

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕГИСТРАТОРЫ МЕТЕОРНЫХ РЛС

В. А. Нечитайленко

Радиометод стал одним из основных, а при статистических исследованиях решающим методом изучения метеорных явлений. Развитие метеорной радиоэлектроники [1] позволило не только получить исключительно большой статистический материал, но и породило свою специфическую проблематику как в исследовании метеоров, так и в конструировании соответствующей радиоэлектронной аппаратуры.

Одной из важнейших задач метеорной радиоэлектроники является создание эффективных регистраторов метеорных РЛС с высокой помехоустойчивостью, оперативностью и разрешающей способностью, автомати-

зация наблюдений и обработки результатов, повышение индивидуальной и статистической точности результатов наблюдений.

Метеорный регистратор (МР) — это устройство, выполняющее функцию предварительной обработки информации, получаемой радиометодом [2], т. е. выделение полезных сигналов из смеси сигнала и помехи по некоторому критерию, формирование сигнала запуска фиксирующих устройств или устройств последующей обработки информации, различные и разрешение одновременно существующих сигналов от разных объектов. По существу эти задачи являются частными задачами теории помехоустойчивости.

Критерии оптимальности

С точки зрения теории статистических решений при радиолокации метеоров приходится решать либо задачу обнаружения сложного сигнала, либо задачу выделения (восстановления) сигнала из измеренных параметров этого сигнала. Известно, что потери информации при приеме сигналов зависят от априорного распределения сигналов и правила принятия решения. Введенный Мидлтоном на основе математической теории риска Вальда критерий минимального среднего убытка — критерий Байеса [3] — является наиболее общим критерием оптимальности. Нахождение правила Байеса равносильно отысканию структуры оптимального приемника.

Поскольку источником интересующей нас информации является след, в наиболее общем случае в качестве такого приемника следует рассматривать весь канал прохождения сигнала от передатчика до выходных устройств вторичной обработки. При этом оптимальный регистратор — это регистратор метеорной РЛС, оптимальной в смысле критерия Байеса. При попытке решить эту задачу в столь общем виде мы неизбежно сталкиваемся с двумя трудностями.

Первая трудность заключается в следующем. Аппаратура для исследования метеоров, особенно слабее $+7^m$, является довольно сложной и дорогостоящей. Поэтому практически все существующие в настоящее время метеорные РЛС являются универсальными или многофункциональными. Если для специализированных РЛС в принципе возможно отыскание оптимальной структуры и параметров, то решение этой задачи для многофункциональной РЛС неизбежно требует введения функций убытков, определенных относительно качественно различных параметров сигнала, в чем не может не присутствовать элемент субъективизма.

Вторая трудность заключается в том, что даже задача отыскания алгоритма построения простейшей специализированной метеорной РЛС весьма сложна в формальном отношении, особенно если учесть то обстоятельство, что в большинстве практически важных случаев мы не можем определить с достаточной достоверностью модель помехи. Целесообразным является подход к решению задачи аналогичный изложенному в работах [4, 5]. Считая некоторые из основных параметров метеорных РЛС заданными, определяются оптимальные параметры метеорного регистратора.

В общем случае метеорный регистратор представляет многопороговое решающее устройство. Критерием оптимальности при сравнительном анализе обнаружителей является критерий однопорогового обнаружения Неймана — Пирсона. При сравнительном анализе помехоустойчивости схем запрета более приемлемым оказывается критерий Котельникова.

К настоящему времени основные задачи определения оптимальных структур и параметров МР решены, особенно после разработки и создания ряда метеорных РЛС в Харьковском политехническом институте. Ра-

боты [6, 8, 9, 10, 12, 14] содержат результаты разработок и эксплуатации большого числа специальных схем и узлов МР, позволяющих решать все основные задачи построения конкретной логической сети регистратора на основании заданных требований.

