

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЧМ-СИГНАЛА В ЧАСТОТНЫХ РЛТСО

Данилов Е.А., Сальников И.И.

*Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия), e-mail: [h3ker@narod.ru](mailto:h3ker@narod.ru)*

В статье рассмотрен метод улучшения технических параметров радиолучевой системы охраны при использовании вейвлет-преобразования. Радиолучевые технические средства охраны одни из наиболее распространенных периметровых. Описан принцип работы радиолучевой системы охраны. При использовании вейвлет-преобразования при обработке ЛЧМ-сигнала увеличивается отношение сигнал/шум. Оценено время пребывания нарушителя в зоне охраны. Выполнена оценка параметров вейвлет-преобразования применительно к реальным параметрам движения нарушителя и реальным характеристикам системы охраны. Анализ информационных параметров ЛЧМ-сигнала показал, что основным параметром является частота девиации. Важной особенностью работы является использование двух разных подходов: программного и аппаратного. Показано, что для реализации вейвлет-преобразования следует использовать ПЛИС. Время выполнения вейвлет-преобразования на СП не удовлетворительно для получения результата в реальном времени.

Ключевые слова: техническое средство охраны, частотный метод измерения дальности, вейвлет-преобразование, программируемые логические интегральные схемы, сигнальные процессоры.

## OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF INFORMATION CHIRP SIGNAL IN THE FREQUENCY RADIOLUCHEVYH TECHNICAL SYSTEMS PROTECTION

Danilov E.A., Salnikov I.I.

*Penza State Technological University, (Penza, Russia) e-mail: [h3ker@narod.ru](mailto:h3ker@narod.ru)*

The paper presents a method of improving the technical parameters of radioluchevoy protection system using wavelet transform. Radioluchevye technical means of protection are among the most common perimeter. Describes the operational principle of radioluchevoy protection system. Applying wavelet transform in the processing of the chirp signal is increased signal/noise ratio. It is estimated residence time violator in the area of protection. The estimation of the parameters of the wavelet transform with respect to the actual parameters of a violator and the actual characteristics of the system. Analysis of the information parameters chirp-signal showed that the main parameter is the frequency deviation. An important feature is the use of two different approaches: software and hardware. It is shown that the implementation of the wavelet transform, use the FPGA. Runtime wavelet transform on the DSP is not satisfactory to obtain the result in real time.

Keywords: technical means of protection, the frequency range measurement method, the wavelet transform, programmable logic integrated circuits, signal processors.

Технические системы охраны (ТСО) в настоящее время активно развиваются в связи с угрозой террористических актов и энергичным развитием информационных технологий. Первичным источником информации о факте проникновения нарушителя на охраняемые объекты являются периметровые средства охраны, которые служат важнейшим элементом интегрированной системы безопасности. Радиолучевые ТСО (РЛТСО) одни из наиболее распространенных периметровых ТСО. Это определяется: высокой вероятностью обнаружения; устойчивостью к изменению метеоусловий; простотой эксплуатации и монтажа по сравнению с другими ТСО. Принцип работы РЛТСО заключается в создании электромагнитного поля в пространстве между приемником и передатчиком – зоне охраны (ЗО), и регистрации изменений параметров этого поля при пересечении его нарушителем [4].

Среди широкого спектра РЛТСО важное значение имеют частотные однопозиционные системы, в которых для обнаружения нарушителя применяется частотный метод радиолокации. В пространство излучается линейно-частотно модулированный (ЛЧМ) сигнал. Непериодический ЛЧМ-сигнал представляет собой сложный радиоимпульс с длительностью  $T_M$  и внутренней частотной модуляцией. В работе [5] представлена структурная схема РЛТСО с ЧМ, показан принцип работы, который заключается в излучении в пространство ЗО ЛЧМ-сигнала и приеме задержанного ЛЧМ-сигнала, отраженного от нарушителя. Основным элементом структурной схемы является синхронный детектор, в котором формируются биения с частотой, прямо пропорциональной дальности до нарушителя. Измерение частоты биений и определение дальности до нарушителя выполняется с помощью узкополосных фильтров низкой частоты.

В работе [2] показано, что применяя вейвлет-преобразование при обработке ЛЧМ-сигнала в РЛТСО с ЧМ, можно существенно улучшить их технические характеристики. В первую очередь увеличивается отношение сигнал/шум. Это позволит увеличить вероятностные характеристики системы, увеличить протяженность ЗО, снизить мощность излучения. Кроме того, появляется возможность определить количество нарушителей, так как наблюдается существенное сжатие отраженного сигнала после вейвлет-преобразования.

