frac{\sqrt{m_\varphi} - \sqrt{n_\varphi}}{\Delta t_d} \sqrt{\lambda R_0},$$

где Δt_d — время между m_φ и n_φ периодами колебаний в случае отражения радиоволн от движущейся цели.

Величина скорости, измеренная по дифракционной картине, определяется как

$$V_u = \frac{V\overline{m_0} - V\overline{n_0}}{\Delta t_{\phi}} V\overline{\lambda R_0}, \quad (3)$$

где Δt_{ϕ} — время между m_{ϕ} и n_{ϕ} периодами биений амплитуды выходного сигнала при дифракционном отражении радиоволн от метеорного следа.

Значение δ_2 в процентах для $\varphi_0 = \pi$

Таблица 4

$m \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	93,2	73,2	58,8	48,4	36,5	33,0	30,3	28,2	26,3	24,8
1	—	16,2	13,3	11,4	10,4	9,4	8,7	8,2	7,6	7,24
2	—	—	9,70	8,44	7,55	6,92	6,40	6,00	5,70	4,42
3	—	—	—	7,00	6,24	5,74	5,30	4,98	4,70	4,42
4	—	—	—	—	5,40	4,97	4,60	4,33	4,05	3,86
5	—	—	—	—	—	4,66	3,96	3,89	3,66	3,46
6	—	—	—	—	—	—	3,81	3,55	3,40	3,18
7	—	—	—	—	—	—	—	3,39	3,11	2,98
8	—	—	—	—	—	—	—	—	2,90	2,77
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,53

Значение δ_2 в процентах для $\varphi_0 = \frac{3\pi}{2}$

Таблица 5

$m \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	94,9	78,5	61,8	52,3	47,6	41,4	37,9	35,3	32,9	31,1
1	—	47,3	19,3	16,7	15,0	13,7	12,6	11,0	11,3	10,5
2	—	—	11,4	11,2	11,1	11,0	10,9	10,8	10,8	10,8
3	—	—	—	10,3	9,11	8,45	7,87	7,33	6,91	6,54
4	—	—	—	—	8,00	7,40	6,90	6,41	6,05	5,70
5	—	—	—	—	—	6,75	6,05	5,80	5,45	5,15
6	—	—	—	—	—	—	5,60	5,27	4,98	4,73
7	—	—	—	—	—	—	—	4,77	4,51	4,35
8	—	—	—	—	—	—	—	—	4,38	4,15
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,65

Если в выражении (3) числитель умножить на $\frac{V\overline{m_{\phi}} - V\overline{n_{\phi}}}{V\overline{m_0} - V\overline{n_0}}$,

а знаменатель на $\Delta t_d / \Delta t_{\phi}$, то получим истинное значение скорости

$$V_d = \frac{V\overline{m_{\phi}} - V\overline{n_{\phi}}}{\Delta t_d} V\overline{\lambda R_0}.$$

Обозначим:

$$\delta_1 = \frac{\Delta t_{\phi} - \Delta t_d}{\Delta t_{\phi}}, \quad \delta_2 = \frac{(V m_0 - V n_0) - (V m_{\varphi} - V n_{\varphi})}{V m_0 - V n_0},$$

тогда

$$V_d = V_u \frac{1 - \delta_2}{1 - \delta_1}. \quad (4)$$

С учетом поправки δ_3 формула (4) принимает вид

$$V_d = V_u \frac{1 - \delta_2}{(1 - \delta_1)(1 - \delta_3)}, \quad (5)$$

где

$$\delta_3 = \frac{\delta_{10} - \delta_{1\varphi}}{\delta_{10}}. \quad (6)$$

При практических расчетах поправку δ_3 можно не учитывать, так как ее величина примерно на порядок меньше величины δ_1 и δ_2 .

Выводы

1. Дифракционный метод измерения скорости метеоров дает некоторую погрешность, обусловленную неточностью определения фазы φ_0 и нелинейной зависимостью частоты колебаний огибающей амплитуд отраженного сигнала от времени, причем первая составляющая погрешности значительно больше второй.

2. С увеличением номеров колебаний, по которым определяется скорость, обе составляющие погрешности уменьшаются.

3. При использовании импульсного метода начальная фаза $\varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \text{const}$, а следовательно, и погрешность δ_2 для данных m и n

постоянна (таблица 3).

4. При использовании непрерывно-волнового метода величина δ_2 зависит главным образом от начальной фазы φ_0 , точность определения которой зависит, в свою очередь, от соотношения амплитуд \overline{U}_c и $\overline{U}_{3\varphi}$.

Вычисления показывают, что для определения скорости с точностью $\cong 1\%$ точность определения фазы φ_0 должна составлять примерно 45° . Для этого необходимо, чтобы напряжение $|\overline{U}_{3\varphi}|$ было на порядок выше максимального напряжения сигнала.

5. Поправку необходимо учитывать при решении вопроса о существовании гиперболических скоростей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловелл В. и Клегг Д., Радиоастрономия, Издательство иностранной литературы, 1953.
2. Мак-Кинли Д., Определение метеорных скоростей радионаблюдениями, *Астрофизический журнал*, т. 113, № 2, 1951.
3. Маннинг Л., Теория радиобнаружения метеоров, *Журнал прикладной физики*, т. 11, № 8, 1948.
4. Таблицы интегралов Френеля. Издание АН СССР, 1953.