

ма при обнаружении слабого детерминированного сигнала на фоне аномально-засоренной помехи выражается через элементарные функции [6]. При локально-оптимальном обнаружении слабого СГФ обработке подвергается квадрат огибающей $E(t)$ на выходе ГА. При этом зависимость коэффициента ρ (5) от параметров p , σ_g^2 и σ_a^2 оказывается более сложной, что делает необходимым при вычислении ρ применение методов численного интегрирования.

5. Локально-оптимальный алгоритм обнаружения слабого СГФ по выборке с независимыми элементами устойчив не только к распределению аддитивных шумов на выходе ГА [5, 6], но и к распределению полезного сигнала. Основные результаты сохраняются и при непрерывном негауссовском СГФ.

Литература

1. Grishchuk L.P., Lipunov V.M., Postnov K.A. et al. // LANL Archiv astro-ph/0008481 30 Aug. (2000).
2. Allen B. // Proc. Les. Houches School on Astrophysical Sources of Gravitational Waves / Eds. J.A. Murck, J.P. La-sota. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996.
3. Vitale S., Cerdonio M., Coccia E., Ortolan A. // Phys. Rev. D. 1997. **55**, No. 4. P. 1741.
4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1994.
5. Шелухин О.И. Негауссовские процессы в радиотехнике. М.: Радио и связь, 1999.
6. Новоселов О.Н., Фомин А.Ф. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем. М.: Машиностроение, 1991.

Поступила в редакцию
10.05.00

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 538.56+535

МОДУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ КЛАССИЧЕСКИХ СЖАТЫХ СОСТОЯНИЙ

Ю. Е. Дьяков

(кафедра общей физики и волновых процессов)

Предложен и рассмотрен новый метод реализации преобразований типа «несжатое состояние \rightleftharpoons сжатое состояние», в котором используется простая линейная система с модулятором (М-система). Показано, что для гармонического сигнала М-система является фазочувствительной: амплитуда сигнала на выходе может существенно зависеть от его фазы на входе.

1. Под классическим полем в сжатом состоянии будем понимать узкополосный случайный процесс

$$y = \frac{1}{2} \tilde{A} e^{i\omega_0 t} + \text{к. с.} = a \cos \omega_0 t - b \sin \omega_0 t, \quad (1)$$

$$\langle y \rangle = 0,$$

для комплексной амплитуды которого $\tilde{A} = a + ib$ выполняется условие [1]

$$\langle \tilde{A}^2 \rangle = \langle a^2 \rangle - \langle b^2 \rangle + 2i \langle ab \rangle \neq 0. \quad (2)$$

Процесс (1) не является стационарным, так как его дисперсия меняется со временем по гармоническому закону с частотой $2\omega_0$:

$$\langle y^2 \rangle = \frac{1}{2} \langle \tilde{A} \tilde{A}^* \rangle + \frac{1}{4} \left(\langle \tilde{A}^2 \rangle e^{i2\omega_0 t} + \text{к. с.} \right).$$

2. Случайные поля в сжатом состоянии обладают рядом замечательных свойств [2, с. 85]. В связи с различными возможностями применения сжатых полей представляет интерес поиск простых и эф-

фективных способов их получения. В настоящей работе предлагается и анализируется новый метод генерации классических (неквантовых) сжатых полей, основанный на применении модулятора.

Пусть

$$x = \rho \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

— узкополосный стационарный (т. е. несжатый) случайный процесс, и мы хотим его «сжать». Анализ существующих методов сжатия наводит на мысль, что основным принципом сжатия является следующий: нужно каким-то образом преобразовать x в процесс

$$x_- = \rho \cos(\omega_0 t - \varphi + \varphi_0) \quad (3)$$

с обращенной (или сопряженной) фазой φ , а затем сложить x и x_- . Можно показать, что процессы x и x_- , сами по себе несжатые, в сумме образуют сжатый процесс

$$y = x + Cx_-, \quad (4)$$

параметры сжатия которого определяются постоянными φ_0 и C .