Далее оценим параметры вейвлет-преобразования с целью определения средства реализации на аппаратном уровне. Основными условиями при реализации мобильных РЛТСО являются: малые массогабаритные характеристики, малое энергопотребление, а также высокая надежность системы. Всем этим требованиям в разной степени удовлетворяет современная элементная база цифровых устройств обработки информации в виде программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), а также в виде сигнальных процессоров (СП). Для эффективного выбора данных элементов необходимо знать параметры исходного сигнала, а также параметры дискретного вейвлет-преобразования.

### Оценка времени пребывания нарушителя в зоне обнаружения

ЗО для однопозиционных РЛТСО аппроксимируется эллиптическим параболоидом (рис. 1). При этом главными характеристиками являются максимальная высота  $h$ , ширина  $r$ , а также длина  $l$ .

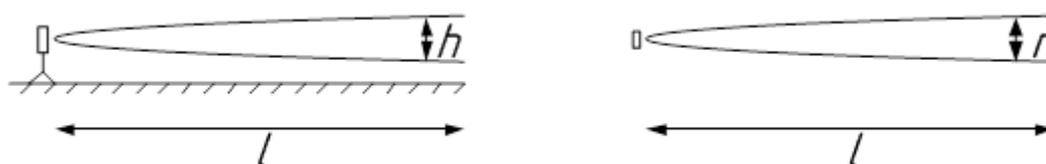


Рис. 1. Зона обнаружения однопозиционной РЛТСО

Средняя скорость бегущего человека в быстром темпе примерно равна  $V_H = 32$  км/ч (9 м/с), примем это значение за максимальную скорость нарушителя. Отсюда, зная ширину  $r$ , можно вычислить примерное время пребывания нарушителя в ЗО:  $t_n = r/V_H$ .

В реально выпускаемых РЛТСО ширина ЗО равна 2 м. Тогда минимальное время пребывания нарушителя в ЗО будет равно

$$t_n = \frac{2}{9} = 0,222 \approx 0,2 \text{ с.} \quad (1)$$

### Определение числа отсчетов для выполнения вейвлет-преобразования

Известно, что процедура превращения непрерывных сигналов в цифровые состоит из двух этапов: дискретизации и квантования. Всегда важно правильно выбрать интервал дискретизации. Задача о выборе интервала дискретизации наиболее просто решается для сигналов с ограниченным спектром на основе теоремы Котельникова [4]. ЛЧМ-сигнал относится именно к таким сигналам. В соответствии с теоремой Котельникова непрерывный сигнал  $S(t)$ , в спектре которого не содержится частот выше  $f_g$ , полностью описывается выборочными значениями  $S(k\Delta t_i)$  отсчитанными через интервалы времени

$$\Delta t_i \leq \frac{1}{2f_g} = \frac{\pi}{\omega_g}.$$

ЛЧМ-сигнал (рис. 2) описывается центральной частотой  $f_c$ , частотой девиации  $f_d$  и частотой модуляции  $f_M$ . При смещении спектра ЛЧМ-сигнала в область низких частот максимальная частота  $f_{\max}$  будет примерно равна  $f_d$ .

Тогда интервал дискретизации будет равен  $\Delta t_i = \frac{1}{2f_d}$ , и частота дискретизации –  $f_i = 2f_d$ . Частоту дискретизации необходимо брать с запасом из-за неточности гетеродинирования и невысоких порядков входных фильтров

