УДК 621.396.4

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ФАЗОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ РАЗЛИЧИМОСТИ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ В КАНАЛАХ СВЯЗИ

И.В.Григоров

APPLICATION OF NONLINEAR PHASE FILTERS FOR IMPROVEMENT OF DISCERNABILITY OF DISCRETE SIGNALS IN LIAISON CHANNELS

I.V.Grigorov

1. Введение

Задачи различения сигналов являются классическими и решаются в различных радиотехнических системах – в каналах связи, в радиолокационных и оптических системах, при обработке изображений и т.д. Как правило, они решаются с помощью линейных методов. В частности, при приеме дискретных сигналов, используются корреляторы или согласованные фильтры [1]. В этом случае различимость сигналов, перекрывающихся во времени, обеспечивается за счет их временного сжатия. Эти методы в основном применяются для обработки широкополосных шумоподобных сигналов с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Эффективность сжатия таких сигналов снижается с уменьшением их полосы частот, а при отсутствии ЛЧМ, становятся неэффективными. Например, при прохождении импульса с гауссовской огибающей без ЛЧМ через согласованный с ним фильтр, его среднеквадратическая ширина увеличивается в $\sqrt{2}$ раз.

В [2] был предложен новый способ обработки сигналов, предназначенный для подавления импульсных помех в каналах связи. Он основан на использовании так называемых нелинейных фазовых фильтров (НФФ). Эффективность подавления таких помех с помощью НФФ повышается за счет сильного временного сжатия импульсов помехи во временной области. Идея их построения основана на следующем. В нелинейной квантовой механике, нелинейной оптике и других областях широко используется нелинейное уравнение Шрёдингера. Оно, в частности, описывает эволюцию огибающей оптических импульсов большой амплитуды, распространяющихся по оптическому волокну (ОВ), работающему в нелинейном режиме. Наиболее простой и распространенной моделью, описывающей эти процессы, является уравнение с кубической нелинейностью [3]:

$$\mathrm{i}\frac{\partial \Psi}{\partial \eta} + \beta \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \tau^2} + \mathrm{i}\alpha\Psi + \chi|\Psi|^2\Psi = 0, \tag{1}$$

где $\Psi(\eta, \tau)$ – комплексная огибающая оптического импульса, распространяющегося вдоль пространственной координаты

$$\eta = z / L_0, \tag{2}$$

где z – обычная пространственная координата, L_0 – величина, определяющая пространственный масштаб (чаще всего это дисперсионная длина ОВ, на которой ширина оптического импульса удваивается), τ – «бегущая» временная координата импульса, отсчитываемая от его центра

$$\tau = \frac{t - z/v_{\tilde{A}}}{\tau_u}, \tag{3}$$

τ_u – начальная полуширина импульса, $v_{\tilde{A}}$ – его групповая скорость, α – коэффициент затухания ОВ, β – дисперсионный параметр, χ – показатель нелинейности. При определенном соотношении параметров β и χ в ОВ наблюдается эффект аномальной дисперсии, при котором амплитуда оптического импульса существенно растет, а длительность уменьшается. Упомянутый выше НФФ является приближенным электрическим аналогом нелинейного ОВ. Идея его построения основана на следующем.

Для численного моделирования процессов в ОВ, используется, в частности, метод расщепления по физическим факторам [4]. В соответствии с ним уравнение (1) можно рассматривать как нелинейный дифференциальный оператор, описывающий некоторый эквивалентный нелинейный фильтр с распределенными параметрами. Огибающую $\Psi(\eta, \tau)$ в начале ОВ, рассматривают как сигнал на входе этого фильтра, а при значении координаты $\eta = l$ – его выходным сигналом:

$$\Psi(0, \tau) = z(\tau), \qquad \Psi(l, \tau) = v(\tau). \tag{4}$$

Для простоты в исходной модели (1) можно положить параметр затухания $\alpha = 0$, а вид нелинейности задать в общем виде. Полученное уравнение будет иметь вид

$$\mathrm{i}\frac{\partial \Psi}{\partial \eta} + \beta \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \tau^2} + f(\Psi)\Psi = 0, \tag{5}$$

где $f(\Psi)$ – нелинейная функция.

