

ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОМЕТЕОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ. IV. О ПРИЗНАКАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИ КЛАССИФИКАЦИИ ОТРАЖЕНИЙ В АВТОМАТЕ

А. А. Дьяков

Харьков

Полная автоматизация обработки позволяет оптимизировать ее при самых широких предположениях [1]. В данной статье рассматриваются некоторые вопросы, связанные с автоматической обработкой информации о скорости и координатах радианта, заключающейся в отраженном сигнале при радиолокации метеоров. Среди всех современных методов определения координат радианта индивидуального метеора радиосредствами, исключая пеленгационно-временной метод [2], общим является определение экстремальных точек огибающей амплитудно-временной характеристики (АВХ), регистрируемой радиолокатором. Значения аргумента для этих точек используются по известному методу [3] для расчета скорости метеорного тела и временных сдвигов (при разнесенном приеме), которые в дальнейшем используются для определения координат радианта и элементов орбиты. Будем считать это положение заданным, и тогда результатами первичной обработки на выходе автомата должны быть значения аргумента экстремальных точек АВХ.

IV—1. При радиолокации метеоров форма АВХ зависит от многих случайных причин: значения линейной электронной плотности в следе, положения отражающей точки на нем, координат радианта (при фиксированной геометрии приемных пунктов), значения коэффициента диффузии, атмосферных искажающих факторов (ветер, турбулентность), явлений резонанса в следе и т. д. Поэтому представленную задачу можно рассматривать как последовательно решаемые задачи: определение пригодности отраженного сигнала к дальнейшей обработке (распознавание) и оценка параметров этого сигнала. Поскольку задачу оценки параметров сигнала также можно рассматривать как задачу распознавания, целесообразно определить общий подход к разработке алгоритмов первичной обработки с позиций теории распознавания образов — по результатам ограниченного числа измерений параметров предъявленного объекта (реализации) необходимо принять оптимальное

решение о принадлежности его к тому или иному классу из общей совокупности объектов. По методам решения теория распознавания образов может рассматриваться как развитие направления теории оптимального приема, нашедшего широкое отражение в работах Миддлтона [4, 5] и характерного тем, что для отыскания структуры и параметров оптимального приемника используются методы теории статистических решений.

Задача распознавания состоит из двух этапов — обучение (или самообучение) и собственно распознавание. Обучение представляет собой нахождение значений решающей функции $d = f(V)$ для точек обучающей выборки и экстраполяцию этих значений на произвольные точки пространства реализаций $\{V\}$. Причем экстраполяция без произвола возможна только при определенных предположениях о свойствах решающей функции. В задачах распознавания решающие функции обычно принимают дискретные значения, постоянные в пределах каждого из различаемых подмножеств сигналов. В тех случаях, когда имеется возможность предположить, что мерность пространства реализаций невелика, решающие функции могут быть успешно аппроксимированы покрытием различаемых подмножеств гиперсферами или полупространствами. Области сложной конфигурации строятся при помощи линейного разделения пространства реализаций совокупностью гиперплоскостей вида

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i - a_{n+1} = 0,$$

отличающихся коэффициентами a .

IV—2. Обычно объем исходных измерений, характеризующий распознаваемый сигнал, весьма значителен, и возникает необходимость заменить их какими-то обобщающими характеристиками или признаками, имеющими меньший объем, но достаточно полно описывающими объект распознавания. Задача отыскания экономических и информативных признаков не имеет определенной постановки [6], поскольку не существует формальных правил, позволяющих до обучения назвать такую совокупность признаков. Поэтому предварительный выбор признаков, который рассматривается как первый этап обучения, производится по интуитивным соображениям исходя из априорного анализа реализаций.

Необходимо отметить, что некоторые рекомендации по выбору признаков существуют. Так, выбранные признаки должны характеризоваться инвариантностью к возможным преобразованиям реализаций простотой устройства измерения их значений, лучшей устойчивостью к мешающим воздействиям и т. д.