$$f_i = 3f_d. \quad (2)$$

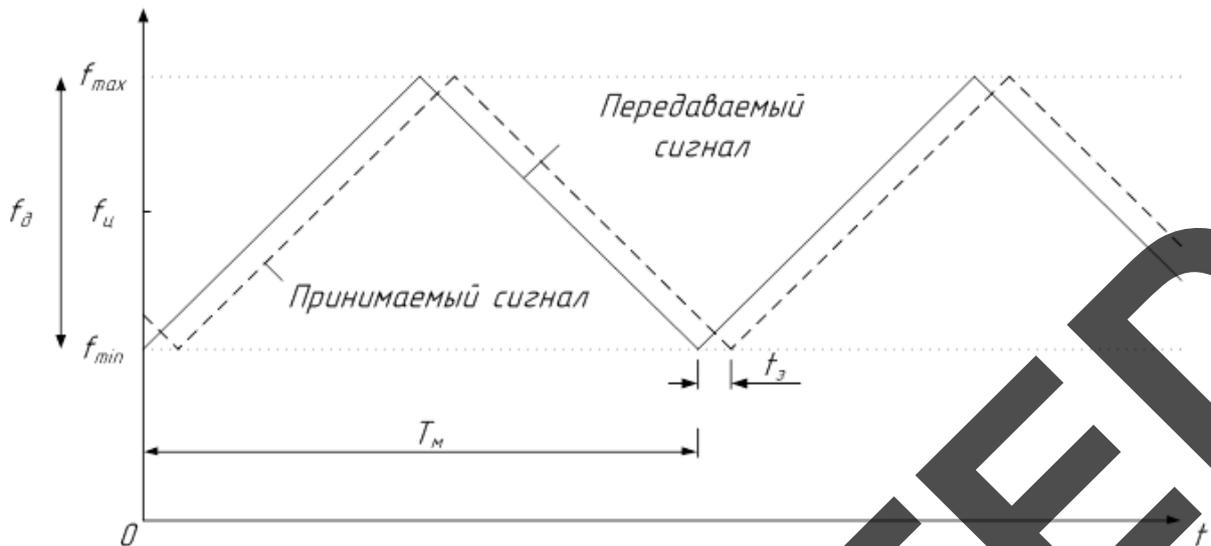


Рис. 2. ЛЧМ-сигнал, используемый в РЛТСО с ЧМ

Для выполнения вейвлет-преобразования (ВП) необходимо к временному отрезку  $T_M$ , равному одному периоду передаваемого ЛЧМ-сигнала, прибавить время задержки, т.е.  $T_M + t_з$ , которое определяется дальностью до объекта и максимальное значение которого для получения однозначного результата не может быть больше  $t_{з,max} = T_M / 2$  (рис. 2). С учетом этого возьмем время ВП с запасом, т.е.

$$t_{ВП} = \frac{3T_M}{2}. \quad (3)$$

Определим число отсчетов ВП с учетом (2) и (3):

$$N_{ВП} = 3f_D \cdot \frac{3T_M}{2} = 4,5 \cdot T_M f_D = \frac{4,5 \cdot f_D}{f_M}. \quad (4)$$

В таблице 1 показана зависимость числа отсчетов ВП  $N_{ВП}$  от частоты девиации  $f_D$  и частоты повторения ЛЧМ  $f_M$ . Для реализации ВП можно применить быстрое преобразование Фурье (БПФ). БПФ вычисляется из числа отсчетов, кратных степени 2, поэтому в таблице 1 приведено  $N_{ВП,2}$  округление числа отсчетов до ближайшей степени 2, что приводит к увеличению числа отсчетов и времени ВП:  $t_{ВП,2} = N_{ВП,2} / f_i$ . В последнем столбце таблицы 1 приведены значения числа отсчетов ВП, получаемые за интервал нахождения нарушителя в ЗО (1):

$$N_{ВП,Н} = \frac{t_n}{t_{ВП,2}} = \frac{0,2}{t_{ВП,2}}. \quad (5)$$

Таблица 1

## Число отсчетов для разных параметров ЛЧМ-сигнала

$f_M$ , кГц	$f_d$ , МГц	$N_{ВП}$	$N_{ВП,2}$	$f_i$ , МГц	$t_{ВП,2}$ , мкс	$N_{ВП,H}$
4	25	28125	32768	75	437	457
4	50	56250	65536	150	437	457
4	100	112500	131072	300	437	457
8	25	14062,5	16384	75	219	913
8	50	28125	32768	150	219	913
8	100	56250	65536	300	219	913
8	115	64687,5	65536	345	190	1052
8	200	112500	131072	600	219	913
12	25	9375	16384	75	110	1818
12	50	18750	32768	150	110	1818
12	100	37500	65536	300	110	1818
12	170	63750	65536	510	129	1550
12	200	75000	131072	600	110	1818
16	25	7031,25	8192	75	110	1818
16	50	14062,5	16384	150	110	1818
16	100	28125	32768	300	110	1818
16	200	56250	65536	600	110	1818
16	230	64687,5	65536	690	95	2105

Для вычисления БПФ нам необходимо накопить необходимое число отсчетов, время сбора которых равно  $T_{ВП,H} = \frac{N_{ВП,H}}{f_i}$ . Величина  $T_{ВП,H}$  косвенно определяет вероятность и достоверность обнаружения нарушителя. Из таблицы 1 видно, что наиболее оптимальный ЛЧМ-сигнал будет с параметрами  $f_M = 12$  кГц,  $f_d = 170$  МГц. При этом мы получаем лучший в группе показатель по числу выборок с не слишком высокой частотой дискретизации.