В [5] показано, что в простейшем случае нелинейный фильтр, описываемый уравнением (5), можно реализовать в цифровой форме в виде двух последовательно соединенных звеньев – нелинейного и линейного (НЗ и ЛЗ). Эти звенья имеют соответственно коэффициент преобразования мгновенных значений по комплексной огибающей

$$\dot{H}(Z) = \exp\{\,\mathrm{i}\, f(Z)\,\} \tag{6}$$

и импульсную характеристику (также по комплексной огибающей)

$$\dot{g}(t) = g_0 \exp\left(\frac{\mathrm{i}\, a t^2}{2}\right), \tag{7}$$

которой соответствует передаточная функция

$$\dot{G}(\mathrm{i}\omega) = \exp\left(-\frac{\mathrm{i}\omega^2}{2a}\right); \tag{8}$$

здесь $f(Z)$ – нелинейная функция НЗ; $\Delta\eta$ и a – соответственно пространственный параметр и коэффициент фазы ЛЗ, g_0 – постоянный коэффициент:

$$a = \frac{1}{2\beta\Delta\eta}, \qquad g_0 = \sqrt{\frac{a}{2\pi}}. \tag{9}$$

Для обеспечения физической реализуемости ЛЗ в выражение (7) необходимо ввести функцию окна $g_0(t)$ и задержку t_0, которую обычно выбирают равной половине длительности окна:

$$\dot{g}(t) = g_0(t) \exp\left(\frac{\mathrm{i}\, a (t - t_0)^2}{2}\right) \tag{10}$$

Как видно из (6) и (8) нелинейное и линейное звенья являются фазовыми и имеют единичный коэффициент передачи по амплитуде. ЛЗ при этом реализует преобразование Френеля. В целом рассмотренное устройство называют нелинейным фазовым фильтром (НФФ) – рис. 1.

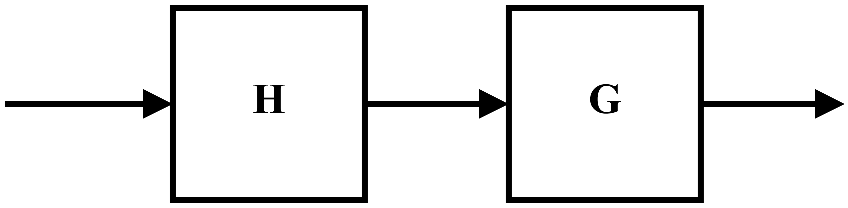

Рис.1.

2. Детерминированная оптимизация НФФ

Сначала можно решить задачу детерминированной оптимизации НФФ с целью минимизации длительности одиночного импульса на его выходе. Аналогичная задача была решена в [5] для повышения эффективности подавления импульсных помех в каналах связи. Поскольку, форма импульсов на входе НФФ может быть различной, представляет интерес определение оптимальной функции $f(Z)$ для импульсов различных форм. Нетрудно показать, что если импульс $Z(t)$ на входе НФФ не имеет внутриимпульсной частотной модуляции (ЧМ), оптимальная нелинейность имеет вид

$$f_{\text{opt}}(|Z|) = -\frac{at^2(|Z|)}{2}, \tag{11}$$

где

$$t(|Z|) = Z^{-1}(t) \tag{12}$$

– функция, обратная функции $Z(t)$. Для импульса с гауссовской огибающей

$$Z(t) = U \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_u^2}\right), \tag{13}$$

где U – амплитуда импульса, τ_u – его среднеквадратическая полуширина, функция (13) имеет две обратные

$$t_{1,2}\left(|Z|\right)=\pm\sqrt{2\tau_u^2\ln\left(\frac{U}{|Z|}\right)},\qquad(14)$$

а оптимальная нелинейная функция

$$f_{\text{opt}}\left(|Z|\right)=a\tau_u^2\ln\left(\frac{|Z|}{U}\right).\qquad(15)$$

Нетрудно показать, что амплитуда импульса на выходе фильтра будет иметь значение

$$V_{\max}=U\tau_u\sqrt{a}\,.\qquad(16)$$

Аналогично решается задача оптимизации и для импульсов других форм.