Эти требования сводятся к достижению максимума помехоустойчивости при минимуме потерь информации. Для получения соответствующих качественных показателей МР его структура должна удовлетворять требованиям, непосредственно вытекающим из анализа помехоустойчивости, оперативности и разрешающей способности. Это определенный тип обнаружителя, число входов и выходов регистратора, тип схемы запрета и количество элементов памяти схемы запрета и др. [14]. Здесь мы остановимся на нескольких задачах, не нашедших освещения в специальной литературе. Это анализ помехоустойчивости и оперативности дискретных обнаружителей и помехоустойчивости комбинированной схемы запрета продолжительных радиоэхо.

Помехоустойчивость дискретных обнаружителей

При анализе помехоустойчивости дискретных обнаружителей будем рассматривать процессы, протекающие в дискретном времени. Значения вероятности ложных выбросов и правильного обнаружения после прохождения смеси сигнала и шума амплитудного дискриминатора и квантизатора (АД и КВ), вычисленные для интервала $T_{кв}$, соотносятся с соответствующими моментами времени t_i , совокупность которых и образует множество, на котором определен дискретный процесс. При этом не учитывается неопределенность в смещении представленной в дискретном времени реализации от истинной, поскольку она должна быть учтена только при определении дальности по квантованным параметрам. При сравнительном анализе помехоустойчивости различных обнаружителей предполагаются известными вероятность появления ложных выбросов в некоторый момент t_i (p_N) и вероятность появления выброса при условии, что сигнал присутствует на входе АД в соответствующем интервале $T_{кв}$ (p_S). В качестве основных схем задержки рассматриваемые дискретные обнаружители используются сдвиговые и комбинационные регистры [10]. Проводя аналогию между линиями задержки и инерционными схемами задержки на одновибраторах, назовем схемы первого типа безынерционными регистрами (БИР), а схемы второго типа — инерционными (ИР).

Известно, что квазиоптимальная обработка пакета квантованных сигналов [15] не может в принципе обеспечить качественно лучшие характеристики, чем оптимальная обработка непрерывных сигналов. Однако при практической реализации алгоритмов обработки можно констатировать ряд существенных преимуществ обработки квантованных сигналов. Отсутствие явления насыщения, свойственного аналоговым устройствам, потерь информации за счет паразитных параметров приводит к тому, что во многих практически важных случаях потери при квантовании оказываются одинаковыми или даже меньшими, чем указанные выше потери в аналоговых устройствах.

Решение задачи квазиоптимального обнаружения пакета квантованных сигналов сводится к вычислению отношения правдоподобия и выбору оптимального второго порога. Алгоритм квазиоптимального об-

наружения пакета квантованных сигналов, определенного на N_0 позициях [16], имеет вид

$$\sum_{j=1}^{N_0} x_j \eta_j \geq 1,5 \sqrt{N_0}, \quad (1)$$

где x_j — значение, принимаемое процессом на j -й позиции;
 η_j — весовая функция.

Пакеты отраженных импульсов, наблюдаемые при радиолокации метеоров, имеют обычно большую длительность, т. е. состоят из десятков и сотен импульсов. Поэтому построение схемы, реализующей алгоритм квазиоптимального обнаружения, усложняется тем, что порог оказывается неопределенным. Однако позиции пакета, на которых обеспечивается выполнение условия L из N_0 , весьма неравноценны. Для многих видов радиолокационных исследований метеоров ценность регистрации сигналов резко падает, если номер позиции, на которой произошло событие L из N_0 , оказывается больше, чем некоторое число m , определяющее положение первого максимума дифракционной картины. При частоте повторения $F_{\text{п}} = 500$ гц для основной массы регистраций, пригодных для вычисления скорости метеоров, $m \cong 7$ и (1) принимает вид

$$\sum_{j=1}^7 x_j \eta_j \geq 4.$$

Легко заметить, что обнаружители n/m (n из m) в схемном отношении оказываются более громоздкими, чем обнаружители $n/n/m$ (n смежных из m). На практике обычно используют схемы обнаружителей $n/n/m$. Среди многих МР, описанных в литературе, нет ни одного, который реализовал бы алгоритм квазиоптимального обнаружения пакета импульсов. Поэтому интересно сравнить помехоустойчивость квазиоптимального обнаружителя n/m с помехоустойчивостью обнаружителей $n/n/m$ на инерционных и безынерционных регистрах ($n/n/m$ -ИР и $n/n/m$ -БИР).

