

УДК 623 98

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ В ДИСКРЕТНОМ ВРЕМЕНИ ПО ПРЯМЫМ И КОСВЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

А. П. Лось,

доктор техн. наук, зам. начальника управления
Федеральное государственное унитарное предприятие «Первый ЦНИИ
Министерства обороны России»

Е. А. Войнов,

канд. техн. наук, зам. директора научно-производственного комплекса
Федеральное государственное унитарное предприятие «ЦНИИ «Гранит»»

Предложены новые алгоритмы распознавания, работающие в условиях ограничений на время наблюдения и при создании помех. В основе разработанного подхода использован последовательный принцип обработки информации, включающий комплексную систему фильтрации и классификации сигналов по мере их поступления. Особенностью предлагаемого подхода является использование динамического потраекторного описания сигнала на основе дифференциальных уравнений и оптимальных правил остановки, позволяющих минимизировать сумму вероятностей ошибок классификации. Приведены результаты моделирования при классификации сигналов по ширине спектра в условиях шумовой помехи.

New recognition algorithms operating in conditions of constraint on the observation period and under jamming are proposed. Sequential principle of information processing including the combined system of filtration and classification of signals as they enter is used as the developed approach basis. The proposed approach peculiarity is the use of dynamic trajectorywise description of a signal based on differential equations and optimal rules of stopping allowing to minimize the sum of probabilities of classification errors. Results of simulation on spectrum width classification of signals in conditions of noise interference are listed.

В современных условиях развития средств радиоэлектронного наблюдения и средств противодействия основными показателями, характеризующими эффективность бортовых средств космических аппаратов, самолетов, ракет, являются помехозащищенность, дальность обнаружения, точность определения координат и возможность классификации объектов. В настоящее время глубоко исследованы и созданы образцы информационно-измерительных бортовых комплексов, во многом решающие проблемы обнаружения, определения координат объектов в условиях РЭП противника. Вопросы классификации объектов для бортовых средств наблюдения получили меньшее развитие вследствие ряда технических трудностей, связанных с малой апертурой антенн бортовых комплексов и требованиями больших дальностей обнаружения. В этих условиях проблема классификации объектов может быть решена только на основе комплексного использования всех достижений в области техники радиоэлектронного обнаружения объектов, методов алгоритмической обработки сиг-

налов и математической теории распознавания образов.

Авторами предлагаются пути разработки новых алгоритмов распознавания (классификации) объектов, учитывающих небольшое время наблюдения за объектом, а также возможность создания мощных помех, что не позволяет осуществлять точные измерения. В условиях РЭП противника байесовы алгоритмы распознавания могут быть чрезвычайно сложными вследствие того, что вероятностные распределения значений измеряемых параметров и мгновенные значения помехи могут быть не гауссовскими. Это обстоятельство обосновывает необходимость дальнейших исследований, направленных на поиск простых и высокоэффективных процедур распознавания. Достаточно общий и конкретный способ решения указанной задачи связан с использованием принципа асимптотической оптимальности, приведенного в работах Б.Р. Левина, П.А. Бакута, В. Г. Релина.

При использовании этого принципа возможен подход, основанный на совместном использовании

концепции последовательных измерений. Таким образом возникает задача синтеза системы распознавания, включающая комплексную систему фильтрации, многоканальной обработки измерительной информации и систему классификации. Эта система характеризуется следующими признаками:

- размерность вектора результатов измерений больше размеров вектора входных сигналов;
- наличие функциональной или корреляционной связи между измеряемыми сигналами;
- единый критерий оптимальности или общие ограничения при синтезе системы многомерной фильтрации;
- многоальтернативность решения задачи классификации.

Особенностью предлагаемого подхода является использование не корреляционно-спектрального подхода, а динамического потраекторного описания сигнала, что обеспечивает повышенную помехоустойчивость системы. Потраекторное представление случайных процессов, осуществляемое с помощью дифференциальных уравнений, позволяет использовать теорию оптимальных правил остановки для нахождения алгоритмов, минимизирующих средние потери. При этом учитывается, что в подавляющем большинстве задач одной из основных составляющих потерь является время, затрачиваемое на принятие решения, при котором минимизируется сумма вероятности ошибок классификации.

