

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ШУМОВ НА ЧИСЛО МЕТЕОРОВ, ОБНАРУЖЕННЫХ РАДИОЛОКАТОРОМ

Г. Н. ГЛАЗОВ

(Представлено научным семинаром радиотехнического факультета)

Одной из важнейших задач метеорной радиолокации является выявление изменения метеорной активности во времени. Однако, регистрирующая способность метеорного радиолокатора, к сожалению, различна в разных условиях и непостоянна во времени. Известно, что часовое число метеоров N , обнаруженных радиолокатором, зависит от величины порогового сигнала. Величина порогового сигнала меняется во времени вследствие изменения во времени уровня космических шумов, в основном определяющих пороговый сигнал в диапазоне волн, обычно используемых для метеорной радиолокации.

В работе [1] показано, что поправка на часовое число, обусловленная непостоянством уровня космических помех, при приеме на слабонаправленную антенну мала и для волны $\lambda = 10$ м, например, находится в пределах $\pm 15\%$.

Поправка на часовое число может оказаться значительной при приеме на направленную антенну, в частности, из-за „вспышек“ помех космического или солнечного происхождения и различной ориентации луча антенны по отношению к „горячим“ и „холодным“ источникам космического шума в разное время.

Представляет интерес рассмотрение вопроса о влиянии уровня и хода космических помех на число метеоров, обнаруженных за достаточно большой промежуток времени. Так как, вообще говоря, число метеоров, обнаруженных локатором за время T , есть случайная величина, то представляет интерес нахождение зависимости параметров распределения этой случайной величины от поведения уровня космических шумов в интервале T ; ясно заранее, что искомые параметры распределения и, в частности, среднее число регистраций за время T , зависят от среднего уровня шумов в интервале T и степени вариации их относительно среднего (т. е. от дисперсии) в этом интервале.

Зная такие зависимости, можно сравнивать результаты наблюдений в различных условиях, например, число зарегистрированных локатором метеоров при различных положениях лепестка направленной антенны, или результаты наблюдений на направленные антенны в разных точках земного шара. При рассмотрении зависимости числа обнаруженных метеоров от длины волны, координат локатора, направления лепестка антенны и т. д. может быть должным образом исключен фактор влияния космического шума. Представляет интерес нахож-

дение зависимости дисперсии числа обнаруженных за время T метеоров (при одних и тех же условиях наблюдения) от характеристик космического шума. Это дает возможность наметить границы, в которых возможно отклонение числа обнаруженных за время T метеоров по чисто случайным причинам.

Следуя Кайзеру [2], можно записать зависимость среднего часового числа обнаруженных метеоров N от мощности порогового сигнала ε следующим образом:

$$N = k_1 \varepsilon^{\frac{s-1}{2}}, \quad (1)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, не зависящий от величины порогового сигнала; s — параметр распределения метеорных тел по массам [2]: $p(m) \sim m^{-s}$.

Мощность порогового сигнала может быть представлена в виде [3].

$$\varepsilon = kT_o \Delta f \left(\frac{T_a}{T_o} - 1 + F_c \right) \rho, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана; T_o — комнатная температура; T_a — эффективная температура антенны, характеризующая интенсивность внешних (в данном случае — космических) шумов; Δf — эффективная полоса шумов приемника; F_c — собственный коэффициент шумов приемника, характеризующий интенсивность внутренних (флуктуационных) шумов приемника; ρ — коэффициент наблюдаемости.

В общем случае $k_1 = k_1(t)$ и $\varepsilon = \varepsilon(t)$ есть реализации случайной функции времени. В частном случае, когда среднее число обнаруженных в единицу времени метеоров N постоянно, распределение числа n метеоров, обнаруженных за время T , дается формулой Пуассона

$$P_T(n) = \frac{(N \cdot T)^n \cdot e^{-NT}}{n!}. \quad (3)$$

В общем случае, когда $N = N(t)$ есть функция времени [4,5]

$$P_T(n) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}, \quad (4)$$

где
$$\mu = \int_{t_o}^{t_o+T} N(t) dt, \quad (5)$$

t_o — время начала интервала T .

Таким образом, процесс регистраций метеоров задается как нестационарный „пуассоновский“ случайный процесс. Необходимые условия [5], при которых справедливы (3), (4) выполняются для процесса регистраций метеоров, если каждому зарегистрированному метеору поставить в соответствие точку на оси времени (соответствующую, например, началу радиозохи).

В частности, вытекающее из (4) теоретическое распределение интервалов между метеорными радиозохо хорошо согласуется с экспериментальными данными [6,7].

