

УДК 621.396

## МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ МАЛОЗАМЕТНЫХ РЛС ПО ИХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫМ ПОРТРЕТАМ

Д. С. Войнов

Череповецкое высшее военное инженерное училище радиозлектроники, 162622,  
г. Череповец, пр-т Советский, 126

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2017 г., после доработки – 9 января 2018 г.

**Аннотация.** Представлен подход к измерению в средствах радиотехнического контроля временных параметров сигналов малозаметных радиолокационных станций на основе морфологической обработки результатов частотно-временного преобразования. Описывается разработанная имитационная модель, реализующая данный подход. Приводится график зависимости точности оценки длительности зондирующего ЛЧМ сигнала от отношения сигнал/шум.

**Ключевые слова:** малозаметные радиолокационные станции, радиотехнический контроль, вейвлет-фильтрация, морфологическая обработка.

**Abstract.** Low probability of intercept (LPI) radars have the property of low power, wide bandwidth, frequency variability or other design features to make them difficult to be detected or identified by passive intercept receiver devices such as radio engineering complexes (RTK). In the RTK the potential error of time parameters measurement is determined by fluctuations in the signal fronts. With a small signal to noise ratio, the separation of the pulse fronts becomes practically impossible. In this connection, a contradiction arises which is associated with the need to estimate the time parameters of signals of low-visibility radar with an SNR of less than 0 dB on the one hand and limitations of existing methods on the other hand.

One of the possible solutions to this contradiction is the measurement of time parameters using algorithms for morphological processing of the results of bilinear time-frequency distributions, for example Choi-Williams distribution.

The purpose of the research was to provide the possibility of automatic estimation of signals time parameters in conditions of low SNR (less than 0 dB) using algorithms for morphological processing of the time-frequency distribution results .

To achieve this goal the imitation model of the estimating process of the time parameters (for example, the pulse duration) was developed. The simulation was carried out in the Matlab R2016a environment.

The proposed approach for estimating the time parameters of signals under conditions of low SNR (less than 0 dB) is based on the application wavelet thresholding and morphological processing in a new subject area. The developed simulation model allows providing the possibility of automatic estimation of signals time parameters. This approach can be used to jointly assess the frequency and time parameters of signals from LPI radars.

**Key words:** low probability of intercept radar, time-frequency distributions, radio engineering complexes, morphology method.

## Введение

Использование в малозаметных радиолокационных станциях (РЛС) шумоподобных квазинепрерывных сигналов с малой пиковой мощностью излучения приводит к низкому отношению сигнал/шум (ОСШ) (менее 0 дБ) на входе станции радиотехнического контроля (РТК).

В средствах РТК потенциальная ошибка измерения временных параметров определяется флуктуациями фронтов сигнала. Среднее значение флуктуаций

фронтов  $\sigma_{fp}$  зависит от ОСШ:  $\sigma_{fp} = \frac{\tau_{fp}}{q}$ , где  $\tau_{fp}$  – длительность фронта;  $q = \frac{P_c}{P_u}$

- отношение сигнал/шум, где  $P_c$  - мощность сигнала,  $P_u$  - мощность шума.

$q$  – отношение сигнал/шум [1]. При этом согласно [2] потенциальную ошибку измерения (нижняя граница Крамера-Рао) возможно оценить лишь при больших ОСШ  $q \gg 1$ .

При малом ОСШ выделение фронтов импульса становится практически невозможным. В связи с этим возникает противоречие,

обусловленное необходимостью оценки временных параметров сигналов малозаметных РЛС при ОСШ менее 0 дБ и ограничениями существующих способов.

Одним из возможных вариантов разрешения данного противоречия является измерение временных параметров с помощью алгоритмов морфологической обработки результатов билинейных частотно-временных преобразований. Использование класса билинейных преобразований обусловлено тем, что они обеспечивают максимальную концентрацию сигнальной энергии в частотно-временном пространстве [3].

