

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР ЧИСЛЕННОСТИ РАДИОМЕТЕОРОВ

Ю. И. Волощук

Исследования метеорных явлений имеют исключительное значение для развития многих разделов космогонии, геофизики, радиосвязи и др. Среди многочисленных задач, решаемых метеорной астрономией, в первую очередь следует назвать задачу изучения притока метеорного вещества на Землю, одним из методов решения которой является изучение численности метеорных радиоэхо в функции их амплитуды и длительности.

В качестве регистраторов численности метеоров наиболее широко в настоящее время применяется отметчик с яркостной модуляцией луча и раздвоением развертки [1]. С рядом усовершенствований (электронная линза, четырехканальный регистратор амплитуд) регистратор численности непрерывного типа работает в составе метеорного радиолокатора в Харьковском политехническом институте (ХПИ).

Большой поток информации, получаемый на высокочувствительных специальных РЛС, все шире используемых для изучения метеорных явлений, потребовал создания вычислительных устройств, которые позволяли бы полностью автоматизировать процесс регистрации и обработки результатов измерений.

Одним из первых шагов в этом направлении явилась разработка в ХПИ статистического анализатора численности метеорных отражений

(САЧМО). В отличие от устройств автоматической обработки результатов измерения орбит, радиантов и т. д. [2] при изучении численности, алгоритм вторичной обработки элементарен, поэтому применение ЭВМ нецелесообразно. Основные трудности при проектировании САЧМО заключаются в построении устройств предварительной и первичной обработки сигналов.

Существует ряд общих требований, предъявляемых к статистическому анализатору численности:

- 1) полная автоматизация всего процесса обработки информации;
- 2) наличие эффективной системы защиты от помех;

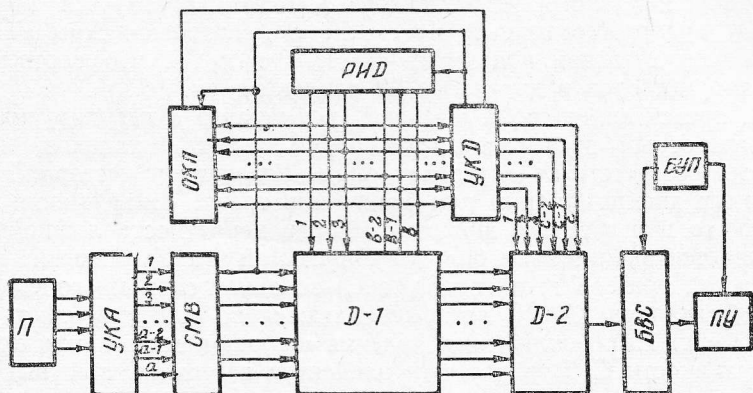


Рис. 1. Функциональная схема статистического анализатора численности радиометеоров:

П — приемник; УКА — устройство квантования сигналов по амплитуде; СМВ — схема многопериодного выделения сигналов; РИД — регистр интервалов дальности; Д-1 — дешифратор по амплитуде и дальности; ОКП — обнаружитель конца пакета отраженных импульсов; УКД — устройство квантования сигналов по длительности; Д-2 — дешифратор по амплитуде и длительности; БВС — блок выходных счетчиков; БУП — блок управления печатью; ПУ — печатающее устройство.

- 3) обеспечение параллельной обработки одновременно существующих отражений;
- 4) предельное увеличение скважности квантования сигналов по амплитуде и длительности;
- 5) обеспечение эффективного обнаружения конца пакета отраженных импульсов;
- 6) возможность получения информации о принятом сигнале и вытекающей из нее информации о свойствах метеора (первичная и вторичная обработка) с минимальной задержкой во времени после регистрации.

Следует отметить ряд специфических особенностей работы метеорных РЛС, которые в большой степени определяют выбор того или иного решения при проектировании метеорного регистратора:

- 1) кратковременное существование отраженного сигнала (доли секунды);
- 2) малое допустимое время принятия решения (единицы миллисекунд).

Перечисленные требования явились определяющими при выборе схемы анализатора и его параметров.

На рис. 1 приведена функциональная схема статистического анализатора. Устройство, представляющее собой объемную матрицу, обеспечивает автоматическую регистрацию событий в трехкоординатном поле. Координатами являются амплитуда, длительность и наклонная дальность. Результат представляется в виде трехмерной функции $N = f(A, \tau, R)$,

через равные промежутки времени из которой могут быть получены соответствующие двумерные и одномерные распределения.