Среднее число метеоров, зарегистрированных за время T , согласно (4), равно

$$N_{Tcp} = \mu = \int_{t_0}^{t_0+T} \kappa_1(t) \varepsilon(t)^{\frac{s-1}{2}} dt, \quad (6)$$

и среднеквадратичное уклонение

$$\sigma(N_T) = \sqrt{N_{Tcp}}. \quad (7)$$

При достаточно большом T , когда $\mu \gg 1$, пуассоновское распределение (4) достаточно хорошо аппроксимируется нормальным распределением [4]

$$P_T(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}} e^{-\frac{(n-\mu)^2}{2\mu}}. \quad (8)$$

Введем величину k_{1cp} , равную среднему значению величины κ_1 на интервале T

$$k_{1cp} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \kappa_1(t) dt. \quad (9)$$

В момент t величина k_1 отличается от k_{1cp} на величину приращения $\Delta k_1(t)$

$$k_1(t) = k_{1cp} + \Delta k_1(t). \quad (10)$$

Подставляя (10) в (6), имеем

$$N_{Tcp} = k_{1cp} \int_{t_0}^{t_0+T} \varepsilon(t)^{\frac{s-1}{2}} dt + \int_{t_0}^{t_0+T} \Delta k_1(t) \varepsilon(t)^{\frac{s-1}{2}} dt. \quad (11)$$

Второй член в правой части (11), характеризующий взаимную корреляцию двух независимых случайных процессов (один из которых $\Delta k_1(t)$ — с нулевым средним), стремится к нулю при $T \rightarrow \infty$. При достаточно большом T этим членом можно пренебречь. Тогда имеем:

$$N_{Tcp} = k_{1cp} \int_{t_0}^{t_0+T} \varepsilon(t)^{\frac{s-1}{2}} dt. \quad (12)$$

Перепишем (1) в виде

$$N(t) = k_2(a + h)^\alpha, \quad (13)$$

где

$$a = \frac{T_a(t)}{T_0}, \quad h = F_c - 1, \quad \alpha = -\frac{s-1}{2}, \quad k_2 = (kT_0 \Delta f \rho)^{-\frac{s-1}{2}}.$$

В диапазоне волн, обычно применяемых для метеорной радиолокации, космические шумы превышают внутренние, $T_a(t) > T_0$, $a > h$. При этих условиях ряд Тейлора для $N(t)$

$$N(t) = a^\alpha + h\alpha a^{\alpha-1} + \frac{1}{2} h^2 \alpha (\alpha - 1) a^{\alpha-2} + \dots \quad (14)$$

быстро сходится. Так как $\alpha < 0$, с погрешностью, меньшей по абсолютной величине, чем $\frac{h^2 \alpha (\alpha - 1)}{a^{2-\alpha}}$, можно записать

$$(a + h)^\alpha = a^\alpha + \alpha h \frac{1}{a^{1-\alpha}}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (12), получаем

$$N_{T_{cp}} = k_2 k_{1cp} \left(\frac{1}{T_o^\alpha} \int_{t_o}^{t_o+T} T_a^\alpha(t) dt + \frac{\alpha h}{T_o^{\alpha-1}} \int_{t_o}^{t_o+T} T_a^{\alpha-1}(t) dt \right). \quad (16)$$

Представим функцию $T_a(t)$ в виде

$$T_a(t) = T_{acp} + \Delta T_a(t). \quad (17)$$

где

$$T_{acp} = \frac{1}{T} \int_{t_o}^{t_o+T} T_a(t) dt. \quad (18)$$

Разумеется,

$$\int_{t_o}^{t_o+T} \Delta T_a(t) dt = 0. \quad (19)$$

Учитывая (17), разлагаем функции $T_a^\alpha(t)$ и $T_a^{\alpha-1}(t)$ в ряд Тейлора и считая, что $\Delta T_a < T_{acp}$, отбрасываем члены порядка $\frac{\Delta T_a^3}{T_{acp}^{3-\alpha}}$ и выше. Тогда, учитывая (19), после простых преобразований получаем:

$$N_{T_{cp}} = k_2 k_{1cp} \left(\frac{T_{acp}}{T_o} \right)^\alpha \cdot T \left[1 + \frac{1}{2} \alpha (\alpha - 1) \sigma^2 + \frac{\alpha}{b} \right]. \quad (20)$$

Здесь $\sigma^2 = \frac{1}{T_{acp}^2 \cdot T} \int_{t_o}^{t_o+T} \Delta T_a^2(t) dt$ — нормированная дисперсия, характеризующая степень разброса $T_a(t)$ относительно среднего;

$b = \frac{T_{acp}}{T_o} \frac{1}{h}$ — характеризует относительное превышение космических шумов над внутренними. Выражение в квадратных скобках (20) дает поправку, обусловленную различным влиянием космического шума на число обнаруженных метеоров в зависимости от дисперсии огибающей и среднего уровня мощности шумов. Член $\frac{\alpha}{b}$ учитывает, в частности, изменение влияния шумов (как внешних, так и внутренних) при изменении длины волны. При увеличении длины волны $\left| \frac{\alpha}{b} \right|$ уменьшается, что приводит к увеличению поправочного множителя.