В результате анализа фоторегистраций, полученных на аппаратуре Харьковского института радиоэлектроники [7], множество входных сигналов было разбито на пять подмножеств, объединенных по характеру изменения АВХ. Типичные сигналы из этих подмножеств схематично изображены на рис. 1. Первый тип

сигналов представляет отражения от ненасыщенных следов и следов промежуточного типа с четко выраженной дифракцией и экспоненциальным спадом амплитуды. Вероятность появления таких сигналов по одному приемному каналу составляет примерно $p_I = 0,33$. Объединение сигналов от ненасыщенных и промежуточных следов вызвано следующим. Во-первых, теоретические исследования, проведенные В. Н. Лебединцом и А. К. Сосновой [12],

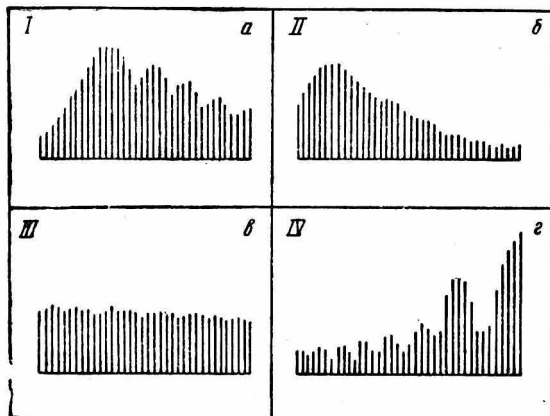


Рис. 1. Типичные формы отраженных сигналов и вероятности их появления.

показали, что дифракционные кривые для следов промежуточного типа почти не отличаются от соответствующих ненасыщенным следам. Поэтому разделение этих двух типов при классификации отражений ненадежно даже в случае применения довольно сложных признаков [16, 17]. Во-вторых, результаты исследований [12] указывают на справедливость применения дифракционного метода для расчета скорости и координат радианта к отражениям от следов промежуточного типа при условии исключения из обработки главного максимума АВХ. Следовательно, в поставленной задаче разделять эти сигналы нет необходимости.

Отражения второго типа также происходят от названных выше следов, но характеризуются «замасанной» дифракцией ($p_{II} = 0,34$). Третий тип представляет отраженные сигналы с почти постоянной амплитудой, модулированной шумовыми флуктуациями ($p_{III} = 0,14$). Отражения четвертого типа происходят от «вспышечных» и насыщенных следов, дающих дифракцию на подлете или возрастающие дифракционные максимумы после формирования основной (первой) зоны Френеля ($p_{IV} = 0,09$). Пятый тип представляет все сигналы аномальной (относительно первого типа) формы от следов, искаженных ветром, дроблением, резонансом и т. д. ($p_V = 0,10$).

Анализировались отражения, зарегистрированные в августе 1970 года, общим числом более 11 тысяч. Согласно [8], это означает, что выборочные параметры отражают параметры генеральной совокупности с допустимой ошибкой $\varepsilon \leq 0,01$ и мерой риска $P = 0,99$. Здесь же следует заметить, что классификация отраженных сигналов, приведенная в [18], явно избыточна. Авторы полагают, что входной сигнал состоящим из трех частей: переднего фронта, средней части и спада, и по каждой из этих частей определили девять различных типов формы отраженных сигналов. Если учесть, что разбиение составлено на основании анализа менее тысячи отражений, то понятна также статистическая необеспеченность такой классификации.

IV—3. На основании упомянутых выше рекомендаций приступим к предварительному выбору и обсуждению признаков, по которым можно было бы разделить входные реализации на установленные классы. Причем конечным результатом такой классификации должно быть, очевидно, определение отражений первого типа. В качестве признака, по которому можно безошибочно распознавать отражения четвертого типа, примем убывание амплитуды максимумов, начиная с главного максимума АВХ (скорость убывания произвольная). В качестве последнего всегда принимаем максимум с наибольшей амплитудой из числа зарегистрированных. Чтобы вынести решение о том, действительно ли найденные экстремальные точки соответствуют дифрагирующему метеорному отражению, необходимо выбрать признак, отражающий некоторым образом законы дифракции в принятом сигнале и инвариантный к преобразованиям его в координатах амплитуда — время. Таким признаком может служить отношение длин двух различных зон Френеля, измеренных в единицах времени (n или t). Как можно видеть из [3], такое отношение, рассчитанное для любой пары из найденных зон Френеля, не зависит от амплитуды отраженного сигнала, а также от масштаба АВХ по оси времени, определяемого случайными параметрами, скоростью метеора V и дальностью до отражающей точки R . Неоднозначность отсчета устраняется выбором главного максимума. Наличие диффузии, шумовых искажений и дискретности представления расширяет область существования выбранного признака, определяет его случайную природу.

Для выяснения влияния диффузионных искажений АВХ на разброс значений выбранного признака воспользуемся данными, приведенными в табл. 1 работы М. Шимека [10]. В таблицу сведены значения приведенного аргумента x экстремальных точек АВХ, рассчитанные для различных значений обобщенного параметра Δ численными методами. Анализ приведенных данных показывает, что значения выбранного признака существенно зависят от величины Δ . Это должно привести к увеличению расстояния между реализациями внутри одного класса, и, следовательно, распознавание по такому признаку будет малоэффективным.

