УДК 621.396.96

Informatics and Mathematical Methods in Simulation
Vol. 7 (2017), No. 4, pp. 291-299

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДИСКРЕТНО-АДАПТИВНОЙ ОДНОКАНАЛЬНОЙ ПО ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ ГАУССОВЫХ ПОМЕХ

И.В. Цевух, А.В. Соколов, А.А. Сакович

Одесский национальный политехнический университет,
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: itsevukh@opu.ua

В работе предложена методика минимизации числа режимов и оптимизации параметров одноканальной по доплеровской частоте дискретно-адаптивной системы (ДАС) обработки сигналов на фоне гауссовых помех при дополнительном ограничении на величину потерь в эффективности по сравнению с системами с непрерывной перестройкой параметров. Разработана с использованием теоретико-графовой модели процедура параметрического синтеза ДАС. Приведены результаты математического моделирования одноканальной по доплеровской частоте ДАС обработки сигнала в условиях аддитивной смеси коррелированной и некоррелированной гауссовых помех.

Ключевые слова: отношение правдоподобия, достаточная статистика, ковариационная матрица

Введение

Одним из основных требований, предъявляемых к существующим и проектируемым многофункциональным системам передачи и извлечения информации (СПИИ), является высокая помехозащищенность в условиях сложной, изменчивой и априорно неизвестной помеховой обстановки. Известно [1], что эффективные системы обработки полезного сигнала в условиях помех должны синтезироваться с использованием теста отношения правдоподобия. Полученные таким образом алгоритмы минимизируют, в определенном смысле, риск, связанный с применением неправильных решений, что немаловажно при построении систем, на выходе которых принимается решение о наличии или отсутствии в исходном процессе полезного сигнала. Применение оптимальных алгоритмов для решения конкретных радиотехнических задач осложняется в силу специфики, заключающейся в невозможности достаточно обоснованного задания вероятностных или даже спектрально-корреляционных характеристик сигнала и помехи, а также требований к реализации алгоритмов в реальном масштабе времени при сохранении их устойчивости к асимптотически оптимальным решениям.

Сложность практической реализации адаптивных оптимальных обнаружителей полезного сигнала с непрерывной перестройкой параметров в зависимости от помеховой обстановки делает актуальным поиск упрощенных вариантов построения и расчет параметров таких систем.

Цель статьи и постановка задач исследования

Целью статьи является проведение параметрического синтеза упрощенной, с точки зрения практической реализации, одноканальной по доплеровской частоте дискретно-адаптивной системы обработки сигналов при дополнительном ограничении на величину потерь в эффективности по сравнению с системами с непрерывной перестройкой параметров.

Для достижения цели необходимо решить следующие *задачи*:

1. Разработать упрощенный квазиадаптивный алгоритм обработки сигналов в условиях априорно неизвестной помеховой обстановки;
2. Предложить методику минимизации числа режимов и оптимизации параметров одноканальной по доплеровской частоте дискретно-адаптивной системы обработки сигналов при дополнительном ограничении на величину потерь в эффективности по сравнению системами с непрерывной перестройкой параметров;
3. Провести параметрический синтез одноканальной по доплеровской частоте дискретно-адаптивной системы обработки сигналов в условиях аддитивной смеси коррелированной и некоррелированной гауссовых помех.

Основная часть

Разработка упрощенного варианта построения системы обработки сигнала в условиях сложной и априорно неизвестной помеховой обстановки. Для упрощения построения системы обработки предположим, что априорная неопределенность спектрально-корреляционных характеристик процесса на входе СПИИ носит характер параметрической, а значит одним из путей ее преодоления может быть использование адаптивного Байесова подхода. В этом случае, при допустимости гауссовой аппроксимации плотности распределения вероятности помехи, приемлемыми с точки зрения скорости сходимости оказываются пути, основанные на идее замены в полученных при априорной определенности алгоритмах, корреляционной матрицы помехи ее состоятельной оценкой [2]. С учетом этого в рамках адаптивного Байесового подхода заменим фиксированные параметры ковариационной матрицы помехи $B_{\text{П}}$ их оценками максимального правдоподобия, полученными из обучающей выборки в отсутствии полезного сигнала.

