

## СИНТЕЗ ФИЛЬТРА ДЛЯ СЖАТИЯ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА

Латышев В.В., Никерова О.А.

Московский государственный авиационный институт  
(технически университет), Россия, E-mail: [lvv@mai.ru](mailto:lvv@mai.ru)

Современные радиотехнические средства активно используют широкополосные сигналы, обладающие высокой помехоустойчивостью: ЛЧМ-сигналы, коды Баркера, М-последовательности и т.п. Для точного определения времени их прихода используют сжатие сигналов. Обычно эту операцию выполняет согласованный фильтр, который играет двойственную роль. С одной стороны, обеспечивает максимальное отношение сигнал/шум для облегчения работы устройства обнаружения, с другой - сжатие широкополосных сигналов для создания условий высокоточной оценки момента прихода сигнала. Кроме того, от степени сжатия зависит и такой важный параметр радиолокации, как разрешающая способность. Поэтому операция сжатия является крайне необходимой. Если для слабых сигналов на первом месте стоит проблема обнаружения, то при улучшении отношения сигнал/шум на первое место выходят разрешающая способность и точность оценивания момента прихода. С учетом этого замечания использование при обработке сигналов исключительно согласованной фильтрации может быть подвергнуто критике. Действительно со спектральной точки зрения при прочих равных условиях, чем шире спектр сигнала, тем точнее может быть определено его положение на оси времени. В то же время при прохождении через согласованный фильтр спектр сужается. Теоретически это должно привести к ухудшению точности по сравнению с априорными возможностями. Разрешающая способность так же зависит от ширины спектра. Чем шире спектр сигнала, тем лучшая разрешающая способность может быть достигнута. Отсюда возникает идея совместить согласованную фильтрацию с предварительным расширением спектра сигнала при корреляционной обработке.

Заметим, что попытки увеличения степени сжатия по сравнению со случаем согласованной фильтрации известны. Как правило, они основаны на параметрических моделях сигналов и связаны с большим объемом вычислений, трудно реализуемым в реальном масштабе времени. Кроме того, эффективность параметрических методов существенно зависит от особенностей спектрального состава сигнала. Хороший обзор подобных методов представлен в [1]. В отличие от параметрического подхода в данной работе предлагается линейный метод дополнительного сжатия сигналов по сравнению с возможностями согласованного фильтра, который легко реализуется в реальном масштабе времени.

В качестве примеров операций, приводящих к расширению спектра сигналов, можно предложить дифференцирование, инверсную фильтрацию [2], аналитическое продолжение спектра [3]. Возможны и различные эвристические процедуры спектрального расширения. Однако авторы отдают себе отчет, что расширение спектра - это деликатная операция. Сигнал наблюдается в смеси с шумом и расширение спектра наблюдаемой реализации одновременно является источником усиления шумов в соответствующих спектральных областях. Для контроля уровня дополнительно вносимых шумов необходимо подобрать соответствующий критерий. Он должен обеспечивать компромисс между степенью расширения спектра сигнала и возможностью сохранения высокой точности оценки времени прихода сигнала. Поскольку потенциальная точность оценки момента прихода импульса зависит от количества фишеровской информации о задержке сигнала, это количество и предлагается использовать в качестве указанного критерия для синтеза расширяющего спектр фильтра (РСФ). При расширении спектра сигнала будем минимизировать потери фишеровской информации о  $\tau$ .