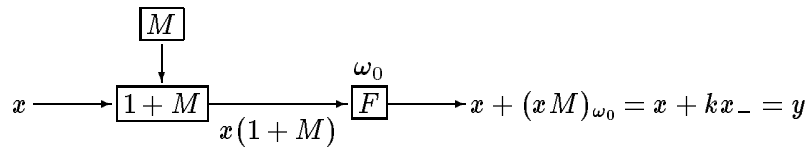


Рис. 1. М-система. Система с модулятором $M = 2k \cos(2\omega_0 t + \varphi_0)$ для преобразования несжатого поля x в сжатое поле y ; F — фильтр, настроенный на частоту ω_0 ; x_- — поле с обращенной фазой

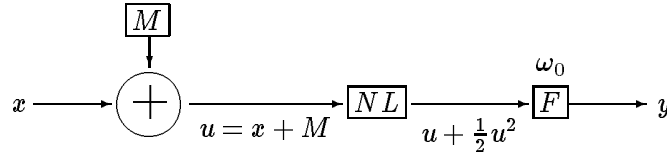


Рис. 2. Вариант М-системы с нелинейным квадратичным элементом NL

3. Предлагаемая система сжатия (М-система) схематически показана на рис. 1. Основным элементом здесь является модулятор M — местный генератор удвоенной частоты $2\omega_0$ (аналог накачки в параметрическом усилителе). Фильтр F пропускает только колебания, частота которых близка к ω_0 . Получаемые ниже соотношения относятся также к варианту М-системы, в котором используется нелинейный квадратичный элемент (рис. 2).

Рассмотрим подробнее действие М-системы. Поле, создаваемое модулятором, запишем как $M = 2k \cos(2\omega_0 t + \varphi_0)$. Произведение xM имеет составляющие на частотах ω_0 и $3\omega_0$: $xM = (xM)_{\omega_0} + (xM)_{3\omega_0}$. Фильтр F пропустит лишь первую составляющую, которая, как нетрудно убедиться, с точностью до коэффициента совпадает с полем (3), имеющим обращенную фазу:

$$(xM)_{\omega_0} = k\rho \cos(\omega_0 t - \varphi + \varphi_0) = kx_-.$$

В результате на выходе М-системы формируется сжатое поле типа (4):

$$\begin{aligned} y &= x + (xM)_{\omega_0} = x + kx_- = \\ &= a \cos(\omega_0 t + \varphi_0/2) - b \sin(\omega_0 t + \varphi_0/2), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} a &= (1 + k)(\alpha \cos \varphi_0/2 + \beta \sin \varphi_0/2), \\ b &= (1 - k)(\beta \cos \varphi_0/2 - \alpha \sin \varphi_0/2) \end{aligned} \quad (6)$$

— квадратурные компоненты выходного поля y , а $\alpha = \rho \cos \varphi$, $\beta = \rho \sin \varphi$ — квадратурные компоненты входного поля x .

4. Определим теперь параметры сжатия поля (5), следуя методике, предложенной в работе [1]. Поскольку x — стационарный случайный процесс, то $\langle \alpha^2 \rangle = \langle \beta^2 \rangle = \sigma^2$, $\langle \alpha\beta \rangle = 0$. При этом, согласно (6),

$$\langle a^2 \rangle = \sigma^2(1 + k)^2, \quad \langle b^2 \rangle = \sigma^2(1 - k)^2, \quad \langle ab \rangle = 0. \quad (7)$$

Из (7) видно, что критерий сжатия (2) выполняется. Определим теперь введенную в работе [1] степень сжатия \varkappa . Согласно (7),

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= (\langle a^2 \rangle + \langle b^2 \rangle)/2 = \sigma^2(1 + k^2), \\ \gamma_1 &= (\langle a^2 \rangle - \langle b^2 \rangle)/2 = \sigma^2 2k, \\ \gamma_2 &= \langle ab \rangle = 0, \end{aligned}$$

так что

$$\varkappa = \frac{\sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}}{\gamma_0} = \frac{2|k|}{1 + k^2}, \quad 0 \leq \varkappa \leq 1. \quad (8)$$

«Эллипс ошибок» для поля y будет ориентирован горизонтально при $k > 0$ и вертикально при $k < 0$; в обоих случаях отношение большей оси эллипса к меньшей равно

$$S_{\max} = \sqrt{\frac{1 + \varkappa}{1 - \varkappa}} = \frac{1 + |k|}{1 - |k|},$$

где $S = \langle a^2 \rangle^{1/2} / \langle b^2 \rangle^{1/2}$ — коэффициент сжатия [1]. Как следует из (8), меняя коэффициент модуляции k , можно получать на выходе М-системы поле y с любой степенью сжатия, от $\varkappa = 0$ до $\varkappa = 1$. Наибольшее сжатие ($\varkappa = 1$, $S_{\max} = \infty$) достигается при $|k| = 1$. Согласно (7), в этом оптимальном случае ни одна из дисперсий $\langle a^2 \rangle$, $\langle b^2 \rangle$ не обращается в бесконечность. Этим М-система выгодно отличается от параметрического усилителя, в котором при $\varkappa \rightarrow 1$ дисперсия одной из квадратурных компонент стремится к бесконечности.

