

01;09;12

©1995

СПОСОБ СИНТЕЗА БИСПЕКТРАЛЬНО-ОРГАНИЗОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Г.Н.Бочков, К.В.Горохов

Биспектральный (полиспектральный) анализ в физике и технике становится методом получения принципиально новой информации об объектах и средах в задачах нелинейной спектроскопии, диагностики и идентификации, существенно дополняя спектрально-корреляционный подход к решению подобных задач [1-3]. Биспектр-анализаторы открывают класс нового поколения приборов для самых различных приложений в акустике, радиофизике и оптике.

При использовании анализаторов биспектра принципиально важны тестовые калибровочные измерения и оценка их точности. Для этой цели необходимо решение задачи синтеза специальных биспектрально-организованных сигналов (БОС), имеющих заданные биспектральные характеристики. В результате создания биспектральных синтезаторов появляется, кроме того, возможность использования БОС для целей имитации, зондирования, а также параллельной передачи больших информационных массивов (изображений, рельефов и т.д.) [4].

Предложенные в [5-7] методы синтеза БОС связаны с формированием случайных процессов с изменяющимися во времени амплитудами и/или фазами взаимосвязанных спектральных составляющих. При этом принципиальные трудности синтеза переносятся на обеспечение стационарности и строгой определенности статистических характеристик задающих генераторов исходных шумов [5].

В настоящей работе показано, что синтез БОС возможен при отказе от генерации процессов с изменяющимися во времени амплитудами и фазами спектральных составляющих, если формировать, как описано ниже, квазидетерминированные БОС.

Как известно, биспектр стационарного случайного процесса $x(t)$

$$S_3(f_1, f_2) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \langle X_T(f_1; t) X_T(f_2; t) X_T^*(f_1 + f_2; t) \rangle \quad (1)$$

($\langle x(t) \rangle = 0$, $X_T(f; t) = \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau$, * — комплексное сопряжение) описывает статистическую связанность троек

спектральных компонент на гармонически связанных частотах f_1 , f_2 и $f_3 = f_1 + f_2$. Поэтому в основе принципа действия любого синтезатора БОС лежит некоторый способ, обеспечивающий требуемую степень биспектральной связанности триплетов спектральных составляющих генерируемого БОС.

Основная идея предлагаемого способа заключается в том, что в качестве отдельных элементов БОС $x(t)$ используются биспектрально-связанные триплеты

$$g_l(t) = \sum_{k=1}^3 2A_k^l \cos(2\pi F_k^l t + \varphi_k^l) \quad (1 \leq l \leq N), \quad (2)$$

где $F_3^l = F_1^l + F_2^l$; φ_1^l, φ_2^l — независимые равномерно распределенные в $[-\pi, \pi]$ случайные фазы; $\varphi_3^l = \varphi_1^l + \varphi_2^l - \Psi^l$, Ψ^l — бифаза l -го триплета. Требуемый биспектр $S_3(f_1, f_2)$ синтезируемого сигнала, его биспектр-образ, аппроксимируется совокупностью пиков в определенных точках (F_1^l, F_2^l) биспектральной плоскости. Амплитуды и фазы биспектра в этих точках определяют биспектральные параметры соответствующих триплетов (2):

$$A_1^l A_2^l A_3^l [1 + \delta(F_1^l - F_2^l)] = |S_3(F_1^l, F_2^l)|, \quad (3a)$$

$$\Psi^l = \varphi_1^l + \varphi_2^l - \varphi_3^l = \arg S_3(F_1^l, F_2^l), \quad (3b)$$

где $\delta(f) = \{1 \text{ при } f = 0; 0 \text{ при } f \neq 0\}$. Несвязанность составляющих, относящихся к различным триплетам, и, следовательно, однозначность биспектр-образа БОС в целом обеспечиваются тем, что любая тройка частот $\{F_i^n, F_j^m, F_k^l\}$ ($i, j, k = 1, 2, 3$) составляющих различных триплетов не образует гармонически-связанную тройку частот, т.е.

$$F_i^n + F_j^m \begin{cases} = F_k^l & \text{при } n = m = l \text{ и } i = 1, j = 2, k = 3; \\ \neq F_k^l & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (4)$$

Все методы биспектрального анализа, базирующиеся на использовании алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ), при осуществлении анализа в полосе частот от 0 до F_{\max} с разрешением $\Pi_0 = F_{\max}/M$ обеспечивают вычисление отсчетов биспектра в декартовой сетке частот $\{(n\Pi_0, m\Pi_0); m \leq n \leq M - m; 1 \leq m \leq [M/2]\}$ [1]. Поэтому с

целью согласования биспектр-образа БОС с образом, получаемым в результате анализа его биспектра, синтез также целесообразно осуществлять в сетке частот $(n\Pi_0, m\Pi_0)$.