Рассмотрим подробнее механизм сжатия импульсных сигналов в НФФ на примере гауссовского импульса с огибающей (13); функция $f\left(|Z|\right)$ при этом должна иметь вид (15). Найдем комплексную огибающую сигнала на выходе НЗ:

$$\dot{Y}(t)=\dot{Z}(t)\dot{H}\left(|\dot{Z}|\right)=Z(t)\exp\left(\mathrm{i}\,f\left(|\dot{Z}(t)|\right)\right)=U\exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_u^2}\right)\times$$

$$\times\exp\left(\mathrm{i}\,a\,\tau_u^2\ln\left(\frac{U\exp\left(-t^2/2\tau_u^2\right)}{U}\right)\right)=$$

$$=U\exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_u^2}\right)\exp\left(-\mathrm{i}\frac{at^2}{2}\right)=$$

$$=Y(t)\exp\left(\mathrm{i}\,\Theta_y(t)\right).\qquad(17)$$

Таким образом, огибающая сигнала на выходе нелинейного звена НФФ не изменяется по отношению к огибающей входного сигнала

$$Z(t)=Y(t),\qquad(18)$$

а изменяется его мгновенная начальная фаза

$$\Theta_y(t) = -\frac{at^2}{2} \tag{19}$$

и переменная составляющая мгновенной частоты

$$\Omega_y(t) = \frac{d}{dt}\Big(\Theta_y(t)\Big) = -at\ . \tag{20}$$

Таким образом, НЗ развивает у гауссовского импульса идеальную внутриимпульсную линейную частотную модуляцию (ЛЧМ) с сохранением формы его огибающей. Можно показать, что для импульсов любых форм НЗ с оптимальной нелинейной функцией (11) также развивает идеальную ЛЧМ

$$\Omega_y(t) = \frac{d}{dt}\Big\{f_{opt}\big(Z(t)\big)\Big\} = -at \tag{21}$$

с сохранением формы огибающей. Для нефинитных по длительности сигналов зависимость (21) не ограничена во времени, а для импульсов конечной длительности она имеет локальный характер в пределах длительности импульса.

Очевидно, что закон изменения мгновенной частоты импульсной характеристики ЛЗ вида (7) также является линейным

$$\Omega_g(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{at^2}{2}\right) = at\ , \tag{22}$$

и отличается от (21) только знаком. Это означает, что ЛЗ по отношению к выходному сигналу НЗ, является фильтром, согласованным с ним по фазе. В отличие от обычного согласованного фильтра ЛЗ имеет единичный коэффициент передачи.

Методы сжатия широкополосных импульсных сигналов с внутриимпульсной ЛЧМ, в согласованных фильтрах известны давно, и используются, в частности, для повышения разрешающей способности радиолокаторов [1]. В отличие от них, в описываемом здесь методе ЛЧМ-сигнал формируется с помощью НЗ НФФ из относительно узкополосного сигнала.

3. Результаты моделирования

На рисунке 2 показаны диаграммы гауссовского импульса на входе (штриховая линия) и выходе НФФ с логарифмической нелинейностью (15), построенные с использованием пакета «MathCad – 12». Выходной импульс показан с учетом задержки сигнала в ЛЗ, которая равна половине длительности импульсной характеристики.