На втором этапе поиска упрощенного варианта построения используем тот факт, что для ряда радиотехнических приложений допустимым оказывается применение вместо оптимальной многоканальной системы обработки - упрощенной системы одноканальной по доплеровской частоте сигнала. Для построения таких одноканальных систем, решающих задачу обнаружения импульсного сигнала на фоне гауссовых помех с неизвестными корреляционными свойствами, в [3] и [4] предложено использовать, соответственно, достаточные статистики

$$T^2 = X^* \hat{B}_{\text{П}}^{-1} X \,; \tag{1}$$

$$C^2 = X^* \hat{B}_{\text{П}}^{-2} X \,, \tag{2}$$

где X – N-мерный вектор выборочных отсчетов входного процесса, $\hat{B}_{\text{П}}$ – оценка максимального правдоподобия ковариационной матрицы помехи, * – знак эрмитова сопряжения и транспонирования. В [4] показано, что эффективность алгоритма, использующего C^2 статистику, по вероятностным показателям для гауссовых моделей сигнала и помех оказывается несколько выше алгоритма, использующего T^2

статистику Хотеллинга. Тем не менее, построение систем обработки на базе (1) и (2) затруднено из-за необходимости измерения и преобразования ковариационной матрицы помехи, что требует большого числа вычислений, а для (2) еще и дополнительного, по сравнению с (1), умножения на оценку обратной ковариационной матрицы помехи.

И, наконец, на третьем этапе для уменьшения вычислительной сложности перейдем от адаптивной системы с непрерывной перестройкой параметров (СНП), к дискретно-адаптивной системе [5], состоящей из совокупности неадаптивных подсистем (режимов), автоматически переключающихся в зависимости от результатов анализа помеховой обстановки. Обеспечим при этом контролируемый уровень потерь в эффективности такой ДАС по сравнению с СНП.

Разработка методики параметрического синтеза ДАС. При гауссовой аппроксимации плотности распределения вероятностей аддитивной смеси действующих на входе приемника помех, любую из возможных помеховых ситуаций, принадлежащих некоторой области θ, можно полностью характеризовать значением элементов ковариационной матрицы $B_{\Pi} \in B(\theta)$. Основная идея перехода от систем обработки с непрерывной к системам с дискретной перестройкой параметров заключается в разбиении непрерывной области θ на минимально возможное число $\dot{M}$ неперекрывающихся подобластей, в каждой из которых потеря в эффективности ДАС относительно СНП не превышает заданной величины C_0 (1-й этап):

$$M \to \min_{B_{\Pi} \in B(\theta)} = \dot{M};$$

при ограничении

$$C(B_{\Pi}, \mathrm{W}_{gi}) \le C_0;$$

$$i = k, \text{ если } B_{\Pi} \in B(\theta_k),$$

где $C(B_{\Pi}, W_{gi})$ – функционал потерь, вид которого определяется выбранным критерием оптимальности системы обработки G, $B(\theta_k)$ – совокупность всех возможных ковариационных матриц помехи подобласти θ_k, W_{gi} – вектор параметров систем обработки, определяемый ковариационной матрицей B_{gi}.

При этом координаты «центров» (определяющие параметры режимов ДАС) и границы подобластей θ_i, $i = \overline{1, \dot{M}}$, должны выбираться так, чтобы доставлять минимум средним по области θ потерям (2-й этап):

$$\int_{B(\theta)} C'(B_{\Pi}, \mathrm{W}_{gi}) \to \min_{B_{\Pi} \in B(\theta)},$$

при условии, что

$$C'(B_{\Pi}, \mathrm{W}_{gi}) \to \min_{j = \overline{1, M}} C(B_{\Pi}, \mathrm{W}_{gi}).$$

С учетом этого, правило выбора вектора параметров ДАС может быть записано в следующем виде:

$$W_{gi} = Z_g H_i,$$

где

$$H_i = [h_1 = 0, ..., h_{i-1} = 0, h_i = 1, h_{i+1} = 0, h_{\dot{M}} = 0],$$

если $B_{\Pi} \in B(\theta_i)$; Z_g – матрица, состоящая из $\dot{M}$ векторов параметров ДАС.

