Оптимизация систем когерентной обработки сигналов на фоне помех

Optimizing the systems of coherent signal processing against background interference

Попов / Popov D.
Дмитрий Иванович
(adop@mail.ru)
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»,
профессор.
г. Рязань

Ключевые слова: квазиоптимальная обработка – quasi-optimal processing; оптимизация – optimization; сигналы – signals; пассивные помехи – passive interference.

Рассмотрены структурные схемы систем квазиоптимальной обработки сигналов при наличии пассивных помех на основе режекторного и многоканального фильтров для непрерывного и дискретного режимов сканирования антенного луча. Предложены методы поэтапной оптимизации режекторного и многоканального фильтров, основанные на экстремальных свойствах характеристических (собственных) чисел матриц. Приведены результаты оптимизации рассматриваемых систем когерентной обработки сигналов.

Structural schemes are considered of systems for quasi-optimal processing of signals in the presence of passive interference, based on rejection and multi-channel filters for continuous and discrete scanning modes by the antenna beam. Techniques are suggested for stage-by-stage optimization of rejection and multi-channel filters based on the extreme properties of characteristic values (eigen-values) of matrices. Results are presented of optimizing the considered systems of coherent signal processing.

Введение

Пассивные помехи в виде мешающих отражений от неподвижных или медленно перемещающихся объектов – местных предметов, гидрометеоров (облаков, дождя, града, снега), металлизированных отражателей, сбрасываемых противником, и др. – существенно нарушают нормальную работу радиолокационных систем [1, 2]. Интенсивность пассивных помех может значительно превышать уровень собственных шумов приемника, что приводит к перегрузкам приемного тракта («ослеплению» радиолокатора) и, как следствие этого, к потере полезных сигналов. Однако даже при отсутствии перегрузок полезный сигнал может быть потерян или вообще не обнаружен на фоне интенсивных мешающих отражений.

Оптимальная обработка когерентно-импульсных сигналов на фоне пассивных помех включает матричную фильтрацию обрабатываемых отсчетов с последующим многоканальным когерентным суммированием (накоплением) результатов матричной фильтрации [3]. При марковских аппроксимациях помехи матричный фильтр преобразуется в векторный режекторный фильтр (РФ), приводя к традиционной квазиоптимальной структуре «режекторный фильтр – многоканальный фильтр (МФ)» [3]. В случае произвольных корреляционных свойств помехи характеристики РФ и МФ должны быть оптимизированы с целью повышения и приближения эффективности системы квазиоптимальной обработки к эффективности системы оптимальной обработки. Решение данной задачи является целью настоящей статьи.

Структурные схемы систем обработки сигналов

Структурная схема системы квазиоптимальной обработки сигналов при непрерывном (линейном) сканировании антенного луча приведена на рис. 1, где ЗУ – запоминающее устройство, ВМ – вычислитель модуля. На вход системы с периодом повторения T поступают N цифровых отсчетов $U_j = x_j + \mathrm{i}y_j$ $(j = \overline{1, N})$ комплексной огибающей аддитивной смеси сигнала, пассивной помехи и собственного шума приемного устройства. Выходные отсчеты РФ m-го порядка запоминаются в ЗУ и затем в скользящем режиме поступают в МФ. Число каналов МФ определяется числом накапливаемых отсчетов, равным $N - m$ с учетом исключения из обработки m выходных отсчетов РФ, соответствующих его переход-