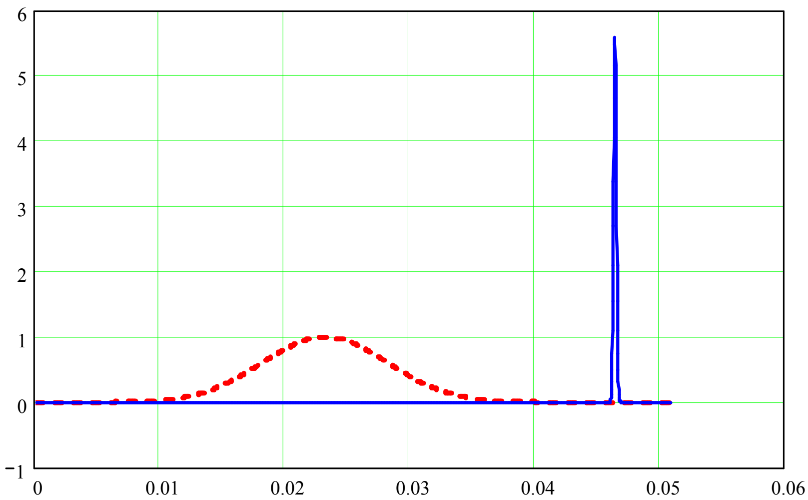

Рис. 2.

Количественно степень сжатия импульса в НФФ можно оценить коэффициентом сжатия импульса на уровне его среднеквадратической полуширины. Если НФФ имеет оптимальную нелинейность, то его можно найти:

$$k_c = \frac{V_{\max}}{U} = \frac{g_0}{U} \int\limits_{-\infty}^{\infty} \left| Z(\tau) \right| d\tau . \tag{23}$$

В частности, для гауссовского импульса этот коэффициент имеет значение

$$k_c = \frac{V_{\max}}{U} = \tau_u \sqrt{a}\,. \qquad (24)$$

Очевидно, что степень сжатия импульса постоянной длительности определяется только параметром линейного звена a. Он, в свою очередь, определяет скорость и диапазон изменения мгновенной частоты сигнала на выходе НЗ и мгновенной частоты импульсной характеристики ЛЗ, т.е. частотой дискретизации сигнала на входе НФФ и длительностью входного сигнала. Для импульса, изображенного на рисунке 2, коэффициент k_c имеет значение около 5,5 и может быть существенно увеличен путем увеличения параметра a.

К сожалению, амплитуда реальных сигналов и их длительность изменяются во времени. Как показывает моделирование, при больших значениях параметра a небольшие изменения параметров входного импульса приводят к существенному изменению k_c. Этот факт не позволяет получить очень большие значения коэффициента сжатия. Для количественной оценки степени влияния флуктуаций параметров импульса на k_c нужно решать более сложную задачу статистической оптимизации НФФ, но ее решение выходит за рамки данной работы.

НФФ является нелинейным устройством, поэтому в нем не соблюдается принцип суперпозиции. Поэтому аналитически найти его отклик на сумму двух или нескольких импульсов, сдвинутых относительно друг друга, сложно. Поэтому оценить эффективность нового метода различения сигналов можно с помощью моделирования. Для количественной оценки различимости сигналов используются различные критерии. Наиболее распространенным из них, особенно в оптических системах обработки информации, является критерий Релея [6]. В соответствии с ним, импульсные сигналы, перекрывающиеся во времени, считаются различимыми, если уровень суммарного сигнала между ними не превышает половины амплитуды каждого из них. На рис. 3а приведены временные диаграммы двух гауссовских импульсов без шума и их суммы на входе НФФ, а на рис.3б – на входе и выходе НФФ с оптимальной логарифмической нелинейностью при наличии шума (отношение средних мощностей одного из сигналов и шума около 10 дБ). Очевидно, что эффективность работы НФФ велика, т.к. импульсы, почти не различимые на входе, становятся различимыми в соответствии с критерием Релея.