Отметим, что пространство θ образует в общем случае бесконечное множество помеховых ситуаций. При численном решении задачи параметрического синтеза необходимо будет перейти к конечным множествам, разбивая пространство входных переменных сеткой из w опорных точек (метод сеток).

Конкретизируем вид критериев оптимизации для каждого из этапов предложенной процедуры параметрического синтеза в соответствии с выбранной моделью дискретно-адаптивной системы обработки сигналов. С учетом [4,6], формальное представление задач поиска минимального числа режимов помехозащиты и оптимизации их параметров имеет вид:

1-й этап:

$$M \to \min_{B_{\Pi} \in B(\theta)} = \dot{M};$$

при ограничении

$$C(B_{\Pi_j}, B_{\Pi_k}^{-2}) = \frac{\sqrt{TrB_{\Pi_j}^{-2} TrB_{\Pi_k}^{-2}}}{\sqrt{Tr(B_{\Pi_k}^{-2} B_{\Pi_j})^2}} \le C_0;$$

$$j = \overline{1, w}; \;\; k = \overline{1, \dot{M}},$$

где $B_{\Pi_k}^{-2} = ZH_k$, Z – блочная матрица, составленная из $\dot{M}$ матриц обработки ДАС, при синтезе которой использовалась достаточная статистика C^2; $Tr[]$ – след матрицы.

2-й этап:

$$\dot{V} = \min_{V \in V(\theta)} Q(V);$$

$$Q(V) = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^{w} C'(B_{\Pi_j}, B_{\Pi_k}^{-2});$$

$$C'(B_{\Pi_i}, B_{\Pi_k}^{-2}) = \min_{\forall n \ne k} C(B_{\Pi_i}, B_{\Pi_n}^{-2}).$$

В столь общей постановке оптимизационная задача первого этапа является *NP*-полной, что говорит о невозможности, в общем случае, получения точных оптимальных решений за полиномиальное время без помощи недетерминированных алгоритмов, то есть о необходимости для любого детерминированного алгоритма, корректно решающего данную *NP*-полную задачу, в худшем случае, экспоненциального количества времени и, следовательно, о его неприменимости на практике ни к каким, за исключением очень малой размерности, индивидуальным задачам. Понимание сложности задачи имеет ряд преимуществ: с одной стороны – показывает безнадежность попыток алгоритмически решить задачу, а с другой – открывает пути для достижения менее амбициозных целей, чем построение алгоритма, который всегда находит точное решение и время работы которого никогда не превышает полиномиальной оценки.

С учетом этого, и пользуясь рекомендациями [7] для практического решения комбинаторных задач подобного типа, используем приближенный метод. Одним из самых удобных и широко использующихся при проектировании сложных систем, в которых естественным образом можно выделить связи между элементами, является теоретико-графовая модель представления данных.

В рамках указанной модели ограниченный ансамбль комбинаций, «помеховая ситуация – режим помехозащиты» может быть представлен с помощью двудольного неориентированного графа $\Gamma(U,V,E)$, в котором множество вершин $U=\{u_1,...,u_L\}$ соответствуют L $(L>>M)$ помеховым ситуациям с ковариационными матрицами B_{uj}, $j=\overline{1,L}$, а координаты вершин множества $V=\{\mathrm{v}_1,...,\mathrm{v}_\mu\}$ однозначно определяют параметры $\mu>>\dot{M}$ режимов работы ДАС.

Пусть $H-$ некоторая нумерация на множестве вершин графа $\Gamma(U,V,E)$. Номер вершины u_j при этом обозначается $H(u_j)$, а номер вершины $v_i-H(v_i)$.