Расчетные соотношения для вычисления вероятностей ложного обнаружения могут быть получены с помощью асимптотической формулы

$$P = P A_{\text{мм}}, \quad (2)$$

где $P = [P_0, P_1, \dots, P_M]$ — вектор-строка предельных вероятностей состояний обнаружителя;

$A_{\text{мм}}$ — матрица вероятностей переходов.

Не приводя полных выражений, которые могут быть получены аналогичным образом, отметим, что при $p_N \rightarrow 0$ вероятность ложного обнаружения для n/m стремится к величине $C_{m-1}^{n-1} p_N^n$, а $n/n/m$ -БИР и $n/n/m$ -ИР — к величине p_N^n . Зависимости $P_{\text{л}}$ о (p_N) для обнаружителей 4/7, 4/4/7-БИР и 4/4/7-ИР приведены на рис. 1, а.

Последовательность дискретных состояний обнаружителя при воздействии на него пакетов импульсов ограниченной длительности образует неоднородную цепь Маркова, поэтому вероятность правильного обнаружения не может быть определена с помощью формулы (2). Вероятность правильного обнаружения может быть определена последовательным вычислением за m шагов по рекуррентным соотношениям (20),

(21), (22) [14]. На рис. 1, б представлены зависимости $P_{п.о} = f(p_s/p_{л.о})$ для рассматриваемых обнаружителей.

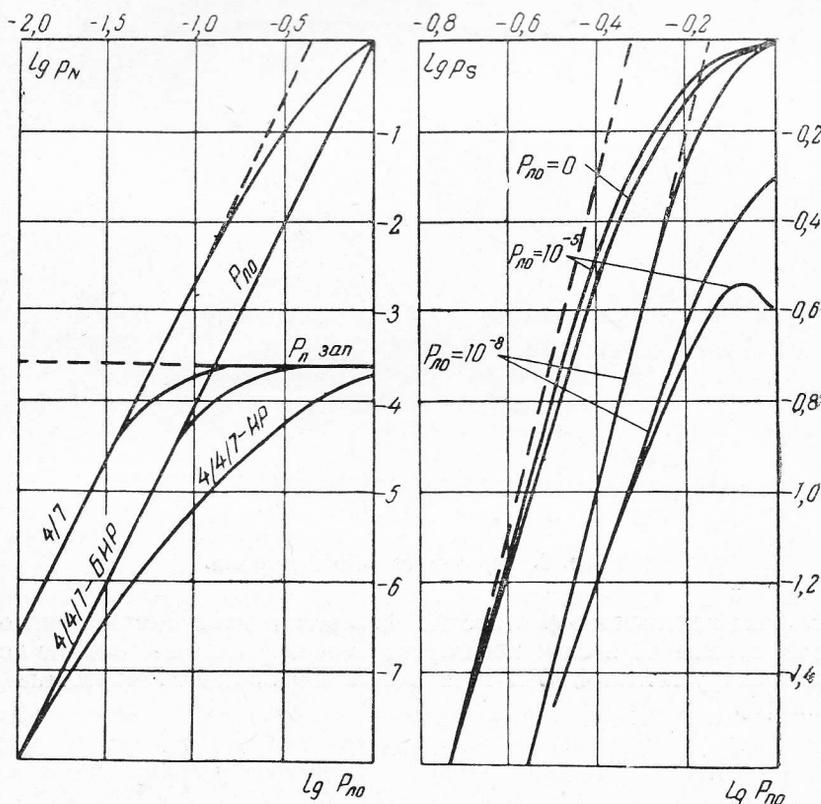


Рис. 1. Вероятности ложного (а) и правильного (б) обнаружения дискретными регистраторами.

