

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON**

А.И. Проскурин, Н.Ю. Юдина

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова»

В данной работе рассмотрено моделирование автокорреляционного метода обнаружения линейно-частотно модулированного сигнала с использованием языка программирования Python. Спектр ЛЧМ сигнала формируется с помощью функции *FFT* из состава библиотеки NumPy. Данная функция осуществляет быстрое преобразование Фурье. Анализ разностных частот между исходным и задержанным сигналами в результате использования автокорреляционного метода позволяет выявить ЛЧМ-сигнал.

Ключевые слова: автокорреляция, ЛЧМ-сигнал, Python, амплитуда, спектр

## **SIMULATION OF AUTOCORRELATION METHOD FOR DETECTING A LINEAR-FREQUENCY-MODULATED SIGNAL USING THE PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE**

A.I. Proskurin, N.Y. Yudina

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

This paper discusses the modeling of an autocorrelation method for detecting a linear-frequency-modulated signal using the Python programming language. The spectrum of the chirp signal is formed using the FFT function from the NumPy library. This function performs a fast Fourier transform. Analysis of the difference frequencies between the original and delayed signals as a result of the use of the autocorrelation method allows you to identify the chim signal.

Keywords: autocorrelation, chirp signal, Python, amplitude, spectrum

Для обнаружения и оценки параметров сигналов наиболее эффективным является автокорреляционный метод. Он позволяет обнаружить периодические особенности сигнала на основе сравнения с его задержанной копией. Автокорреляционный метод обеспечивает выделение ключевых особенностей спектра.

При перемножении исходного и задержанного сигналов возникают комбинационные колебания. Это соответствует сумме и разности полных фаз(2).

$$S_x(t) = s_{вх}(t) \times s_3(t) = A \cos(2\pi(f_0 t + \varphi(t))) \times A \cos(2\pi(f_0(t - \tau_3) + \varphi(t - \tau_3))) = \frac{A^2}{2} \cos(2\pi(2f_0 t + \varphi(t) + \varphi(t - \tau_3) - f_0 \tau_3)) + \frac{A^2}{2} \cos(2\pi(\varphi(t) - \varphi(t - \tau) + f_0 \tau_3)).$$

ЛЧМ-сигналы часто используют в радиолокации, так как они устойчивы к помехам и обладают высокой энергией.

При использовании автокорреляционного метода на разности частоты между исходным и задержанным сигналами возникает пик. Этот пик позволяет определить параметры сигнала, такие как задержка и частота.

Структурная схема автокорреляционного обнаружителя показана на рисунке 1.

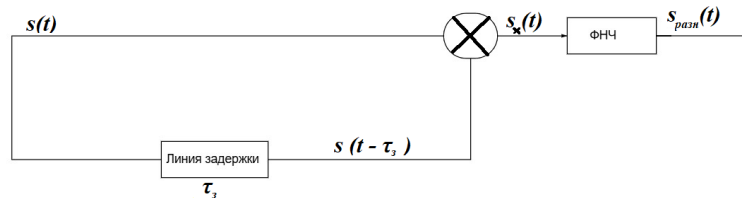


Рисунок 1 – Структурная схема автокорреляционного обнаружителя

Эта схема включает в себя исходный сигнал, линию задержки, задержанный сигнал и фильтр для снижения высоких частот (ФНЧ).

Предположим, что на входе данной схемы поступает сигнал с линейной модуляцией частоты, который определяется следующими выражениями:

$$s(t) = A \cos(2\pi(f_0 t + \varphi(t))), \quad -\frac{\tau_u}{2} < t \leq \frac{\tau_u}{2} \quad (4)$$

$$f_0 = \frac{f_{max} + f_{min}}{2}, \quad \varphi(t) = \frac{\gamma t^2}{2}, \quad \gamma = \frac{f_{max} - f_{min}}{\tau_u},$$

где  $A$  – амплитуда ЛЧМ-сигнала;  $f_0$  – центральная частота;  $\varphi(t)$  – функция модуляции;  $f_{max}$ ,  $f_{min}$  – максимальная и минимальная частота ЛЧМ-сигнала;  $\tau_u$  – длительность сигнала;  $\gamma$  – скорость изменения частоты.

ЛЧМ-сигнал – это сигнал, частота которого изменяется линейно во времени. Математически ЛЧМ-сигнал можно описать следующим образом:

$$s(t) = A \cos \left( 2\pi \left( f_0 t + \frac{B}{2T} t^2 \right) \right),$$

где  $A$  – амплитуда сигнала,  $f_0$  – начальная частота,  $B$  – ширина полосы частот,  $T$  – длительность сигнала.

Комбинационные колебания возникают при перемножении исходного и задержанного сигналов, что соответствует сумме и разности полных фаз (6):

$$\begin{aligned} S_x(t) = s_{bx}(t) \times s_3(t) &= A \cos \left( 2\pi (f_0 t + \varphi(t)) \right) \times A \cos \left( 2\pi (f_0 (t - \tau_3) + \varphi(t - \tau_3)) \right) \\ &= \frac{A^2}{2} \cos(2\pi(2f_0 t + \varphi(t) + \varphi(t - \tau_3) - f_0 \tau_3)) + \\ &+ \frac{A^2}{2} \cos(2\pi(\varphi(t) - \varphi(t - \tau) + f_0 \tau_3)). \end{aligned}$$

Для моделирования автокорреляционного метода был использован язык программирования Python.