Рассмотрим работу САЧМО по функциональной схеме. Смесь полезного сигнала и различного рода шумов и помех с выхода приемника П поступает на вход устройства квантования по амплитуде УКА.

Создание высокочувствительного метеорного комплекса в ХПИ, составной частью которого является САЧМО, привело к расширению диапазона регистрируемых масс метеорных частиц в несколько десятков раз. Необходимость регистрации этих частиц потребовала использования специального приемного устройства с широким динамическим диапазоном. В качестве такого устройства в САЧМО используется помехозащищенный супергетеродинный приемник с логарифмическим УПЧ [3]. Динамический диапазон приемника составляет 85 дБ, что соответствует регистрации метеоров в диапазоне 12 радиовеличин.

УКА представляет собой обычный компаратор с регулируемым порогом и широтным дискриминатором. УКА имеет a каналов, каждый из которых соответствует определенной радиовеличине метеора. На низких уровнях дискриминации при наличии в тракте обнаружения только амплитудного и широтного дискриминаторов вероятность ложной тревоги оказывается значительно больше допустимой [4]. Уменьшение вероятности ложной тревоги достигается использованием схем многопериодного выделения сигналов (СМВ), которые являются по существу обнаружителями типа k/k . Для исключения явления «забоя» и достижения предельной оперативности СМВ в качестве элементов задержки при выделении по периоду используются безынерционные регистры [5].

Как указывалось выше, САЧМО предназначен для работы с высокочувствительным радиолокатором. При этом часовое число регистраций достигает 4—5 тысяч и вероятность одновременного существования нескольких отражений оказывается значительной. Критерием, по которому можно отделить одно отражение от другого, является наклонная дальность. Отражения в САЧМО разделяются методом сравнения дальности регистрируемого следа с эталонной шкалой, введенной в долговременное ЗУ.

РИД, кроме ЗУ дальности, включает в себя схемы выделения и запоминания интервалов дальности, в которых существует в данный момент отражение. РИД имеет b каналов дальности. Шкала дальности, введенная в ЗУ, учитывает неравномерность хода численности в функции расстояния до отражающей точки таким образом, что вероятность появления отражения в любом из интервалов на этой шкале приблизительно одинакова.

После прохождения РИД сигнал по одному из b каналов поступает в дешифратор по амплитуде и дальности (Д-1). В Д-1 каждому отражению на определенной дальности ставится в соответствие значения его амплитуды. С выхода РИД сигнал поступает также на ОКП и УКД. ОКП — антифединговая схема, которая вместе со схемой многопериодного выделения составляет программный обнаружитель начала и конца пакета отраженных импульсов типа $(k/k - n/Z \times l)$ [4].

С выхода УКД, собранного по схеме двухтактного сдвигового регистра, сигнал по одному из c каналов длительности с приходом команды из ОКП поступает в дешифратор по амплитуде и длительности (Д-2), который сигналы от одного и того же следа, идущие по каналам длительности и амплитуды, ставит в $1-1$, соответствие друг другу. Это возможно потому, что и тот и другой сигналы имеют один общий параметр — дальность. Д-2 представляет собой плоскую решетку с a горизонтальными и c вертикальными шинами. Амплитуда и длительность

радиоэхо определяются тем из $(a \times c)$ каналов Д-2, по которому сигнал поступает в БВС.

Через определенные промежутки времени, задаваемые из БУП, производится опрос выходных счетчиков и их гашение. Информация поступает в ПУ и печатается на бумаге.

В результате регистрации и последующей обработки происходит накопление определенной информации о метеоре, теле, породившем его, свойствах верхней атмосферы. При этом интересуются как индивидуальными характеристиками, так и характеристиками всего регистрируемого комплекса отражений от метеорных следов. Последние могут быть статистически наиболее полно описаны n -мерной функцией плотностей вероятностей регистрируемых параметров метеора, частицы и среды [6].

Дадим оценки селективности регистраторов численности. При наличии помех различной природы и интенсивности учет избирательности регистратора непрерывного типа определяется в основном принятой процедурой обработки пленок. Одной из существенных погрешностей является погрешность, вносимая оператором. Для регистратора типа САЧМО необходимо различать два вида искажений: искажения получаемых функций распределения вследствие ограниченного динамического диапазона следящих устройств и искажения из-за отсутствия достаточно полных априорных сведений о регистрируемом процессе.