Пусть также вершина u_j достигается из v_i, если выполняется условие

$$C(B_{u_j},W_{v_i})\le C_0.$$

Тогда решение задачи сводится к построению подграфа $\Gamma_{\Pi}(U,\dot{S},\dot{E})$ с минимально возможным множеством вершин $\dot{S}$, таким, что

$$\dot{S}\in V,\left|\dot{S}\right|=\dot{M},$$

а для любой вершины $u_j\in U$ существует единственное ребро $(u_j,s_i)\in\dot{E},$ вес которого

$$C(B_{u_j},W_{v_i})=\min_k \mathrm{C}(B_{u_j},W_{v_k}).$$

Предлагается следующий алгоритм построения подграфа $\Gamma_{\Pi}(U,\dot{S},\dot{E})$.

Вход*:* граф $\Gamma(U,V,E)$. ***Выход****:* подграф $\Gamma_{\Pi}(U,\dot{S},\dot{E})$.

Начало.

Шаг 1. $M:=0,\ S:=\varnothing.$

Шаг 2. Выбор в V вершины

$$V_m=\arg\max_{j=H_v,j\ne m}\deg(V_j),$$

где $\deg(V_j)$ – степень вершины. Неопределенность разрешается произвольно.

Шаг 3. Удалить из $\Gamma(U,V,E)$ найденную вершину V_m и все смежные з ней вершины из U.

Шаг 4. Добавить V_m в S и увеличить $M:=M+1.$

Шаг 5. Если $U\ne\varnothing,$ то переход к шагу 2.

Шаг 6. $j:=0,\ N:=M.$

Шаг 7. $j:=j+1,$ если $j>M$ то переход к шагу 11.

Шаг 8. Удалить из S вершину $V_{H_{S(j)}}$.

Шаг 9. При отсутствии в $\Gamma(U,V,E)$ на данной итерации изолированных вершин уменьшить $N:=N+1$ и перейти к шагу 7.

Шаг 10. Включить $V_{H_{S(j)}}$ в S и перейти к шагу 7.

Шаг 11. $\dot{M} := N, \quad \dot{S} := S.$

Шаг 12. Вершина $u_j \in U$ смежна вершине $s_i \in \dot{S}$, если выполняется условие

$$C(B_{u_j}, W_{v_i}) = \min_k C(B_{u_j}, W_{v_k}).$$

Конец .

При практической реализации алгоритма для больших мощностей множеств V и U существенный вопрос заключается в том, каким образом хранить данные в памяти ПК, потому что способ хранения описаний ограниченного ансамбля комбинаций «помеховая ситуация – режим помехозащиты» (вершин двудольного графа) и отношений между ними (ребер графа) влияет на возможность и скорость получения решения поставленной задачи. Указанные отношения могут задаваться с помощью матриц смежности, инцидентности, достижимости, списков смежности, списков ребер. Проведенный анализ показал целесообразность представления графа $\Gamma(U,V,E)$ в памяти ПК с помощью бинарной матрицы инцидентности, так как в этом случае учет априорной информации о двудольном характере данного графа позволяет существенно сократить объем используемой памяти по сравнению с необходимым для представления графа произвольной конфигурации.

Элементы d_{ij}^u матрицы инцидентности $D_u[\Gamma(U,V,E)]$ определяются следующим образом:

$$d_{ij}^u = \begin{cases} 1, \text{если существует ребро } (u_j, v_i); \\ 0, \text{в противоположном случае.} \end{cases}$$

Временная сложность разработанного алгоритма и его эффективность в значительной степени зависит от конфигурации вводимого графа $\Gamma(U,V,E)$, а его емкостная сложность определяется размерами матрицы инцидентности $D_u[\Gamma(U,V,E)]$ и, несмотря на экономию, достигаемую за счет учета двудольного характера графа $\Gamma(U,V,E)$, ограничивает применение этих алгоритмов объемом памяти ПК, имеющегося у разработчика.

