

# Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 621.37:621.391

А.А. Белокуров

Государственное предприятие Центральное конструкторское бюро «Протон», Харьков

## РАСПОЗНАВАНИЕ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИЗВЕСТНОМ ЧИСЛЕ ИХ КЛАССОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

*Для определения списка рабочих частот сложных сигналов использованы методы распознавания образов при известном числе классов сигналов, которые различаются количеством частот и их номинальными значениями. Для выбора моделей с различным числом частот применен критерий Шварца. Оценена эффективность предложенного метода путем имитационного статистического моделирования.*

**Ключевые слова:** многочастотные сигналы, цифровая обработка, система алгебраических уравнений, частотно-временные параметры.

### Введение

**Актуальность проблемы.** Повсеместное распространение беспроводных сетей множественного доступа вызывает повышенный интерес разработчиков к проблеме разработки новых стандартов связи, предусматривающих все более высокие скорости соединения при неизменных (или практически неизменных) ограничениях на доступную полосу частот и допустимую мощность излучения передатчиков. Достижение разумного компромисса между энергетическими и частотными затратами на передачу возможно на основе использования сложных многочастотных сигналов. Сложность структуры таких сигналов является причиной существенных затруднений при решении задач радиомониторинга. Поэтому совершенствование методов автоматического цифрового анализа параметров многочастотных многофазных сигналов является весьма актуальной задачей.

**Анализ последних исследований.** Традиционным методом первичного выявления параметров контролируемых сигналов в настоящее время является Фурье-анализ на основе быстрых алгоритмов преобразования [1]. Основным недостатком традиционных методов является сравнительно низкое разрешение по частоте. Разрешение можно повысить путем использования априорной информации о параметрах обрабатываемых сигналов. На этом основаны нетрадиционные методы спектрального анализа, которые активно разрабатываются в последнее время и которые используют модели, аппроксимирующие сигнал. При этом оценке подлежит конечное число параметров [2]. В [3, 4] для определения списка ортогональных рабочих частот сигнала используется согласованное

разложение сигнала в ряд на интервале модуляции по гармоникам и методы линейной алгебры. Такое согласованное разложение очень трудно получить при использовании быстрого преобразования Фурье, где разрешение по частоте точно определяется продолжительностью интервала разложения. В [4] предложен метод определения списка рабочих ортогональных поднесущих частот OFDM сигналов с префиксом в условиях, когда известно число классов таких сигналов и характеристики сигналов для каждого из классов. При наличии префикса корреляционным методом определены основные структурные временные параметры OFDM сигналов: значение интервала ортогональности, значение интервала модуляции, значение средней скорости модуляции и интервал ортогональности по частоте. Эти априорные сведения позволили упростить и в то же время повысить эффективность распознавания. В отличие от [4] в настоящей статье решается задача распознавания сигналов при известном числе их классов и списке частот для каждого класса и полной априорной неопределенности относительно основных структурных временных параметров сигналов.

**Цель статьи.** Целью статьи является разработка математического метода распознавания сигналов в условиях, когда известно число классов таких сигналов и список частот для каждого класса и полной априорной неопределенности относительно основных структурных временных параметров сигналов.

### Основная часть

В настоящее время наиболее распространенным видом многочастотных сигналов являются OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

сигналы [1]. Произвольный OFDM сигнал формируется путем алгебраического суммирования нескольких гармонических колебаний одинаковой амплитуды, каждое из которых имеет несколько вариантов модуляционного фазового сдвига.

OFDM сигнал может содержать префиксную часть, которая является повторяющейся (с точностью до знака) начальной частью сигнала, добавляемой в конце интервала модуляции. Данное циклическое продолжение сигнала необходимо для борьбы с неравномерным запаздыванием поднесущих колебаний различных частот при многолучевом распространении радиоволн и сбоях синхронизации.