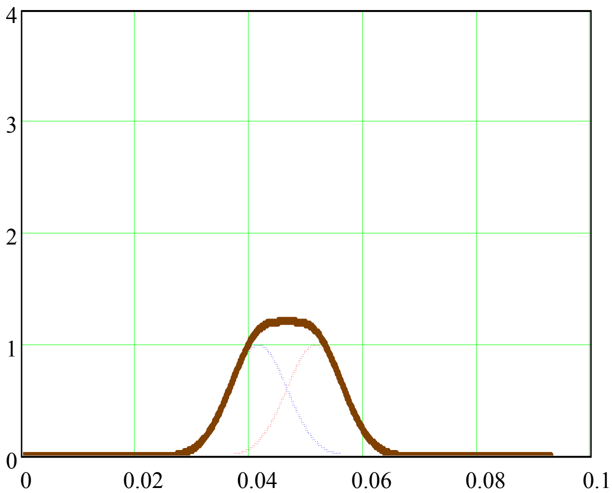

Рис. 3а.

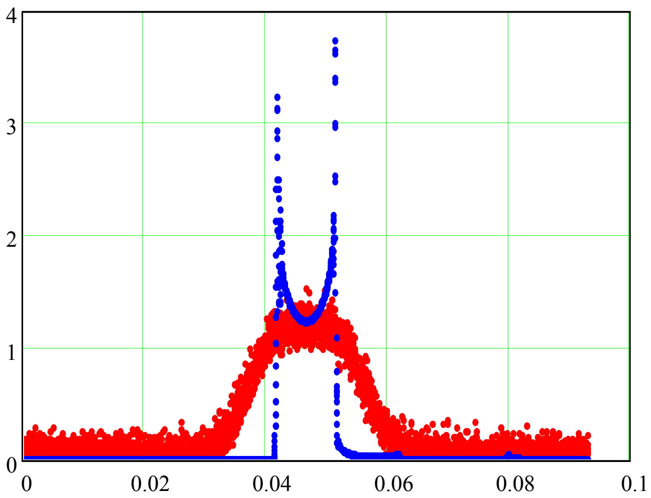

Рис. 3б.

4. Заключение

Следует отметить, что нелинейные фазовые фильтры можно реализовать не только в цифровой, но и в аналоговой форме в оптическом диапазоне, и использовать их с той же целью в волоконно-оптических линиях передачи. Этот способ использовался, в частности, для получения лазерных импульсов фемтосекундного диапазона и подробно описан в [7]. Здесь в качестве НЗ использовался короткий (порядка 3 метров) отрезок оптического волокна, работающего в нелинейном режиме. На выходе волокна при этом развивается ЛЧМ, что называется эффектом фазовой самомодуляции (ФСМ). В качестве ЛЗ использовалась дифракционная решетка, также реализующая преобразование Френеля. Трудность такой реализации НФФ состоит в том, что нелинейные эффекты в обычных оптических волокнах, в частности ФСМ, начинают проявляться при достаточно больших мощностях сигналов – единицы ватт и выше. Сигналы, передаваемые по волоконно-оптическим линиям связи имеют значительно меньшие мощности. Поэтому при реализации таких устройств необходимо иметь специальные волокна с повышенными нелинейными свойствами или другие аналогичные им устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ширман Я.Д.* Разрешение и сжатие сигналов. М.: Советское радио, 1974.– 360 с.

2. *Широков С.М.*, *Григоров И.В*. Метод подавления импульсных помех с применением нелинейных фазовых фильтров // Сборник трудов учебных заведений связи, вып. 163. – Спб.,1997, с.139-145.

3. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. 328 с.

4. *Yevick D., Hermansson B*. Soliton analysis with the propagating beam method //Optics Comm. – 1983. – V.47. – №.2. – P.101–106.

5. *Григоров И.В.* Анализ и моделирование метода подавления импульсных помех с применением нелинейных фазовых фильтров. // Информатика, радиотехника и связь. Сборник трудов молодых ученых ПИИРС. Самара 1996. С.23 – 27.

6. *Папулис А.* Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971, 495 с.

7. *Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. - М.: Наука, 1988. – 312 с