

УДК 004.67 + 621.391.26

## **ПРИМЕНЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА МАТРИЧНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА В ШУМЕ**

*Д.Д. Салов, О.Л. Ибряева*

В статье применен метод матричных пучков для обнаружения сигнала в шуме. Показано, что классический метод не способен определить время начала сигнала, в то время как модифицированный метод помимо определения времени прихода сигнала также оценивает его частоту.

Ключевые слова: обработка сигнала, метод матричных пучков, обнаружения сигнала в шуме, определения времени прихода, оценка частоты.

В данной работе рассматривается задача определения параметров и времени прихода зашумленного сигнала с неизвестными параметрами. Данная задача появляется во многих областях, таких как спектральный анализ сигналов ядерного магнитного резонанса [1], в идентификации радиолокационных объектов [2], в сейсмологии [3], медицине [4] и др.

Для решения данной задачи был применен классический метод матричных пучков [5] и его модифицированный аналог [6]. Насколько нам известно, ранее нигде метод матричных пучков не использовался для определения времени прихода сигнала, потому что (как показано в данной статье) классический ММП плохо справляется с этой задачей. Можно заметить, что существует множество алгоритмов решения задачи обнаружения сигнала, но они либо работают преимущественно с синусоидальными сигналами (преобразование Фурье, обобщенный «кросс-коррелятор» [7–9]), либо требуют знания законов распределения как самого сигнала, так и его шумовой составляющей (метод максимального правдоподобия [10, 11]).

Предложенный в этой статье метод не требует такой априорной информации и работает с сигналами достаточно общего вида суммой затухающих синусоид. Количество синусоид не предполагается известным заранее. Для оценки эффективности представленных выше методов предложен модельный сигнал длительностью 0,1 с. Он представляет собой последовательность затухающих синусоид, возникающих в случайные моменты времени. Данный модельный сигнал представлен на рис. 1.

На рассматриваемом отрезке сигнала затухающая синусоида частотой 30 кГц возникла 10 раз (некоторые синусоиды частично перекрылись друг с другом). Амплитуда и фаза синусоид различны, частота и коэффициент затухания всех синусоид одинаковы.

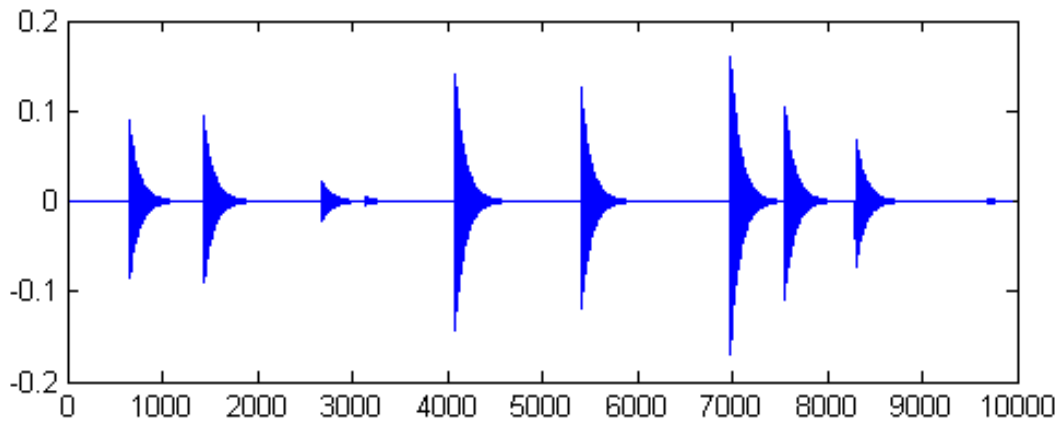


Рис. 1. Случайная последовательность синусоид

Частота дискретизации сигнала – 100 кГц. Зашумленный сигнал (в качестве шума взяты отсчеты нормально распределенной случайной величины) представлен на рис. 2. Отношение сигнал/шум (SNR) для данного сигнала будем вычислять по формуле 1:

$$SNR = 10 \log \frac{\frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \frac{1}{N} \sum_{k=\eta_s}^{\eta_s+N} y_k^2}{\sigma^2}, \quad (1)$$

где  $M$  – число импульсов на рассматриваемом временном отрезке сигнала,  $N$  – число отсчетов, за которое синусоида затухает до уровня 5 % от энергии в момент возникновения импульса,  $\eta_s$  – номер отсчета, соответствующий времени возникновения затухающей синусоиды,  $y_k$  – значения выходного сигнала в отсутствии шума, а  $\sigma$  – дисперсия шумового сигнала.