Однако не все существующие стандарты OFDM предусматривают наличие префикса. В этом случае априорные данные о частотно-временной структуре сигнала не могут быть получены методами [3,4]. Для выявления первичных параметров в подобных случаях традиционно используется спектральный анализ на основе БПФ [1]. Точное определение временных параметров через характеристики спектра в условиях множества несущих, многократно модулированных по фазе, даже при очень большой частоте дискретизации обречено на неудачу.

В практических ситуациях имеется некоторая база данных с характеристиками многочастотных сигналов и требуется отнести принятый сигнал к одному из известных классов [4].

Как и в [4] полагаем, что каждый класс характеризуется признаками  $\mathbf{F}_\ell = (f_{1\ell}, \dots, f_{n_\ell})$  – вектор частот, которые содержит сигнал класса  $\ell = 1 \dots L, n_\ell$  – количество частот. На практике часто возникают ситуации, когда сигнал может не принадлежать к числу заданных классов и должен быть отнесен к  $(L+1)$  классу не заданных в статистическом смысле сигналов [5]. Это более сложная задача распознавания заданных сигналов с оцениванием их параметров. При этом задаются  $L+1$  гипотезы, которые могут быть приняты в отношении наблюдаемых сигналов:  $(H_\ell, \ell = 1 \dots L)$  – для заданных сигналов,  $H_\ell$  – для неизвестных сигналов, объединенных в  $(L+1)$  класс [5].

Обозначим через  $\mathbf{B} = (b_0, \dots, b_{N-1})$  произвольную выборку сигнала размера  $N$ .

При вычислении критериев для выбора класса в [4] используется нормированная остаточная сумма квадратов ошибок модели (RSS критерий):

$$RSS_\ell = \frac{(\mathbf{B} - \mathbf{A}_\ell \hat{\mathbf{X}}_\ell)^T (\mathbf{B} - \mathbf{A}_\ell \hat{\mathbf{X}}_\ell)}{N - n_\ell - 1}, \quad \ell = \overline{1, L}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}_\ell = \left\| \mathbf{a}_{i,j}^\ell \right\|$ ,  $i = \overline{0, N-1}, j = \overline{0, (2 \cdot n_\ell - 1)}$ ;

$$a_{i,j}^\ell = \cos[2\pi f_{j\ell} \cdot t_i], \quad 0 \leq j \leq n_\ell - 1;$$

$$a_{i,j}^\ell = \sin[2\pi f_{j\ell} \cdot t_i], \quad n_\ell \leq j \leq 2 \cdot n_\ell - 1,$$

$$\hat{\mathbf{X}}_\ell = (\mathbf{A}_\ell^T \mathbf{A}_\ell)^{-1} \mathbf{A}_\ell^T \mathbf{B}. \quad (2)$$

Сама величина (1) не может служить критерием для выбора структуры, поскольку при увеличении сложности модели  $n_\ell$  происходит все более точное приближение к входным, что допустимо только при отсутствии возмущений. Для выбора моделей с различным числом параметров часто используют следующие критерии [4]:

1) информационный критерий Акаике (AIC- Akaike informatijn criterion), который имеет вид

$$AIK(n_\ell) = \ln(RSS_\ell) + 2 \cdot n_\ell; \quad (3)$$

2) байесовский информационный критерий Шварца (BIC- Bayesian informatijn criterion), в котором дополнительно учитывается длина выборки

$$BIK(n_\ell) = \ln(RSS_\ell) + \frac{\ln N}{N} \cdot n_\ell; \quad (4)$$

3) финальная ошибка прогнозирования или модифицированный RSS критерий, которая не требует дополнительной информации и вычисляется так:

$$\Phi O П(n_\ell) = RSS_\ell \cdot \frac{N + n_\ell}{N - n_\ell}. \quad (5)$$

Если говорить конкретно о критериях выбора моделей, то следующим шагом процесса выбора должен стать анализ их применимости в зависимости от количества данных, по которым строится модель. Результаты моделирования на выборках небольшого объема показали, что предпочтительным является критерий Шварца. Тогда с использованием (1) решение принимается в два этапа [5]:

1) если хотя бы для одного значения  $\ell = 1, L$  выполняется неравенство

$$BIK(n_\ell) = \ln(RSS_\ell) + \frac{\ln(N)}{N} \cdot n_\ell \leq \lambda_\ell,$$

то принимается решение в пользу  $L$  заданных радиосигналов; если выполняются условия

$$BIK(n_\ell) = \ln(RSS_\ell) + \frac{\ln(N)}{N} \cdot n_\ell > \lambda_\ell,$$

то принимается решение в пользу  $(L+1)$ -го класса сигналов с неизвестными параметрами;

2) если выполняются неравенства для нескольких классов, то на втором этапе решение в пользу  $\ell$ -го сигнала принимается при выполнении системы неравенств

$$BIK(n_\ell) \leq BIK(n_i); \quad \text{для } i=1, 2, \dots, \ell-1, \ell+1, \dots, L.$$

Пороговые значения  $\lambda_\ell$  определяются из условия обеспечения требуемой вероятности правильного распознавания  $\ell$ -го сигнала, которая может быть оценена, исходя из следующих соображений. В (4) случайной величиной является величина  $RSS_\ell$ , которая приближенно распределена по нормальному

$$\text{закону } N\left(\frac{N\sigma_\ell^2}{(N-n_\ell-1)}, \frac{\sigma_\ell^2}{(N-n_\ell-1)}\sqrt{2N}\right).$$

Далее с использованием метода линеаризации найдем математическое ожидание и дисперсию величины  $ВК(n_\ell)$ . Соответственно они равны

$$M[ВК(n_\ell)] = \ln\left(\frac{N\sigma_\ell^2}{(N-n_\ell-1)}\right) + \frac{\ln N}{N} \cdot n_\ell$$

и 
$$D[ВК(n_\ell)] \approx \frac{2N}{(N-n_\ell-1)^2}.$$

При предположении, что  $ВК(n_\ell)$  имеет нормальное распределение, пороговые значения  $\lambda_\ell$  определяются из условия обеспечения требуемой вероятности правильного распознавания  $\ell$ -го сигнала  $P_\ell$ , т.е.

$$P_\ell = P(|ВК(n_\ell) - M[ВК(n_\ell)]| \leq \lambda_\ell) = 2\Phi_0\left(\lambda_\ell / \sqrt{D[ВК(n_\ell)]}\right),$$

где 
$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

Следует заметить, что при малом количестве отсчетов сигнала, наличии помех и плохой обусловленности матрицы  $A$  точное решение (2) (в смысле псевдорешения) оказывается крайне неустойчивым, то есть задача относится к классу некорректных.

Поэтому на практике необходимо ввести дополнительный этап оценивания степени адекватности модели природе процесса в целом и имеющимся априорным предположениям. В [4] за счет наличия префикса дополнительно оценивались значение интервала ортогональности, значение интервала модуляции, значение средней скорости модуляции и интервал ортогональности по частоте.

В нашем случае эти априорные данные не доступны, однако для каждого из классов точно известен список и значения частот сигналов. То есть, дополнительным параметром может быть уровень значимости каждой из гармоник с учетом длины выборки и числа оцениваемых параметров. Уровень значимости указывает долю ошибочно принятых решений о значимости параметров при оценивании регрессии. При использовании статистических методов гармоника считается статистически значимой, если она вносит существенный вклад в дисперсию временного ряда, то есть, если отвергается статистическая гипотеза о том, что  $y_{\ell i}^2 = 0$ , где

$$y_{\ell i} = \left(\hat{x}_i^\ell\right)^2 + \left(\hat{x}_{i+n_\ell}^\ell\right)^2, \quad i = 0, \dots, (n_\ell - 1),$$

$\hat{X}^\ell = \left\{\hat{x}_0^\ell, \dots, \hat{x}_{2-n_\ell}^\ell\right\}$  – вектор оценок квадратурных составляющих для класса сигнала с номером  $\ell$ .

