

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ НА СТРУКТУРНОМ МНОЖЕСТВЕ ВАРИАНТОВ

к.т.н. В.М. Безрук

(представил д.т.н., проф. И.Д. Горбенко)

Подробно рассмотрены основные этапы оптимизации системы распознавания по совокупности показателей эффективности и затрат.

В настоящее время наблюдается широкое использование многокритериального подхода при проектировании сложных систем. Разработаны общие методы многокритериальной оптимизации систем [1 – 4]. В работах [5 – 7] они конкретизированы применительно к оптимизации систем распознавания сигналов с учетом совокупности показателей эффективности и затрат. В данной работе рассмотрены основные этапы оптимизации аналогичных систем на примере сигналов связи с различным видом и параметрами модуляции. С использованием морфологического подхода синтезировано структурное множество допустимых вариантов системы. Выполнено сужение полученного множества до множества Парето - оптимальных альтернатив путем нахождения согласованного оптимума показателей качества. На заключительном этапе осуществлен выбор единственного варианта системы на множестве неулучшаемых альтернатив с применением условного критерия предпочтения.

### *Постановка задачи и метод ее решения*

Пусть распознаванию подлежат  $M$  случайных сигналов  $X^i(t)$ ,  $i = \overline{1, M}$ . Сигналы предъявляются на вход системы распознавания в виде выборок реализаций  $X_r(t)$ ,  $r = \overline{1, M}$ , каждая из которых задана на конечном интервале времени  $(0, T)$ . Полагается, что сигналы принадлежат классу случайных процессов с ограниченной энергией, и для описания сигналов может быть выбрана математическая модель в виде ортогональных разложений случайных процессов [5].

Структуру системы распознавания сигналов будем искать в классе систем, реализуемых средствами цифровой вычислительной техники. Последнее определяет необходимость использования конечномерных представлений сигналов в виде  $N$  - мерных векторов случайных коэффициентов разложений используемых ортогональных рядов

$$\bar{D}^i = (D_1^i, \dots, D_j^i, \dots, D_N^i)^T, i = \overline{1, M}.$$

Будем полагать  $N$  - мерные плотности распределения векторов  $\bar{\mathbf{D}}^i$  гауссовскими, т.е.  $N(\bar{\mathbf{D}}/\bar{\boldsymbol{\mu}}^i, \mathbf{R}^i)$ , с априори неизвестными средними векторами  $\bar{\boldsymbol{\mu}}^i$  и корреляционными матрицами  $\bar{\mathbf{R}}^i$ . Считается заданной классифицированная обучающая выборка сигналов  $\left\{ \mathbf{x}_r^i(\mathbf{t}), r = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, M} \right\}$ , а также априорные вероятности предъявления сигналов  $P_i$ , причем

$$\sum_{i=1}^M P_i = 1.$$

Систему распознавания сигналов будем оценивать совокупностью показателей эффективности и затрат, определяющих основные потребительские свойства системы

$$\bar{\mathbf{k}}(\Phi) = (\mathbf{k}_1(\Phi), \mathbf{k}_2(\Phi), \mathbf{k}_3(\Phi), \mathbf{k}_4(\Phi)), \quad (1)$$

где  $\mathbf{k}_1$  - показатель качества распознавания сигналов, определяемый средней вероятностью ошибочного распознавания сигналов  $P_{\text{ош}}$ ;

$\mathbf{k}_2$  - показатель быстродействия системы, определяемый длительностью интервала времени наблюдения выборки из  $\nu$  реализаций сигналов  $T_H = \nu T$ ;

$\mathbf{k}_3$  - показатель реализационных затрат системы, определяемый требуемым объемом вычислений и памяти при реализации системы средствами вычислительной техники;

$\mathbf{k}_4$  - показатель затрат на проектирование, определяемый объемом вычислений на всех этапах проектирования системы;

$\Phi$  - оператор системы, определяемый структурой  $\mathbf{s}$  и вектором параметров  $\bar{\boldsymbol{\beta}}$  системы распознавания  $\Phi = (\mathbf{s}, \bar{\boldsymbol{\beta}}) \in \Phi$ ,  $\mathbf{s} \in \mathbf{S}$ ,  $\bar{\boldsymbol{\beta}} \in \mathbf{B}$ ,  $\Phi = \mathbf{S} \times \mathbf{B}$ ;

$\Phi, \mathbf{S}, \mathbf{B}$  - соответственно множества операторов, структур, параметров системы.