Исходя из этого, одним из способов выбора частот составляющих синтезируемых триплетов, отвечающих элементам $B_{nm} = S_3(n\Pi_0, m\Pi_0)$ биспектр-образа, может быть следующий:

$$F_1^{nm} = F_1^n = n\Pi_0 + \Delta_{1n} \quad (1 \leq n \leq M-1);$$

$$F_2^{nm} = F_2^m = m\Pi_0 + \Delta_{2m} \quad (1 \leq m \leq [M/2]);$$

$$F_3^{nm} = F_1^n + F_2^m \quad (m \leq n \leq M-m; 1 \leq m \leq [M/2]), \quad (5)$$

где смещения Δ_{1n} и Δ_{2m} выбираются так, чтобы, с одной стороны, удовлетворить условиям однозначности биспектр-образа (4), а с другой — обеспечить требуемую степень их малости по сравнению с шагом Π_0 :

$$|\Delta_{1n}| \leq \Pi_0/Q, \quad |\Delta_{2m}| \leq \Pi_0/Q \quad (Q > 2). \quad (6)$$

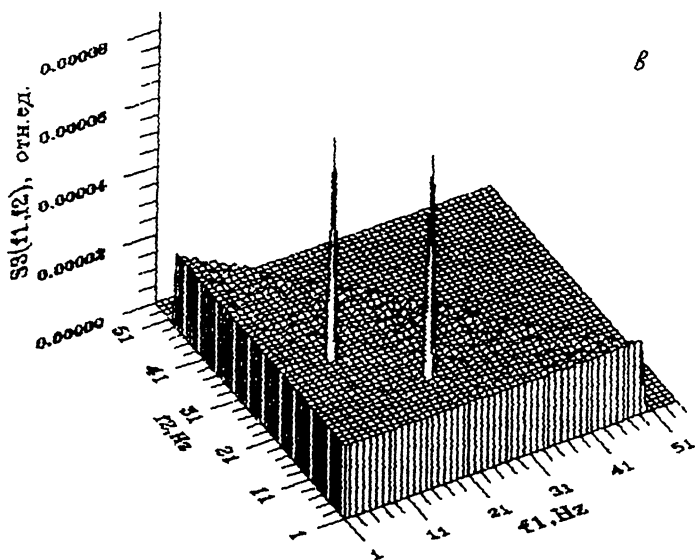
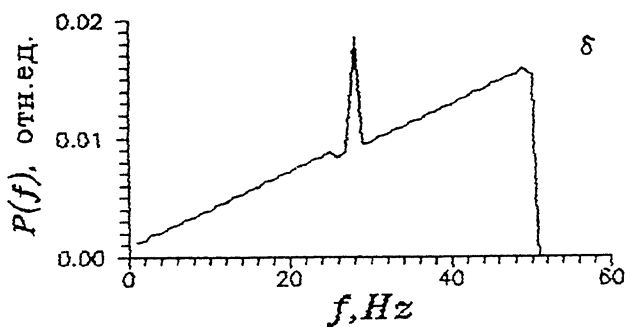
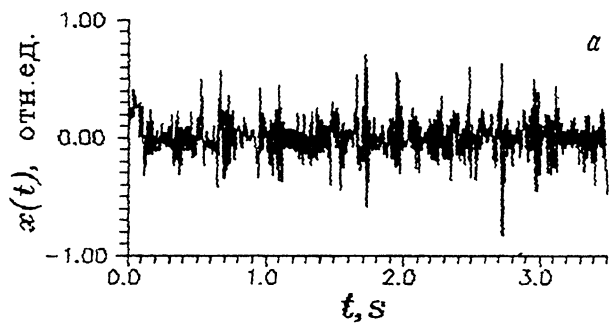
Отметим, что способ выбора частот (5) предполагает использование двух групп “опорных” составляющих. Первая из них включает составляющие на частотах F_1^n , каждая из которых является общей для триплетов, отвечающих элементам B_{nm} с одинаковыми значениями индекса n . А каждая из компонент второй группы составляющих на частотах F_2^m является общей для триплетов, соответствующих элементам B_{nm} с одинаковыми значениями индекса m .

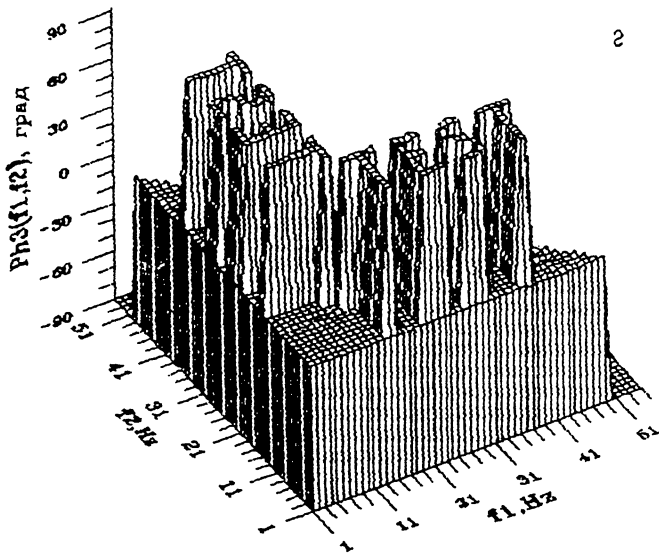
При цифровой реализации синтеза квазидетерминированного БОС целесообразно использовать следующую последовательность операций.

