

К ВОПРОСУ О СЕЛЕКТИВНЫХ СВОЙСТВАХ
РАДИОЛОКАЦИОННОГО МЕТОДА НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ
(II. УСТОЙЧИВЫЕ СЛЕДЫ)

Е. И. ФИАЛКО

(Представлено научным семинаром радиотехнического факультета)

Введение

Ряд исследователей полагает, что радиолокационный метод наблюдения метеоров обладает селективностью, то есть различной чувствительностью к метеорам в зависимости от их скорости [1, 2 и др].

Ранее было показано, что в случае регистрации ионизированных метеорных следов неустойчивого типа действительно должна иметь место избирательность по скорости [3, 4, 5 и др.].

Однако нельзя ограничиваться рассмотрением регистрации лишь неустойчивых метеорных следов, так как при измерении скоростей метеоров в значительной мере используются устойчивые следы, а иногда (особенно в случае работы на относительно длинных волнах и приема с больших расстояний) измеряются скорости только тех метеорных тел, которые создают устойчивые ионизированные следы.

В связи с этим возникает необходимость выяснения селективных свойств радиолокационного метода при регистрации метеоров (или при измерении их скоростей) в случае устойчивых метеорных следов.

Для того, чтобы метеор оказался зафиксированным, необходимо, чтобы длительность отражения радиоволн от ионизированного следа превышала некоторое минимальное значение T_{\min} (характеризующее оперативность системы [6]). То же имеет место и при измерении скорости. Надо зафиксировать пульсации амплитуд эхо-сигналов в пределах нескольких зон Френеля, для чего необходимо существование отражения и превышение его над соответствующим пороговым уровнем в течение определенного времени (порядка десятых долей секунды).

Строго говоря, T_{\min} зависит от измеряемого параметра метеора, от вида измерения (или регистрации), от параметров локатора и т. п.; в частности, T_{\min} может зависеть и от скорости метеорного тела v . Ограничиваясь здесь приближенным анализом, будем полагать величину T_{\min} независимой от v .

Кроме того, будем полагать, что прием эхо-сигналов ведется из области характеристической высоты [7].

Случай регистрации сигналов в условиях интегрирования, требующий отдельного рассмотрения, в данной работе не излагается.

Зависимость количества обнаруженных метеоров устойчивого типа от параметров аппаратуры, атмосферы и метеорных тел рассмотрена Кайзером [8]; более подробное рассмотрение проведено в [9].

Возможны два режима уверенного обнаружения устойчивых метеорных следов [9]:

1) Отражение длительностью $T_{cl} \geq T_{min}$ превышает пороговый уровень ($\epsilon_c > \epsilon_n$) (рис. 1).

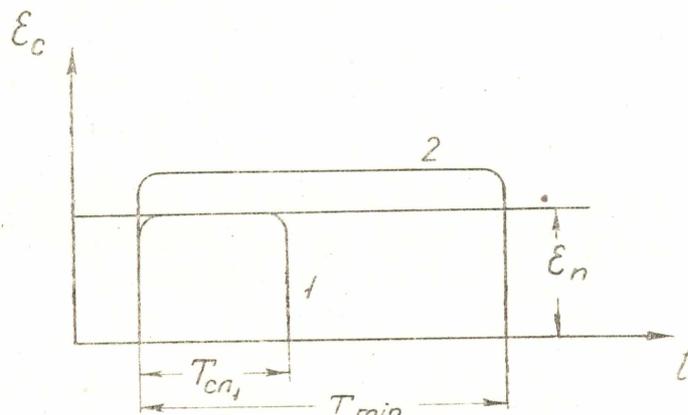


Рис. 1. Случай, когда отражение с длительностью $T_{cl} \geq T_{min}$ превышает пороговый уровень ϵ_n . ϵ_c — мощность эхо-сигналов; t — время. 1 и 2 — огибающие амплитуд эхо-сигналов: 1 — отражение, достигшее порогового уровня. 2 — отражение длительностью $T_{cl} = T_{min}$.