Полагается, что существующие ограничения на структуру и параметры системы распознавания, а также ограничения на показатели качества:  $\mathbf{k}_1 \leq \mathbf{k}_{1\text{доп}}$ ,  $\mathbf{k}_2 \leq \mathbf{k}_{2\text{доп}}$ ,  $\mathbf{k}_3 \leq \mathbf{k}_{3\text{доп}}$ ,  $\mathbf{k}_4 \leq \mathbf{k}_{4\text{доп}}$ , определяют некоторое множество допустимых систем распознавания  $\Phi_D \in \Phi$ .

Требуется для сформулированных условий решить задачу выбора вариантов системы, оптимальных по совокупности показателей качества. Решение такой задачи включает формирование дискретного множества допустимых альтернатив с учетом задаваемых исходных данных, выбор Парето - оптимальных вариантов системы и построение процедуры их упорядочения с целью нахождения единственного варианта структуры системы.

Нетрудно видеть, что введенные показатели качества (1) взаимосвязаны и конкурируют между собой. Поэтому нельзя достичь потенциально возможного значения каждого в отдельности показателя без ухудшения других показателей. Может быть достигнут лишь согласованный оптимум введенных показателей качества в смысле безусловного критерия предпочтения (критерия Парето) [5].

Для выбора единственного решения на множестве эффективных (Парето - оптимальных) решений могут быть использованы методы, основанные на построении скалярной целевой функции.

### ***Формирование допустимого множества и нахождение подмножества Парето - оптимальных вариантов системы распознавания***

Рассмотрим особенности формирования множества Парето - оптимальных вариантов системы распознавания на примере распознавания шести ( $M = 6$ ) псевдослучайных сигналов связи, подробно описанных в [5]. Сигналы были заданы выборками реализаций 60 - мерных случайных векторов  $\{\bar{x}_r^i, r = \overline{1, n}, i = \overline{1, M}\}$ , которые получены с помощью параллельного анализатора спектра с временем анализа  $T = 40$  мс.

С учетом того, что для описания случайных векторов используется математическая модель в виде ортогональных разложений, система распознавания сигналов может быть представлена в виде последовательного соединения датчика исходного конечномерного описания сигналов, формирователя коэффициентов разложения сигналов в некотором ортогональном базисе, а также классификатора. Различные способы реализации каждого из указанных блоков в соответствии с морфологическим подходом к формированию допустимого множества определяют различные варианты системы распознавания сигналов [7]. Сведения о выбранных вариантах структуры системы распознавания приведены в табл. 1.

Видно, что структуры системы распознавания определяются решающим правилом в виде байесовского классификатора, оптимального в смысле средней вероятности ошибочного распознавания, а также другими, более простыми правилами принятия решений по выборкам реализаций, которые характерны для случая описания сигналов вероятностной моделью в виде ортогональных разложений [5].

В качестве информативных признаков выбраны базисные функции, в частности, собственные векторы, определяемые на основе разложения Карунена - Лоэва, а также множественного дискриминантного анализа. Их использование позволяет сократить размерность конечномерного представления сигналов без существенной потери информации для их распознавания.

Множество допустимых вариантов системы распознавания получено из допустимых сочетаний элементов структуры, определяемых вариантами формирователя признаков, решающих правил и различными значениями числа признаков  $N$  и объема выборки  $v$ . С учетом ограничений

на значения показателей качества  $k_1, k_2, k_3$ , в окрестности базовых вариантов системы отобраны 30 допустимых альтернатив. Каждый альтернативный вариант системы представлен на множестве значений числовыми значениями нормированных показателей качества, которые приведены в табл. 2.

Таблица 1

Выбранные варианты структуры системы распознавания

Класс системы	Формирователь информативных признаков	Классификатор
1	Общие признаки Карунена - Лозва	Байесовский классификатор*
2	Объединенная система Карунена - Лозва	То же
3	Дискриминантные признаки	То же
4	Общие признаки Карунена - Лозва	Байесовский классификатор**
5	То же	Классификатор по минимуму** расстояния до эталона в пространстве корреляционных матриц
6	То же	Классификатор по минимуму расстояния до эталона в пространстве энергетических спектров**

Примечание: \* - решение принимается по одной реализации;  
\*\* - решение принимается по выборке реализаций.

Показатель качества распознавания оценивался для каждого варианта системы методом статистического моделирования на ЭВМ по заданным выборкам сигналов. При оценке показателя затрат использованы выражения для описания динамической сложности системы через объемы вычислений и памяти при реализации на ЭВМ. Показатель быстродействия определен через общее время получения выборки реализаций.