На практике оцениванию параметров, как правило, предшествует обнаружение сигнала и далее его классификация. Учитывая определенную общность этих процессов при использовании математического аппарата уравнений фильтрации, предлагается единообразно составить алгоритмы для решения этих задач. В основу этих алгоритмов положена теория нелинейной фильтрации, представленная работами Р.Ш. Липцера и А.Н. Ширяева [1]. Исходя из этого, предполагались марковские и гауссовские процессы в оцениваемом параметре. Для этого случая можно составить замкнутые системы уравнения, позволяющие по реализации наблюдаемой компоненты η_t построить функционал математического ожидания $m_t(\lambda)$. При оценивании параметра сигнала скрытого, в шуме, рассматривался трехмерный случайный процесс $[\lambda, \theta(t|\lambda), \eta_t]$. Для решения этой задачи необходима фильтрация процесса $q(t|l)$ и оценивание параметра λ , имеющее любое распределение. Предполагалось, что параметр λ является случайной величиной, принимающей конечное число n неотрицательных значений, соответственно $m_t(\lambda)$ представляется суммой:

$$m_t(\lambda) = \sum_{i=1}^n \lambda_i P_i(\lambda_i)$$

где $P_i(\lambda_i)$ – вероятность появления λ_i , значения параметра λ ; $P_i(\lambda_i) = P_i(\lambda_i) / \eta_i^2$ – вычисляется в результате решения нелинейных дифференциальных уравнений [2]. В этих условиях проводятся косвенные дискретные измерения, так как сигнал скрыт и искажен шумом.

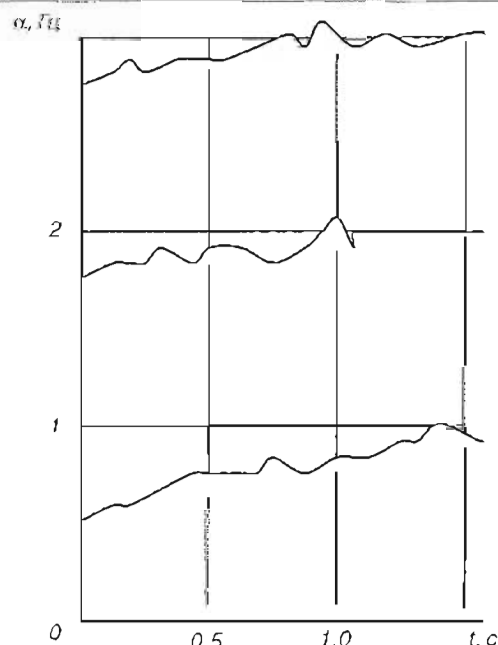
С использованием данного подхода была решена задача оценки ширины спектра (α) сигнала с корреляционной функцией $K(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|}$. Дифференциальные уравнения для наблюдаемой компоненты η_t , ненаблюдаемой θ_t и помехи U_{1q} имеют вид:

$$\begin{aligned} d\theta_t &= -\alpha\theta_t dt + \sigma^2 \sqrt{c_1} d\omega_1; \\ dU_t &= -\beta U_t dt + \beta \sqrt{c_2} d\omega_2(t); \\ d\eta_q(t) &= \theta_t + U_t, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ^2 – мощность сигнала, c_1, c_2 – спектральная плотность мощности сигнала и помехи соответственно, ω_1, ω_2 – винеровские процессы; β – ширина спектра помехи.

Оценивание параметра α осуществлялось на основе обобщенного уравнения фильтрации Калмана-Бьюси. Результаты моделирования приведены на рис. 1 для дискретных значений $\alpha_j, j = 1, \dots, 10$, распределенных по закону Стьюдента с M , равным 10, 20 и 30 Гц, и СКО, равным 5 Гц. В качестве помехи принимался окрашенный шум с $\beta = 50$ Гц, $c_1 = c_2 = 1$. Система уравнений (1) решалась на основе использования первой итерации Пикара. Как видно из этой системы, основой служит непрерывная модель динамики процессов. Временная дискретизация здесь используется для решения уравнений на ЦВМ. Однако можно ориентироваться сразу на дискретную модель наблюдений [1] и алгоритм оценивания составлять сразу в дискретной форме – в форме рекуррентных соотношений.