Получение функции избирательности регистратора численности, определенной на всем интервале регистрируемых длительностей, является сложной задачей, так как в зависимости от длительности отражения одни искажающие факторы становятся определяющими, а влиянием других можно пренебречь.

Здесь мы рассмотрим искажения функции распределения длительности за счет величины порога амплитудного дискриминатора (АД) и искажения вследствие «разрывов» отражений и подавления их. Оценка последних особенно важна, поскольку позволяет ответить на один из основных вопросов реализации алгоритмов автоматической обработки численности: возможно ли использование общих обнаружителей и схем запрета для покadroвых регистраторов и регистраторов численности.

Искажения за счет порога оказываются существенными только для отражений от ненасыщенных следов, искажения второго типа следует учитывать только для следов переходного типа и переуплотненных.

Рассмотрим влияние порога на форму закона распределения метеоров по длительности. Знание этого закона для ненасыщенных следов необходимо для решения ряда задач, например, учета селективности ветрового регистратора к малым скоростям дрейфа [7].

Регистрируемая длительность отражения связана с амплитудой A_m и порогом E_0 следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \tau_m &= \frac{1}{\alpha} \ln \frac{A_m}{E_0}; \\ \alpha &= \frac{16\pi^2 D}{\lambda^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где D — коэффициент амбиполярной диффузии;
 λ — длина волны передатчика.

Зная закон распределения амплитуд регистрируемых отражений $W_q(q)$, можно получить закон распределения случайной величины τ_m . Для комплекса отражений, регистрируемых на метеорном радиолокаторе в ХПИ [8],

$$W_q(q) = 0,76 (q + 1)^{-1,76}, \quad (2)$$

где $q = \frac{A_m}{U_{ш}}$ — отношение сигнал-шум;

$U_{ш}$ — эффективное напряжение шумов.

Тогда, считая $D = \text{const}$,

$$W_{\tau}(\tau_m) = 0,76\alpha V (Ve^{\alpha\tau_m} + 1)^{-1,76} e^{\alpha\tau_m}. \quad (3)$$

Здесь $V = \frac{E_0}{U_{ш}}$ — относительный порог.

Рассмотренные выше искажения оказываются несущественными для следов переходного типа и переуплотненных. Регистрируемая длительность этих отражений искажается наличием нижепороговых флуктуаций и подавлением помехой небольших интервалов между соседними отражениями. При этом искажается как общее число отражений, так и закон распределения их по длительности.

Рассмотрим характер и методику определения искажений для случая воздействия на регистратор сигнала и шума, распределенного по гауссовому закону. Рассмотрим наиболее простой случай, когда численность отражений невелика и последовательность появления отражений во времени в интервале дальности, равном разрешающей способности регистратора, может рассматриваться как пуассоновский поток событий и, следовательно, вероятностью подавления [8] можно пренебречь.

Пусть N_p — число метеорных эхо, зарегистрированных в некотором интервале длительности $\Delta\tau$ за время Δt , N — истинное число отражений в этом интервале за это же время. Тогда

$$N = N_p + N_1 - N_2, \quad (4)$$

где N_1 — число отражений, выпавших из интервала $\Delta\tau$ в результате разрывов, вызванных нижепороговыми флуктуациями с длительностью, большей T_{α} [8];

N_2 — число вторичных пакетов, полученных вследствие «разрывов» более длительных отражений и по своей продолжительности соответствующих интервалу $\Delta\tau$.

Задача заключается в том, чтобы оценить величины N_1 и N_2 .

Для комплекса отражений, регистрируемых метеорной РЛС высокой эффективной чувствительности [9], закон распределения длительности отражений от следов переходного типа и переуплотненных можно представить в виде

$$W(\tau) = 1,1\tau_0^{1,1}\tau^{-2,1}, \quad (5)$$

где τ_0 — минимальная регистрируемая длительность эха;

$(\tau - \tau_0)$ — регистрируемая длительность эха.