Ограничение на показатель затрат на проектирование (задано  $k_4 \leq 10^{10}$ ) учитывает весь объем вычислений при моделировании, включая нахождение множества Парето - оптимальных оценок. В последних столбцах табл. 2 знаком “+” отмечены альтернативные варианты системы, принадлежащие различным слоям Парето. Первый слой включает множество Парето - оптимальных вариантов системы распознавания с номерами 1, 7, 10, 11, 12, 20, 21.

Таблица 2

## Числовые значения нормированных показателей качества

Класс системы	Вариант	Параметры системы		Значения показателей качества			Номер слоя Парето		
		N	v	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	1	2	3
1	1	2	1	1,0	0,17	0,36	+		
	2	4		0,58	0,17	0,43		+	
	3	6		0,56	0,17	0,51		+	
2	4	2		0,72	0,17	0,54			+
	5	4		0,68	0,17	0,62			+
	6	6		0,68	0,17	0,71			
3	7	2		0,48	0,17	0,40	+		
	8	4		0,42	0,17	0,47	+		
	9	6		0,3	0,17	0,56	+		
4	10	2	2	0,54	0,33	0,37	+		
	11		4	0,38	0,68	0,42	+		
	12		6	0,36	1,0	0,47	+		
	13	4	2	0,44	0,33	0,46			
	14		4	0,26	0,68	0,53	+	+	+
	15		6	0,1	1,29	0,61			
	16	6	2	0,36	0,33	0,57		+	
	17		4	0,14	0,68	0,69			+
18	6		0,1	1,0	0,8				
5	19	2	6	0,6	1,0	0,45			+
	20		4	0,14	0,68	0,48	+		
	21	4	6	0,1	1,0	0,54	+		
	22	6	4	0,14	0,68	0,57		+	
	23		6	0,1	1,0	0,64			
6	24	2	4	0,96	0,68	0,4		+	
	25		6	0,74	1,0	0,44			+
	26	4	4	0,6	0,68	0,46			+
	27		6	0,3	1,0	0,51		+	
	28		2	0,94	0,33	0,45			+
	29	6	4	0,36	0,68	0,52		+	
	30		6	0,1	1,0	0,59		+	

**Выбор единственной альтернативы на множестве Парето – оптимальных вариантов системы распознавания**

Лучший вариант выделен с использованием условного критерия предпочтения в виде

$$\min_i k_p^i = \min_i (\eta_1 k_1^i + \eta_3 k_3^i), \quad (3)$$

где  $i$  - номер варианта;  $\eta_1 = \eta_3 = 0,5$  - коэффициенты линейной свертки показателей качества распознавания и реализационных затрат.

Выражение (3) аналогично критерию максимума функции полезности в простейшем варианте равной значимости частных показателей Парето - оптимальных вариантов системы распознавания.

Для выбора единственного варианта системы распознавания может быть использован также метод анализа иерархии Саати [8], который позволяет установить предпочтения на множестве Парето, не задавая заранее функцию полезности в виде (3). Этот метод характеризуется меньшей степенью субъективизма при задании скалярной целевой функции.

В рассмотренном примере наиболее предпочтительным оказался вариант системы с номером 20. Это система распознавания с классификатором по минимуму евклидоваго расстояния до эталона в пространстве значений корреляционных моментов сигналов, представленных в обобщенном базисе Карунена - Лозва, при значениях  $N = 4$  и  $v = 4$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Березовский Б.А., Барышников Ю.М., Борзенко В.И., Кепнер Л.М. Многокритериальная оптимизация: Математические аспекты. – М.: Наука, 1986. – 186 с.
2. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
3. Подиновский В.Д., Ногин В.Д. Парето - оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
4. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств. – М.: Сов. радио, 1986. – 288 с.
5. Омельченко В.А. Основы спектральной теории распознавания сигналов. – Харьков: Высшая школа, 1983. – 159 с.
6. Омельченко В.А. Многокритериальные задачи распознавания сигналов. Ч.1. Распознавание сигналов в условиях априорной неопределенности // Отбор и передача информации. – 1989, вып. 3. – С.13 - 15.
7. Безрук В.М. Принципы оптимизации систем распознавания случайных сигналов на структурном множестве вариантов // Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полей, ч. 2. – Харків: ХІРЕ, 1982. – С. 10 - 22.
8. Саати Т., Керс К. Аналитическое планирование. Организация систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.