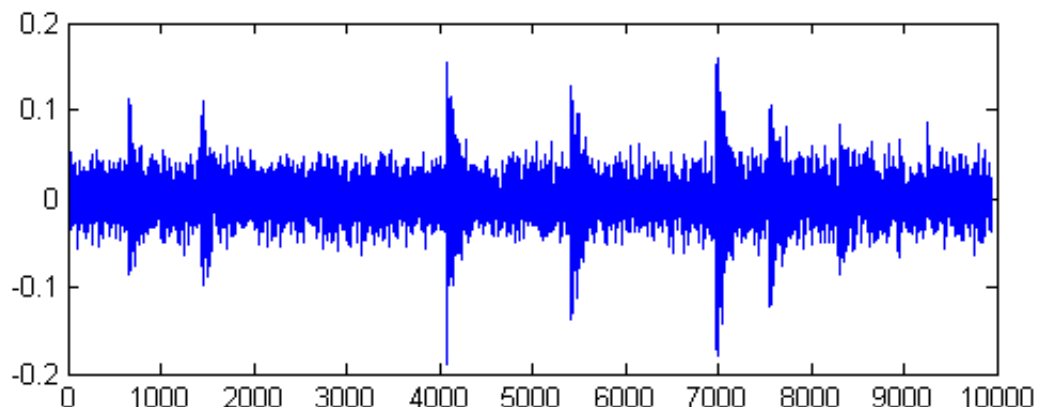


Рис. 2. Зашумленный сигнал

Для сигнала на рис. 2 значение SNR составило 7 дБ. Со сдвигом на 1 отсчет, предложенным в статье методом были обработаны сегменты сиг-

нала длиной 0,5 мс каждый. Значение параметра  $\varepsilon$  было выбрано равным 0,01. Найденные значения частоты показаны на рис. 3. Видно, что на участках с полезным сигналом модифицированным методом матричных пучков была обнаружена частота около 30 кГц. Важно, что на участках сигнала без полезной составляющей никаких частот не было найдено. Таким образом, предложенный метод позволяет найти время прихода сигнала и даже оценить его частоту.

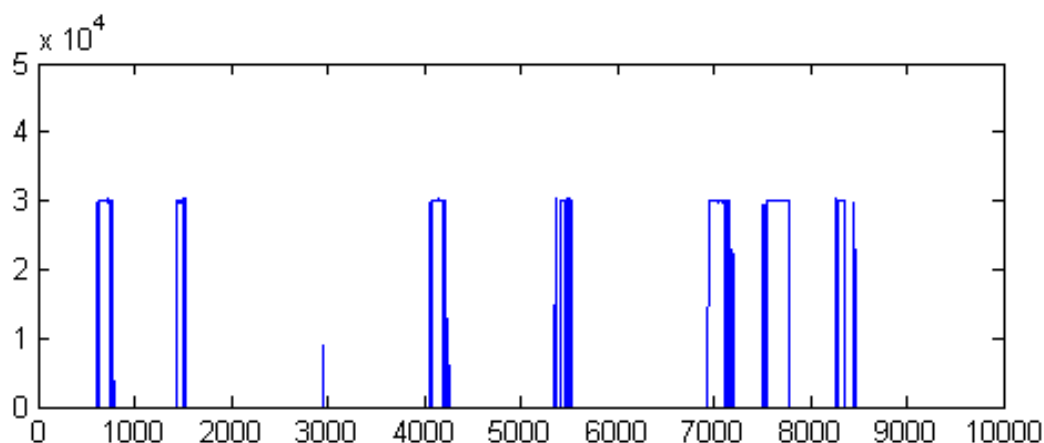


Рис. 3. Зависимость найденной частоты от отсчетов сигнала

Заметим, что классический метод матричных пучков будет подстраивать шум под сумму синусоид и находить различные частоты на протяжении всего сигнала.