Одномерная функция плотностей вероятностей длительности флуктуаций t_{Φ} , как показано в работе [8], представляется в виде

$$W(t_{\Phi}) = 7,14 \left(\frac{t_{\Phi}}{0,12} \right)^{1,3} e^{-\frac{t_{\Phi}}{0,12}}. \quad (6)$$

Число флуктуаций j связано с τ и t_{Φ} следующим соотношением:

$$j + 1 = \frac{\tau}{t_{\Phi}}. \quad (7)$$

Можно показать, что закон распределения числа флуктуаций на отражении с длительностью τ имеет вид

$$W_i(j) = 7,14 \frac{\tau}{(j+1)^2} \left[\frac{\tau}{0,12(j+1)} \right]^{1,3} e^{-\frac{\tau}{0,12(j+1)}}. \quad (8)$$

График функции $W_j(j)$ для различных значений τ приведен на рис. 2.

Если i — число разрывов огибающей пакета отраженных импульсов, т. е. i — число флуктуаций с $t_{\phi} > T_a$,

$$P_i = \sum_{i=j}^{\infty} P_i p_i^i q_i^{i-1}, \tag{9}$$

где P_i — вероятность того, что отражение будет разорвано точно i раз;
 P_j — вероятность того, что огибающая пакета будет иметь j флуктуаций;

p_j — вероятность повторного запуска, $q_j = 1 - p_j$.

Пусть n — число флуктуаций огибающей пакета отраженных импульсов между двумя разрывами, т. е.

$$n = \frac{j}{i+1}. \tag{10}$$

Вероятность появления n флуктуаций между разрывами будет равна

$$P_n(n) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i [n(i+1) + 1] P_i(i). \tag{11}$$

И, наконец, добавка к истинной численности за счет разрывов огибающей пакета отражений с длительностью τ

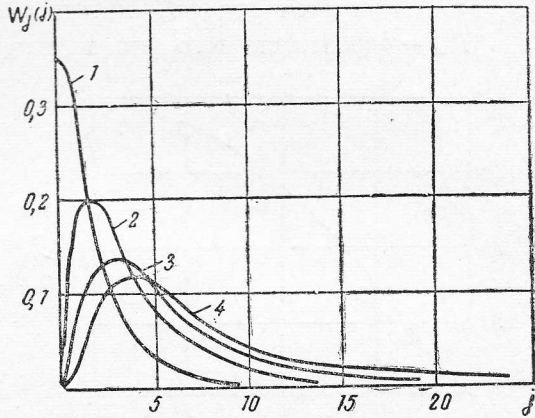


Рис. 2. Функция плотностей вероятностей числа флуктуаций для различных τ :
 1 — $\tau = 0,5$ сек; 2 — $\tau = 1$ сек; 3 — $\tau = 1,5$ сек;
 4 — $\tau = 2$ сек.

$$N_{2\tau} = NP(\tau) \sum_{k=1}^{\infty} P_{t_{\phi}}\left(\frac{\Delta\tau}{k}\right) P_{n_{\tau}}(k), \tag{12}$$

где $P(\tau)$ — вероятность появления отражения с длительностью τ ;
 $P_{t_{\phi}}(x)$ — вероятность появления флуктуации с длительностью x ;
 $P_{n_{\tau}}(k)$ — вероятность появления k флуктуаций между соседними разрывами для отражений с длительностью τ .

Если теперь взять сумму $N_{2\tau}$ для всех значений τ , получим добавку к численности за счет разрывов более длинных эхо.

N_2 можно представить как

$$N_2 = NP_{\Sigma} P''_{\Delta\tau}, \tag{13}$$

где NP_{Σ} — общее число вторичных пакетов, полученное от всех эхо;
 $P''_{\Delta\tau}$ — вероятность того, что данный вторичный пакет попадает в интервал $\Delta\tau$.

Найдем $N_{1\Delta\tau}$ — число отражений, выпавших из интервала $\Delta\tau$ вследствие разрывов огибающей пакета.

Вероятность выпадения одного отражения из $\Delta\tau$ равна

$$P'_{\Delta\tau} = 1 - \sum_{i=0}^{\infty} P_i q_i^i. \tag{14}$$

Зависимость $P'(\tau)$ показана на рис. 3. Из графика видно, что при выбранном значении p_f , соответствующем типичным установкам покадрового регистратора, отражения с длительностью, превышающей 5 сек, практически регистрироваться не будут. Для регистрации и этих отражений необходимо уменьшить p_f , а это достигается увеличением T_a [8], что при сохранении прежней вероятности подавления повлечет за собой уменьшение эффективной чувствительности регистратора.

$$N_{1\Delta\tau} = P'_{\Delta\tau} N_{\Delta\tau}, \quad (15)$$

где $N_{\Delta\tau}$ — истинное число отражений в интервале $\Delta\tau$;

$$N_{\Delta\tau} = NP_{\Delta\tau};$$

$P_{\Delta\tau}$ — вероятность того, что длительность эха лежит в интервале $\Delta\tau$.