Для проверки гипотезы вычисляется статистика [6]:

$$n_\ell \cdot y_{\ell i}^2 / \left(2 \cdot \sigma_{\ell i}^2\right), \quad i = 1, 2, \dots, n_\ell, \quad (6)$$

где  $\sigma_{\ell i}^2 = \left(\sum_{j=1}^N b_j^2 - n_\ell \cdot y_{\ell i}^2\right) / (N - 2)$  – оценка дис-

персии отклонения оцененных значений от измеренных.

Вычисляемая величина имеет  $F$ -распределение с  $\nu_1 = 2$  и  $\nu_2 = N - 2$  степенями свободы. Гипотеза отвергается, то есть гармоника считается значимой, если вычисленная величина больше, чем  $P = (1 - \alpha)$  – точка  $F$ -распределения с соответствующими степенями свободы, где  $P$  – вероятность правильного принятия гипотезы, а  $\alpha$  – вероятность ложного решения. В зависимости от величины  $\alpha$  можно выбрать порог для количества значимых гармоник.

По результатам имитационного моделирования на рис. 1 представлены зависимости вероятности правильной классификации  $P_{ПК}$  трех классов сигналов ( $n_\ell = 4; 12; 20$ ) от отношения сигнал/шум  $E_b / N_0$  (отношение энергии одного бита к плотности мощности шума) при  $P_\ell = 0.997$ , т.е.  $\lambda_\ell = 3\sqrt{D[ВК(n_\ell)]}$ . Длина выборки составляла 260 дискрет, что обеспечивает хорошую обусловленность задачи по критерию диагонального преобладания матрицы Грама  $\phi(MG) > 2n_\ell - 1$  для трех классов сигналов, то есть существуют и могут быть выработаны гарантированные оценки разрешимости задачи с требуемой точностью при заданной точности исходных данных [7].

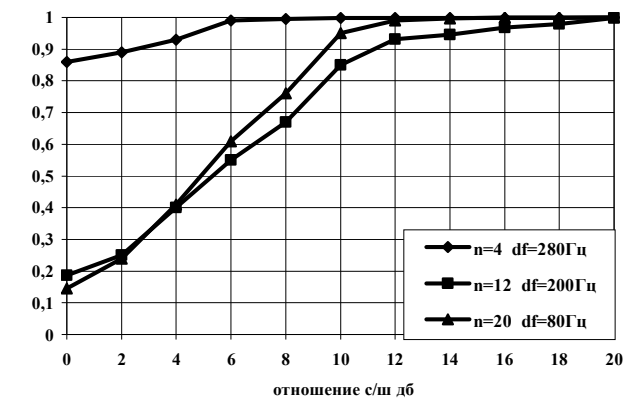


Рис. 1. Зависимость  $P_{ПК}$  от отношения  $E_b / N_0$  в дБ

Анализ показывает, что для отношений сигнал/шум больше десяти для всех классов сигналов вероятность правильного распознавания не менее 0.85.

Также моделировалась длина выборки 180 дискрет, при которой критерий диагонального преобладания матрицы Грама не выполнялся для сигналов третьего класса ( $n_\ell = 20$ ).

В этом случае для улучшения результатов оценок (6) использовалось преобразование взвешивания с одним шагом [8], которое заключается в одновременном умножении матрицы  $A$  и вектора  $B$  на матрицу

$$G = \text{diag}(g_1, \dots, g_N),$$

где  $\xi_i^2 = (B - A_\ell \hat{X}_\ell)^T (B - A_\ell \hat{X}_\ell)$  – величина невязки

решения МНК;  $g_0 = N / \sum_{i=1}^N \xi_i^2$ ,  $\sum_{i=1}^N g_i = N$ ,

$$g_i = g_0 / \xi_i^2, \quad i = 1, \dots, N,$$

Анализ результатов определения вероятности правильной классификации сигналов третьего класса  $P_{\text{ПК}}(20)$  с помощью обычного МНК и с преобразованием взвешивания показал возможность увеличения вероятности правильной классификации при использовании преобразования взвешивания примерно в 2-3 раза.

