

## Keysight Technologies

# Измерение боковых лепестков импульса во временной области для оценки характеристик РЛС со сжатием импульса

Заметки по применению

Серия “Измерение параметров РЛС”

## Обзор

В радиолокационных системах (РЛС) использование модуляции внутри импульса для его сжатия позволяет улучшить пространственное разрешение и увеличить дальность обнаружения при заданном уровне выходной мощности. Поэтому эта техника широко используется в РЛС текущего и следующих поколений.

К сожалению, традиционные методы измерения параметров ВЧ импульсов оказываются менее эффективными для оценки возможностей РЛС со сжатием импульса. Так, в РЛС, работающих без сжатия импульсов, пространственное разрешение непосредственно связано с длительностью импульса. В отличие от этого, в РЛС со сжатием импульсов, использующих линейно-частотную модуляцию (ЛЧМ) в импульсе, разрешение зависит как от длительности импульса, так и от ширины полосы ЛЧМ и линейности изменения частоты.

В технике разработки РЛС подход, называемый методом измерения уровня боковых лепестков импульса во временной области (SSL), проявил себя как удачное техническое решение для оценки работы РЛС. Этот метод сводит множество потенциально возможных искажений сигнала к простому показателю, с помощью которого можно определить, удовлетворяют ли характеристики РЛС её предполагаемому назначению.

Данные заметки по применению определяют ключевые проблемы, связанные с измерениями характеристик РЛС со сжатием импульсов, описывают метод измерения боковых лепестков импульса во временной области и намечают в общих чертах пути практического использования этого метода.

## Проблема

Как говорилось выше, параметры модуляции, используемые в РЛС со сжатием импульса, безусловно, влияют на характеристики системы. Одна из проблем состоит в том, как определить, каким должен быть уровень характеристик компонентов, чтобы их можно было использовать в подсистемах РЛС. Точно также, при диагностике системы трудно оценить суммарные характеристики без измерения свойств отдельных компонентов.

Например, бывает трудно судить о влиянии характеристик компонентов на какие-либо искажения модулированного импульса, и ошибки в этих измерениях обычно приводят к использованию дорогих компонентов с завышенными характеристиками. Рассмотрим частотно-зависимое отражение, обусловленное рассогласованием фильтра ПЧ, используемого в приёмнике РЛС (рисунок

1). Обычно низкочастотные фильтры ПЧ имеют значительные задержки сигнала. Когда это сочетается с внутренними отражениями от полезного импульса, может появиться паразитный эхо-сигнал. Иногда очень непросто оценить влияние такого отражения на совокупные функциональные характеристики РЛС с внутриимпульсной частотной модуляцией и сжатием импульса.

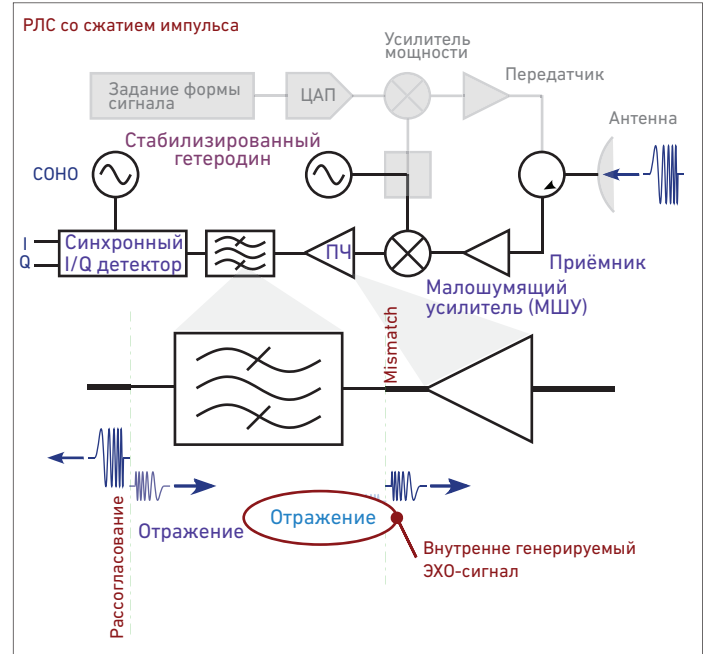


Рисунок 1. Отражения из-за рассогласования могут быть причиной появления паразитных эхо-сигналов