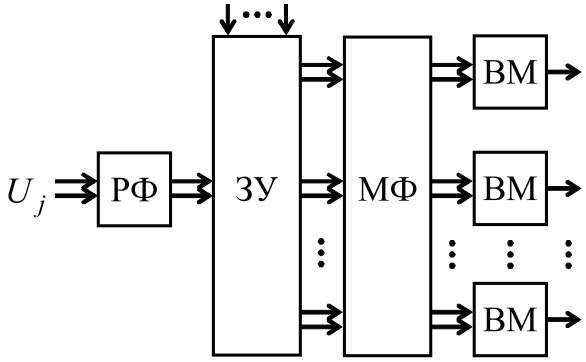

Рис. 1

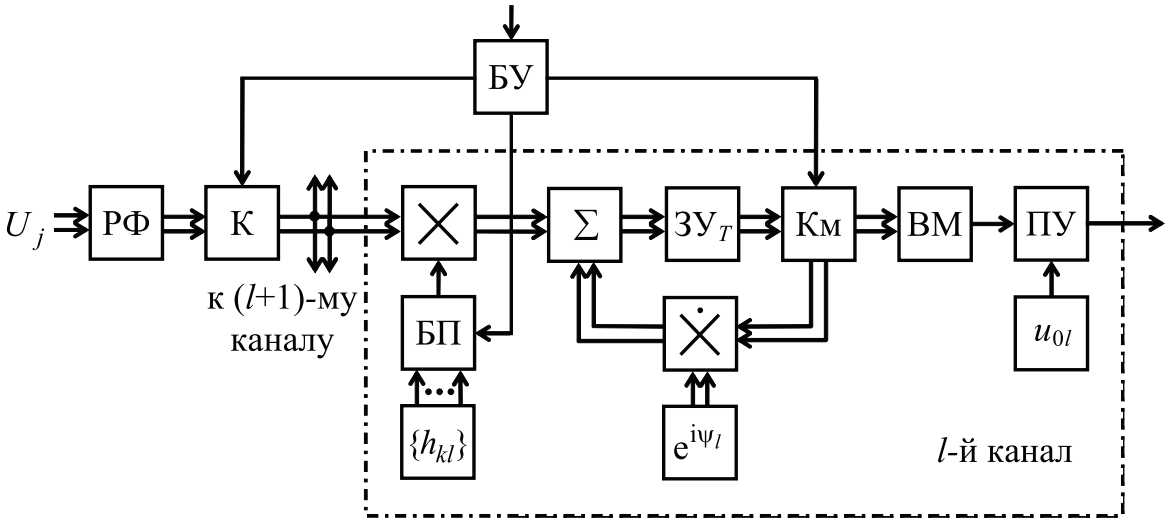

Рис. 2

ному режиму. Выходные величины ВМ далее сравниваются с пороговыми уровнями обнаружения, по результатам чего выносится решение о наличии или отсутствии сигнала от цели в соответствующем канале МФ.

Структурная схема системы квазиоптимальной обработки сигналов при дискретном сканировании антенного луча, реализуемом фазированными антенными решетками, приведена на рис. 2. После завершения переходных процессов в РФ [т. е. к $(m+1)$-му отсчету] по команде блока управления (БУ) замыкается ключ *К*. Выходные отсчеты РФ взвешиваются коэффициентами h_{kl}, поочередно коммутируемыми блоком переключения БП в каждом периоде повторения к входу умножителя $(\times)$ по командам БУ. Когерентное накопление в l-м канале МФ осуществляется с помощью коммутируемой задержанной обратной связи и комплексного умножения $(\dot{\times})$ задержанных отсчетов на величину $e^{i\psi_l}$ [4], где $\psi_l = 2\pi l/(N-m), l = \overline{1, N-m}$ После перемещения антенного луча в новое положение по команде БУ коммутатор (Км) переключает выход запоминающего на период повторения T устройства $ЗУ_T$ к вычислителю модуля ВМ, и происходит считывание накопленных сумм. По результатам сравнения в пороговом устройстве ПУ выходных величин ВМ с пороговым уровнем u_{0l} выносится решение об обнаружении сигнала от цели.