## Выводы

Основной результат данной статьи заключается в получении универсального метода определения списка рабочих частот многочастотных сигналов. В отличие от известных спектральных методов, в данном методе предложено использование помехоустойчивых решений переопределенных систем уравнений, а для обеспечения их устойчивости введен дополнительный этап – определение уровня значимости каждой из гармоник с учетом длины выборки и числа оцениваемых параметров. Поскольку классы сигналов различаются количеством поднесущих частот, для принятия решения используется критерий Шварца, учитывающий порядок используемой модели класса и длину выборки. Результаты моделирования показали, что для характерных для практики отношений сигнал/шум от десяти до двадцати для всех классов вероятность правильной классификации сигналов не менее 0.85. Дальнейшим развитием рассмотренного метода может быть рассмотрение возможности

использования преобразования взвешивания для случаев коротких выборок сигналов.

## Список литературы

1. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневецкий, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Дмитриев Е.В. Аппроксимация коротких процессов, сигналов, функций и расчет их гармонических дискретных спектров / Е.В. Дмитриев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2007. – Т. 10, № 1. – С. 33-46.
3. Кузниченко В.С. Определение списка рабочих частот OFDM сигналов в системах автоматического радиомониторинга в условиях априорной неопределенности / В.С. Кузниченко // Системы управления, навигации та зв'язку. – К.: ЦНДІ НІУ, 2011. – Вип. 1(17). – С. 276-278.
4. Кузниченко В.С. Определение списка рабочих частот OFDM сигналов в системах автоматического радиомониторинга при известном числе их классов / В.С. Кузниченко, Г.Г. Писарёнок, С.Г. Рассомахин // Системи управління навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НІУ, 2011. – Вип. 3(19). – С. 262-265.
5. Безрук В.М. Совместное обнаружение, пеленгование и распознавание радиоизлучений с учетом неопределенности измерений параметров сигналов / В.М. Безрук, А.М. Чеботов // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ, 2009. – Вип. 5 (79). – С. 82-84.
6. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов / Г.Г. Канторович // Экономический журнал ВШЭ. – М., 2002. – № 2. – С. 251-273.
7. Метод определения необходимой длительности многочастотных сигналов для их анализа методами линейной алгебры / А.А. Белокуров, О.И. Вотяков, В.С. Кузниченко, Г.Г. Писарёнок // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2016. – Вип. 1 (138). – С. 6-9.
8. Белокуров А.А. Повышение точности определения параметров многочастотных сигналов для их анализа методами линейной алгебры / А.А. Белокуров, О.И. Вотяков, Г.Г. Писарёнок // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХУПС, 2016. – № 1(22). – С. 115-117.

Поступила в редколлегию 25.02.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, доцент С.Г. Рассомахин, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков.

## РОЗПІЗНАВАННЯ БАГАТОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ ПРИ ВІДОМОМУ ЧИСЛІ ЇХНІХ КЛАСІВ У АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ РАДІОМОНІТОРИНГУ

О.О. Білокуров

Для визначення списку робочих частот складних сигналів використані методи розпізнавання образів при відомому числі класів сигналів, які відрізняються кількістю частот і їх номінальними значеннями. Для вибору моделей з різним числом частот використано критерій Шварца. Оцінено ефективність запропонованого методу шляхом імітаційного статистичного моделювання.

**Ключові слова:** багаточастотні сигнали, цифрова обробка, система лінійних рівнянь алгебри, частотно-часові параметри.

## RECOGNITION OF MULTIFREQUENCY SIGNALS AT KNOWN NUMBER OF THEIR CLASSES IN THE AUTOMATIC SYSTEMS OF RADIOMONITORING

A.A. Belokurov

For determination of list of working frequencies of difficult signals the methods of recognition of patterns are used at the known number of classes of signals which differentiate the amount of frequencies and their basic values. For the choice of models with the different number of frequencies the criterion of Schwarz is applied. The estimation of efficiency of the offered method is carried out by an imitation statistical design.

**Keywords:** multifrequency signals, digital treatment, system of algebraic equalizations, frequency-temporal parameters.