*Цель исследования* – обеспечить возможность автоматической оценки временных параметров сигналов в условиях низкого ОСШ (менее 0 дБ) с помощью алгоритмов морфологической обработки результатов частотно-временного преобразования.

### Имитационная модель и результаты моделирования

Для достижения данной цели была разработана имитационная модель процесса оценки временных параметров сигналов (на примере длительности импульса) в средствах РТК, структурная схема представлена на рис. 1. Моделирование проводилось в среде Matlab R2016a.

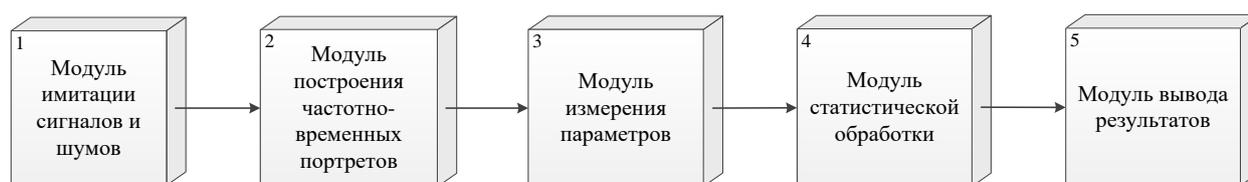


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели.

В модуле 1 генерируется аддитивная смесь  $S(t) = s(t) + n(t)$  радиолокационного сигнала  $s(t)$  и белого гауссовского шума с единичной дисперсией и нулевым математическим ожиданием  $n(t)$ . В качестве сигнала рассмотрен типовой зондирующий радиоимпульс длительностью  $\tau_u = 8$  мкс

с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и прямоугольной огибающей. Длительность всей входной реализации  $\tau = 10$  мкс.

Содержание предлагаемого подхода условно разделим на следующие итерации.

Первая (модуль 2) – зашумленный сигнал  $S(t)$  подвергается билинейному частотно-временному преобразованию Чоя-Вильямса [4]:

$$\rho[S(t)] = \sqrt{\frac{\sigma}{4\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-j2\pi ft)}{|t|} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{-\sigma(u-t)^2}{4t^2}\right) S\left(u + \frac{t}{2}\right) S^*\left(u - \frac{t}{2}\right) dudt \quad (1)$$

где  $\sigma$  – параметр, регулирующий уровень перекрестных составляющих. При моделировании значение параметра  $\sigma = 1,6$ ; (\*) - знак комплексного сопряжения.

Ввиду того что моделируемая входная реализация  $S(t)$  имеет конечную длительность  $\tau$ , выражение (1) вычисляется в пределах данного интервала.

Двумерное графическое представление результатов частотно-временного преобразования (1) определим как частотно-временной портрет сигнала.

На рис. 2 представлен сформированный частотно-временной портрет заданного ЛЧМ сигнала при отсутствии шума (рис. 2 а) и при ОСШ минус 4 дБ (рис. 2 б). На рис. 2 б отчетливо видна сигнальная составляющая.