Другие проблемы, связанные с внутренним устройством РЛС, могут быть обусловлены ухудшением работы компонентов, которые могут влиять на работу демодулятора. Примерами могут служить появление неучтённого фазового шума, амплитудной модуляции, отражений и групповой задержки. Все это приводит к искажениям сигнала, которые появляются в приёмнике, ограничивая его динамический диапазон и точность работы РЛС.

## Решение проблемы

Один из путей решения таких задач состоит в устранении потенциально возможных искажений сигналов в процессе определения характеристик, сводя эту процедуру к, желательно, одному простому показателю, который может охарактеризовать работу РЛС в соответствии с ее предполагаемым назначением. Измерение боковых лепестков импульса во временной области является эффективным методом, позволяющим использовать надёжное измерительное оборудование, где с помощью калибровки можно исключить влияние его внутренних искажений на результаты измерения, а с помощью математической обработки данных измерения точно характеризовать работу РЛС со сжатием импульсов.

### Боковые лепестки импульса во временной области

Боковые лепестки импульса во временной области (иногда называемые дальними боковыми лепестками) являются результатом использования техники сжатия импульса. Они появляются, когда в процессе сжатия происходит свёртка идеального отраженного сигнала РЛС с импульсной характеристикой не совсем идеального корреляционного фильтра или когда происходит свёртка неидеального отраженного сигнала с импульсной характеристикой не совсем идеального корреляционного фильтра, а также при некоторой комбинации этих двух случаев. Это приводит к тому, что некоторая часть энергии отраженного импульса оказывается за пределами его длительности. Во временной области это проявляется в расширении длительности отраженного импульса, особенно в присутствии мешающих отражений от земной поверхности или аномалий в передаче сигнала из-за несовершенства тракта передачи. Корреляционный фильтр в современной РЛС почти всегда реализуется цифровыми средствами на основе цифровой обработки сигналов (DSP) вместо аналоговых фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ-фильтры, или SAW). Поэтому результирующий сжатый импульсный сигнал оказывается математически детерминированным и обладающим хорошей повторяемостью. Его легко оптимизировать средствами моделирования.

## Весовые функции

Для уменьшения боковых лепестков во временной области до приемлемого уровня обычно используется амплитудное взвешивание выходных сигналов. Побочным эффектом взвешивания является ухудшение соотношения сигнал/шум. Некоторые из наиболее широко используемых весовых функций (окон) вместе с уровнями подавления боковых лепестков и потерями в отношении сигнал/шум приведены в таблице 1.

Таблица 1. Популярные весовые функции и их свойства

Оконная функция	Макс. уровень бокового лепестка, дБ	Потери в соотношении с/ш, дБ
Равномерная	-13,2	0
Хэмминга	-42,8	1,34
Хэннинга	-32	1,4
Блэкмана	-58	2,37
Блэкмана-Хэрриса (трехчленная)	-67	2,33

