

УДК 621.396.96

ДОПЛЕРОВСКИЕ ПРОЦЕССОРЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ (ЧАСТЬ 1)

Кошелев В.И.

Введение

Задачи, решаемые современными радиолокационными станциями (РЛС), системами и комплексами определяются их назначением и исключительно многообразны. Одной из подсистем, определяющих важнейшие характеристики радиолокационных станций (РЛС), является подсистема первичной обработки сигналов. Наиболее известный вариант ее построения базируется на доплеровской фильтрации в так называемом процессоре быстрого преобразования Фурье (БПФ) или доплеровском процессоре сигналов (ДПС). Несмотря на принципиальную простоту структуры используемого в ДПС алгоритма БПФ, оптимальный расчет его параметров зависит от решаемой задачи и представляет собой сложную и противоречивую задачу. Это связано с необходимостью рационального выбора критерия синтеза, оптимизацией в соответствии с ним размерности преобразования и предварительной весовой обработки принятой пачки импульсов, обеспечением необходимой точности оценки дальности и параметров движения целей.

Критерии синтеза ДПС. Целевые функции задач синтеза устройств первичной обработки сигналов и соответствующие им критерии синтеза позволяют оптимизировать весовые коэффициенты ДПС в отдельно взятом канале обработки или группе каналов [1]. Используются следующие критерии: частотные, энергетические [2, 3], вероятностные [4] и комбинированные технико-экономические [5]. Применение того или иного критерия определяется многими факторами: характером задачи, степенью априорной неопределенности параметров, ресурсами, степенью разработки соответствующего программного и аппаратного обеспечения вычислений, опытом и интуицией проектировщика. Частотный критерий используется в задачах синтеза цифровых фильтров при предъявлении требований к АЧХ и ФЧХ фильтров. Критерий минимума среднеквадратической ошибки фильтрации (СКО), минимизирующий разность результата фильтрации обрабатываемого процесса и ожидаемого сигнала. Данный критерий удобен при синтезе имитационных радиолокационных моделей [6, 7]. Энергетический критерий позволяет обеспечить максимум выигрыша в отношении сигнал-шум, шум-помеха, сигнал-помеха или сигнал-(помеха+шум). Модифицированный энергетический критерий, кроме того, учитывает дополнительные требования (ограничения), предъявляемые к форме частотной характеристики, потерям в отношении сигнал-шум и т.п. К вероятностным относят большую группу критериев, оперирующих характеристиками обнаружения и их функциональными преобразованиями. Поэтому их целесообразно использовать в задачах синтеза обнаружителей радиолокационных сигналов. Критерий минимакса [8], применяемый к одному из перечисленных критериев, удобен при синтезе неадаптивных

Представлены методы решения задач оптимизации структуры и параметров доплеровских процессоров, используемых в устройствах первичной обработки РЛС для решения задач обнаружения параметров радиолокационных сигналов. Задачи измерения скорости, ускорения и дальности будут рассмотрены во второй части статьи.

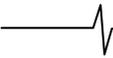
систем и систем с частичной адаптацией. Комбинированный технико-экономический критерий объединяет любой из перечисленных критериев с критерием, ограничивающим стоимость или сложность аппаратно-программной реализации. Решению задач оптимизации с использованием одного из перечисленных критериев посвящены многочисленные работы различных авторов, например [9-11]. Однако обоснованию выбора того или иного критерия синтеза в известной литературе уделено недостаточное внимание.

Процедура оптимизации существенно усложняется при априорной неопределенности параметров сигналов и помех и необходимости многоканального построения ДПС. Как правило, наряду с обнаружением радиолокационного сигнала требуется разрешение сигналов по дальности, скорости и в некоторых случаях по ускорению. Число каналов, а также ширина и настройка скоростных (доплеровских) каналов являются структурными параметрами многоканальных ДПС [12-14]. В отличие от параметрической оптимизации многоканальных ДПС с фиксированной структурой структурная оптимизация представляет собой более сложную задачу.