По аналогии с этим примером были составлены и решены дифференциальные уравнения для оценивания длительности импульса, его амплитуды. Учитывая последовательный характер вычисления оценки параметра, разработана процедура классификации сигналов. В основу предлагаемого подхо-



■ Рис. 1. Результаты моделирования для дискретных значений α

да положены решающие правила и алгоритмы об оптимальной остановке процесса, представляемого апостериорной вероятностью $P_j(t)$ принадлежности сигнала к j -му классу, $j=1, 2$ [1]. С использованием байесовского подхода решение о принадлежности объекта к какому-либо классу принималось на основе достижения $P_j(t)$ граничных значений. При этом последовательное во времени вычисление значений $P_j(t)$ осуществлялось исходя из дифференциального уравнения для $P_j(t)$, в которое входит значение отношения правдоподобия

$$\varphi_1 = dP^{(1)}(\eta_0^t) / dP^{(0)}(\eta_0^t)$$

в виде производной меры процесса η_0^t , содержащего сигнал, по мере процесса, не содержащего сигнала.

В рассматриваемом случае, при наблюдении сигнала в шумах, можно вместо недоступного непосредственному наблюдению параметра использовать его оценку. Понятно, что стохастическая природа сигнала требует затрат времени на вычисление оценки параметра сигнала, и чем больше можно затратить времени, тем ближе будет оценка к значению самого параметра. Возникает процедура последовательной классификации.

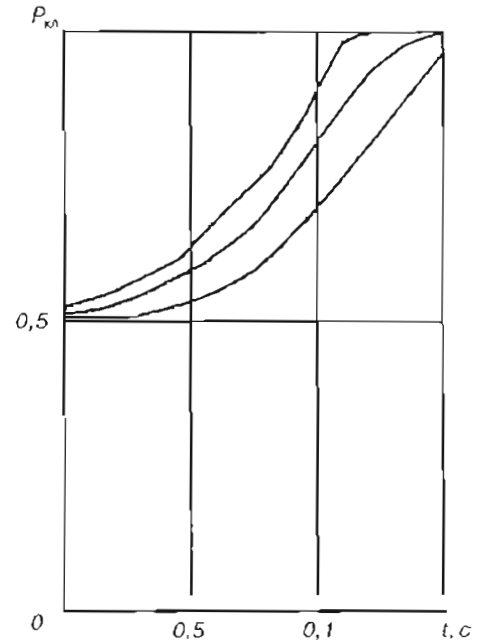
В отличие от рассматриваемого случая двухальтернативной классификации [1] здесь решается модификационная задача многоальтернативной классификации зашумленного сигнала.

Уравнение классификации для $P_j(t)$ выведено для случая, когда параметр λ , по которому проводится классификация, принимает одно из λ_i значений и когда параметр λ принадлежит к одному из F_m распределений, $M = 1, \dots, n$, где M – число классов. Дифференциальное уравнение для $P_j(t)$ получено на основе байесова подхода и имеет громоздкий вид даже для трех классов, поэтому не приводится. В основе вывода этих дифференциальных уравнений лежало уравнение для $P_j(t)$, имеющее вид:

$$P_j(t) = \frac{P_j \varphi_t}{P_0 \left[1 + \sum_{j=1}^M (P_j / P_0) \varphi_t \right]}$$

где P_j – априорные вероятности появления объектов j -го класса, P_0 – вероятность отнесения объекта ни к одному из классов; M – общее число классов.

С использованием предлагаемого подхода было проведено статистическое моделирование процесса классификации объектов для трех классов по параметру ширины спектра межпериодных флюктуа-



■ Рис. 2. Результаты статистического моделирования процесса классификации

ций (α). Результаты моделирования приведены на рис. 2 в виде зависимости вероятности правильной классификации $P_{кп}$ от времени t .

Как видно из графиков на рис. 1, 2, за время, равное 1с производится классификация процессов с вероятностью $P_{кп} = 0,7 \div 0,9$.

Выводы

Предложенный подход к оцениванию и классификации процессов на основе потраекторного описания случайных процессов в виде стохастических дифференциальных уравнений с использованием теории оптимальных правил остановки позволяет получить дополнительный выигрыш во времени сходимости процессов в условиях помех. Количественные оценки предлагаемых методов и подходов подтверждены результатами цифрового моделирования.

Литература

1. Липцер Р. Ш., Ширяев А. Н. Статистика случайных процессов. – М.: Наука, 1974. – 696 с.
2. Розов А. К. Нелинейная фильтрация. – СПб.: Политехника, 1994. – 172 с.