Анализ характеристик обнаружения $P_{п.о}(P_{л.о})$ (рис. 2) показывает, что квазиоптимальный обнаружитель обеспечивает наибольшую вероятность правильного обнаружения при фиксированном значении $P_{л.о}$. Обнаружитель $n/n/m$ -БИР имеет помехоустойчивость, отличающуюся от помехоустойчивости обнаружителя n/m на единицы децибелл; число же элементов, необходимых для его реализации в $\frac{m-1}{1,5\sqrt{m-1}}$ раз меньше.

Можно также показать, что при работе на уровнях амплитудной дискриминации $E_{пор}/\sigma_{ш} \geq 3 \div 5$ и наличии в тракте обработки сигнала широтного дискриминатора помехоустойчивость обнаружителя $n/n/m$ -ИР практически не ниже, чем $n/n/m$ -БИР. По-видимому, целесообразно в регистраторах метеорных РЛС средней эффективной чувствительности типа «Наташа» [12] и «Тропик» [11] применять дискретные обнаружители типа 4/4/7-ИР. Это утверждение подкрепляется также тем обстоятельством, что схема однорегистрового инерционного обнаружителя [14] логически эквивалентна схеме многорегистрового инерционного обнаружителя при отмеченных выше отношениях сигнал — шум. При выборе

же обнаружителя для высокочувствительных РЛС типа метеорной автоматической радиолокационной станции ХПИ (МАРС) необходимо иметь в виду то обстоятельство, что входной поток информации является

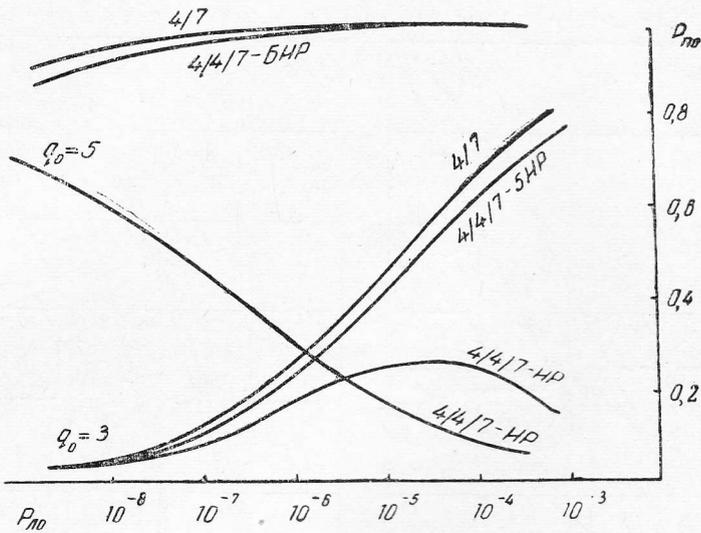


Рис. 2. Характеристики обнаружения.

весьма интенсивным и вероятностью одновременного существования одного и более отражений нельзя пренебречь. В этом случае необходимо использовать обнаружители 4/4/7-БИР и схемы параллельной обработки отражений [6].

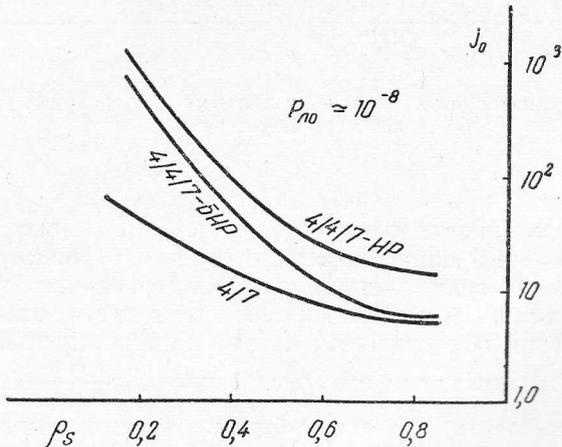


Рис. 3. Оперативность дискретных регистраторов.