Синтез структуры ДПС. При гауссовской статистике аддитивной смеси сигнала, узкополосной помехи и шума, плотность вероятности:

$$W(\mathbf{x}) = (4\pi)^{-N} \det^{-1} \mathbf{R} \exp\{-\mathbf{x}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x} / 2\},$$

где \mathbf{x} – выборочный N -мерный вектор процесса, \mathbf{R} и \mathbf{R}^{-1} – прямая и обратная матрицы обрабатываемого процесса. Для модели белого гауссовского шума $\mathbf{R}\mathbf{x}\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{E}$ – единичная матрица. Правило решения строится на вычислении отношения правдоподобия (ОП) $OP(\mathbf{x}) = W_1(\mathbf{x} | H_1) / W_0(\mathbf{x} | H_0)$, где $W_1(\bullet)$ и $W_0(\bullet)$ условные плотности вероятностей по гипотезе H_1 и H_0 соответственно. Структура оптимальной по критерию максимума отношения правдоподобия (МОП) обработки определяется после операции логарифмирования ОП минимальной достаточной статистикой вида: $\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}$. Причем ядро квадратичной формы $\mathbf{Q} = \mathbf{R}_s^{-1} - \mathbf{R}_{scr}^{-1}$ является N -мерной матрицей обработки, где $\mathbf{R}_{scr} = \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_{cm}$, $\mathbf{R}_{cm} = \mathbf{R}_c + \lambda \mathbf{E}$ – соответственно корреляционные матрицы смеси сигнала, помехи и шума, а также помехи и шума. Ввиду априорной неопределенности энергетических соотношений сигнала, помехи и шума сложно определить матрицу \mathbf{R}_{scr}^{-1} . Поэтому для получения практических алгоритмов обработки требуется введение ряда упрощающих предположений, с учетом которых



минимально достаточная статистика приводится к виду: $\mathbf{x}^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{s}$, где $\mathbf{s} = \{s e^{-i\varphi}\}$ – вектор ожидаемого сигнала.

На практике параметр φ априори неизвестен, поэтому обнаружение проводится в многоканальном устройстве, параметры которого оптимизируются в подынтервалах возможного изменения φ , что достигается усреднением в доплеровских скоростных подынтервалах. В результате алгоритм и структура устройства обработки видоизменяются и в качестве многоканального доплеровского фильтра используется процессор дискретного (быстрого) преобразования Фурье. На рис. 1 представлена соответствующая структурная схема алгоритма ДПС [14].

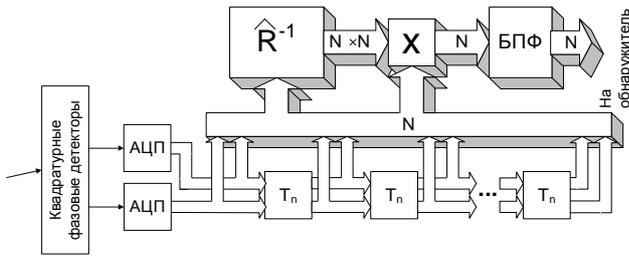


Рис. 1. Структурная схема ДПС при неизвестных параметрах обнаруживаемого сигнала

При числе временных выборок, равном N , данный фильтр эквивалентен гребенке из N доплеровских фильтров, частотная расстройка между которыми составляет $\Delta F_d = 1/NT$, где T – период повторения импульсов. Структура многоканального фильтра включает блок памяти для хранения выборок входного сигнала, набор умножителей, реализующих для каждого частотного канала алгоритм взвешивания во временной области, процессор БПФ.

При более сильном допущении – разложении ядра минимальной достаточной статистики во внешнее произведение векторов

$$\mathbf{Q} = \mathbf{R}_s^{-1} - \mathbf{R}_{scr}^{-1} = \mathbf{w}\mathbf{w}^H,$$

где \mathbf{w} – вектор обработки, в операцию линейной фильтрации $\mathbf{x}^H \mathbf{w}$ входной последовательности \mathbf{x} с оптимизированным по тому или иному критерию вектором обработки \mathbf{w} . Такое допущение позволяет исключить из структуры сложный матричный обесблуживающий фильтр, а операцию декорреляции обрабатываемой выборки выполнить непосредственно в каналах ДПС с учетом взаимного расположения и формы спектров сигнала и помехи, а также уровня шума.