5. Используя выражение (6), нетрудно убедиться, что подбором k и φ_0 можно выделять на выходе М-системы любую из квадратурных компонент входного шума или их произвольную линейную комбинацию. Можно также показать, что М-система позволяет решать «обратную» задачу, т. е. преобразовывать поля из сжатого состояния в несжатое.

6. Рассмотрим прохождение через М-систему гармонического сигнала. Полагая

$$\begin{aligned} x &= x_0 = \rho_{\text{in}} \cos(\omega_0 t + \varphi_{\text{in}}), \\ y &= y_0 = \rho_{\text{out}} \cos(\omega_0 t + \varphi_{\text{out}}), \end{aligned}$$

получим

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{\text{out}}}{\rho_{\text{in}}} &= \mathcal{K}, \quad \mathcal{K} = \sqrt{1 + k^2 + 2k \cos \left[2 \left(\varphi_{\text{in}} - \varphi_0/2 \right) \right]}, \\ \varphi_{\text{out}} &= \text{arctg} \left[\frac{1 - k}{1 + k} \text{tg} \left(\varphi_{\text{in}} - \frac{\varphi_0}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Как видно из (9), коэффициент преобразования по огибающей \mathcal{K} чувствителен как к фазе входного сигнала φ_{in} , так и к фазе модулятора φ_0 ; в зависимости от значения разности фаз $\varphi_{\text{in}} - \varphi_0/2$ величина \mathcal{K} меняется в пределах от $\mathcal{K}_{\text{max}} = |k| + 1$ до $\mathcal{K}_{\text{min}} = |k| - 1$. Аналогичной зависимостью усиления от фазы сигнала обладает, как известно, и параметрический усилитель [3].

Таким образом, М-система способна переводить фазовую модуляцию на входе в глубокую амплитудную модуляцию на выходе.

7. Следует отметить, что М-система не содержит резонансных или инерционных элементов. Поэтому если частота модуляции не равна в точности $2\omega_0$, т. е.

$$M(t) = 2k \cos(\omega_M t + \varphi_0), \quad \omega_M = 2\omega_0 + \delta, \quad (10)$$

то полученные выше соотношения останутся верными и в случае (10) при замене в них φ_0 на $\varphi_0 + \delta t$. Мы получим

$$x = \rho \cos(\omega_1 t + \varphi), \quad x_- = \rho \cos(\omega_2 t - \varphi + \varphi_0), \quad (11)$$

$$y = a \cos(\omega_M t + \varphi_0)/2 - b \sin(\omega_M t + \varphi_0)/2, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} a &= (1 + k)\rho \cos(\delta t/2 + \varphi_0/2 - \varphi), \\ b &= (1 - k)\rho \sin(\delta t/2 + \varphi_0/2 - \varphi), \end{aligned} \quad (13)$$

где $\omega_1 = \omega_0$, $\omega_2 = \omega_0 + \delta$, $\omega_M/2 = \omega_0 + \delta/2$, $(\omega_2 - \omega_1)/2 = \delta/2$, $\omega_M = \omega_1 + \omega_2$. Согласно (11), поля x и x_- имеют теперь *разные* частоты, образуя в сумме сжатое поле y (12) нового типа — *двухчастотное*. Квадратурные компоненты (13) этого поля тоже необычны: это не низкочастотные, а узкополосные шумы, спектр которых лежит в области частоты $\delta/2$. Частотная расстройка δ не влияет, однако, на степень сжатия поля (12) и на параметры эллипса сжатия квадратурных компонент (13), так как фаза φ_0 в формулу (8) не входит.

Как следует из (12), при наблюдении квадратурных компонент методом синхронного (гомодинного) детектирования частота гомодина должна равняться $\omega_M/2 = (\omega_1 + \omega_2)/2$. По этой частотной схеме эффект сжатия можно было бы наблюдать, например, в двухконтурном параметрическом усилителе, где он должен проявляться в неравенстве дисперсий, $\langle a^2 \rangle \neq \langle b^2 \rangle$, а также в генерации монохроматической компоненты поля $\langle y^2 \rangle$ на частоте $\omega_M = \omega_1 + \omega_2$, т. е. на частоте модуляции (накачки).

Автор благодарен проф. В. И. Шмальгаузену за обсуждение работы.

Литература

1. Дьяков Ю.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2001. №4 (в печати).
2. Ахманов С.А., Белинский А.В., Чиркин А.С. // Новые физические принципы оптической обработки информации / Под ред. С.А. Ахманова, М.А. Воронцова. М.: Наука, 1990. С. 83.
3. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981.

Поступила в редакцию
30.06.00

После переработки
24.01.01