Моделирование ЛЧМ сигнала:

```
chirp_signal
= np.cos(2 * np.pi * (Fc * time + (b / 2)
* np.power(time, 2))) + \
1j * np.sin(2 * np.pi * (Fc * time + (b / 2) * np.power(time, 2)))
```

Сигнал моделируется в комплексном виде и включает синфазную и квадратурную составляющую:

$$I(t) = np.cos(2 * np.pi * (Fc * time + (b / 2) * np.power(time, 2)))$$

Реализация квадратурной составляющей отсчетов сигнала

$$Q(t) = np.sin(2 * np.pi * (Fc * time + (b / 2) * np.power(time, 2)))$$

В результате моделирования ЛЧМ сигнала получена зависимость сигнала от времени.

На рисунке 2 приведена зависимость амплитуды  $I$  и  $Q$  отсчетов от времени.

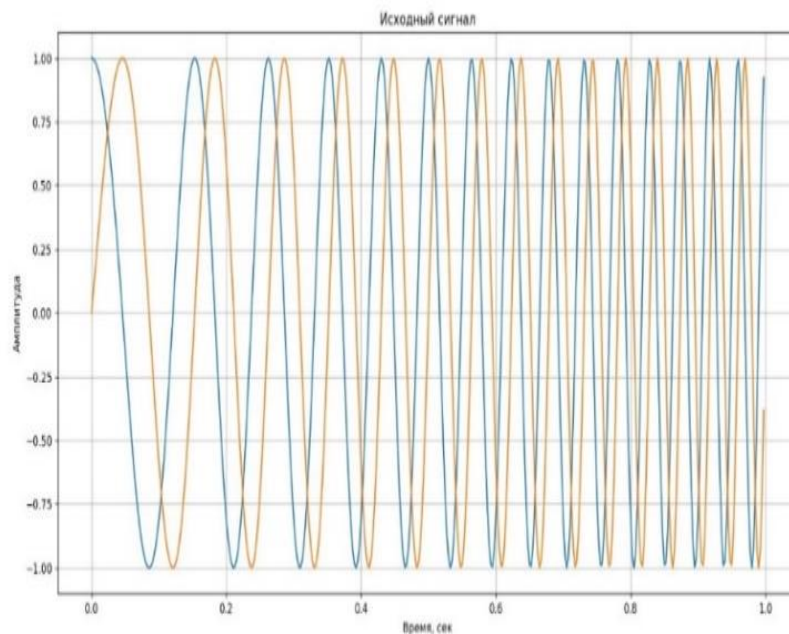


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды I и Q отсчетов от времени

Спектр ЛЧМ сигнала формируется с помощью функции *FFT* из состава библиотеки NumPy. Данная функция осуществляет быстрое преобразование Фурье [1].

На рисунке 3 приведен спектр сформированного ЛЧМ сигнала.

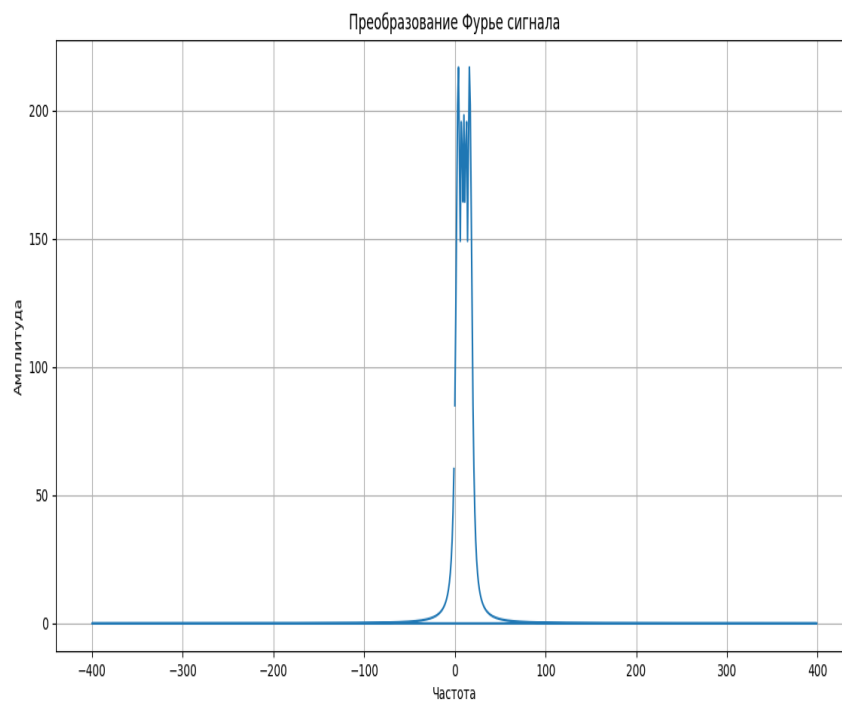


Рисунок 3 – Спектр сформированного ЛЧМ сигнала

Таким образом, в результате моделирования смоделирован сигнал с ЛЧМ. Спектр сигнала, полученный в результате автокорреляции сигнала ЛЧМ и задержанного сигнала приведен на рисунке 4.