Критерии и методы оптимизации

Оптимизацию системы обработки проведем в два этапа: поочередно для РФ и МФ. РФ m-го порядка описывается вектор-столбцом весовых коэффициентов $\mathbf{g} = \{g_k\}^{\mathrm{T}}, \ k = \overline{0, m}$. В качестве критерия эффективности РФ используем нормированный коэффициент прохождения помехи через РФ.

$$\gamma = \mathbf{g}^{\mathrm{T}}(\mathbf{r}_{\mathrm{п}} + \lambda\mathbf{I})\mathbf{g}/\mathbf{g}^{\mathrm{T}}\mathbf{g} = (\mathbf{g}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}_{\mathrm{п}}\mathbf{g}/\mathbf{g}^{\mathrm{T}}\mathbf{g}) + \lambda, \quad (1)$$

где $\mathbf{r}_{\text{п}}$ – корреляционная матрица помехи, элементы которой $\rho^{\text{п}}_{jk} = \rho_{\text{п}}[(j-k)T]$ являются коэффициентами межпериодной корреляции; $\lambda = \sigma^2_{\text{ш}} / \sigma^2_{\text{п}}$ – отношение шум/помеха; $\mathbf{I} = [\delta_{jk}]$ – единичная матрица; δ_{jk} – символ Кронекера.

Оптимальный вектор $\mathbf{g}$ выбирается по критерию $\gamma \to \min\limits_{\mathbf{g}}$. Из экстремальных свойств характеристических (собственных) чисел матриц следует [5], что минимумом отношения Рэлея в выражении (1) является наименьшее собственное число $\alpha_{\min}$ матрицы $\mathbf{r}_{\text{п}}$, определяемое как наименьший корень характеристического уравнения $\det(\mathbf{r}_{\text{п}} - \alpha\mathbf{I}) = 0$. При этом $\gamma_{\min} = \alpha_{\min} + \lambda$, а оптимальный вектор $\mathbf{g}$ не зависит от λ и определяется как собственный вектор матрицы $\mathbf{r}_{\text{п}}$, соответствующий $\alpha_{\min}$, из матричного уравнения

$$(\mathbf{r}_{\text{п}} - \alpha_{\min}\mathbf{I})\mathbf{g} = 0. \qquad (2)$$

Конкретный вид весовых коэффициентов РФ g_k в аналитическом или численном виде определяется путем решения системы однородных линейных уравнений (2) при ограничивающем условии $g_0 = 1$ и с учетом свойства симметрии коэффициентов $g_k = (-1)^m g_{m-k}$. При найденных весовых коэффициентах g_k обработка в РФ может быть описана N-мерной матрицей режекции $\mathbf{d}$ верхней треугольной формы с элементами $d_{jk} = g_{k-j}$ при $k \le j + m$ и $d_{jk} = 0$ при $k > j + m$.

На втором этапе при известной матрице $\mathbf{d}$ оптимизируются параметры МФ. С этой целью необходимо использовать показатель эффективности системы обработки в целом. Обработка в МФ описывается вектор-столбцами $\mathbf{H}_l = \{h_{kl}\, e^{i(k-1)\psi_l}\}^{\text{т}}$, $k, l = \overline{1, N-m}$. Порядок МФ сокращается за счет обработки в РФ и равняется $N - m$. Число каналов МФ обычно выбирается также равным $N - m$, а среднее значение и ширина полосы пропускания каждого канала определяются соответственно величинами $\psi_l = 2\pi l/(N-m)$ и $\Delta\psi = 2\pi/(N-m)$.

Эффективность системы обработки в целом характеризуется выигрышами в отношении сигнал/помеха на выходах каналов МФ:

$$\mu_l(\theta) = \mathbf{h}_l^{\text{т}}[\mathbf{d}^{\text{т}}\mathbf{r}_{\text{с}l}(\theta)\mathbf{d}]\mathbf{h}_l \Big/ \mathbf{h}_l^{\text{т}}[\mathbf{d}^{\text{т}}\mathbf{r}_{\text{п}l}\mathbf{d}]\mathbf{h}_l, \quad l = \overline{1, N-m}, \qquad (3)$$