Результаты параметрического синтеза одноканальной по доплеровской частоте ДАС сигнала в условиях аддитивной смеси некоррелированной (НП) и унимодальной коррелированной гауссовых помех. С помощью программной реализации предложенной методики проведем параметрический синтез одноканальной по доплеровской частоте ДАС сигнала в условиях характерной для некоторых типов СПИИ помеховой обстановки, когда отношение некоррелированная помеха(НП)/коррелированная помеха(КП) изменяется в пределах от 0 до -40дБ, форма спектра флуктуаций КП – от резонансной до гауссовой, а его относительная полуширина от 0,05 до 0,2. Предположим, что адаптация к аргументу корреляционной функции помехи носит непрерывный характер. Такое уточнение области помеховых ситуаций позволяет существенно снизить время расчетов за счет устранения в процессе формирования множеств U и V графа $\Gamma(U,V,E)$ операции проверки генерируемых матриц $B_{u_j}, \quad j = \overline{1,L}$, на принадлежность к классу ковариационных.

Результаты расчетов числа подобластей (режимов помехозащиты $\dot{M}$), требуемого для обеспечения заданного уровня максимальных потерь (C_0), и значений средних, относительно СНП, потерь в эффективности ($\overline{\Delta C}$) в зависимости от размерности (N)

вектора входного процесса ДАС, синтезированной с использованием решающей статистики (2), приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты параметрического синтеза одноканальной по доплеровской частоте ДАС

N	C_0, dB	$\dot{M}$	$\overline{\Delta C}, dB$
3	1	12	0,093
	2	9	0,148
	3	7	0,210
	4	5	0,281
	5	3	0,409
4	1	11	0,430
	2	8	0,453
	3	6	0,592
	4	4	0,705
	5	3	0,767
5	1	9	0,89
	2	7	0,913
	3	5	0,937
	4	3	1,179
	5	3	1,179

Из таблицы 1 следует, что с увеличением N сокращается число режимов ДАС: при C_0 = 3дБ $\dot{M}$ уменьшается с семи для N =3 до пяти для N =5. Это можно объяснить тем, что с увеличением N разность между значениями условных математических ожиданий статистики C^2 $\{M[C^2 / \text{сигнал присутствует}] \;\; -M[C^2 / \text{сигнал отсутствует}]\}$ растет быстрее примерно в $\sqrt{N}$ раз, чем условное среднеквадратическое отклонение $D^{1/2}[C^2 / \text{сигнал отсутствует}]$, а следовательно, снижается влияние "хвостов" распределения $p[C^2 / \text{сигнал отсутствует}]$ на величину показателя качества обнаружения.

Для наглядности в таблице 2 приведены результаты расчетов значений элементов нижней треугольной матрицы обработки Q (разложение Холесского $B_{\Pi_k}^{-2} = QQ^T$) одноканальной по доплеровской частоте ДАС обработки сигнала, синтезированной с использованием достаточной статистики C^2 для N = 3 и C_0 = 3дБ .

Таблица 2.

Значения элементов нижней треугольной матрицы обработки Q одноканальной ДАС

C_0, dB	Номер режима	Q			$\overline{\Delta C}, dB$
3	1	1024	-2026	1024	0,21
		0	2865	-1448	
		0	0	2047	
	2	458,2	-902,9	457,3	
		0	25,24	-25,57	
		0	0	0,701	

Продолжение таблицы 2.

C_0, dB	Номер режима	Q			$\overline{\Delta C}, dB$
3	3	273,9	-537,4	273,1	0,21
		0	19,82	-20,17	
		0	0	0,5	
	4	724,1	-1417	723,9	
		0	16,03	-16,39	
		0	0	0,612	
	5	63,81	-123,0	62,59	
		0	12,11	-12,42	
		0	0	0,605	
	6	149,4	-286,2	149,2	
		0	8,231	-8,540	
		0	0	0,625	
	7	8,191	-13,94	6,709	
		0	4,440	-4,652	
		0	0	0,661	

