

ОПТИМИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКАНАЛЬНОГО РЕЖЕКТОРНОГО ФИЛЬТРА

Кошелев В.И., Ву Туан Ань

Введение

Обнаружение сигналов движущихся целей, как правило, производится при наличии на входе приемника РЛС коррелированных пассивных помех, уровень которых значительно превышает как уровень полезного сигнала, так и уровень некоррелированного шума. Известные различные методы и устройства селекции движущихся целей (СДЦ) основаны на использовании различий спектрально-корреляционных характеристик выделяемых сигналов, отраженных от движущихся целей, и неподвижных или медленно перемещающихся источников пассивных помех. Системы СДЦ построенные по рассмотренному в [1] одноканальному алгоритму режекции, реализуются линейным РФ. Для увеличения степени режекции пассивных помех повышают порядок режекторного фильтра, что, однако, ухудшает условия для выделения полезного сигнала. После операции режекции пассивных помех для выделения полезных сигналов на фоне остатков режекции применяют многоканальную когерентную обработку в когерентном накопителе (КН). Для этого весь интервал возможного изменения доплеровского смещения частоты (фазы) сигнала разбивают на L подынтервалов (каналов) и используют обнаружитель в каждом частотном канале. В работе [2] предложена структура многоканального режекторного фильтра (МРФ) для СДЦ, а в [3] проведен его сравнительный анализ с одноканальным РФ по коэффициенту подавления помех. Однако в перечисленных работах не полностью исследованы зависимости усредненных энергетических характеристик МРФ от ширины спектра флуктуаций помехи и отношения помеха-шум и особенностей частотных характеристик отдельных каналов МРФ, отличающих МРФ от РФ и КН.

Цель работы состоит в оптимизации числа и расстановки каналов по критерию среднего коэффициента подавления помех в зависимости, как от параметров помех, так и шумов, а также в исследовании частотных характеристик МРФ, отличающих его как от одноканального РФ, так и от КН.

Используем для обнаружения сигнала, представляющего собой пачку импульсов с неизвестной доплеровской частотой, МРФ с матрицей обработки $\mathbf{W} = \{\mathbf{W}_1, \dots, \mathbf{W}_l, \dots, \mathbf{W}_L\}$, где \mathbf{W}_l специально сформированный вектор весовых коэффициентов фильтра в канале с номером $l, l \in [1, L]$. Условием формирования \mathbf{W}_l в каждом канале является совпадение центра фазовой настройки зоны режекции во всех каналах с межпериодным сдвигом фазы помехи φ_n .

Подробно проанализирован многоканальный режекторный фильтр (МРФ), с оптимизированными по критерию максимального коэффициента улучшения параметрами. Получены выражения, определяющие необходимое число каналов при заданной эффективности подавления помех. Проведен сравнительный анализ амплитудно-частотных характеристик различных структур фильтров. Выработаны рекомендации, касающиеся области применения МРФ.

Структура МРФ изображена на рис.1. Она включает L параллельных каналов режекции, отличающихся друг от друга значениями весовых коэффициентов.

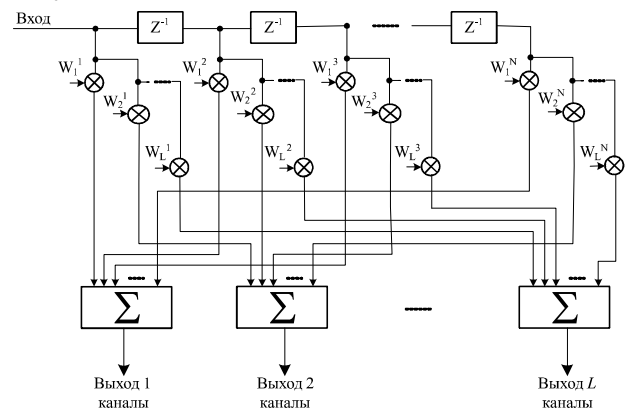


Рис.1. Структура МРФ.

