

УДК 621.397.5

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ПРОЦЕССЕ СИМВОЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**А. И. Лоскутов<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, начальник кафедры

**А. А. Бянкин<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, профессор кафедры

**А. С. Дуников<sup>а</sup>**, адъюнкт

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** в процессе совершенствования ракетно-космической техники к радиотелеметрическим системам предъявляются все более высокие требования в отношении достоверности получения данных. Одним из способов обеспечения достоверной передачи результатов телеизмерений является повышение помехоустойчивости работы системы синхронизации. Целью работы является формирование вектора признаков образа двоичного символа группового телеметрического сигнала, необходимого для синтеза системы символьной синхронизации в частотно-временной области. **Методы:** на основе расчета биспектральной плотности фрагмента сигнала формируется вектор признаков, позволяющий демодулировать двоичные символы группового телеметрического сигнала. **Результаты:** определен вектор признаков, проведено моделирование возможности применения биспектрального анализа для демодуляции двоичных символов группового телеметрического сигнала. **Практическая значимость:** результаты исследований использованы для разработки метода символьной синхронизации в частотно-временной области. Сформированный вектор признаков позволяет при малых отношениях сигнал/шум однозначно демодулировать двоичные символы группового телеметрического сигнала. Следовательно, полученные результаты обеспечивают повышение достоверности приема телеметрической информации.

**Ключевые слова** — биспектральный анализ, групповой телеметрический сигнал, демодуляция, символьная синхронизация.

## Введение

Системы символьной синхронизации радиотелеметрических средств решают задачи демодуляции и определения границ двоичных символов в групповом телеметрическом сигнале. Решение данных задач сопровождается значительными трудностями, так как принимаемый групповой телеметрический сигнал искажен помехами различного происхождения и уровня. При этом статистические характеристики шума часто априорно полностью не определены или определены частично и неточно.

Среди традиционных подходов, обеспечивающих подавление помех, используются методы линейной и нелинейной фильтрации [1]. Эффективность применения данных методов в значительной степени зависит от полноты априорных знаний о статистических характеристиках помех, которые на практике имеют далеко не всегда. Помимо этого применимость традиционных методов фильтрации и восстановления сигналов сильно зависит от отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе наземной приемно-регистрирующей аппаратуры. Существующие наземные приемно-регистрирующие станции обеспечивают требуемую вероятность ошибки приема символов при ОСШ, значительно превосходящих единицу. Зачастую потеря телеметрической информации, вызванная сбоем работы системы синхронизации, происходит при ОСШ, имеющем значение,

немалого превосходящее единицу. Одним из перспективных подходов, который обеспечил бы устойчивую работу системы символьной синхронизации, является подход, основанный на построении системы символьной синхронизации как системы распознавания образов с использованием данных спектрального анализа группового телеметрического сигнала.

Существующие бортовые радиотелеметрические системы используют при передаче информации сигналы с кодово-импульсной модуляцией частотной манипуляцией (КИМ<sub>2</sub>-ЧМ) и кодово-импульсной модуляцией фазовой  $\pi$ -манипуляцией (КИМ <sub>$\pi$</sub> -ФМ). При этом информация передается двоичными символами «0» и «1», различающимися значениями частоты и фазы. Законы модуляции описываются следующими формулами [2]:

$$s(t) = A_0 \cos(2\pi f_m t + \varphi_0); \quad (1)$$

$$s(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_m + \varphi_0), \quad (2)$$

где  $f_m$ ,  $\varphi_m$  — значения частоты и фазы манипуляции двоичных символов группового телеметрического сигнала.

В результате передачи группового телеметрического сигнала передается набор двоичных символов  $S = \{s^{(1)}, s^{(2)}, \dots, s^{(n)}\}$ , искаженных шумами, представляющих собой множество объектов распознавания.

Необходимо определить:

— пространство признаков  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ , определяющих однозначное разделение двоичных символов на классы в спектральной области;

— функцию преобразования  $g(s)$ , позволяющую выделить из искаженных символов группового телеметрического сигнала признаки классов.

### Спектральное оценивание информационных символов группового телеметрического сигнала на основе биспектрального анализа

Основным методом, позволяющим разделить двоичные символы группового телеметрического сигнала на классы и отделить их от шумов, является селекция сигнала.