Выводы

В работе предложена методика и проведен параметрический синтез одноканальной по доплеровской частоте сигнала ДАС, в которой, для сокращения числа режимов был сохранен непрерывный характер адаптации к аргументу корреляционной функции помехи. Показано, что синтезированная, в соответствии с разработанной методикой ДАС для заданных ограничений на максимальные потери позволяет, при сравнительно небольшом числе режимов помехозащиты (не более семи для $C_0 \geq$ 3дБ, $N \geq 3$), обеспечить, в предположении безошибочной классификации помеховой обстановки, незначительные (менее 1дБ для $C_0 \geq$ 3дБ, $N \geq 3$) средние относительно СНП потери в эффективности обработки сигналов на фоне аддитивной смеси некоррелированной и унимодальной коррелированной помех.

Список литературы

1. Merrill, I. Skolnik Radar Handbook. Vol. 1. – 3 Edition. — The McGraw-Hill Companies, 2008. — 273 p. — ISBN: 9780071485470.
2. Levy, B.C. Principles of Signal Detection and Parameter Estimation N. — Y.: Springer, 2008. — 642 p.
3. Бартенев, В.Г. О построении адаптивного обнаружителя импульсных сигналов на фоне нормальных помех с неизвестными корреляционными свойствами / В.Г. Бартенев, А.М. Шлома. // Радиоэлектроника. — 1988. — № 2. — С. 3–8.
4. Цевух, И.В. Алгоритм обработки гауссовых сигналов условиях гауссовых помех / И.В. Цевух. // Радиоэлектроника. — 1988. — № 12. — С. 53–54.
5. Maurice, G. Bellanger Adaptive digital filters. — Marcel Dekker Inc, 2001. — 464 p.
6. Бакулев, П.А. Радиолокационные системы. — М: Радиотехника, 2004. — 320 с.
7. Avis, D. Graph theory and combinatorial optimization / D. Avis, A. Hertz, O. Marcotte. — Y.: Springer, 2005. — 272 p.

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ДИСКРЕТНО-АДАПТИВНОЇ ОДНОКАНАЛЬНОЇ З ДОПЛЕРОВСЬКОЇ ЧАСТОТИ СИСТЕМИ ОБРОБКИ СИГНАЛУ В УМОВАХ ГАУССОВИХ ЗАВАД

І.В. Цевух, А.В. Соколов, А.А. Сакович

Одеський національний політехнічний університет,
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: itsevukh@opu.ua

В роботі запропонована методика мінімізації числа режимів і оптимізації параметрів одноканальної з доплеровської частоти дискретно-адаптивної системи (ДАС) обробки сигналів на тлі гаусових завад при додатковому обмеженні на величину втрат в ефективності в порівнянні системами з безперервною зміною параметрів. Розроблено, з використанням теоретико-графової моделі, процедуру параметричного синтезу ДАС. Наведено результати математичного моделювання одноканальної з доплеровської частоти ДАС обробки сигналу в умовах адитивної суміші корельованої та некорельованої гаусових завад.
Ключові слова: відношення правдоподібності, достатня статистика, коваріаційна матриця

PARAMETRIC SYNTHESIS OF ONE-CHANNEL ON DOPPLER FREQUENCY OF DISCRETE-ADAPTIVE PROCESSING SYSTEM FOR SIGNAL IN GAUSSIAN NOISES

I.V. Tsevukh, A.V. Sokolov, A.A. Sakovich

Odesa National Polytechnic University,
1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine; e-mail: itsevukh@opu.ua

In this paper a technique for minimizing the number of regimes and optimizing the parameters of a discrete-adaptive signal processing system (DAS) in conditions of gaussian noises is proposed, with an additional restriction on the magnitude of efficiency losses compared to systems with continuous parameters variation. A procedure for parametric DAS synthesis was developed using the graph-theoretic model. Results of the mathematical modeling of a single-channel on doppler frequency DAS in the conditions of an additive mixture of correlated and uncorrelated gaussian noises are presented.
Keywords: likelihood ratio, sufficient statistics, covariance matrix