Оптимизация МРФ подразумевает рациональный выбор весовых коэффициентов в каждом канале и общего числа каналов L . Коэффициент улучшения для произвольного l -го канала можно представить в виде

$$\mu_l = \frac{\mathbf{W}_l^H \mathbf{R}_c \mathbf{W}_l}{\mathbf{W}_l^H \mathbf{R}_{\text{шум}} \mathbf{W}_l}, \quad (1)$$

где $\mathbf{R}_c, \mathbf{R}_n$ – нормированные корреляционные матрицы сигнала и помех с элементами

$$\begin{aligned} R_c(j, k) &= \rho_c(j, k) \exp[i\varphi_c(j - k)] \\ \mathbf{R}_{\text{шум}} &= \mathbf{R}_n + \lambda \{\delta_{jk}\}, \\ R_n(j, k) &= \rho_n(j, k) \exp[i\varphi_n(j - k)], \end{aligned} \quad (2)$$

а $\lambda = \sigma_w^2 / \sigma_n^2$ – отношение дисперсии шума к дисперсии коррелированной помехи, $j, k \in [1, N]$; N – число импульсов в пачке; δ_{jk} – символ Кронекера; $\rho_c(j, k)$; $\rho_n(j, k)$ – коэффициенты корреляции сигнала и помехи.

Важно определить в какой мере форма частотной характеристики и полоса пропускания каждого канала МРФ зависят от ожидаемого в данном канале значения межпериодного сдвига фазы сигнала φ_{cl} . Очевидно, вели-

чина μ принимает различные значения в зависимости от межпериодного доплеровского сдвига фазы сигнала φ_c в пределах интервала изменения $\varphi_c=[0, 2\pi]$. При этом μ имеет четную симметрию относительно π . Из этого следует, что число каналов МРФ, а, следовательно, и различных векторов \mathbf{W}_l , должно быть равно L в диапазоне фаз $[0, \pi]$. При разбиении интервала распределения неизвестного параметра φ_c на равные по ширине каналы величина $\Delta\varphi = \pi/L$. Положения центров настройки каналов определяются из рекуррентного уравнения $\bar{\varphi}_{l+1} = \bar{\varphi}_l + \Delta\varphi$. Полагая φ_c равновероятной в пределах полосы любого доплеровского канала, определим максимум μ_l и соответствующий ему вектор \mathbf{W}_l в каждом канале по критерию:

$$\max(\tilde{\mu}_l) = \max_{\varphi_l} \frac{1}{\Delta\varphi} \int_{\varphi_l - \Delta\varphi/2}^{\varphi_l + \Delta\varphi/2} \mu_l d\varphi_c \quad (3)$$

для упрощения при реализации положим значение настройки l -го канала равным φ_l и с учетом (1) и (2) преобразуем (3) к виду

$$\max(\tilde{\mu}_l) = \max_{\mathbf{w}} \frac{\mathbf{w}_l^T \mathbf{r}^c \mathbf{w}}{\mathbf{w}_l^T \mathbf{r}^{mn} \mathbf{w}}, \quad (4)$$

где элементы корреляционных матриц сигнала \mathbf{r}^c и помехи \mathbf{r}^{mn} имеют вид:

$$r_{jk}^c = \rho_c(j, k) \text{sinc}[\Delta\varphi(j-k)/2] \cos[(\varphi_c - \varphi_n)(j-k)],$$

$$r_{jk}^{mn} = \rho_{mn}(j, k) \cos[\varphi_n(j-k)],$$

Решением (4) является собственный вектор матрицы $\mathbf{r}_{mn}^{-1} \mathbf{r}^c$, соответствующий её максимальному собственному значению.

Средний выигрыш МРФ относительно одноканального РФ выраженный в логарифмическом масштабе можно представить в виде:

$$\Delta\mu = \frac{10}{L\Delta\varphi} \sum_{l=1}^L \int_{\varphi_l - \Delta\varphi/2}^{\varphi_l + \Delta\varphi/2} (\lg(\mu_l) - \lg(\mu_{RF})) d\varphi_c,$$

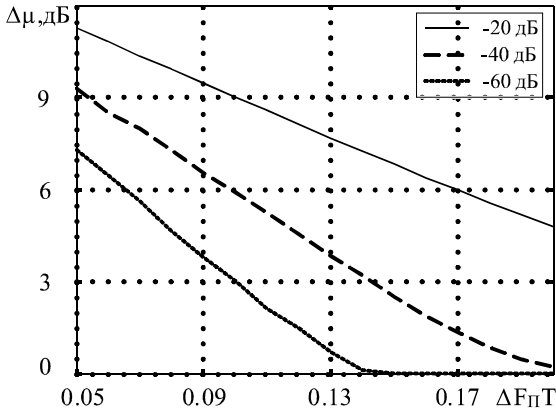


Рис .2. Зависимость выигрыша МРФ относительно одноканального РФ от ширины спектра помехи.

