

УДК 681.883

В. А. Сапрыкин

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*

М. Б. Гладких

ЗАО «ТЕЛПРОС»

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ БЫСТРОДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

ГЧМ сигналы, корреляционный отклик, шум

Современная техническая гидроакустика развивается в направлении формирования процедур обработки сигналов эффективно функционирующих в условиях обнаружения высокоскоростных и быстро маневрирующих подводных живых организмов. Однако теоретические исследования в этом направлении столкнулись с определенными трудностями фундаментального плана, затрагивающих базовые основы методов обработки.

Всякое физическое явление G , описывающее передачу, рассеивание от сцены и прием акустической энергии имеет симметричную природу (обладает групповой структурой G). В этом случае изучение физического явления связывают с изучением представлений группы G . Это означает, что группа представляется в пространстве отображений (операторных функций на группе) T согласно правилу:

$$T(g_1 g_2) = T(g_1) T(g_2) \text{ для всех } g_1, g_2 \in G \text{ и } T(e) = I_0,$$

где e – нейтральный элемент группы; I_0 – тождественное отображение (действие).

Как правило, в гидролокационных системах при корреляционной обработке учитываются дальность и радиальная скорость цели, которые описываются с помощью преобразований времени $t: t \rightarrow \alpha t + \tau$, где α – доплеровский параметр, τ – параметр задержки. Вместо приближенного доплеровского эффекта, описываемого сдвигом частот спектральной функции сигнала используется точное описание эффекта Доплера. Необходимость такого описания преобразования сигнала объясняется большим числом Маха $2v/c$, где v – относительная скорость сближения

цели, c – скорость звука в воде. При таком подходе вместо известной функции неопределенности (ФН) Вудворда [1] применяют широкополосную функцию неопределенности [1–5], которую определяют соотношением:

$$\Psi(t, \alpha) = \sqrt{\alpha} \cdot \int_0^{\infty} \psi(\alpha \cdot f) \cdot \overline{S(f)} \exp(i2\pi ft) \frac{df}{f},$$

где $Y(f)$ – спектральная функция Фурье принимаемой реализации, $S(f)$ – спектральная функция Фурье сигнала.

Решение поставленной задачи формирования процедуры согласованной фильтрации возможно при условии введения дополнительного числового параметра β , отвечающего за линейные изменения доплеровского эффекта, что достигается использованием специальной группы, которую называют инверсной группой преобразований времени.

Элемент группы инверсных преобразований времени IB определяется правилом:

$$g(\alpha, \beta)t \rightarrow \frac{\alpha t}{-\beta t + 1}$$

с обратным элементом $g(\alpha, \beta)^{-1}t = \frac{t/\alpha}{\beta t/\alpha + 1}$ и представляется в виде произведения матриц

$$\begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\beta & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ -\beta & 1 \end{pmatrix} \text{ и } \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ -\beta & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\alpha & 0 \\ \beta/\alpha & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Важно заметить, что группа матриц $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\beta & 1 \end{pmatrix}$ образует коммутативную инверсную подгруппу I , а группа матриц $\begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ образует коммутативную подгруппу доплеровских преобразований. Напротив группа IB является некоммутативной подгруппой.

Подгруппа I является нормальным делителем группы IB , поэтому множество IB/I – факторгруппа.

Заметим, что факторгруппа IB/I изоморфна мультипликативной подгруппе B . Отсюда следует, что задачу исследования IB/I можно свести к изучению подгруппы B . Смежные классы определяются элементами $g(\alpha, 0)$ – доплеровскими преобразованиями. Каждое такое преобразование дает свой смежный класс $B = \{g : g(\alpha, \beta), \forall \beta \in R^1\}$.

Группа IB не инвариантна относительно сдвига. Это означает, что при обработке сигналов с IB симметрией необходимо иметь информа-

циво о параметре задержки τ или сформировать перебор по данному параметру.

Таким образом введение инверсной группы преобразования времени позволило записать переменный доплеровский эффект при условии определенности по параметру задержки (приемнику известна информация о задержке сигнала) в виде:

$$s(g^{-1}t) = s\left(\frac{t/\alpha}{\frac{\beta}{\alpha} + 1}\right).$$

Аналогом преобразования Фурье для группы I является инверсное преобразование Фурье или просто инверсное преобразование:

$$\tilde{S}(s) = I\{s(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(i2\pi s t / t) \frac{dt}{t^2}, \quad (1)$$

где $I\{\dots\}$ – инверсное преобразование.

Запишем обратное инверсное преобразование $I^{-1}\{\dots\}$

$$I^{-1}\{\tilde{S}(s)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}(s) \exp(-i2\pi s t / t) ds = s(t), \quad (2)$$

где s – инверсная частота.