1. Для заданного биспектр-образа $S_3(n\Pi_0, m\Pi_0)$ согласно (3а, 3б) определить амплитуды и фазы $k_M = (M-1) + [M/2] + [M^2/4]$ составляющих БОС в частотной области:

$$X(f) = \sum_{n=1}^{M-1} A_1^n e^{i\varphi_1^n} \delta(f - F_1^n) + \sum_{m=1}^{[M/2]} A_2^m e^{i\varphi_2^m} \delta(f - F_2^m) + \sum_{m=1}^{[M/2]} \sum_{n=m}^{M-m} A_3^{nm} e^{i\varphi_3^{nm}} \delta(f - F_3^{nm}) \quad (f \geq 0). \quad (7)$$

При этом, как следует из (3а, 3б), амплитуды A_1^n, A_2^m и фазы φ_1^n, φ_2^m опорных составляющих в общем случае произвольны и могут быть получены с помощью датчика случайных чисел.





Синтезированный тестовый биспектрально-организованный сигнал — фрагмент реализации (а) и результаты измерения его характеристик: спектра мощности (б), модуля биспектра (в), бифазы (г).

2. Посредством обратного дискретного преобразования Фурье вычислить требуемую реализацию БОС $x(t)$ во временной области. Отметим, что для выполнения этой операции с использованием алгоритмов БПФ все частоты (5) (с точностью до постоянного множителя f_0) должны принимать целочисленные значения.

Анализ способа выбора частот (5) с учетом условий (4,6) позволил найти семейство наборов целочисленных частот $\{F_1^n/f_0, F_2^m/f_0\}$, для которых максимальный период БОС $T = 1/f_0$ — минимален. На этом периоде содержится вся информация о каждом из $N = [M^2/4]$ элементов биспектр-образа БОС. Смещения Δ_{1n}/f_0 и Δ_{2m}/f_0 , при которых БОС имеет для заданных M и Q минимальную базу

$$P_0/f_0 = (2[M/2] - 1)Q, \quad (8)$$

приведены в таблице.

Возможности реализованного на базе ЭВМ синтезатора БОС иллюстрируются рис. 1, а-г. Модуль биспектра тестового БОС, фрагмент оциллограммы которого показан на рис. 1, а, содержит два базовых биспектр-образа: “пик” — биспектр-образ триплета (2) и “пьедестал” — биспектр-

Параметры десяти вариантов синтеза квазидетерминированных БОС с минимальной базой $\Pi_0/f_0 = (2[M/2] - 1)Q$

№	Δ_{1n}/f_0	Δ_{2m}/f_0	Примечание
1	$-2n + 2[M/2] + 1$	$2m - 2$	
2	$2[M/2] - 1$	$-2m + 1$	
3	$2[M/2] - 1$	$-m - [M/2] + 1$	
4	$2[M/2] - 2$	$-2m + 1$	$M \neq 2[M/2] + 1$
5	$[M/2]$	$m - 2[M/2]$	
6	$-[M/2]$	$-m + 2[M/2]$	
7	$-2[M/2] + 2$	$2m - 1$	$M \neq 2[M/2] + 1$
8	$-2[M/2] + 1$	$m + [M/2] - 1$	
9	$-2[M/2] + 1$	$2m - 1$	
10	$2n - 2[M/2] - 1$	$-2m + 2$	

образ суммы триплетов, имитирующих негауссов шум с постоянным биспектром в заданной области частот. Бифаза того же самого БОС представляет определенную информационную структуру.

Список литературы

- [1] Никуас Х.Л., Рагувер М.Р. // ТИИЭР. 1987. Т. 75. № 7. С. 5-30.
- [2] Mendel J.M. // Proc. IEEE. 1991. V. 79. N 3. P. 278-305.
- [3] Александров Е.Б., Голубев Ю.М., Ломакин А.В., Носкин В.А. // УФН. 1983. Т. 140. В. 4. С. 547-582.
- [4] Bochkov G.N., Gorokhov K.V., Markov G.A., Dubkov A.A., Zheltov S.N., Rezvov A.V. // Proc. 7th Vilnius Conf. "Fluctuation Phenomena in Physical Systems". Vilnius University Press, Lithuania. 1994. P. 243-249.
- [5] Sasato K., Sato T. // J. Acoust. Soc. Am. 1979. V. 65(3). P. 732-739.
- [6] Huber P.J., Kleiner B., Gasser T., Dumermuth G. // IEEE Trans. Audio Electroacoust. 1971. AU-19. P. 78-86.
- [7] Sasaki K., Sato T., Kano M. // J. Acoust. Soc. Am. 1981. V. 69(1). P. 286-292.

Нижегородский государственный университет им.Н.И.Лобачевского

Поступило в Редакцию
17 марта 1995 г.