На рис.2 представлены зависимости выигрыша $\Delta\mu$ от ширины спектра помехи $\Delta F_n T$ в диапазоне $0.05 \div 0.2$ при различных уровнях шума $\lambda = -20, -40, -60$ дБ при $N = 10; \Delta F_c T = 0.015$. Из рис. 2 видно, что чем шире спектр флуктуаций помехи, тем меньше выигрыш. При увеличении отношения дисперсии шума к дисперсии коррелированной помехи увеличивается выигрыш МРФ относительно РФ благодаря лучшему качеству МРФ в накоплении сигнала. Из рис.2 видно, что максимальный выигрыш наблюдается при $\Delta F_n T = 0.05$, а минимальный - при $\Delta F_n T = 0.2$. При $\Delta F_n T > 0.15$ и малом ($\lambda = -60$ дБ) уровне шума МРФ и РФ имеют сравнимые характеристики, но с увеличением шума до $\lambda = -20$ дБ средний по всему диапазону значений φ_c выигрыш возрастает до ~ 4.8 дБ. Следовательно, целесообразность применения МРФ возрастает при сужении спектра флуктуаций помех и при возрастании уровня некоррелированных шумов.

При числе каналов $L \rightarrow \infty$, что равносильно $\Delta\varphi \rightarrow 0$ и точно известным доплеровским фазам сигнала и помехи, эффективность МРФ определяется как максимальное собственное число матрицы $\mathbf{r}_{mn}^{-1} \mathbf{r}^c$ [3] при $r_{jk}^c = \rho_c(j, k) \cos[(\varphi_c - \varphi_n)(j-k)]$.

Определим потери в l -м канале МРФ в логарифмическом масштабе

$$\Delta\tilde{\mu}_l = \frac{10}{\Delta\varphi} \int_{\varphi_l - \Delta\varphi/2}^{\varphi_l + \Delta\varphi/2} [\lg \mu_{opt} - \lg \mu_l] d\varphi_c.$$

Тогда средние потери МРФ по всем каналам будут:

$$\Delta\tilde{\mu} = \frac{10}{L\Delta\varphi} \sum_{l=1}^L \int_{\varphi_l - \Delta\varphi/2}^{\varphi_l + \Delta\varphi/2} [\lg \mu_{opt} - \lg \mu_l] d\varphi_c,$$

Зависимости средних потерь эффективности $\Delta\tilde{\mu}$ оптимального МРФ и КН от числа каналов L , приведена на рис.3 при различном уровне шума $\lambda = -30, -60$ дБ и ширине спектра флуктуаций сигнала $\Delta F_c T = 0.015$ и помехи $\Delta F_n T = 0.1$.

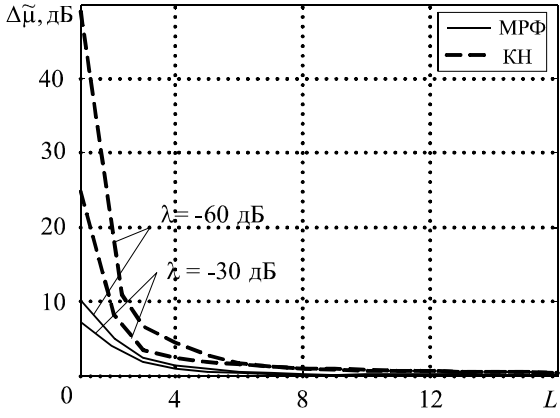
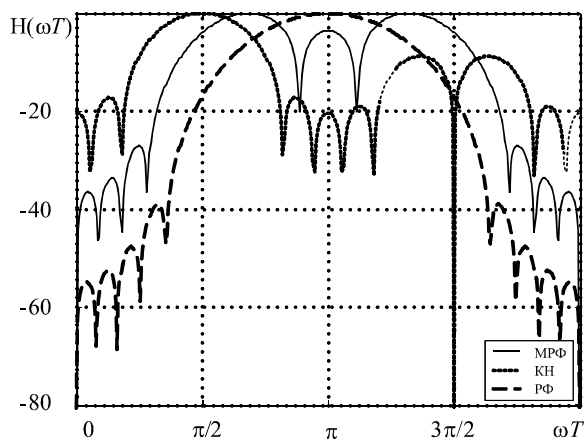
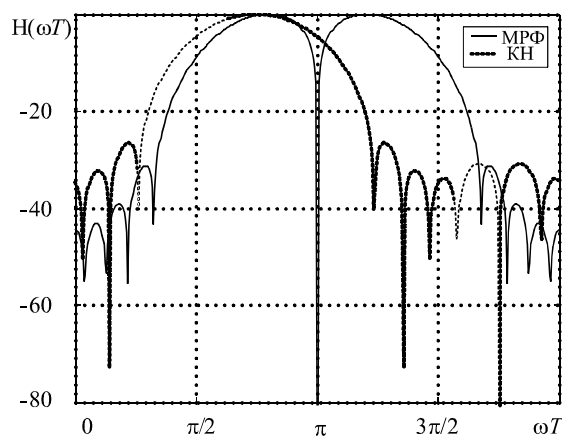