Описание инверсного преобразования Фурье позволяет определить аналог широкополосной функции неопределенности в области инверсных частот, в соответствии с выражением [7, 8]:

$$\bar{\Psi}(\alpha, \beta) = \left| \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}\left(\frac{s}{\alpha}\right) \overline{\tilde{S}(s)} \exp\left(-i2\pi s \frac{1}{\beta}\right) ds \right|^2. \quad (3)$$

Соотношение (3) является базовым оператором решения задачи формирования согласованного фильтра в условиях обнаружения и определения КПДЦ высокоскоростных живых организмов.

В силу неинвариантности инверсной группы относительно сдвига, для определения задержки формируется специальная операция перебора процедуры (3) по всем моментам времени с шагом, определяемым интервалом корреляции входного процесса. Таким образом, при обработке сигналов в области времени производится его секционирование и сдвиг блока для осуществления перевода в инверсную область и компенсации задержки. Причем компенсация задержки τ заключается в выборе истинного начала блока. Далее сигналы секций переводятся в инверсную область времени. Там сигнал подвергается корреляционной обработке, основанной на согласованной фильтрации (3) принятого процесса и эта-

лонного сигнала, заключающейся в вычислении инверсного преобразования Фурье (ИПФ) принятого процесса, в вычислении результата перемножения этого преобразования с комплексно сопряженным ИПФ эталонного сигнала, вычислении обратного инверсного преобразования Фурье от результата перемножения, вычислении квадрата модуля, сравнении полученного отклика квадрата модуля взаимно корреляционной обработки с пороговым напряжением и принятием решения об обнаружении цели и измерении параметров движения цели. При этом согласованная фильтрация осуществляется по всем возможным значениям постоянного и переменного доплеровских параметров, находящихся в банке данных.

Для сокращения вычислительных затрат и упрощения облика приемной системы целесообразно сократить количество параметров банка данных. Из трех оцениваемых параметров наиболее важными являются параметры задержки и доплеровский параметр, поэтому может быть поставлена задача исключения параметра переменного доплеровского эффекта путем использования, в качестве зондирующей посылки сигнала инвариантного к переменному доплеровскому эффекту. Этим сигналом является отрезок тонального импульса $s(t) = \exp(2 \cdot i \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$, подвергнутый инверсному временному преобразованию $s(t) \rightarrow s\left(-\frac{1}{t}\right)$. Таким образом, в среду излучается сигнал с инверсной частотной модуляцией от верхних частот к нижним вида, рассматриваемый относительно его инверсной меры (рис. 1):

$$s(t) = \exp\left(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot s_0 \cdot \frac{1}{t}\right) \cdot \text{rect}\left(-\frac{1}{t \cdot T}\right), \quad (4)$$

где f_0 – начальная частота; T – длительность зондирующего сигнала в естественном масштабе времени

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \frac{1}{2}; \\ 0, & |t| > \frac{1}{2}. \end{cases}$$

Покажем, что сигнал (4) инвариантен относительно переменного доплеровского действия β . Действительно, сигнал (4) переписывается:

$$s(t) \rightarrow s\left(\frac{t}{\beta t + 1}\right) = \exp\left(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot s_0 \cdot \left(-\beta - \frac{1}{t}\right)\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{1}{T} \left(-\beta - \frac{1}{t}\right)\right).$$

Вычисляя инверсную взаимную корреляционную функцию при малом параметре β , получим:

$$\tilde{r}_{\omega}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) \cdot s\left(\frac{\tau-t}{T}\right) \frac{d\tau}{\tau^2} = \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot s_0 \cdot \Delta t) \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{1}{T}x\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{1}{T}(x-\Delta t)\right) dx.$$

Видно, что результатом корреляционного отклика является треугольная функция и при малом параметре β сдвигом максимума функции можно пренебречь.

Для задания инверсного эталонного сигнала необходимо определить его время начала и окончания. Сначала определим мгновенную частоту инверсного сигнала [9]:

$$f(t) = s_0 / t^2$$

Зададим верхнюю f_u и нижнюю f_n частоты Фурье.

Если задана инверсная частота s_0 , то начало t_n сигнала равно $t_n = \sqrt{s_0 / f_u}$, а конец сигнала равен $t_k = \sqrt{s_0 / f_n}$.

Длительность сигнала равна:

$$T_i = \frac{1}{t_n} - \frac{1}{t_k} = \frac{t_k - t_n}{t_k t_n} = \frac{\sqrt{\frac{s_0}{f_n}} - \sqrt{\frac{s_0}{f_u}}}{\sqrt{\frac{s_0^2}{f_n f_u}}} = \frac{\sqrt{f_u} - \sqrt{f_n}}{\sqrt{s_0}}$$

Количество волн инверсного сигнала равно:

$$KW = s_0 T_i = s_0 \left(\frac{t_k - t_n}{t_k t_n} \right)$$

Заметим, что инверсная частота имеет размерность секунды, а инверсное время имеет размерность $1/c$ или [Гц].