Аппаратом, способным выполнить селекцию сигнала, является теория цифровой обработки сигналов. Из анализа работ [3—6] определено, что для решения задачи селекции сигнала целесообразно использовать спектральный и частотно-временной анализ сигнала. При использовании данных методов групповой телеметрический сигнал представляется в частотной области. Исходя из (1), (2), одним из определяющих признаков информационных символов является значение частот и фаз манипуляции  $f_m, \varphi_m$ , где  $m = 1, 2$ , а также значение несущей частоты  $f_0$ , на которых амплитуда спектра имеет максимальное значение. Вместе с тем одним из признаков, позволяющих определить номинал символа, является превышение определенного порогового значения спектральным пиком анализируемого сигнала. Следовательно, пространство признаков, определяющих разделение двоичных символов на классы в спектральной области, имеет вид  $P = \{f_{\max}, \varphi_{\text{тек}}, p_{\text{пор}}\}$ , где  $f_{\max}$  — значение частоты, соответствующей максимальной амплитуде спектра;  $\varphi_{\text{тек}}$  — текущее значение фазы спектра;  $p_{\text{пор}}$  — показатель превышения максимальной амплитуды спектра порогового значения.

В качестве функции преобразования  $g(s)$ , позволяющей выделить из искаженных символов группового телеметрического сигнала признаки классов, необходимо использовать алгоритмы спектрального и частотно-временного анализа сигналов. Условием применения функции преобразования является достоверное выделение пространства признаков из сигнала, искаженного шумом при ОСШ, незначительно превосходящем единицу. Анализ методов спектрального оценивания сигнала на основе вычисления амплитудного спектра, спектральной плотности мощности сигнала, псевдоспектра, выполнения оконного преобразования Фурье, авторегрессионного спектрального анализа и биспектрального анализа показал, что наиболее эффективным методом яв-

ляется биспектральный анализ. Биспектральный анализ в настоящее время находит широкое применение при восстановлении радиолокационных изображений, в задачах технической и медицинской диагностики. Биспектральный анализ основан на использовании корреляционных функций третьего порядка.

В цифровой обработке сигналов используются прямой и косвенный методы оценивания биспектральной плотности. Прямой метод обладает более высоким быстродействием за счет применения быстрых алгоритмов преобразования Фурье и исключения трудоемких расчетов оценок корреляционной функции третьего порядка.

Групповой телеметрический сигнал на входе системы синхронизации представляет собой дискретную последовательность  $\{s^{(i)}(t)\}$  из  $i = 0, 1, 2, \dots, I-1$  отсчетов в виде набора  $n$  независимых реализаций  $s^{(n)}(t)$ , представляющих собой отдельные символы информационных сообщений.

Расчет биспектральной плотности производится по следующему алгоритму.

1. Формирование реализаций группового телеметрического сигнала  $s_1 = \{s^{(1)}(i)\}$ ,  $s_2 = \{s^{(2)}(i)\}$ , ...,  $s_n = \{s^{(n)}(i)\}$ , при этом для демодуляции двоичных символов реализации формируются на основе информации, полученной от схемы определения границ символов.

2. Расчет мгновенного спектра каждой реализации группового телеметрического сигнала

$$\begin{aligned} \dot{S}_1(\omega) &= \int_0^{I-1} s^{(1)}(t) e^{-j\omega t} dt, \dots, \dot{S}_n(\omega) = \\ &= \int_0^{I-1} s^{(n)}(t) e^{-j\omega t} dt, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $t$  определяется длительностью участка, на котором вычисляется мгновенный спектр, а пределы интегрирования — дискретными отсчетами анализируемых реализаций.

3. Формирование выборочной оценки биспектральной плотности с помощью тройного произведения значений, полученных в (3):

$$\dot{B}_S^z(\omega) = \dot{S}_z(\omega) \dot{S}_z(\omega) \dot{S}_z^*(\omega), \quad (4)$$

где  $z = 1, 2, \dots, n$ .

4. По формуле (4) рассчитывается биспектр каждой реализации группового телеметрического сигнала, представляющего собой

$$\dot{B}_S(\omega) = |\dot{B}_S(\omega)| e^{j\gamma_S(\omega)}, \quad (5)$$

где  $\dot{B}_S(\omega)$  и  $\gamma_S(\omega)$  — соответственно амплитудный и фазовый биспектры анализируемой реализации.

Из полученных по формуле (5) данных рассчитываются значения показателей пространства признаков.