На рисунке 2 графически показаны характеристики функции Хэмминга

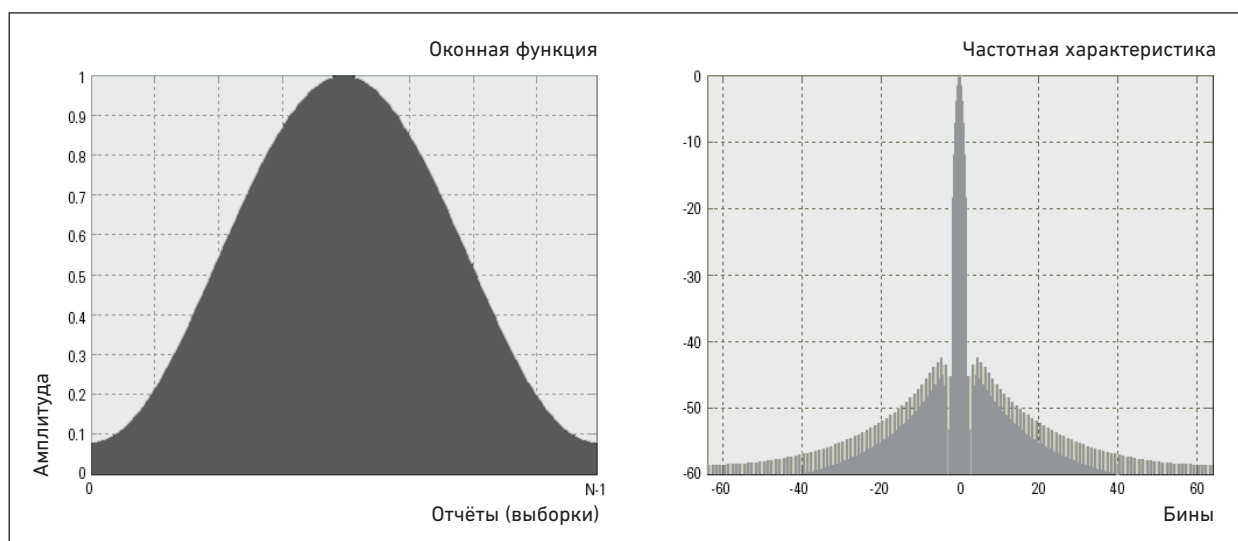


Рисунок 2. Оконная функция Хэмминга и соответствующая ей частотная характеристика

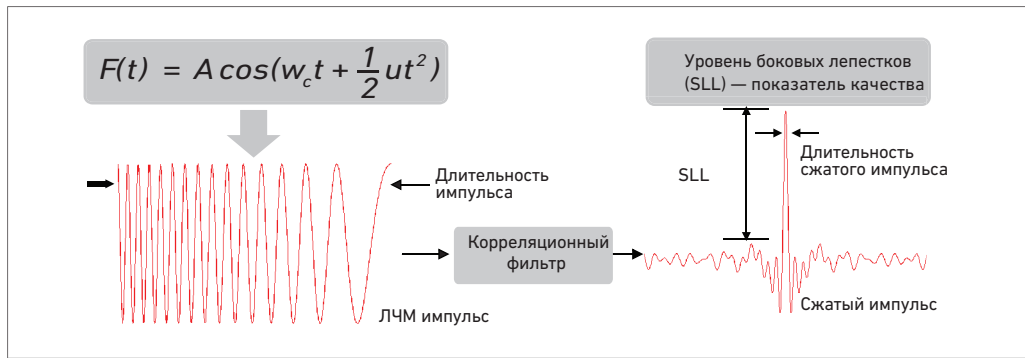


Рисунок 3. Сжатие импульса и измерение боковых лепестков импульса во временной области

### Применение метода боковых лепестков

Детектор в приемнике РЛС определяет корреляцию между переданным сигналом и эхо-сигналами и шумами, принятыми за определенный интервал времени. Когда принятый сигнал совпадает с переданным сигналом, появляется пик корреляционной функции и обнаружение цели отмечается в этот момент времени.<sup>1</sup>

В идеальном случае пик корреляционной функции был бы бесконечно узким с уровнем, равным единице, и был бы окружен боковыми лепестками шумоподобного характера. В другом крайнем случае корреляция между чистым сигналом и чистым шумом равна нулю. Рисунок 3 иллюстрирует процесс сжатия импульса и измерения боковых лепестков.

Нарушения в работе системы, простирающиеся от несовершенства генерируемых сжатых импульсов до внутренних отражений от фильтров, могут привести к тому, что уровень боковых лепестков корреляционной функции будет значительно превышать шумовой порог (рисунок 4). Поскольку трудно судить о влиянии таких нарушений на сжатый импульс, использование техники измерения уровня боковых лепестков во временной области даёт количественную оценку форм переданных импульсов и принятых сигналов.