где θ – доплеровский сдвиг фазы сигнала за период повторения T; $\mathbf{h}_l = \{h_{kl}\}^{\text{т}}$ – $(N-m)$ – мерные вектор-столбцы, $k, l = \overline{1,\ N-m}$; $\mathbf{r}_{\text{с}l}(\theta)$, $\mathbf{r}_{\text{п}l}$ – учитывающие фазовые сдвиги МФ корреляционные матрицы сигнала и суммы пассивной помехи и шума, элементы которых соответственно

$$r^{\text{с}l}_{jk}(\theta) = \rho^{\text{с}}_{jk}\cos[(j-k)(\theta - \psi_l)],$$
$$r^{\text{п}l}_{jk} = \rho^{\text{п}}_{jk}\cos[(j-k)\psi_l] + \lambda\delta_{jk}.$$

Символ $[\,\cdot\,]$ в (3) означает операцию вычеркивания соответствующих переходному процессу в РФ m первых строк и столбцов матриц $\mathbf{d}^{\text{т}}\mathbf{r}\mathbf{d}$.

Полагая распределение величины θ равновероятным в интервале $\Delta\psi$ любого канала МФ и исключая ее неопределенность путем усреднения выражения (3), найдем

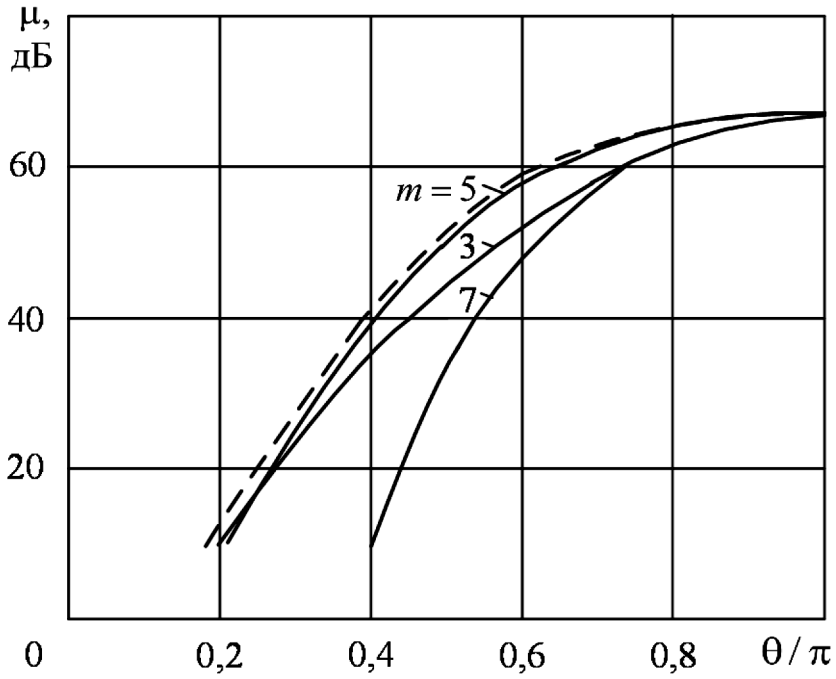

Рис. 3

$$\mu_l = \frac{1}{\Delta\psi}\int_{\psi_l-\Delta\psi/2}^{\psi_l+\Delta\psi/2}\mu_l(\theta)\,d\theta = \mathbf{h}_l^{\mathrm{T}}[\mathbf{d}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}_{\mathrm{c}}\mathbf{d}]\mathbf{h}_l \Big/ \mathbf{h}_l^{\mathrm{T}}[\mathbf{d}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}_{\mathrm{п}l}\mathbf{d}]\mathbf{h}_l,$$
$$l = \overline{1, N-m}, \qquad (4)$$

где элементы матрицы $\mathbf{r}_{\mathrm{c}}$ имеют вид

$$r_{jk}^{\mathrm{c}} = \rho_{jk}^{\mathrm{c}}\,\mathrm{sinc}[(j-k)\Delta\psi/2)].$$