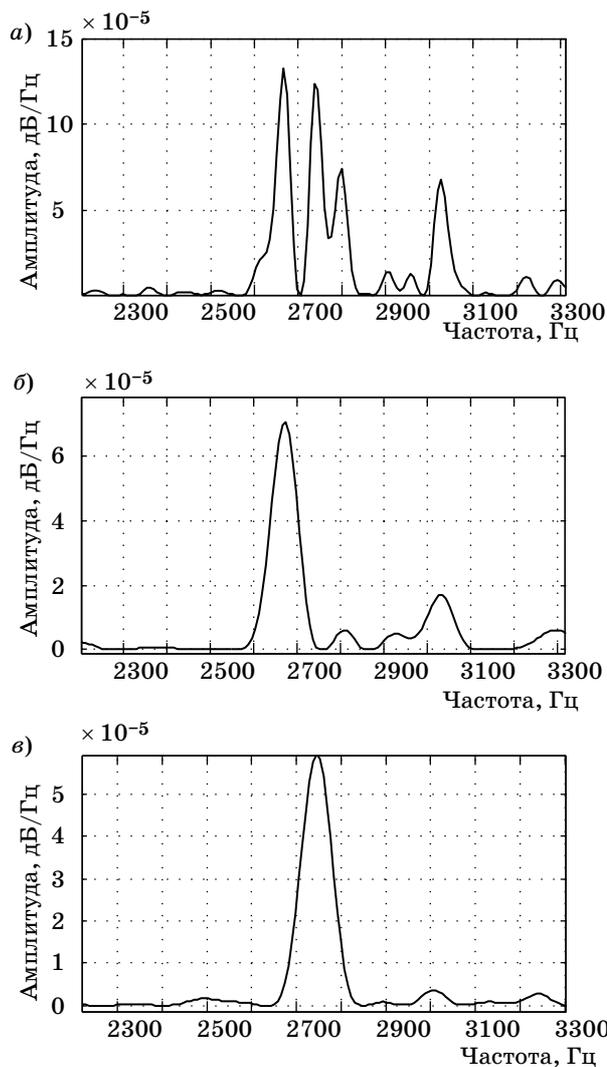
Биспектральный анализ по сравнению с другими методами спектрального оценивания имеет ряд преимуществ [4]:

— биспектральный анализ позволяет сохранить комплексный фурье-спектр сигнала и, следовательно, восстановить информацию о фазовых характеристиках сигнала;

— корреляционная функция третьего порядка гауссова шума стремится к нулю, что позволяет использовать биспектральный анализ при ОСШ, не превышающих единицу;

— биспектр инвариантен к смещению исходного сигнала.

Таким образом, для демодуляции двоичных символов группового телеметрического сигнала целесообразно использовать биспектральный анализ, являющийся более эффективным по сравнению с другими методами спектрального оценивания сигнала за счет сохранения фазовых



■ **Рис. 1.** Модуль биспектра информационных символов «01» (а); «0» (б); «1» (в)

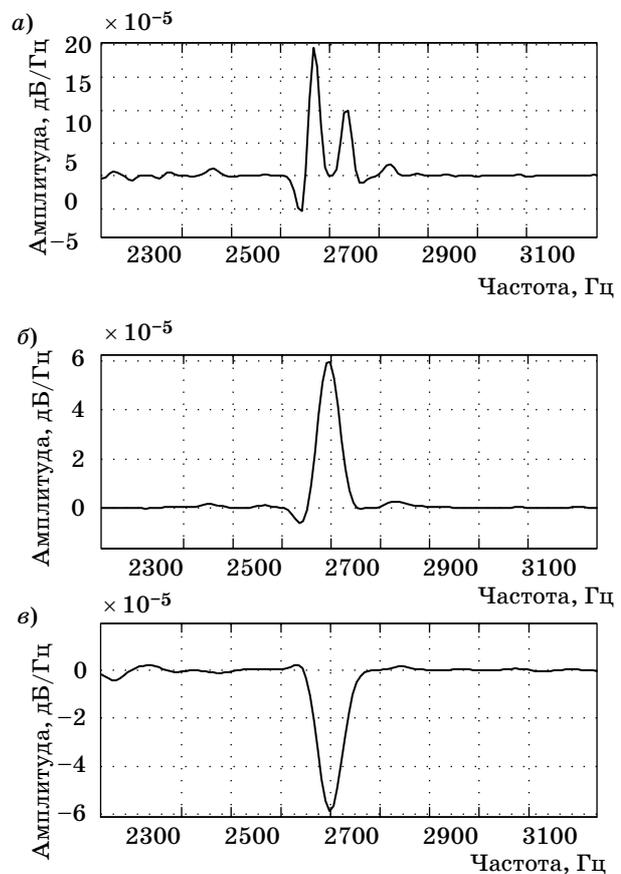
соотношений и возможности его применения при ОСШ, незначительно превышающих единицу.

### Моделирование применения биспектрального анализа при распознавании двоичных символов группового телеметрического сигнала

Моделирование возможности использования биспектра при расчете пространства признаков двоичных символов проводилось в среде MatLab. В целях повышения скорости вычисления использовался метод масштабного моделирования, а именно кратного уменьшения параметров радиосигнала, таких как скорость передачи и значения несущей частоты сигнала.