Для точного измерения уровня боковых лепестков требуется фильтр, хорошо согласованный с формой ожидаемого импульса. Первым шагом является создание идеальной формы сигнала, представляющего сжатый импульс, обязательными параметрами которого являются: ширина полосы частот, длительность импульса и характеристики внутриимпульсной ЛЧМ. Моделирование такого сигнала может быть выполнено с помощью САПР SystemVue или ПО Signal Studio компании Keysight, либо MATLAB компании MathWorks. Созданное математическими средствами, идеальное (то есть, хорошо повторяющееся и без искажений) представление сжатого импульса может быть сохранено в памяти и вызвано впоследствии для определения корреляции с измеренным сигналом и вычисления уровня боковых лепестков.

Для измерения и вычисления уровня боковых лепестков ЛЧМ импульс должен имитировать реальный рабочий сигнал РЛС. Для систем, имеющих несколько рабочих режимов, нужно использовать несколько форм сигнала, и должно быть сделано несколько измерений уровня боковых лепестков. Платформа для генерации импульса должна обеспечивать повторяемость при создании и восстановлении импульсов для измерительных стимулов и для сравнительных измерений.

С другой стороны, идеальный сжатый импульс можно создать математически и сравнить с измеренным импульсом без его физической генерации. Недостаток этого подхода в том, что относительное сравнение всегда происходит с идеальным импульсом, что не всегда желательно. Иногда может быть необходимо измерить уровень боковых лепестков между двумя точками в испытуемой системе, чтобы обнаружить и проанализировать специфический источник аномалий.

Три предлагаемых программных средства для создания импульсных сигналов могут использовать различные методы, но конечный результат будет одинаков: получение комбинированного файла или отдельных файлов I и Q сигналов, которые могут быть непосредственно загружены в память генератора сигналов произвольной формы (AWG).

**САПР SystemVue.** Это программное средство моделирования системы. САПР SystemVue с поставляемой по отдельному заказу библиотекой модели РЛС предоставляет эталонные модели обработки сигнала для исследования компромиссных решений в архитектурах импульсной доплеровской РЛС, РЛС непрерывного излучения с ЧМ (FMCW), РЛС с цифровым управлением фазированной антенной решеткой сверхширокополосной РЛС (UWB). Этот пакет позволяет моделировать сценарий с добавлением целей, мешающих эхо-сигналов, замираний, шумов, помех и ВЧ эффектов, необходимых для реалистичного анализа системы и проверки решений на ранних стадиях НИОКР, используя подключение к оборудованию для испытания в действии. [www.keysight.com/find/SystemVue](http://www.keysight.com/find/SystemVue)

**ПО Signal Studio для создания импульсов.** Этот пакет дает возможность гибкой генерации сложных, широкополосных импульсных комбинаций и применяется на векторных генераторах сигналов E8267D или E4438C. Формирование специальных импульсов, видов модуляции, диаграммы направленности антенн и заданных пользователем комбинаций импульсов легко достигается с помощью простого графического интерфейса пользователя или путем выполнения собственного теста на базе интерфейса прикладного программирования (API) на основе COM. Для операций формирования импульса, таких как обработка сигнала, модуляция, цифровая фильтрация и вычерчивание кривой по точкам следует добавить к пакету Signal Studio широкополосный генератор произвольной формы N603xA/N824xA/M933xA. [www.keysight.com/find/MATLAB](http://www.keysight.com/find/MATLAB)

**MATLAB.** Программная среда и язык программирования, созданные компанией MathWorks, и теперь доступные для заказа непосредственно в компании Keysight в качестве опции, поставляемой с большинством генераторов и анализаторов сигналов. MATLAB расширяет возможности анализаторов и генераторов сигналов компании Keysight для выполнения специализированных измерений, анализа и визуализации данных, создания сигналов произвольной формы, управления приборами и построения испытательных систем. Этот пакет предоставляет интерактивные инструментальные средства и функции командной строки для задач анализа данных, таких как обработка сигналов, модуляция сигнала, цифровая фильтрация и построение кривой. [www.keysight.com/find/MATLAB](http://www.keysight.com/find/MATLAB)

<sup>1</sup> Следует напомнить, что разница во времени между посланным и принятым импульсами относится к расстоянию между РЛС и целью.