Задача оптимизации векторов $\mathbf{h}_l$ соответствует критерию $\mu_l \to \max\limits_{\mathbf{h}_l}$ и решается методами теории матриц [5]. Выражение (4) представляет собой обобщенное отношение Рэлея, максимальные значения которого $\mu_{l\max}$ для каждого канала МФ определяются из характеристических уравнений

$$\det\{[\mathbf{d}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}_{\mathrm{c}}\mathbf{d}] - \mu_l[\mathbf{d}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}_{\mathrm{п}l}\mathbf{d}]\} = 0, \quad l = \overline{1, N-m},$$

и являются максимальными собственными значениями матриц $[\mathbf{d}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}_{\mathrm{п}l}\mathbf{d}]^{-1}[\mathbf{d}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}_{\mathrm{c}}\mathbf{d}]$. Собственные векторы этих матриц, соответствующие $\mu_{l\max}$ и определяемые из матричных уравнений

$$[\mathbf{d}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}_{\mathrm{п}l}\mathbf{d}]^{-1}[\mathbf{d}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}_{\mathrm{c}}\mathbf{d}]\,\mathbf{h}_l = \mu_{l\max}\mathbf{h}_l, \quad l = \overline{1, N-m},$$

представляют собой оптимальные векторы $\mathbf{h}_l$, $l = \overline{1, N-m}$. Данная процедура определения векторов $\mathbf{g}$ и $\mathbf{h}_l$ при $m = \mathrm{const}$ соответствует параметрической оптимизации системы обработки. Варьирование величины $m = \overline{0,\ N-1}$ приводит к структурной оптимизации системы.

Результаты оптимизации

Рассмотрим результаты оптимизации системы РФ-МФ для совместных флюктуаций сигнала ($\rho_{jk}^{\mathrm{c}} = 1$) и гауссовской корреляционной функции помехи:

$$\rho_{jk}^{\mathrm{п}} = \exp\{-[\pi\beta_{\mathrm{п}}(j-k)]^2/2{,}8\},$$

где $\beta_{\mathrm{п}} = \Delta f_{\mathrm{п}} T -$ нормированная ширина спектра помехи.

На рис. 3 при $N = 8$, $\lambda = 10^{-6}$ и $\beta_{\mathrm{п}} = 0{,}1$ приведены зависимости $\mu(\theta)$ при $\theta = \psi_l$ для систем оптимальной (штриховая кривая) и квазиоптимальной (сплошные кривые) обработки. Как видим, эффективность систем существенно зависит от доплеровского сдвига фазы сигнала θ, а также от порядка РФ m. Квазиоптимальные системы, построенные на базе РФ и МФ с оптимальными по критериям (1) и (4) весовыми коэффициентами, приближаются по эффективности к оптимальной системе по мере увеличения m и приближения значения θ к π. При $m = 5$ эффективность квазиоптимальной системы достигает предельной величины и наиболее приближается к эффективности оптимальной системы, проигрывая ей менее 1 дБ в большей части диапазона θ. Дальнейшее увеличение m вплоть до значения $N - 1 = 7$ приводит к сужению скоростной характеристики системы и значительным проигрышам.

Предложенная процедура оптимизации систем когерентной обработки сигналов на основе комбинации режекторного и многоканального фильтров позволяет путем оптимального выбора весовых коэффициентов фильтров в зависимости от корреляционных параметров пассивной помехи приблизиться к эффективности оптимальной системы обработки сигналов на фоне пассивных помех.

Литература

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман [и др.] ; под ред Я.Д. Ширмана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

2. Radar Handbook / ed. by M. I. Skolnik. – 3rd ed. – McGraw-Hill, 2008. – 1352 p.

3. Попов, Д. И. Адаптивная обработка сигналов на фоне пассивных помех / Д.И. Попов // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2000. – Т. 43. – № 1. – С. 59–68.

4. Устройство цифровой когерентной обработки сигналов: а. с. 633353 СССР, МПК6 G 01 S 7/292 / Д. И. Попов; заявл. 12.07.1976; опубл. 27.11.1998, Бюл. № 33. – 9 с.

5. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц / Ф.Р. Гантмахер. – М.: Наука, 1988. – 552 с.