Результаты расчетов показывают, что оперативность, определенная математическим ожиданием времени обнаружения при заданной величине ρ_s и в предположении, что обнаружение по соответствующему правилу на m позициях принимаемого пакета имеет место, у обнаружителей $n/n/m$ выше, чем у n/m при меньшей вероятности правильного обнаружения.

Для некоторых видов исследований (например, измерения дрейфа) регистрации, полученные при условии $n > m$, оказываются пригодными для последующей обработки. В этом случае оперативность может быть охарактеризована номером позиции пакета (j_0), до которой формируется запуск с заданной вероятностью. На рис. 3 представлены зависимости $j_0(p_s/P_{л.о})$ для рассмотренных выше обнаружителей.

Комбинированная схема запрета

В работах [9, 18] изложена методика определения оптимальных параметров антифединговых схем (АФС) одновходовой схемы запрета (ОСЗ). При наличии нескольких запускающих пунктов [6] защита от продолжительных радиоэхо достигается включением в состав регистратора соответствующего числа ОСЗ. Во всех существующих радиолокационных комплексах выполняется условие

$$\Delta D \ll D_{\max},$$

где ΔD — взаимный сдвиг по дальности сигналов, отраженных одним следом и принятых в разных пунктах;

D_{\max} — интервал дальностей, соответствующий периоду повторения.

Это обстоятельство позволяет создать значительно более простую схему запрета для многовходовых регистраторов, имеющую к тому же более высокую помехоустойчивость. Основой многовходовой комбинированной схемы запрета (КСЗ) является обычная ОСЗ. При этом запись сигналов в БИРЗ осуществляется через специальный коммутатор, обеспечивающий запрет сигналов из выносных запускающих пунктов в интервале дальностей ΔD . Коммутатор является несимметричным, так как в случае, если отраженный сигнал появляется вначале на выходе выносного пункта (ВП), ближайший сигнал на выходе ОП появится только через период, но правильно построенная схема запрета к этому времени, т. е. через период, должна вырабатывать последовательность запретных импульсов, соответствующую входным сигналам.

В случае двухвходовой КСЗ, представляющей наибольший практический интерес, мы имеем дело с суммой двух периодических последовательностей импульсов и помехой, представляющей пуассоновский поток с удвоенным математическим ожиданием.

В этом случае для определения $T_{\alpha \min}$ [9] необходимо знать трехмерную функцию плотностей вероятностей

$$W_3(\tau_{\phi 1}, \tau_{\phi 2}, T), \quad (3)$$

где $\tau_{\phi 1}$ — длительность флуктуации сигнала, принятого первым пунктом;

$\tau_{\phi 2}$ — то же для второго пункта;

T — величина взаимного смещения флуктуаций.

Как теоретическое, так и практическое определение функции (3) сопряжено с большими трудностями. Удовлетворительные результаты при оценке $T_{\alpha \min}$ для КСЗ могут быть получены в предположении, что случайная величина τ_m , соответствующая времени перекрытия $\tau_{\phi 1}$ и $\tau_{\phi 2}$, описывается тем же законом, что и $\tau_{\phi 1}$ [9]. При этом математиче-

ское ожидание величины $\tau_{m\text{cp}}$ выражается соотношением, полученным при некоторых упрощающих предположениях [14]:

$$\tau_{m\text{cp}} = E_i \left(-\frac{A^2}{2\tau_{\Phi\text{cp}}^2} \right) + \left[1 - \Phi \left(\frac{A}{\tau_{\Phi\text{cp}}} \right) \right] \left(3,5\tau_{\Phi\text{cp}} - 1,5\frac{A^2}{\tau_{\Phi\text{cp}}} \right) + \\ + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-\frac{A^2}{\tau_{\Phi\text{cp}}^2} \right) - \frac{A}{2\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{A^2}{2\tau_{\Phi\text{cp}}^2} \right),$$

где E_i — интегральная показательная функция;

$\Phi(x)$ — интеграл вероятностей.