Сравним классический и модифицированный ММП. Для этого рассмотрим отрезок сигнала с 4100 по 4150 отсчет, в котором присутствует затухающая синусоида с частотой 30 кГц и «чисто шумовой» отрезок сигнала с 6000 по 6050 отсчет. Результаты сравнения сигналов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты обработки сигнала  
с полезной составляющей с частотой 30 кГц

	Классический метод матричных пучков	Модифицированный метод матричных пучков
Полюса	$-0,3138 + 0,9596i$ $0,8366 + 0,4215i$	$-0,3130 + 0,9354i$
Частоты (кГц)	30,223 7,428	30,140

Таблица 2

Результаты обработки сигнала без полезной составляющей (шум)

	Классический метод матричных пучков	Модифицированный метод матричных пучков
Полюса	0,0518 + 0,7307i 0,7149 + 0,5868i 0,1290 + 0,0000i	–
Частота (кГц)	23,874 10,938 0	–

**Заключение.** Как можно видеть, для первого отрезка сигнала классический метод помимо 30 кГц нашел лишнюю частоту. Для второго отрезка классический метод также нашел ряд частот, подстроив под данный шум сумму комплексных экспонент.

Таким образом, ясно, что классический ММП не позволит определить время прихода полезного сигнала, но его модифицированный аналог прекрасно с этим справляется. Что говорит о перспективности применения модифицированного метода матричных пучков в задачах обнаружения сигнала в шуме.

Библиографический список

1. Lin Y., Hodkinson P., Ernst M., Pines A. A Novel Detection-estimation Scheme for Noisy NMR Signals: Applications to Delayed Acquisition Data // *Journal of Magnetic Resonance*. 1997. Vol. 128, P. 30–41.
2. Коновалюк, М.А. Идентификация объектов сложной формы в сверхкороткоимпульсной радиолокации / М.А. Коновалюк, Ю.В. Кузнецов, А.Б. Баев // III Всероссийская конференция «Радиолокация и связь» (Москва, 26–30 октября 2009 г.). – М.: Изд-во ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 2009. – С. 932–936.
3. Персичкин, А.А. О методике оценки параметров сейсмических сигналов / А.А. Персичкин, А.А. Шпилевой // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. – 2015. – № 10. – С. 122–125.
4. Bhuiyan M., Malyarenko E.V., Pantea M.A., Capaldi D., Baylor A.E., Maev R.Gr. Time-frequency Analysis of Clinical Percussion Signals Using Matrix Pencil Method // *Journal of Electrical and Computer Engineering* 2015. Vol. 2015. P. 340–347. DOI: 10.1155/2015/274541.
5. Hua Y., Sarkar T.K. Matrix Pencil Method for Estimating Parameters of Exponentially Damped Undamped Sinusoids in Noise // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1990. Vol. 38, No. 5. P. 814–824.
6. Ибряева, О.Л. Модификация метода матричных пучков, использующая совместное оценивание полюсов сигнала и обратных к ним / О.Л. Ибряева, Д.Д. Салов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика»*. – 2017. – Т. 6, № 1. – С. 26–37. DOI: 10.14529/cmse170102.

7. Шостак, С.В. Решение задачи «обнаружение-измерение дальности» для малоподвижных объектов методом активной корреляции / С.В. Шостак, Е.Н. Бакланов, П.А. Стародубцев, А.П. Шевченко // Журнал Радиоэлектроники. – 2015. – № 3. – С. 101–117.

8. Логинов, А.А. Реализация алгоритма поиска сигнала заданной формы на фоне шумов / А.А. Логинов, О.А. Морозов, Е.М. Сорохтин, М.М. Сорохтин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Физика твердого тела. – 2005. – № 1(18). – С. 141–145.

9. Ван Трис, Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции / Г. Ван Трис. – М.: Изд-во Сов. радио, 1977. – 650 с.

10. Stoica P., Moses R.L., Friedlander B., Soderstrom T. Maximum Likelihood Estimation of the Parameters of Multiple Sinusoids from Noisy Measurements // IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1989. Vol. 37, No. 3. P. 378–392.

11. Yang X., Huang B., Gao H. A Direct Maximum Likelihood Optimization Approach to Identification of LPV Time-delay Systems // Journal of the Franklin Institute. 2016. Vol. 353. P. 1862–1881.

[К содержанию](#)