### Время выполнения БПФ на различной элементной базе

В цифровой обработке сигналов (ЦОС) преимущественно используются СП и ПЛИС. Изначально СП были более универсальной платформой для разработки приложений ЦОС. Они имели архитектуру, схожую с микроконтроллерами, и ряд библиотек, что упрощало проектирование.

В настоящее время на рынке присутствует множество фирм, выпускающих СП, одной из них является фирма *Analog Devices*. Для вычисления БПФ в библиотеках, распространяемых *Analog Devices*, есть специальный модуль. В таблице 2 приведено время выполнения преобразования на различных сигнальных процессорах фирмы *Analog Devices*.

Таблица 2

### Время выполнения БПФ на СП

Сигнальный процессор	ADSP-2189M	ADSP-21160	ADSP-TS001	ADSP-TS001
Число точек	1024	1024	256	1024
Разрядность	16	32	16	32
Формат точки	Фикс.	Плавающая	Фикс.	Плавающая
Такт. частота, МГц	90	100	150	150
Время выполн. БПФ, мкс	453	180	7,3	69

Применение СП хоть и сокращает время разработки, но для больших объемов обрабатываемых данных не подходит из-за длительных вычислений преобразования. Кроме того, для вычисления БПФ с числом точек более 1024 требуется дополнительная внешняя память, работа с которой еще больше увеличит время преобразования.

Реализация БПФ на ПЛИС требует более глубоких знаний цифровой схемотехники, машинной арифметики, на разработку проекта затрачивается больше времени и ресурсов. Несмотря на это, скорость выполнения БПФ на ПЛИС на порядки превышает скорость программной реализации на СП. В настоящее время для ПЛИС также существует ряд библиотек - как свободных, так и распространяемых самими производителями ПЛИС. Главными производителями ПЛИС являются фирмы *Xilinx* и *Altera*. *Altera* для своих продуктов предлагает ядро *FFT MegaCore*, а *Xilinx* *LogiCORE IP Fast Fourier Transform* (таблица 3). Как видно из таблицы 3, функциональные возможности у обоих ядер примерно одинаковы. Время преобразования приводится для ПЛИС среднего класса *Xilinx - Spartan 6* и *Altera - Cyclone III*. Время преобразования для 65536 точек не приводится, но можно аппроксимировать время, умножив время преобразования 32768 точек на 4, что не должно превышать 4 мс.

Таблица 3

#### Характеристики ядер БПФ

Характеристики	<i>FFT MegaCore</i>	<i>Fast Fourier Transform</i>
Длина преобразования	64-65536	8-65536
Фиксированная точка	да	да
Плавающая точка	да	да
Разрядность, бит	8-32	8-34
Время преобразования для 4096 точек, мкс	90,89	115,30
Время преобразования для 32768 точек, мкс	не приводится	956,35

#### Список литературы

1. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. – М. : Мир, 1989. – 448 с.
2. Данилов Е.А., Сальников И.И. Моделирование вейвлет-преобразования в частотных радиолучевых технических системах охраны // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего-плюс : науч.-метод. журнал [Пенза : Изд-во Пенз. гос. технолог. акад.]. – 2012. - № 05 (09). – С. 107-111.
3. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. – М. : Госэнергоиздат, 1956.
4. Сальников И.И. Анализ пространственно-временных параметров удаленных объектов в информационных технических системах. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 252 с.
5. Сальников И.И. Оценка информативных параметров в частотных радиолучевых технических средствах охраны // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего-плюс : науч.-метод. журнал [Пенза : Изд-во Пенз. гос. технолог. акад.]. – 2012. - № 05 (09). – С. 63-68.

**Рецензенты:**

Бабич М.Ю., д.т.н., главный специалист ОАО «НПП «Рубин», г. Пенза;

Бутаев М.М., д.т.н., профессор, ученый секретарь НТС ОАО «НПП «Рубин», г. Пенза.