Учет многоканальности ДПС на характеристики обнаружения. Анализ влияния структурных параметров многоканальности на энергетические и вероятностные характеристики ДФ показывает, что в результате уменьшения отношения сигнал-(помеха+шум) с увеличением дальности уровень некоррелированного шума относительно сигнала и пассивной помехи резко возрастает [15]. Например, на дистанции 150 км уменьшение составляет не менее 10 порядков. Это обстоятельство приводит к важному выводу о том, что оптимизация ДПС должна производиться отдельно, по крайней мере, для каждой группы смежных дальностных каналов.

При оптимизации обработки в дальностных, скоростных каналах и каналах ускорения обычно игнорируется тот факт, что общее число каналов влияет на вероятностные характеристики и пороговые сигналы ДПС. Между тем увеличение числа каналов от одного до E требует при сохранении заданного для РЛС

в целом уровня ложных тревог F повышения порогов обнаружения во всех каналах [16]. Это приводит к повышению порогового сигнала, относительно одноканального обнаружителя на величину $\Delta\varphi = -\ln E / \ln(FD)$. Аналогично рассчитываются пороги при изменении числа каналов от E до E' . Равенство пороговых сигналов на входе при различном числе каналов может быть достигнуто соответствующим изменением коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха+шум) и определяется формулой: $\mu_E / \mu_{E'} = \ln(FDE) / \ln(F'DE')$. Вероятность правильного обнаружения при этом уменьшается с увеличением дальности (уровня шума) в тем большей степени, чем меньше вероятность F и чем меньше отношение сигнал-помеха на входе. При этом влияние второго фактора сильнее. Так, увеличение числа каналов обнаружения на декаду приводит к повышению требований к энергетическим показателям на выходе ДПС на 1,8...3,5 дБ.

Рассмотрим особенности синтеза многоканального обнаружителя по критерию максимума усредненной по доплеровским каналам вероятности правильного обнаружения сигнала. Этот критерий, предложенный еще в [16], позволяет обеспечить наилучшие характеристики обнаружения сигнала на фоне помех при учете параметров последних в среднем по всем частотным каналам обнаружения и допускает использование различных весовых окон в каналах дальности.

При известной или априорно заданной вероятности P_i появления сигнала в i -ом доплеровском канале и общей весовой обработке на входе процессора БПФ средняя вероятность правильного обнаружения по всем частотным каналам:

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^N D_i P_i,$$

где D_i – вероятность правильного обнаружения цели в i -ом канале; N – число каналов. При этом, естественно, не нарушается условие несовместимости событий D_i .

Положим, что вероятность ложной тревоги F и величина порогового сигнала Q являются постоянными величинами. Причем пороговый сигнал Q определяется по методике предыдущего раздела и является одинаковым для различных доплеровских каналов (каналов скорости) и разным для различных каналов дальности. Тогда вероятность правильного обнаружения в каждом доплеровском канале при гауссовской статистике сигнала, шума и помех является функцией от энергетического критерия – коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха+шум)

$$D_i = D_i(\mu) = F^{1/(1+Q\mu)}.$$

Как отмечалось выше, параметр μ в сильной степени зависит от доплеровского сдвига фазы сигнала φ_s за период повторения импульсов T . Значение φ_s , определяемое в радиолокации радиальной скоростью движения цели относительно РЛС, как правило, неизвестно. Поэтому в соответствии с данным критерием усредняем величину D_i в каждом i -ом канале по всем возможным значениям φ_s в диапазоне $\Delta\psi_i$. В этом случае выражение принимает вид [17]:

$$D_i(\mu) = \frac{1}{\Delta\psi_i} \int_{\Delta\psi_i} F^{1/(1+Q\mu(\varphi_s))} W(\varphi_s) d\varphi_s = \frac{1}{\Delta\psi_i} \int_{\Delta\psi_i} \exp\left[\frac{\ln F}{1+Q\mu(\varphi_s)}\right] \cdot W_i(\varphi_s) d\varphi_s,$$