Рис .3. Зависимость средних потерь эффективности Δμ̃ оптимального МРФ в от числа каналов L..



а



б

Рис.4. Амплитудно-частотные характеристики МРФ и КН

Из рис.3 видно, что уже при $L \geq 12$ разница в эффективности МРФ и КН пренебрежимо мала. При $\lambda = -60$ дБ и числе каналов $L=16$, потери эффективности МРФ не превышают 0.1 дБ, а потери эффективности КН - 0.4 дБ. Причем при одинаковом с КН числе каналов МРФ имеет существенно меньшие потери эффективности. Так при $L=4$ и $\lambda = -60$ дБ потери эффективности МРФ составляют 1.6 дБ, а потери эффективности КН - 4.7 дБ.

На рис.4 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для МРФ и КН порядка $N = 10$, полученные при следующих параметрах: $\Delta F_n T = 0.1$, $\Delta F_c T = 0.015$. АЧХ на рис.4а соответствуют каналу, настроенному на $\varphi_l = 0.5\pi$, на рис.4б - $\varphi_l = 0.75\pi$. На этом же рисунке приведена АЧХ одноканального РФ. Из анализа рис.4 можно сделать вывод о том, что АЧХ каналов МРФ симметричны как относительно значения $\omega T = 0$, так и значения $\omega T = \pi$, что вдвое уменьшает число каналов МРФ по сравнению с КН, различающим знак доплеровской фазы сигнала. КН имеет в любом канале АЧХ симметричную относительно значений ожидаемой доплеровской фазы сигнала $\omega T = \varphi_c = \varphi_l$ и $\omega T = \varphi_c = \pi + \varphi_l$. Интересно отметить, что при нулевой (или скомпенсированной фазе) помехи все каналы МРФ имеют действительные весовые коэффициенты, что дополнительно упрощает его реализацию по сравнению с КН. Из рис.4 также видно, что АЧХ РФ имеет более узкую полосу пропускания при большей глубине зоны режекции по сравнению с МРФ и КН.

Вывод. Использование критерия среднего (по каналам) коэффициента подавления помех повышает эффективность применения МРФ для режекции узкополосных помех, особенно при наличии высокого уровня некоррелированной составляющей (шума) в спектре обрабатываемого сигнала. В остальных случаях предпочтительнее использование КН. По сравнению с КН МРФ обладает аппаратным выигрышем, связанным с сокращением общего числа каналов и использованием действительных весовых коэффициентов. АЧХ доплеровских каналов МРФ симметричны относительно центральной частоты спектра флуктуаций помехи, но имеют деформацию в области ожидаемого значения частоты сигнала, приводящую к повышению селективности сигнала на фоне помех по сравнению с одноканальным РФ.

Литература

1. Вопросы статистической теории радиолокации / П. А. Бакут, И. А. Большаков, Б.М. Герасимов и др.; под ред. Г. П. Тартаковского.- М.: Сов. Радио, 1963.- Т. 1.- 424 с.
2. Попов Д.И., Кошелев В.И. Синтез систем когерентно-весовой обработки сигналов на фоне коррелированных помех. Радиотехника и электроника.- 1984.- Т.24.- №4.- С. 789-792.
3. Кошелев В.И. Первенцев М.А. Синтез многоканального фильтра режекции помехи для систем выделения сигналов // Известия вузов. Радио-электроника.-1998.-Т.41-№2 с. 38-42.