Другими важными факторами при измерении импульсных сигналов, которые будут коррелированы для вычислений уровня боковых лепестков, являются калибровка прибора и коррекция формы сигнала. Причина этого в том, что широкополосный характер большинства сжатых импульсов приводит к потенциально возможным погрешностям при определении зависимости фазы и амплитуды от частоты, возникающим внутри измерительного прибора. Чтобы предотвратить влияние этих погрешностей на измерения уровня боковых лепестков, необходимо, чтобы измерительный приёмник имел встроенное программное обеспечение для выравнивания амплитудно-частотной характеристики и генерации сигнала или аппаратные средства с возможностью введения предсказаний.

### Измерение боковых лепестков импульса во временной области

Процесс измерения начинается с получения подробных сведений об идеальном сжатом импульсе, как описано выше. Следующий шаг — выбор подходящего широкополосного анализатора сигналов, осциллографа или логического анализатора с программой векторного анализа сигналов (VSA). Среди возможных вариантов — предлагаемые компанией Keysight анализаторы сигналов серий PXA и MXA, осциллографы Infiniium серии 90000X и логические анализаторы серии 16900. Эти приборы могут работать с программой векторного анализа сигналов Keysight 89600 VSA, которая поддерживает более 70 форматов сигналов и может выполнять математическую обработку, необходимую для измерения уровня и отображения боковых лепестков импульса. Программное обеспечение VSA может работать на ПК или внутри упомянутых выше приборов. Прибор в данном случае используется для захвата и оцифровки измеряемого сигнала. Программное обеспечение VSA может быть сконфигурировано так, чтобы использовать функцию, идентичную взаимной корреляционной функции (ВКФ) во временной области. Этот подход к определению ВКФ через обратное преобразование Фурье от спектра мощности гораздо менее громоздок, чем прямое вычисление ВКФ между файлами данных во временной области. Для определения ВКФ программа использует данные измерения частотного спектра импульса и умножает их на комплексно-сопряжённые данные частотного спектра заранее созданного идеального импульса. Прежде чем выполнять измерение, данные идеального импульса должны быть импортированы в программу VSA и преобразованы в формат файлов этой программы. Одно важное замечание: для успешного измерения уровня боковых лепестков импортируемый файл и данные измерения должны использовать одинаковую частоту дискретизации.

Когда эти подготовительные операции завершены, можно выполнять измерения. В программе VSA измеренные данные частотного спектра (реальная и мнимая части) умножаются на комплексно-сопряжённые данные частотного спектра идеального импульса. Результат подвергается обратному быстрому преобразованию Фурье (ОБПФ) для вычисления ВКФ, необходимой для измерения уровня боковых лепестков.

$$\text{Измер}(t) \otimes \text{Идеал}(t) = \text{ОБПФ}[\text{Измер}(f) \times \text{компл. сопр.}[\text{Идеал}(f)]],$$