Сказанное подтверждается гистограммой распределения значений выбранного признака для отношения двух первых зон, построенной на основании априорных данных по фоторегистрациям и приведенной на рис. 2.

Влияние диффузии на эффективность распознавания можно уменьшить, если преобразовать выбранный признак следующим образом. Известно, что приращение аргумента между двумя любыми точками АВХ в единицах времени определяется, согласно [3], как

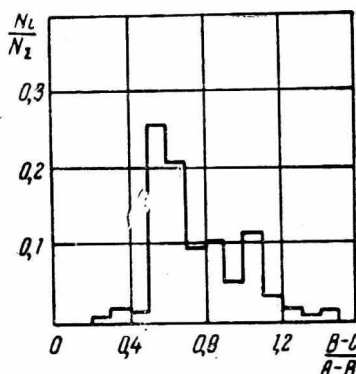


Рис. 2. Распределение значений величины $\frac{B-C}{A-B}$.

$$\Delta t_{ij} = \frac{\Delta x_{ij} \sqrt{R\lambda}}{2V}, \quad (1)$$

где $i > j$; $\Delta t_{ij} = t_i - t_j$; $\Delta x_{ij} = x_i - x_j$; λ — длина волны передатчика. Поскольку однозначность между точками i и j довольно просто устанавливается по экстремумам АВХ, то в (1) используются экстремальные точки.

Имея величины Δt_{ij}^* , полученные из опыта для некоторой V^* и $R_{изм}$, разделим их на нормированные значения соответствующих им величин Δt_{ij}^n , рассчитанные для определенного V^n (нормировочное значение скорости) и того же $R_{изм}$.

Отношение этих величин (обозначим его δ) при подстановке их значений из (1) запишется следующим образом:

$$\frac{\Delta t_{ij}^*}{\Delta t_{ij}^n} = \delta = \frac{\Delta x_{ij}^* V^n}{\Delta x_{ij}^n V^*}, \quad (2)$$

где Δx_{ij}^* — определяются по теоретической АВХ, построенной для неизвестной нам величины Δ^* ;

Δx_{ij}^n — по АВХ, построенной для выбранного нами значения Δ^n .

Из (2) видно, что величина δ остается постоянной для любых i, j из данной выборки в пределах ошибок в размерах зон, определяемых диффузией. Закон распределения этих ошибок можно свести к симметричному относительно нуля, если в качестве величины Δ^n выбрать медиану ее распределения для конкретной аппаратуры. На рис. 3, а представлена гистограмма значений относительной ошибки в определении величины δ по первой зоне, полученная путем моделирования на ЦВМ. Сравнивая распределения на рис. 2 и рис. 3, а, можно сказать, что дисперсия преобразованного признака существенно уменьшилась, однако значение ее еще велико. Поскольку причинами увеличения рас-

сеивания являются флуктуационный шум и дискретность представления, необходимо провести преобразование пространства входных реализаций, заключающееся в фильтрации входных сигналов и интерполяции значений аргумента для экстремальных точек АВХ. Конкретные решения по такому преобразованию будут рассмотрены далее.

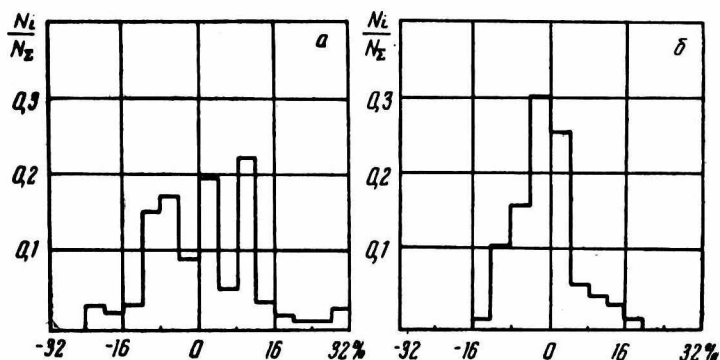


Рис. 3. Распределение относительной ошибки в определении величины δ по первой зоне:

a — в исходном пространстве реализаций; *b* — в преобразованном пространстве реализаций.