2) Отражение длительностью $T_{cl} = T_{min}$ не достигает порогового уровня ($\epsilon_c < \epsilon_n$) и, следовательно, длительность отражения, достигшего порогового уровня, оказывается $> T_{min}$ (рис. 2).

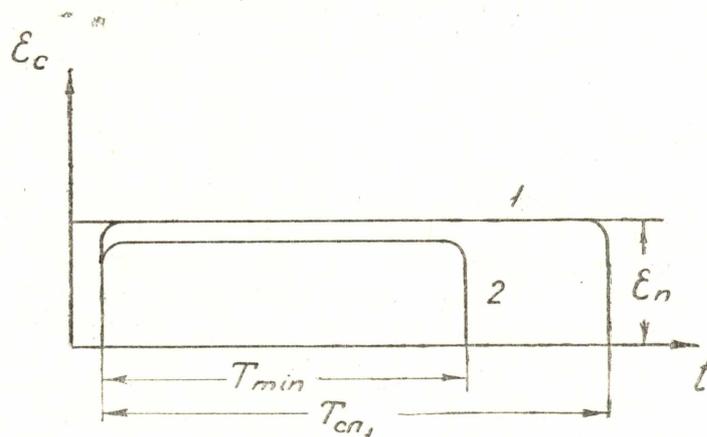


Рис. 2. Случай, когда отражение длительностью $T_{cl} = T_{min}$ (2) не достигает порогового уровня. 1 — отражение, достигшее порогового уровня ($T_{cl} > T_{min}$).

Первый режим возможен при больших коэффициентах диффузии, при измерениях, связанных с весьма большим значением T_{min} , и т. п.

Второй режим может иметь место при приеме сигналов с боковых направлений и с больших дальностей, при использовании весьма маломощной аппаратуры и т. п.

Будем условно называть первый режим — случаем аппаратуры средней чувствительности, а второй — случаем аппаратуры низкой

чувствительности (и будем полагать, что высокочувствительная аппаратура обнаруживает неустойчивые следы, аппаратура низкой и средней чувствительности может регистрировать лишь следы устойчивого типа).

Для того, чтобы выяснить, в какой мере проявляются селективные свойства радиолокационного метода наблюдения метеоров, поступим следующим образом.

Представим себе, что имеется несколько потоков с одинаковыми пространственными плотностями метеорных тел, с одинаковыми законами распределения метеорных тел по массам и т. п.; потоки отличаются лишь скоростями метеорных тел. Выясним, как будет изменяться количество метеоров (N), зафиксированных данным радиолокатором, в функции скорости (v)?

Зависимость $N(v)$ и будет характеризовать селективные свойства радиолокационного метода наблюдения метеоров.

Аппаратура средней чувствительности

В случае когда отражение длительностью $\geq T_{\min}$ превышает пороговый сигнал (рис. 1), количество уверенно обнаруженных метеоров устойчивого типа за единицу времени можно представить в виде [9]

$$N = A_1 \cdot \frac{b \cdot \Delta s}{s-1} \left(\frac{\cos \chi}{\mu} \cdot \frac{\lambda^2}{T_{\min}} \cdot \frac{\beta}{HD} \right)^{s-1} \quad (1)$$

где A_1 — константа; χ — зенитное расстояние радианта; μ — масса атома метеорного тела; β — вероятность ионизации; H — высота однородной атмосферы; D — коэффициент диффузии; λ — длина волны; b и s — константы, характеризующие распределение метеорных тел по массам [7, 10],

$$p(m) = \frac{b}{m^s}, \quad (2)$$

где $p(m) \Delta m$ определяет число метеорных тел в интервале масс m — $m + \Delta m$, проходящих через единицу площади (в плоскости эхо [7]) за единицу времени.

Таким образом, формула (1) определяет количество метеоров потока, „пронзающих“ площадку, лежащую в плоскости эхо (в области характеристической высоты), площадью Δs .