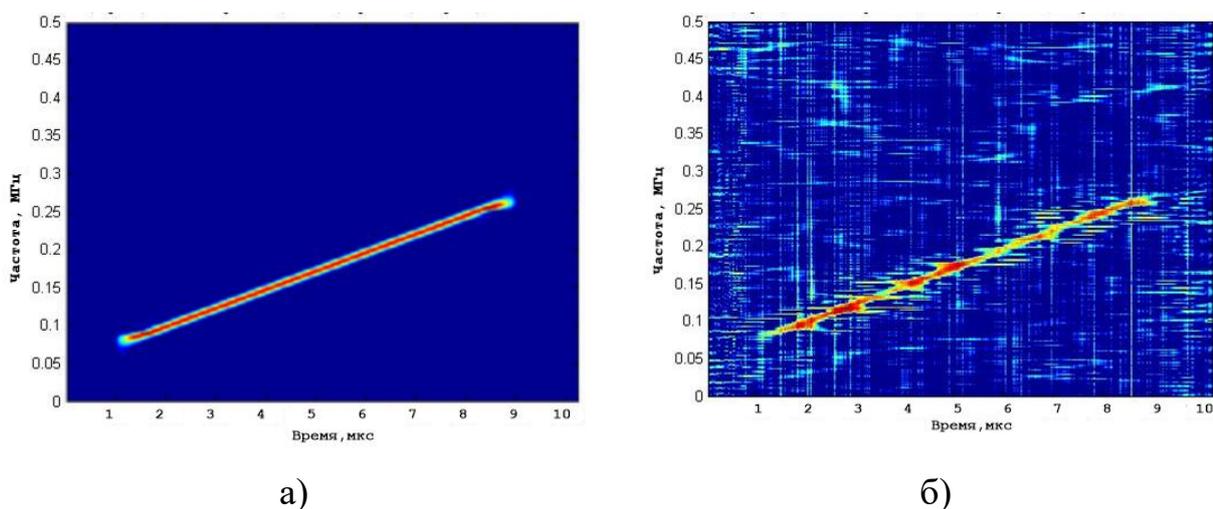


Рис. 2. Частотно-временной портрет ЛЧМ сигнала при отсутствии шума (а) и при ОСШ минус 4 дБ (б).

Вторая – частотно-временной портрет поступает в модуль измерения параметров, структурная схема которого представлена на рис. 3.

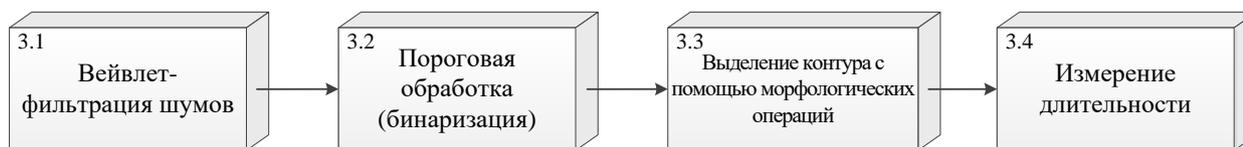


Рис. 3. Структурная схема модуля измерения параметров.

Предварительными этапами оценки длительности сигнала является процедура шумоподавления с помощью вейвлет-фильтрации (подмодуль 3.1), пороговая обработка (бинаризация) (подмодуль 3.2) и выделение контура сигнальной составляющей с помощью морфологических операций (подмодуль 3.3).

Для выполнения вейвлет-фильтрации использовалась базовая функция Мейра. Сравнительный анализ качества вейвлет-фильтрации частотно-временных портретов с помощью различных базовых функций проведен авторами в [6]. В результате применения процедуры шумоподавления отношение сигнал/шум повышается на 1,8-2,3 дБ.

На рис. 4 представлены входные и выходные данные подмодуля 3.1. Как видно из рис. 4 а и 4 б, уровень шумов уменьшился.