где $W_i(\varphi_s)$ – плотность вероятности распределения величины φ_s внутри канала, а параметр μ определяется:

$$\mu = \left(\frac{P_s}{P_{cn}} \right)_{\text{ВЫХ}} / \left(\frac{P_s}{P_{cn}} \right)_{\text{ВХ}} =$$

$$= \left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_{cn}^2} \right)_{\text{ВЫХ}} / \left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_{cn}^2} \right)_{\text{ВХ}},$$

где $P_s = \sigma_s^2$, $P_{cn} = \sigma_{cn}^2$ – соответственно мощность сигнала и смеси помеха+шум. Мощность процесса на выходе фильтра с вектором обработки \mathbf{w} определяется как

$$P_{\text{ВЫХ}} = \sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = \left| \mathbf{u}^{T*} \mathbf{w} \right|^2 = \sigma_{\text{ВХ}}^2 \mathbf{w}^{T*} \mathbf{R} \mathbf{w},$$

где \mathbf{R} – корреляционная матрица процесса (сигнала или помехи+шум). Учитывая, что $\mathbf{R}_{cn} = (\mathbf{R}_c + \lambda \mathbf{E}) / (1 + \lambda)$, окончательное выражение для целевой функции средней вероятности правильного обнаружения при равновероятном распределении доплеровской фазы отраженного сигнала можно записать как:

$$\bar{D}(\mathbf{w}) = \frac{1}{N \Delta \psi} \sum_{i=1}^N P_i \int_{\psi_i - \frac{\Delta \psi_i}{2}}^{\psi_i + \frac{\Delta \psi_i}{2}} \exp \left[\frac{\ln F \cdot \mathbf{w}^H (\mathbf{R}_c + \lambda \mathbf{E}) \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H (\mathbf{R}_c + \lambda \mathbf{E}) \mathbf{w} + Q \mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}} \right] d\varphi \rightarrow \max_{\mathbf{w}},$$

где $\Delta \psi_i$ – ширина полосы пропускания i -го канала. Для адаптивных к корреляционным свойствам помехи систем матрица \mathbf{R}_c заменяется на выборочную матрицу [18-19]. При изменении корреляционных параметров помехи и отсутствии адаптации в данное выражение вводится дополнительная операция усреднения по неизвестным параметрам, что лишь модифицирует рассмотренный метод оптимизации весовой функции. Как показывают расчеты, усреднение в каналах скорости приводит к существенному изменению вида модуля вектора обработки, приближая его к известным весовым функциям. Среди последних наибольшей гибкостью обладают параметрические весовые функции, частотные свойства которых зависят от некоторого параметра. Варьируя этот параметр, удается при использовании вероятностного критерия обеспечивать оптимизацию обработки сигнала на фоне помех, связывая его значение с формой спектра помехи и что особенно важно со спектральным динамическим диапазоном [3, 20].

Выводы

Таким образом, используя различные критерии синтеза, можно решать задачи проектирования многоканальных фильтров когерентно-весовой обработки, оптимизируя при этом такие параметры доплеровского процессора сигналов как число скоростных каналов, их настройка, а также параметры формы амплитудно-частотных (амплитудно-скоростных) характеристик каналов. Во второй части работы будут рассмотрены вопросы синтеза структуры и параметров доплеровского процессора при обработке неэквидистантных последовательностей импульсных сигналов, алгоритмы и структуры ДПС оценки скорости и дальности, также базирующиеся на работах автора.