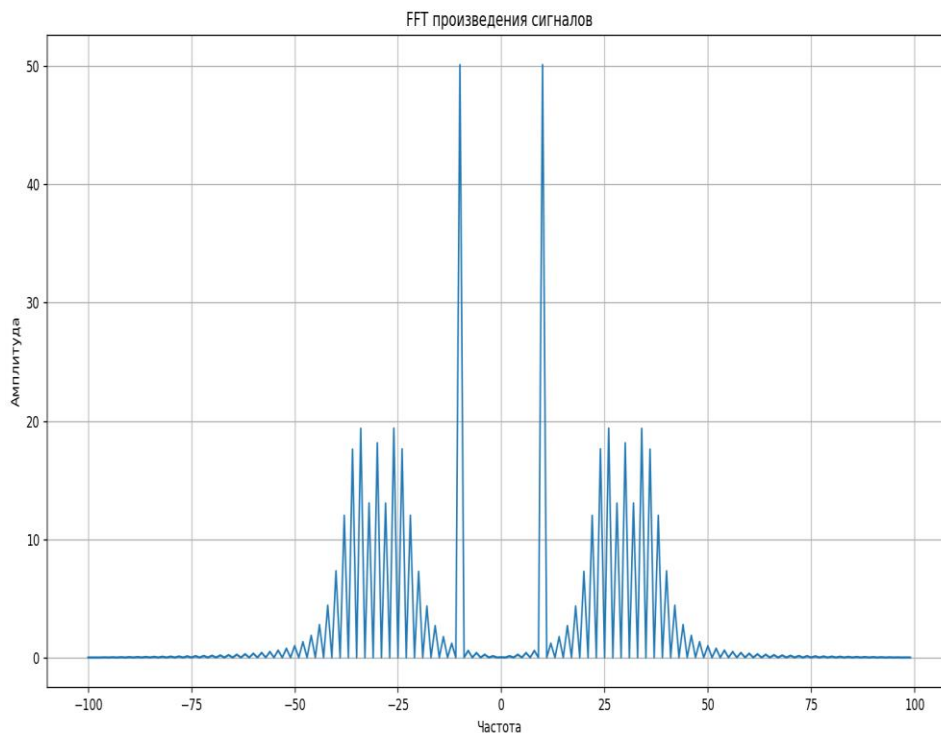


Рисунок 4 – Спектр сигнала в результате автокорреляции

Анализ рисунка 4 показывает, что пики автокорреляционной функции возникают на разностной частоте, т.е. той частоте, на которую смещен задержанный сигнал относительно исходного.

Приведенный пример показывает, что при использовании автокорреляционного метода удастся обнаружить ЛЧМ-сигнал. Проведенные расчеты позволяют установить параметры частоты задержанного сигнала. Автокорреляционный метод обеспечивает идентификацию характеристик сигнала анализируя изменения частоты и длительность импульсов.

К недостаткам данного метода можно относиться то, что точность результатов зависит от качества синхронизации исходного сигнала с его копией. Данный метод чувствителен к внешним помехам и интерференционным эффектам. А это требует дополнительной фильтрации и предварительной обработки данных.

Не смотря на эти недостатки автокорреляционный метод остается востребованным благодаря своей простоте. Результаты, полученные с помощью этого метода, обладают высокой информативностью.

### **Список литературы**

1. Григорьев, Е. К. Основы радиолокации и ЛЧМ сигналов / Е. К. Григорьев. – М.: Радио и связь, 2009. – 320 с.
2. Канатчиков А.А. Сравнительный анализ методов обнаружения и определения параметров зондирующих сигналов РСА космического базирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.2>
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.: ил. – (Учебная литература для вузов)
4. Юдина, Н.Ю. Анализ факторов, оказывающих влияние на надежность структурных элементов сложных вычислительных систем / Н.Ю. Юдина, А.Н. Ковалев // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 86-93.

### **References**

1. Grigor'ev E. K. Osnovy radarokatsii i lchm signalov [Fundamentals of radar and light light signals]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 2009. - 320 p.
2. Kanatchikov A.A. Comparative Analysis of Methods for Detecting and Determining the Parameters of Space-Based SAR Sounding Signals. Zhurnal radioelektronika [electronic journal]. 2020. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.2>
3. Sergienko A.B. Digital Signal Processing: Textbook. allowance. - 3rd ed. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2011. - 768 p.: ill. — (Educational literature for universities)
4. Yudina N.Yu., Kovalev A.N. Analysis of factors influencing the reliability of structural elements of complex computing systems. – 2017. – Т. 10, No 3. – P. 86-93.