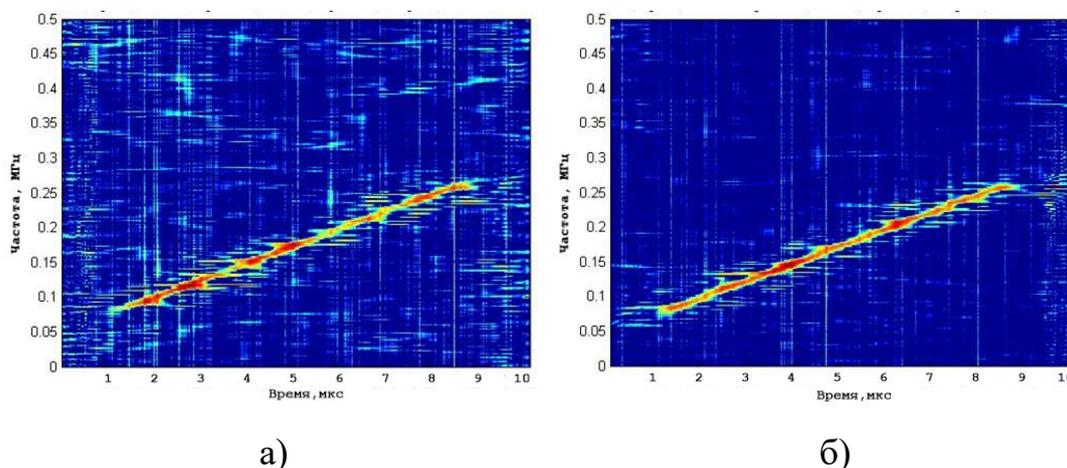


Рис. 4. Частотно-временной портрет ЛЧМ сигнала при ОСШ минус 4 дБ на входе (а) и выходе подмодуля 3.1 (б).

После шумоподавления для обеспечения автоматического выделения сигнальной составляющей в подмодуле 3.2 выполняются процедуры пороговой обработки (бинаризации), основанные на алгоритме Отсу. Данный алгоритм достаточно полно описан в [5]. Затем в подмодуле 3.3 осуществляется поиск

сигнальной составляющей. Основой данного подмодуля является функция морфологической обработки  $\text{bwboundaries}(\rho, 'noholes')$  [5]. На рис. 5 представлен частотно-временной портрет на выходе подмодуля 3.3.

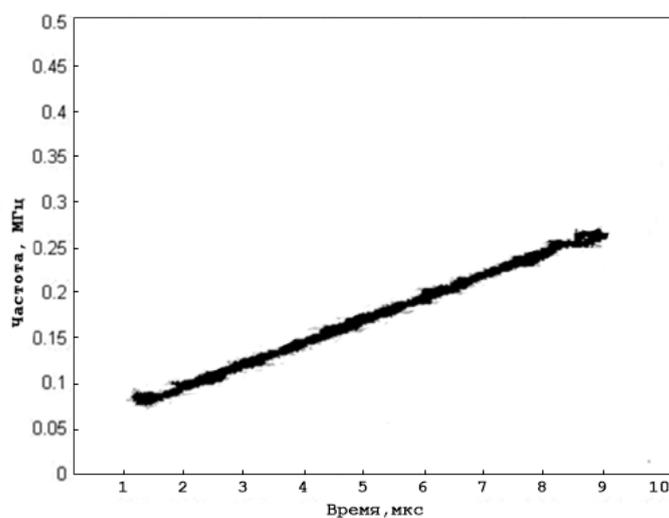


Рис. 5. Частотно-временной портрет на выходе подмодуля 3.3 при ОСШ минус 4 дБ.