Выражая коэффициент b через скорость (v) и объемную плотность потока метеорных тел (Ω)

$$b = \Omega \cdot v \quad (3)$$

и выделяя в (1) сомножители, зависящие от v , получим

$$N = A_1 \left(\frac{\beta}{HD} \right)^{s-1} \cdot v. \quad (4)$$

Представив вероятность ионизации β в виде [7]

$$\beta = a \cdot v^n \quad (5)$$

(где a и n константы, не зависящие от v) и подставляя (5) в (4), получим

$$N = A_1'' \frac{v^{n(s-1)+1}}{(HD)^{s-1}} \quad (6)$$

Для случая $s = 2$ (6) примет вид

$$N = A_1'' \frac{v^{n+1}}{HD} \quad (7)$$

Учитывая зависимость характеристической высоты от скорости $h_m(v)$ [7] и используя $H(h)$ [7] и $D(h)$ [11], найдем $N(v)$ при определенном значении показателя n . Как известно, относительно величины показателя n существуют весьма противоречивые мнения [12].

Полагаясь на результаты теоретических исследований [13,14], примем $n \approx 1$.

На рис. 3 представлена зависимость $N(v)$, построенная по формуле (7) при $n = 1$ (причем по оси ординат отложено отношение $\frac{N(v)}{N_{\max}}$, где N_{\max} — соответствует $v = 30$ км/сек).

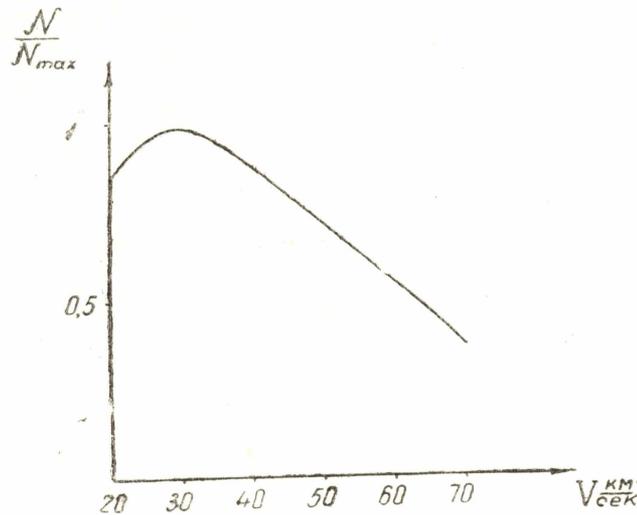


Рис. 3. Зависимость количества метеоров, зарегистрированных аппаратурой „средней“ чувствительности, от скорости метеорных тел. N — количество зарегистрированных метеоров обладающих скоростью v . N_{\max} соответствует, $v \approx 30$ км/сек.

Аппаратура низкой чувствительности

В случае, когда отражение, достигшее порогового уровня, имеет длительность $> T_{\min}$ (рис. 2), количество уверенно обнаруженных метеоров устойчивого типа за единицу времени будет равно [9]

$$N = A_2 \frac{b \Delta s}{s-1} \left(\frac{\cos \chi}{\mu} \cdot \frac{\beta}{H} \right)^{s-1} \left(\frac{P_i G^2 \lambda^3}{\varepsilon_n R^3} \right)^{2(s-1)} \quad (8)$$

где P_i — излучаемая мощность в импульсе; G — коэффициент направленного действия антенны; ε_n — мощность порогового сигнала; R — наклонная дальность от локатора до следа по нормали; A_2 — константа (остальные обозначения оговорены выше).

Выделяя в (8) сомножители, зависящие от v , и учтя, что $R \sim h_m$, получим:

$$N = A_2' \frac{v^{n(s-1)+1}}{H^{s-1} h_m^{6(s-1)}}. \quad (9)$$

При $s = 2$

$$\dot{N} = A_2' \frac{v^{n+1}}{H h_m^6}. \quad (10)$$

Приняв, как и в предыдущем случае, $n=1$ и учитывая $h_m(v)$ [7] и $H(h)$ [7], построим $N(v)$ (см. рис. 4, на котором по оси ординат отложено отношение $\frac{N(v)}{N_{\max}}$, где N_{\max} соответствует $v=70$ км/сек).