Для разделения в пространстве реализаций подмножеств A_I (тип I) и A_{II} (тип II) необходимо ввести признак, характеризующий глубину дифракционных флуктуаций амплитуды. В качестве такого признака введем величину

$$E = \frac{1}{1-m} \sum_{i=1}^{m-1} |y_i - y_{i+1}|,$$

где m — число зарегистрированных экстремумов; y_i — амплитуда i -го экстремума. Эта величина является достаточно объективной характеристикой размаха флуктуаций по всей АВХ. На рис. 4 приведены распределения величины E для A_I и A_{II} , полученные путем моделирования. Для надежной оценки таких параметров сигнала как квазипериод огибающей и временные сдвиги необходимо иметь достаточное количество исходных данных. Такими данными в рассматриваемом случае являются экстремумы АВХ. Поэтому число зарегистрированных экстремумов также может быть выбрано в качестве признака, по которому проводится распознавание предъявленных реализаций. Численное значение этого признака определяется из условий вторичной обработки.

Обозначим выбранные признаки номерами 1, 2, 3 и 4 соответственно порядку их выбора и рассмотрим их природу. Признаки

1 и 4 — детерминированы. Случайность признака 2 обусловлена, как было указано раньше, ошибками измерений и диффузионными искажениями АВХ. Признак 3 имеет полностью случайную природу, определяемую в основном положением зеркальной точки на следе и диффузионным спадом амплитуды.

IV—4. Для оптимальной линейной фильтрации пакета равноотстоящих импульсов с переменной амплитудой необходимо знать закон амплитудной модуляции на каждой позиции пакета [11]. В рассматриваемом случае этот закон, являющийся функцией нескольких параметров, неизвестен для принимаемого сигнала

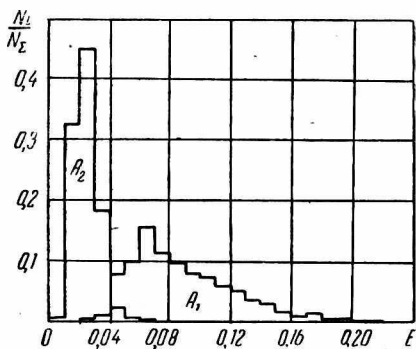


Рис. 4. Распределение величины E для классов A_1 и A_{11} .

и, следовательно, построить оптимальный фильтр как систему со стационарными параметрами, принципиально невозможно. Построение же адаптивной системы связано с предварительной оценкой закона модуляции, которая без улучшения описаний может быть настолько неточна, что фильтр, построенный по такой оценке, окажется способным не улучшать, а ухудшать воспроизведение сигнала. Условие адаптации системы, кроме того, ведет к значительному увеличению времени фильтрации в дискретном автомате.

Исследования ряда авторов [13, 14, 15] показали, что применение линейной фильтрации в сочетании с принципом скользящего сглаживания позволяет за счет выбора соответствующего интервала представлять сигнал полиномом невысокой степени и применять простейшие сглаживающие фильтры. Вопросы синтеза оптимальных линейных фильтров с конечной памятью, предназначенных для выделения и линейного преобразования полиномиальных (степени r) на конечном интервале входных сигналов $U(t)$, получили свое развитие в работах [13, 14, 15]. При этом полагают, что сигнал представлен равноотстоящими дискретами со случайной независимой ошибкой, подчиняющейся нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и известной корреляционной матрицей. Входным сигналом таких фильтров в установившемся режиме являются результаты $(N + 1)$ -измерения входного сигнала $U(t)$, получаемые в моменты времени $n, n - 1, n - 2, \dots, n - N$ и характеризуемые вектор-столбцом $V_n = v_n, v_{n-1}, \dots, v_{n-N}$. Каждая компонента последнего является аддитивной смесью значений полезного сигнала $U(t)$ в точке $n - i$ и помехи $S(n - i)$, где

$$i = 0, 1, 2, \dots, N.$$

Выходным сигналом этих фильтров является оптимальная по заданному критерию оценка линейной функции

$$h[n] = a_0 \vartheta_0 + a_1 \vartheta_1 + \dots + a_r \vartheta_r = a^T \vartheta.$$

Здесь a — $[r + 1]$ -мерный вектор-столбец, элементы которого определяются видом преобразования входного сигнала и выбранной величиной временного сдвига выходного сигнала относительно входного — λ ;

ϑ — вектор-столбец производных от функции $U(t)$ в точке $t = n$, определяющий полезный сигнал;

T — знак транспонирования.