В частном случае постоянного уровня шумов $T_a(t) = T_{acp}$ поправочный множитель

$$p_n = 1 - \frac{s-1}{2} \frac{T_o(F_c-1)}{T_a}$$

При сравнении результатов наблюдений в различных условиях имеем

$$\frac{k_{1cp1}}{k_{1cp2}} = \frac{N_{Tcp1}}{N_{Tcp2}} \cdot \frac{T_{acp2}^{\alpha_2}}{T_{acp1}^{\alpha_1}} \cdot \frac{p_2}{p_1}, \quad (21)$$

где

$$\alpha_i = -\frac{s_i-1}{2}, \quad p_i = 1 + \frac{1}{2} \alpha_i (\alpha_i - 1) \sigma_i^2 + \frac{\alpha_i T_o h_i}{T_{acpi}}$$

Таким образом, необходимо знать такие характеристики космических шумов, как средний уровень мощности в интервале T и дисперсия отгибающей относительно среднего уровня. Вообще, для этого достаточно, чтобы мощность шумов была задана как случайная функция времени. Практически, при разных направленностях и направлениях антенн, это вряд ли возможно.¹⁾ Поэтому необходимо вести запись уровня мощности шумов во время наблюдений и затем определять необходимые величины σ^2 и T_{acp} . Можно также вести непосредственное усреднение двух величин, пропорциональных соответственно мощности шумов и квадрату мощности шумов. В последнем случае дисперсия вычисляется как

$$\sigma^2 = \frac{(T_a^2)_{cp}}{T_{acp}^2} - 1, \quad (22)$$

где $(T_a^2)_{cp} = \frac{1}{T} \int_{t_o}^{t_o+T} T_a^2(t) dt$ — средний квадрат антенной температуры.

Следует заметить, что непосредственное усреднение величины $\frac{s-1}{T_a^2}$ может дать значительные погрешности, вследствие того, что величина s даже в условиях совмещенного во времени эксперимента, а тем более при экспериментах в различное время, может быть различной.

Из (7) и (20) получаем:

$$\sigma(N_T) \sim T_{acp}^{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{1 + \frac{1}{2} \alpha (\alpha - 1) \sigma^2 + \frac{\alpha}{b}} \quad (23)$$

Таким образом, возможное отклонение числа обнаруженных метеоров от N_{Tcp} растет с увеличением T_{acp} и σ^2 .

Кроме выявления средней величины k_{1cp} , представляет интерес нахождение $k_1(t)$ (наиболее вероятной, по результатам наблюдений, реализации). Это можно сделать, определяя корреляцию между $N(t)$ и $T_a(t)$. Рассмотрение этого вопроса выходит за рамки данной работы.

¹⁾ В частности, на метровых волнах для одной и той же антенны диаграмма направленности меняется в зависимости от угла места за счет влияния земли.

Выводы

1. Процесс регистрации метеоров радиолокатором может быть охарактеризован как специальный вид нестационарного „пуассоновского“ процесса.

2. Среднее число регистраций метеорных радиоэхо за данный интервал времени зависит, в первом приближении, от среднего (на данном интервале) уровня мощности шумов и дисперсии огибающей шумов.

3. Дисперсия числа регистраций за данный интервал времени (при данных условиях) также зависит от характеристик шумов. Это позволяет оценить степень разброса общего числа регистраций относительно среднего по чисто случайным причинам.

4. Для внесения поправки на влияние шумов и учета различного действия шумов при сопоставлении результатов, полученных в различных условиях (или в разное время), необходимо знать средний за интервал наблюдения уровень мощности шумов и дисперсию огибающей шумов. Для получения этих характеристик необходимо записывать уровень шумов во время наблюдения или непосредственно усреднять мощность и квадрат мощности шумов по времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фиалко Е. И., Серафимович Л. П. О влиянии интенсивности космических помех на часовое число метеоров, обнаруженных радиосредствами, Известия ТПИ, том 105, 1960.

2. Kaiser T. R. Radio-echo studies of meteor ionization, J. Adv. Phys., 1953, V. 2 No 8, 495.

3. Сифоров В. И. Радиоприемные устройства, Оборонгиз, 1954

4. Левин Б. Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике.,

5. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. Физматгиз, 1960.

6. Фиалко Е. И. Некоторые статистические характеристики метеорных радиоэхо, Бюллетень комиссии по кометам и метеорам астрономического совета АН СССР, 1959, № 4, стр. 9.

7. Фиалко Е. И. О распределении интервалов между метеорными радиоэхо (в печати).