Для иллюстрации рассмотрим аддитивную модель приема известного сигнала  $s(t - \tau)$  в белом гауссовском шуме  $n(t)$  с двусторонней спектральной плотностью мощности  $N_0/2$ :

$$x(t) = s(t - \tau) + n(t). \quad (1)$$

Сигнал имеет конечную длительность  $T$ . Незвестным является время прихода  $\tau$ , которое требуется определить. В качестве сигнала возьмем из [4] импульс вида

$$s(t) = \begin{cases} 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right), & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t < 0, \text{ или } t > T. \end{cases} \quad (2)$$

В [4] на основе метода интегральных уравнений показано, что фишеровская информация полностью сохраняется, если наблюдаемый сигнал разложить на две ортонормированные составляющие:

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin \frac{2\pi}{T}t, \quad 0 \leq t \leq T, \quad \varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos \frac{2\pi}{T}t, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (3)$$

Если использовать фильтр с импульсной характеристикой, являющейся инверсией во времени суммы этих двух функций, то выходной сигнал такого фильтра будет иметь более широкий спектр по сравнению со входным и, в тоже время, его запаздывание потенциально может быть оценено с той же

точностью, что и исходного [4]. Для иллюстрации получаемого эффекта на рис.1 показаны результаты согласованной фильтрации исходного (а) и преобразованного с расширением спектра (б) сигналов.

Видно сжатие примерно в 1,5 раза по сравнению с классическим согласованным фильтром. Анализ шума показывает, что эффект сжатия сигнала сопровождается потерями 1,4 дБ в отношении сигнал/шум. Даже для обнаружения сигнала эти потери не являются катастрофическими, но в данном случае особо подчеркнем, что в результате дополнительных преобразований количество фишеровской информации о  $\mathcal{T}$  не изменяется, что теоретически позволяет оценивать задержку сигнала (б) с той же точностью, что и исходного.

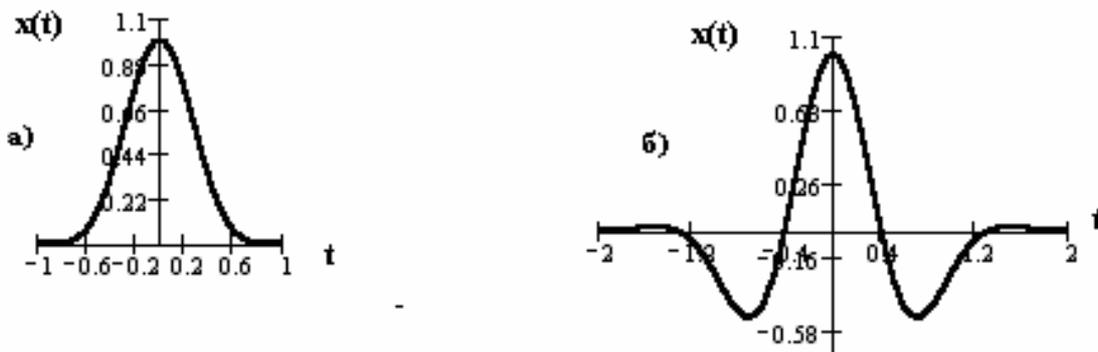


Рис.1

На следующем рис.2 показаны аналогичные результаты для видеоимпульса прямоугольной формы. Случай (а) соответствует выходному сигналу классического согласованного фильтра, а случай (б) – с предварительной обработкой в РСФ.

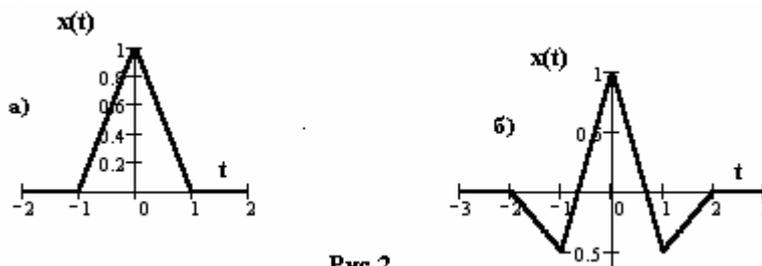


Рис.2

Эффект сжатия и потери в отношении сигнал/шум характеризуются примерно теми же величинами, что и для предыдущего сигнала. Заметим, что одновременно со сжатием в выходном сигнале фильтра наблюдаются отрицательные боковые лепестки вокруг центрального, что можно рассматривать как дополнительный положительный эффект.