Литература

1. Рамплер Д. Подавление мешающих отражений при помощи комплексной весовой обработки последовательности когерентных импульсов // Зарубежная радиоэлектроника.– 1967.– №11.– С.74-94.
2. Кошелев В.И. Синтез систем когерентно-весовой обработки при априорной неопределенности // Приборы и устройства электронных систем управления системами: Межвузовский сб. научн. тр.– Ленинград.– вып. 143.– 1980.– С. 95-99.
3. Попов Д.И., Кошелев В.И. Синтез систем когерентно-весовой об-

- работки сигналов на фоне коррелированных помех // Радиотехника и электроника.– 1984.– Т. 24.– №4.– С. 789-792.
4. Кошелев В.И., Горкин В.Н. Синтез фильтров многоканальной доплеровской обработки сигналов // Известия вузов. Радиоэлектроника.– 2003.– Т. 46.– №1.– С. 63-68.
5. Бакулев П.А., Попов Д.И., Кошелев В.И. Технико-экономическая оптимизация цифровых систем обработки сигналов // Радиотехника.– 1984.– Т. 40.– №3.– С. 25-27.
6. Кошелев В.И. Оценка качества моделей случайных процессов при короткой выборке // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Выпуск 8.- Рязань, 2001.- С. 31-35.
7. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Оптимизация АР-моделей процессов с полимодальным спектром // Изв. вузов. Радиоэлектроника.– 1996.– Т. 39.– №5.– С. 43-48.
8. Кошелев В.И. Синтез систем цифровой фильтрации по принципу минимакса // Эффективность применения цифровых устройств в радиолокации: Межвузовский сб. научн. тр.– М.: МАИ, 1982.– С. 17-22.
9. Кошелев В.И. Рекуррентные алгоритмы обработки случайных сигналов при заданной структуре корреляционных матриц помехи // Радиотехника и электроника.– 1990.– Т. 35, №11.– С.2312-2317.
10. Д.И.Попов Синтез обнаружителей-измерителей доплеровских сигналов.– Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника.– т.42– №2, 1999.– с.11-17.
11. Тонконогов Ю.М. Поиск движущегося сигнала в многоканальной системе // Изв. ВУЗов серия «Радиоэлектроника», 1982, №7, с.3-7.
12. Кошелев В.И. Синтез многоканального фильтра обработки сигналов с априорно неизвестной частотой // Радиоэлектронные устройства: Межвузовский сб. научн. тр.– Рязань: РРТИ, 1980.– С. 132-137.
13. Бакулев П.А., Кошелев В.И., Гладких В.В. Оптимальное многоканальное обнаружение сигналов на фоне коррелированных помех // Изв. вузов. Радиоэлектроника.– 1987.– Т. 30.– № 4.– С. 4-7.
14. Кошелев В.И. Адаптивная обработка радиолокационных сигналов на базе процессора БПФ // Цифровая обработка сигналов, 2001 г., №4. С.12-17.
15. Кошелев В.И. Параметры многоканального обнаружителя доплеровских сигналов. // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Выпуск 8.- Рязань, 2001.- С. 18-20.
16. Вайнштейн Л.А., Зубаков В.Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех.– М.: Сов. Радио, 1960.– 448 с.
17. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Выбор числа каналов обнаружителя маневрирующих целей. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Выпуск 18.– Рязань, 2006.– С. 26-29.
18. Бакулев П.А., Попов Д.И., Кошелев В.И. Синтез и анализ систем междупериодной обработки сигналов при априорной неопределенности параметров помех // Проблемы радиолокации протяженных объектов: Межвузовский сб. научн. тр.– Свердловск: УПИ, 1982.– Ч. 2.– С. 65.
19. Устройство подавления многокомпонентных помех / Рязанская государственная радиотехническая академия; авт. изобретения Кошелев В.И., Андреев В.Г.: Патент на изобретение №2064190, МКИ5 G01S 7/36, по з-ке № 93-031276, приор. 15.06.93. Заяв. 20.07.96. Опубл. в Б.И. №20, 1996.
20. Кошелев В.И. Оценка спектрального динамического диапазона в задачах цифровой обработки сигналов // Цифровая обработка сигналов №4.– 2003.– С. 8-9.