Использование сигнала (4) обусловлено тем, что в своем масштабе он является отрезком экспоненциального тонального сигнала. На рисунке 1 приведена временная диаграмма инверсного сигнала.

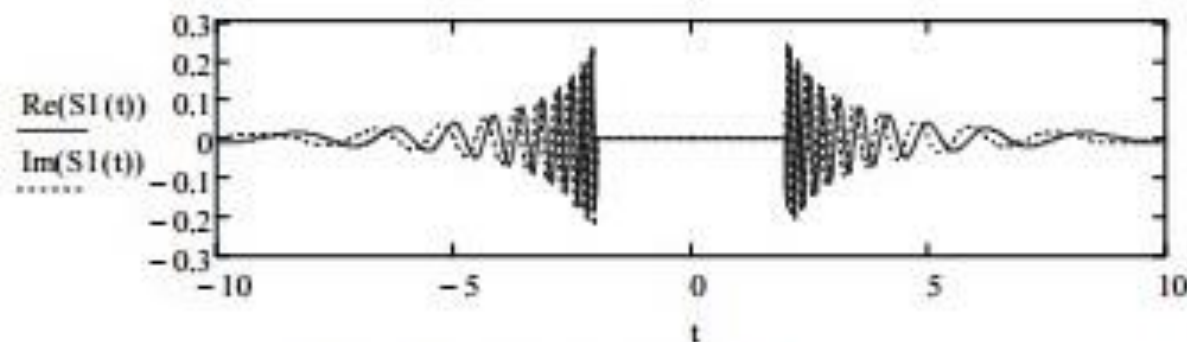


Рис. 1. Временная диаграмма сигнала, промодулированного по инверсному закону

Для проверки достоверности предложенного способа обработки проведено моделирование широкополосной функции неопределенности (ШФН) (3) на ПК в среде MathCad [10]. Максимальное значение ШФН достигается при согласовании параметров эталонного и принимаемого сигнала. Вид ШФН представлен на [рисунке 2](#).

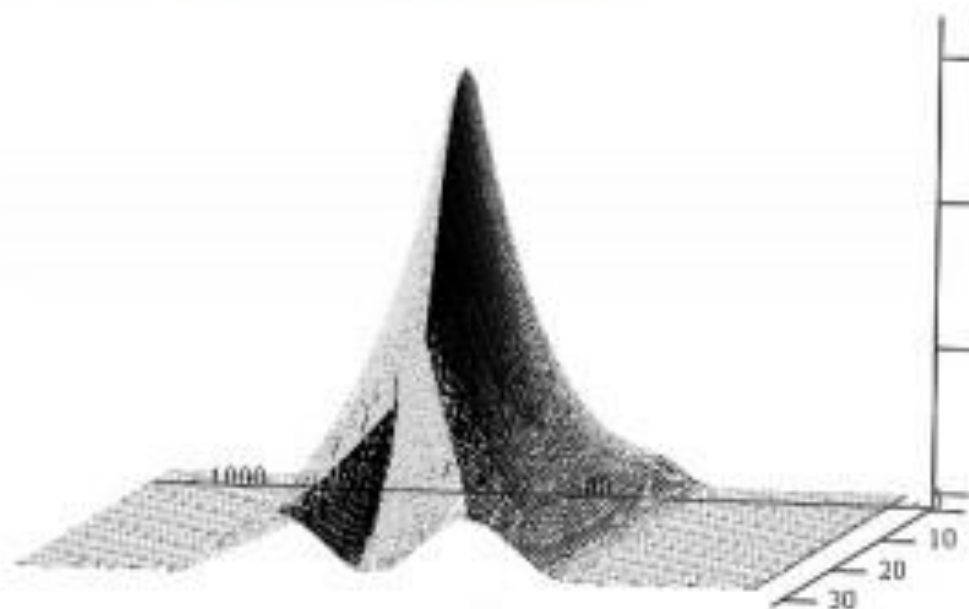


Рис. 2. Вид широкополосной функции неопределенности на ПК в среде MathCad

Из анализа [рисунка 2](#) следует, что инверсный сигнал имеет при комплекснозначном анализе хорошее разрешение по параметру β и инвариантный разрешение при по параметру β при суммировании квадратов (практически инвариантного относительно переменного доплеровского эффекта).

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать выводы:

– применение для представления гидроакустических сигналов группы инверсных преобразований времени в условиях локации быстро движущихся морских животных позволило преодолеть фундаментальные трудности построения процедур согласованной фильтрации. Найдено техническое решение, позволяющее реализовать трехпараметрическую процедуру согласованной фильтрации;

– применение инверсного представления зондирующего сигнала, позволило сократить размерность процедуры согласованной фильтрации с 3-х параметрической до 2-х параметрической. Другими словами, при использовании данного типа сигнала в системах гидролокации можно ограничиться перебором по параметру задержки τ и доплеровскому параметру α .