Для сглаживания предъявленных реализаций и определения экстремальных точек АВХ можно применить последовательно включенные воспроизводящий и дифференцирующий фильтры. При этом сигнал на интервале N представляется полиномом второй степени. Величину N можно определить из этого условия представимости и реального шага квантования по приведенному аргументу (для импульсной аппаратуры). Весовые функции введенных фильтров $K[n]$ определяются по критерию минимума среднеквадратической ошибки, принимая ошибки воспроизведения сигнала и его производных до второго порядка включительно равными нулю. Такие фильтры называют фильтрами с астатизмом третьего порядка ($r + 1$):

$$K[n] = \frac{3}{(N+1)(N+2)(N+3)} \left\{ a_0 \left[(3N^2 + 3N + 2) - 6(2N + 1)n + 10n^2 \right] + (-a_1) \left[-6(2N + 1) + \frac{4(2N + 1)(8N - 3)}{N(N - 1)}n - \frac{60}{N - 1}n^2 \right] + 2a_2 \left[10 - \frac{60}{N - 1}n + \frac{60}{N(N - 1)}n^2 \right] \right\}.$$

Выходные сигналы дифференцирующего фильтра используются при нахождении уточненного значения аргумента для i -го экстремума АВХ. Предварительное значение его фиксируется при перемене знака на выходе дифференцирующего фильтра. Определенные таким образом точки служат началом отсчета для аппроксимационного полинома второй степени, коэффициенты которого находятся по методу наименьших квадратов. Ширина интервала аппроксимации определяется по предварительной оценке из имеющейся уже информации об экстремальных точках АВХ.

Применение описанных фильтров (при $N = 4$) и аппроксимаций к обработке потока сигналов, полученных путем моделирования на ЦВМ «Днепр-1», позволило составить распределение признака δ в преобразованном пространстве реализаций (см. рис. 3, б). Из приведенных иллюстраций видно, что дисперсия признака δ теперь значительно меньше прежней, т. е. распознавание по нему можно провести с меньшей ошибкой.

Проведенный анализ позволил определить предварительную совокупность признаков, которая может быть использована при обучении системы автоматического определения координат радианта и элементов орбиты индивидуальных метеоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Л. Кашеев, Ю. И. Волощук, А. А. Дьяков, В. А. Нечитайленко. Оптимальная обработка радиометеорной информации. I. Постановка задачи. См. статью настоящего сборника.

2. Р. П. Чеботарев. Пеленгационно-временной радиометод определения радиантов и скоростей отдельных метеоров. «Изв. вузов, Радиотехника», т. 6, № 5, 1963.

3. I. G. Davies, C. D. Ellyett. The diffraction on of radio waves from meteor trails and measurement of meteor velocities. Ph. Mag. 7 (40), 614—626 (1949).

4. Д. Миддлтон. Введение в статистическую теорию связи, ч. II. Изд-во «Советское радио», 1962.

5. Д. Миддлтон. Очерки теории связи. Изд-во «Советское радио», 1966.

6. Я. З. Цыпкин. Адаптация и обучение в автоматических системах. Изд-во «Наука», 1968.

7. Б. Л. Кашеев и др. Радиолокационный комплекс для исследования слабых метеоров. Сб. «Радиотехника», вып. 16. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.

8. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. Физматгиз, 1961.

9. Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин. Метеорные явления в атмосфере Земли. Изд-во «Наука», 1967.

10. M. Shimek. The influence of ambipolar diffusion on the shape of radio echoes from meteors. Can. J. Phys. v 46, p 1563, 1968.

11. В. И. Тихонов. Статистическая радиотехника. Изд-во «Советское радио», 1966.

12. В. Н. Лебединец, А. К. Соснова. Отражение радиоволн от метеорных следов. II. Дифракционные картины. «Геомагнетизм и аэрномия», т. 9, № 4, 1969.

13. В. П. Перов. Статистический синтез импульсных систем. Изд-во «Советское радио», 1959.

14. Ю. М. Коршунов, А. И. Бобиков. Цифровые сглаживающие и преобразующие системы. Изд-во «Энергия», 1969.

15. А. Ф. Романенко, Г. А. Сергеев. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. Изд-во «Советское радио», 1968.

16. Б. Л. Кашеев. Об исследованиях свойств верхней атмосферы по радионаблюдениям метеоров. Сб. «Метеоры», вып. 2—3. Изд-во ХГУ, Харьков, 1963.

17. Е. И. Фиалко. Метод измерения линейной плотности и коэффициента диффузии с использованием метеорных радиоэхо промежуточного типа. «Геомагнетизм и аэрномия», т. 5, № 1, 1965.

18. G. S. Hawkins, I. C. Brown. A comprehensive study of the characteristics of meteor echoes — I. Spec Rep. Smithsonian Astroph. Observ. 254 vi, 1967.