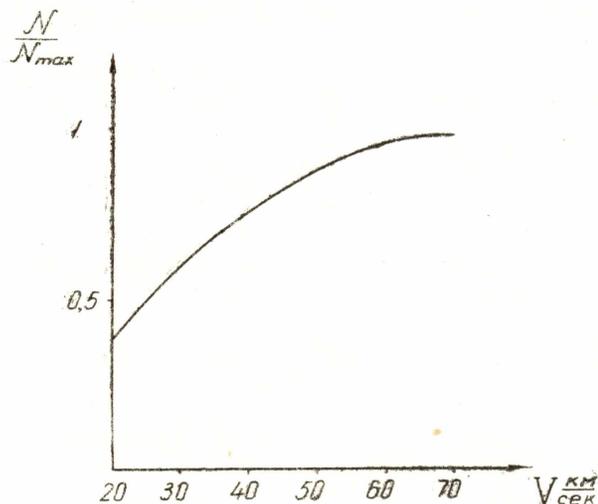


Рис. 4. Зависимость количества метеоров N , зарегистрированных „низкочувствительной“ аппаратурой, от скорости метеорных тел v . N_{\max} — соответствует $v=70$ км/сек.

Обсуждение полученных зависимостей $N(v)$

Как видно из рассмотрения кривых, приведенных на рис. 3 и 4, при регистрации устойчивых метеорных следов проявляются селективные свойства радиолокационного метода, причем характер избирательности существенно определяется параметрами аппаратуры, а также некоторыми характеристиками потока.

Аппаратура с относительно большой мощностью излучения и небольшой длиной волны оказывается наиболее чувствительной к устойчивым метеорам со скоростями $v \approx 30$ км/сек.

Аппаратура маломощная, ведущая прием с больших дальностей, обладает повышенной чувствительностью к быстрым метеорам (причем в пределах скоростей $v \approx 20-70$ км/сек чувствительность монотонно возрастает по мере увеличения v).

Таким образом, для выяснения истинного распределения метеорных тел по скоростям надо знать, на какой аппаратуре производились измерения скоростей метеоров.

В случае весьма низкочувствительной аппаратуры, регистрирующей устойчивые следы (как и в случае весьма высокочувствительной аппаратуры, регистрирующей неустойчивые следы [4, 5], истинное распределение метеорных тел по скоростям будет иметь (по сравнению с кажущимся распределением) значительно больший подъем в области малых скоростей.

В случае же системы „средней чувствительности“ необходимо внесение существенных корректив в области быстрых метеоров.

Следует отметить, что доля метеоров космического происхождения остается малой, даже при внесении корректив в случае системы „средней“ чувствительности (заметим, что эти выводы получены в предположении линейной зависимости вероятности ионизации β от скорости метеорного тела).

Таким образом, для внесения корректив в результаты измерений необходимо иметь критерии, которые позволили бы определить, к какому классу относится аппаратура „средней“ или „низкой“ чувствительности.

Признаки аппаратуры «средней» и «низкой» чувствительности

Радиолокатор регистрирует лишь следы устойчивого типа (то есть следы с линейной электронной плотностью $\alpha \gg 10^{12}$ эл/см), если выполняется условие [9, 15].

$$\frac{P_i G^2}{\varepsilon_n} \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3 \lesssim 2 \cdot 10^3. \quad (11)$$

Отражение от устойчивого следа длительностью $\geq T_{\min}$ превышает пороговый уровень ε_n , если [9, 15]

$$520 \frac{\lambda}{\sqrt{D T_{\min}}} < \frac{P_i G^2}{\varepsilon_n} \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3 \lesssim 2 \cdot 10^3, \quad (12)$$

и не достигает порогового уровня, если одновременно выполняются условия (11) и (13) [9, 15]

$$\frac{P_i G^2}{\varepsilon_n} \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3 \leq \frac{520 \lambda}{\sqrt{D T_{\min}}}. \quad (13)$$

Таким образом, метеорному радиолокатору „средней“ чувствительности соответствует условие (12), а радиолокатору „низкой“ чувствительности—условия (11) и (13).