Модуль биспектра двоичных символов группового телеметрического сигнала с модуляцией КИМ<sub>2</sub>-ЧМ, искаженных белым гауссовым шумом при ОСШ, равном 2 дБ, представлен на рис. 1; на рис. 2 — биспектр информационных символов группового телеметрического сигнала с модуляцией КИМ<sub>π</sub>-ФМ, искаженных белым гауссовым шумом при ОСШ, равном 2 дБ.

Рисунки подтверждают теоретические данные о возможности применения биспектрального



■ **Рис. 2.** Биспектр информационных символов «01» (а); «0» (б); «1» (в)

анализа для выделения пространства признаков, необходимого для разделения информационных символов на классы в целях дальнейшей разработки классифицирующего правила и построения системы символьной синхронизации как системы распознавания образов.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают возможность применения биспектрального анализа для создания систем символьной синхронизации перспективных радиотелеметрических средств.

## Заключение

Применение биспектрального анализа позволило сформировать вектор признаков  $P = \{f_{\max}, \varphi_{\text{тек}}, p_{\text{пор}}\}$ , который обеспечивает однозначное распознавание номиналов двоичных символов группового телеметрического сигнала при малых ОСШ, что подтверждается результатами моделирования в среде MatLab. Современные наземные приемно-регистрирующие станции обеспечивают устойчивый прием телеметрической информации при ОСШ, равном 5 дБ. Использование подхода, основанного на биспектральной обработке фрагментов сигнала, позволяет достичь энергетического выигрыша 3 дБ. Таким образом,

при построении системы символьной синхронизации как системы распознавания образов с использованием данных биспектрального анализа повышает достоверность приема телеметрической информации.

## Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
2. Белицкий В. И., Зверев В. И. Телеметрия/ МО СССР. – Л., 1984. – 465 с.
3. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
4. Басараб М. А., Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. Цифровая обработка сигналов и изображений: монография. – М.: Физматлит, 2007. – 544 с.
5. Солонина А., Улахович Д., Яковлев Л. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 464 с.
6. Swami A., Giannakis G.B. and Zhou G. Bibliography on higher-order statistics//Signal Processing. 1997. Vol. 60. N 1. P. 65–126.

UDC 621.397.5

## Use of Bispectral Analysis in Symbol Synchronization of Radio-Telemetric Systems

Loskutov A. I.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Head of the Department, rujenz@mail.ru

Byankin A. A.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Professor of the Department, aab51@mail.ru

Dunikov A. S.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, artem.sever1@yandex.ru

<sup>a</sup>A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya St., 197082, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** In the course of updating rocket and space technology higher data accuracy requirements should be met by radio-telemetric systems. One way to ensure reliable transmission of telemetric results is to increase noise resistance of synchronization system performance. The goal of the paper is to form a binary symbol image feature vector of a group telemetric signal required for the synthesis of the system of symbol synchronization in a time-frequency domain. **Methods:** Based on calculation of signal fragment bispectral density a feature vector has been formed, it allows demodulating binary symbols of a group telemetric signal. **Results:** The feature vector has been defined, there has been tested a simulation possibility of applying bispectral analysis for demodulation of binary symbols of a group telemetric signal. **Practical relevance:** The results of studies have been used for developing a method of symbol synchronization in a frequency-time domain. The developed feature vector provides certain demodulation of binary symbols of a group telemetric signal at small signal / noise ratios. Therefore, the obtained results ensure enhanced reliability of telemetry data reception.

**Keywords** — Bispectral Analysis, Group Telemetric Signal, Demodulation, Symbol Synchronization.

## References

1. Sklar B. *Tsifrovaia svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital Communication. Theoretical Basis and Practical Application]. Moscow, Vil'iams Publ., 2003. 1104 p. (In Russian).
2. Belickij V. I., Zverev V. I. *Telemetriia* [Telemetry]. Saint-Petersburg, MO SSSR Publ., 1984. 465 p. (In Russian).
3. Sergienko A. B. *Tsifrovaia obrabotka signalov* [Digital Signal Processing]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2011. 768 p. (In Russian).
4. Basarab M. A., Volosiuk V. K., Kravchenko V. F. *Tsifrovaia obrabotka signalov i izobrazhenii* [Digital Signal and Image Processing]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 544 p. (In Russian).
5. Solonina A., Ulahovich D., Iakovlev L. *Algoritmy i protsessory tsifrovoi obrabotki signalov* [Algorithms and Processes the Digital Signal Processing]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2001. 464 p. (In Russian).
6. Swami A., Giannakis G. B. and Zhou G. Bibliography on Higher-Order Statistics. *Signal Processing*, 1997, vol. 60, no. 1, pp. 65–126.