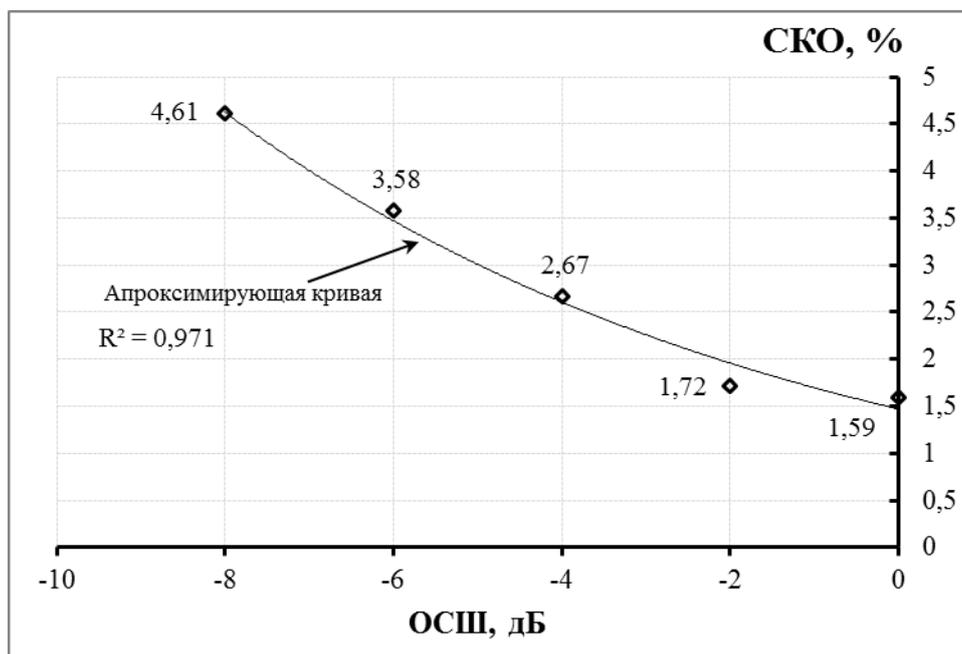


Рис. 6. График зависимости СКО относительной погрешности оценки длительности сигнала от ОСШ.

На заключительном этапе вычисляется значение длины проекции выделенной области на ось абсцисс, что соответствует длительности сигнала (подмодуль 3.4). Относительная погрешность оценки длительности

определяется в соответствии с выражением:  $\delta = \frac{|\tilde{\tau}_u - \tau_u|}{\tau_u} * 100\%$ , где  $\tilde{\tau}_u$  – оценка длительности сигнал,  $\tau_u$  – истинное значение длительности сигнала.

Третья (модуль 4) – результаты измерения подвергаются статистической обработке. На рис. 6 представлен полученный график зависимости среднеквадратического отклонения (СКО) относительной погрешности оценки длительности сигнала от ОСШ (выход модуля 5).

СКО вычислялась по 100 измерениям при каждом ОСШ в диапазоне от 0 до минус 8 дБ с шагом 2 дБ. При уменьшении ОСШ ниже минус 8 дБ сигнальную составляющую выделить не удалось. Вычисленные значения СКО аппроксимированы экспоненциальной кривой с величиной достоверности  $R^2=0,971$ .

Результаты моделирования свидетельствуют о работоспособности предложенного подхода.

## Выводы

Предлагаемый подход оценки временных параметров сигналов в условиях низкого ОСШ (менее 0 дБ) основан на применении современного математического аппарата вейвлет-фильтрации и морфологической обработки в новой предметной области. Разработанная имитационная модель, позволяет производить автоматическую оценку временных параметров сигналов малозаметных РЛС в средствах РТК. Определена зависимость точности оценки длительности ЛЧМ сигнала от ОСШ. Данный подход может применяться для совместной оценки частотных и временных параметров сигналов малозаметных РЛС, что позволит решать задачи их потипового распознавания в средствах РТК.

## Литература

1. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. – М.: Воениздат, 2001. – 456 с.
2. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк, 1970, Пер. с англ. (в четырех томах) под общей редакцией ред. К.Н. Трофимова

Том 1 основы радиолокации. Под ред. Я.С. Ицкохи М., «Сов. радио», 1976, 456 с.

3. Дворников, С. В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 268 с.: ил.
4. Кравченко, В.Ф., Лазоренко, О.В., Пустовойт, В.И., Черногор, Л.Ф. Преобразование Чоя-Вильямса и атомарные функции в цифровой обработке сигналов // Доклады академии наук. - 2007. - Т. 413, №6. С. 750-753.
5. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
6. Войнов, Д.С. Уткин, В.В. Плащенко В.В. Повышение качества частотно-временных портретов радиосигналов при ведении радиотехнического мониторинга // Научные технологии – 2017 – № 11 стр4–8.

**Для цитирования:**

Д. С. Войнов. Морфологический подход к измерению временных параметров сигналов малозаметных РЛС по их частотно-временным портретам. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/1/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719-2018-1-1