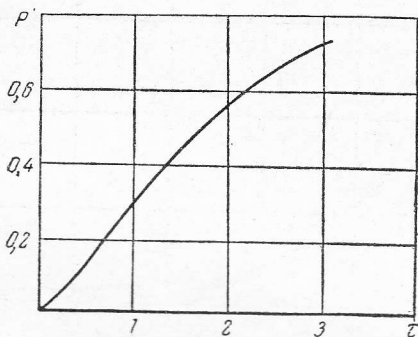


Рис. 3. Вероятность потери одного отражения из интервала длительности $\Delta\tau$ в функции τ .

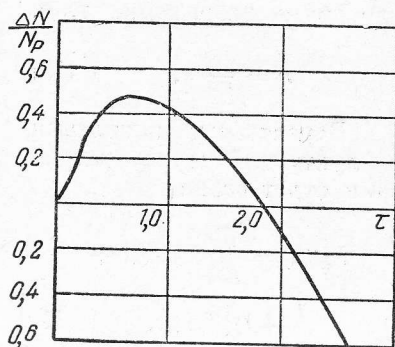


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности числа зарегистрированных метеоров от длительности для вероятности повторного запуска и вероятности подавления оптимальных для покадрового регистратора.

Итак, истинная численность радиоэха равна

$$N = \frac{N_p}{1 - P'_{\Delta\tau} P_{\Delta\tau} + P_{\Sigma} P_{\Delta\tau}}. \quad (16)$$

Рассчитанная по приведенной методике относительная погрешность численности для вероятности повторного запуска и вероятности подавления оптимальных, с точки зрения покадрового регистратора при условии достижения его предельной чувствительности, приведена на рис. 4. Из рисунка видно, что оптимальные параметры обнаружителей и схем запрета покадрового регистратора и САЧМО должны существенно отличаться.

В заключение необходимо отметить следующее. Оценки, полученные при сделанных выше предположениях, а также результаты работы [4] показывают, что на предельном пороге АД систематическая ошибка в функции измеряемого параметра (длительность, численность) может достигать десяти и более процентов. Если при сделанных предположениях (гауссов шум) эта ошибка может быть сравнительно легко учтена, наличие интенсивных помех различной природы существенно увеличивает как систематическую, так и случайную ошибку. Знание основных характеристик помехи и изменения их во времени необходимо для вычисления селективности регистратора в функции времени и последующего восстановления априорной функции распределения исследуемых параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. В. Костылев. Аппаратура астрономической обсерватории имени Энгельгардта для радиолокационных наблюдений метеоров с автоматической регистрацией. «Астрономический журнал», XXXV, вып. 3, 643, 1968.
2. А. А. Дьяков. Об одном аспекте проблемы автоматизации обработки данных радиолокационных исследований метеорных явлений. См. статью настоящего сборника.
3. С. Н. Юдин, И. А. Делов. Радиолокационный приемник с логарифмическим УПЧ для радионаблюдений метеорных следов. Вестник ХПИ № 36(84) «Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
4. Л. А. Бровченко, Ю. И. Волощук, М. Я. Фенстер. Анализ цифрового обнаружителя метеорной РЛС. Вычислительная математика и вычислительная техника. АН УССР, ФТИНТ, Харьков, 1969.
5. Ю. И. Волощук, В. А. Нечитайленко. Регистраторы метеорных станций высокой эффективной чувствительности. Вестник ХПИ, № 22(70) «Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
6. В. А. Нечитайленко. Оптимальные параметры и селективность дискретных регистраторов метеорных РЛС. См. статью настоящего сборника.
7. Г. М. Тептин. Методические вопросы определения скорости ветра методом радиолокации метеоров. Сб. «Метеорное распространение радиоволн», вып. V—VI. Изд-во Казанского ун-та, Казань, 1969.
8. Ю. И. Волощук, В. А. Нечитайленко. Методика определения оптимальных параметров АФС метеорных регистраторов. Вестник ХПИ № 36(84) «Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
9. Б. Г. Бондарь, Б. С. Дудник, А. А. Ткачук. Передающее и антенное устройства метеорной станции высокой эффективной чувствительности. Вестник ХПИ, № 22(70) «Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.