Теоретические и экспериментальные оценки, полученные для комплекса МАРС, показали, что $\tau_{m\text{cp}}$ меньше $\tau_{\Phi\text{cp}}$ примерно в полтора — два раза.

Величина T_c определяется так же, как и для ОСЗ, но при этом средняя частота ложных запусков увеличивается в два раза. Вероятность подавления определяется вероятностью того, что средняя частота в интервале T_c превышает $kF_{\text{л}}$. При этом, поскольку дисперсия распределения Бернулли растет пропорционально частоте, при постоянном p_N при $k > 1$ КСЗ обеспечивает меньшую вероятность подавления при прочих равных условиях.

Можно показать, что вероятность подавления у КСЗ меньше, чем у ОСЗ в ν раз. Асимптотическое приближение для ν может быть получено в виде

$$\nu = \frac{1 - \Phi \left[(k-1) \sqrt{F_{\text{л}}} \right]}{1 - \Phi \left[(k-1) \sqrt{2F_{\text{л}}} \right]}.$$

Таким образом, КСЗ, будучи существенно более простой в функциональном отношении, имеет более высокую помехоустойчивость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Филалко. Метеорная радиоэлектроника. «Изв. вузов, Радиоэлектроника», т. XII, № 5, 1969.
2. А. А. Дьяков. Об одном аспекте проблемы автоматизации обработки данных радиолокационных исследований метеорных явлений. См. статью настоящего сборника.
3. Прием сигналов при наличии шума. Сб. статей под ред. Л. С. Гуткина (пер. с англ.). Изд-во иностр. лит., 1960.
4. В. И. Сифоров. «Радиотехника», 1946, № 1.
5. А. П. Белоусов. «Радиотехника», 1947, № 6.
6. Ю. И. Волощук, В. А. Нечитайленко. Регистратор метеорной станции высокой эффективной чувствительности. Вестник ХПИ № 22 (70), вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
7. Б. Г. Бондарь, Б. С. Дудник, А. А. Ткачук. Передающее и антенное устройство метеорной станции высокой эффективной чувствительности. Вестник ХПИ № 22 (70), вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
8. В. В. Лизогуб, В. А. Нечитайленко. Амплитудный дискриминатор со следящим порогом. Вестник ХПИ № 36 (84), вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
9. Ю. И. Волощук, В. А. Нечитайленко. Методика определения оптимальных параметров АФС метеорных регистраторов. Вестник ХПИ № 36 (84), вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.

10. В. Р. Литвинов, В. А. Нечитайленко. Об одном способе временной задержки дискретных сигналов. Труды ФТИНТ АН УССР, серия «Вычислительная математика и вычислительная техника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
11. P. V. Babadjanyov, V. V. Salchenko, V. L. Kashchev, V. A. Neshchitailenko. Circulation of atmosphere in the lower thermosphere of the equatorial region. 1 AGA Bulletin № 26, vol 2, Paris, 1969.
12. В. А. Нечитайленко. Система защиты от помех метеорной станции. «Кометы и метеоры». № 18. Изд. АФИ, 1970.
13. Б. Л. Кашеев, И. А. Делов, Б. С. Дудник, А. А. Ткачук. Радиолокационный комплекс для исследования слабых метеоров. См. статью настоящего сборника.
14. В. А. Нечитайленко. Вопросы теории оптимальных метеорных регистраторов. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1970.
15. С. З. Кузьмин. Цифровая обработка радиолокационной информации. Изд-во «Советское радио», 1967.
16. M. A. Schwartz. Coincidence procedure for signal detection. IRE Trans. on Inform. Theory. IT-2, № 4, 1956.
17. Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин. Метеорные явления в атмосфере Земли. Изд-во «Наука», 1967.
18. Л. А. Бровченко, Ю. И. Волощук, М. Я. Фенстер. Анализ цифрового обнаружителя метеорной РЛС. Труды ФТИНТа АН УССР, серия «Вычислительная математика и вычислительная техника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.