Выводы

1. Радиолокационные наблюдения при регистрации как устойчивых, так и неустойчивых следов обладают различной чувствительностью к метеорным следам, созданным телами с разными геоцентрическими скоростями.

2. Характер селективности может быть различным в зависимости от свойств аппаратуры.

Может оказаться, что избирательность по скорости имеет монотонно-нарастающий характер, как, например, в случае весьма низкочувствительной (маломощной) аппаратуры. Но избирательность может иметь также экстремальный характер с „подчеркиванием“ медленных устойчивых метеоров в области $v \approx 30$ км/сек (заметим, что в случае регистрации неустойчивых следов „подчеркиваются“ быстрые метеоры со скоростями ≈ 50 км/сек [1, 16]).

3. Селективность радиолокационного метода может привести к существенному искажению картины распределения метеорных тел по скоростям.

4. При переходе от кажущегося распределения метеорных тел по скоростям к истинному распределению необходимо знать параметры (и, прежде всего, чувствительность) аппаратуры.

5. Доля метеоров космического происхождения (точнее, метеоров с геоцентрическими скоростями $v \gg 72$ км/сек) незначительна.

6. Для тщательного исследования селективных свойств радиолокационного метода необходимо уточнить зависимость вероятности ионизации от скорости метеорного тела и рассмотреть прием отражений из всей плоскости эхо.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. J. Örik. Meteors and the upper atmosphere, Irish Astronomical Journ., v. 3, N 6, p. 166, 1955.
2. Ю. А. Лоцилов. Диссипация метеорного следа и вопросы селективности радиолокационных наблюдений, Доклад на юбилейной научной конференции радиотехнического факультета Томского политехнического института, 1958.
3. Е. И. Фиалко. Мощность сигнала, отраженного от метеорного следа в условиях интенсивной диффузии, Известия ТПИ, т. 100, стр. 40, 1962.
4. Е. И. Фиалко. К вопросу о роли скорости метеорного тела при радиолокационных наблюдениях метеоров, Известия ТПИ, т. 114, 1962 (в печати).
5. Е. И. Фиалко. К анализу зависимости часового числа зарегистрированных метеоров от параметров метеорных тел, атмосферы и аппаратуры. Бюллетень комиссии по кометам и метеорам АН СССР, № 5, стр. 9, 1961.
6. Е. И. Фиалко. Об оперативности метеорного радиолокатора, Известия вузов МВО (раздел Радиотехника), т. 3, № 5, стр. 529, 1960.
7. T. R. Kaiser. Radio-echo studies of meteor ionization, J. Adv. Phys., v. 2, N. 8, p. 495, 1953.
8. T. R. Kaiser. Theory of the meteor height distribution obtained from radio-echo observations, M. N. R. A. S., 114, N 1, 39, 1954.
9. Е. И. Фиалко. Уверенное и случайное радиообнаружение устойчивых метеорных следов, Известия ТПИ, т. 100, стр. 84, 1962.
10. Б. Ю. Левин. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в солнечной системе, Изд. АН СССР, 1956.
11. J. S. Greenhow, E. L. Neufeld. The diffusion of ionized meteor trails in the upper atmosphere. Journ. Atm. Terr. Phys., v. 6, N 2—3, 133, 1955.
12. G. S. Hawkins. Meteor ionization and its dependence on the velocity, Astroph. J., 124, N 1, 311, 1956.
13. H. S. Massey, D. W. Sida. Collision processes in meteor trails, Phil. Mag., v. 46, N 373, 190, 1956.
14. Ю. А. Лоцилов. Применение теории атомных столкновений к процессам ионизации в метеорных следах. Изв. Астроном. обсерв. Одесского университета, т. 5, вып. 1, стр. 39, 1959.
15. Е. И. Фиалко. Об условиях регистрации ионизированных метеорных следов различных типов, Известия ТПИ, т. 100, стр. 139, 1962.
16. Е. И. Фиалко. О вероятности метеорной ионизации, Радиотехника и электроника, т. 4, вып. 7, стр. 1206, 1959.