Конечно, предыдущие два сигнала нельзя рассматривать как сложные. Они представлены лишь как иллюстрация свойств предлагаемой процедуры линейного сжатия сигналов. Поэтому на следующих двух рисунках показаны результаты ее применения к сигналам, которые уже можно отнести к классу сложных. Это видеосигналы, построенные в соответствии с трехпозиционным кодом Баркера (рис.3), и в соответствии с 7-позиционной М-последовательностью (рис.4). Как и выше, случаи (а) относятся к выходным сигналам классического согласованного фильтра, а случаи (б) – с дополнительной обработкой РСФ.

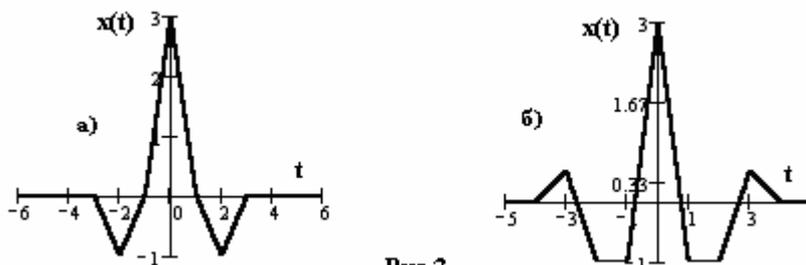


Рис.3

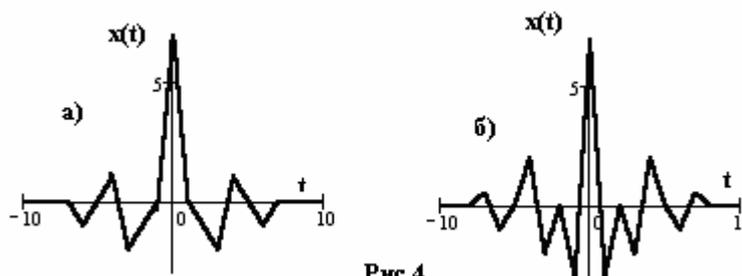


Рис.4

Снова наблюдается эффект сжатия, но помимо потерь в соотношении сигнал/шум 1,4--1,5 дБ, либо появляются дополнительные боковые лепестки (рис.3.б), либо их уровень несколько увеличивается (рис.4.б). Это является некоторым недостатком рассматриваемого подхода к сжатию сигналов. Но нельзя утверждать, что он присущ этому подходу. Первые два случая являются контрпримерами. Рассмотренные сигналы взяты лишь как иллюстрации возникающих эффектов. Видно, что эффект сжатия за счет некоторого ухудшения сигнал/шум является устойчивым свойством предложенного метода обработки сигналов, тогда как появление или увеличение положительных боковых лепестков зависит от конкретного вида сигналов. Это нуждается в дополнительном исследовании.

Заметим, что применение РСФ можно совместить с известными методами подавления боковых лепестков. Кроме того, аппаратная реализация рассмотренного подхода не требует введения РСФ в виде отдельного блока. Он может быть совмещен с согласованным фильтром. Частотная характеристика такого совмещенного блока должна быть равна произведению частотных характеристик РСФ и согласованного фильтра.

#### Литература

1. Alle-Jan van der Veen, Ed F. Deprettere, A. Lee Swindlehurst. Subspace-Based Signal Analysis Using Singular Value Decomposition. – Proc. IEEE, v.81, №9, 1993, p.1277-1308.
2. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов. – М.: Советское радио, 1979.
3. Rino C. I. Band-unlimited image restoration by linear mean-square estimation. – J. Opt. Soc. Am., 1969, v.59, №5, p.547-553.
4. Латышев В. В.// Радиотехника и электроника, 2004, т.49, №9, с.1084-1092.