где

$$\text{Измер}(f) = \text{БПФ}[\text{Измер}(t) \times \text{окно}]$$

$$\text{Идеал}(f) = \text{БПФ}[\text{Идеал}(t) \times \text{окно}]$$

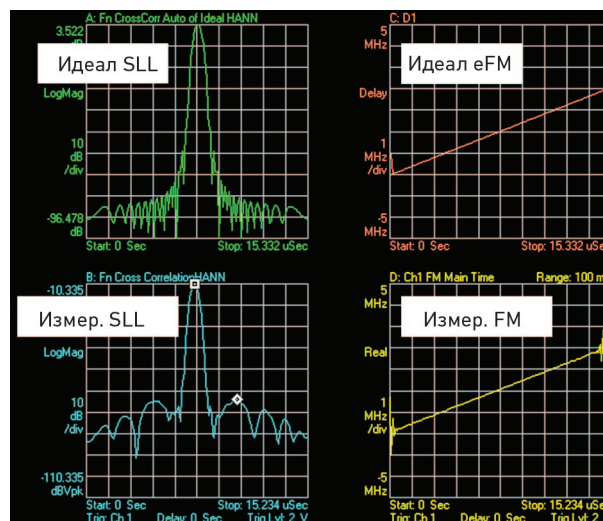


Рисунок 4. Измерение уровня боковых лепестков SLL

## Результаты

Специалисты по РЛС нашли множество применений методу измерения уровня боковых лепестков. Например, для определения характеристик пространственной разрешающей способности и динамического диапазона. Метод также используется для выявления проблем в аналоговых компонентах.

Пространственное разрешение часто является одним из критериев пригодности системы. Поскольку временной интервал между главным лепестком корреляционной функции и минимальным видимым боковым лепестком непосредственно связан с минимальным пространственным разрешением, уровень боковых лепестков даёт эффективную оценку пригодности/непригодности пространственных характеристик РЛС. Знание уровня боковых лепестков даёт уверенность, что никакие другие боковые лепестки, создаваемые внутри системы, не будут влиять на общие пороговые характеристики РЛС.

Корреляционная функция также непосредственно связана с вероятностью обнаружения цели. Из этого следует, что низкий уровень боковых лепестков гарантирует, что аппаратные средства испытываемой РЛС обеспечивают достаточно широкий динамический диапазон, позволяющий обнаруживать слабые сигналы от цели.

На уровне компонентов, измерение уровня боковых лепестков может помочь определить проблемы, связанные с микроволновыми аналоговыми компонентами. Типичный подход состоит в том, чтобы терпеливо довести до конца процесс измерения их параметров и затем просмотреть результаты и выявить потенциальные проблемы. Оценка уровня боковых лепестков импульса во временной области позволяет обнаружить нарушения в любой точке системы, и это даёт возможность быстро оценить, соответствуют ли импульсы РЛС требуемому уровню характеристик. Возможность оценки качества импульса фактически в любой точке РЛС — от передатчика до детектора приемника — делает измерение уровня боковых лепестков ценным диагностическим инструментом. Например, одно быстрое измерение уровня боковых лепестков на выходе передатчика может сразу указать, что является источником проблем — передатчик или приёмник. Последующие измерения позволяют быстро локализовать искажения сигнала, из-за которых характеристики РЛС не могут удовлетворить требованиям к системе.

## Заключение

Измерение уровня боковых лепестков импульса во временной области легко выполняется с помощью популярных анализаторов сигналов, осциллографов и логических анализаторов компании Keysight, оборудованных программным обеспечением векторного анализа сигналов 89600 VSA. Подготовка к измерению требует создания идеального импульсного сигнала, импортирования его в программу VSA и некоторой математической обработки графика. Когда установка завершена, измерения боковых лепестков легко выполняются и могут быть использованы для оценки ключевых особенностей рабочих характеристик, локализации искажений сигнала, диагностики проблем в системе и выявления проблем на уровне компонентов.

Для более глубокого изучения вопроса рекомендуется обратиться в представительство компании Keysight или посетить сайт [www.keysight.com](http://www.keysight.com).

myKeysight

**myKeysight**

[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)  
Персонализированное представление наиболее важной для Вас информации.



Планы Технической Поддержки Keysight  
[www.keysight.com/find/AssurancePlans](http://www.keysight.com/find/AssurancePlans)  
До пяти лет поддержки без непредвиденных расходов гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.



[www.keysight.com/quality](http://www.keysight.com/quality)  
Система управления качеством Keysight Electronic Measurement Group сертифицирована DEKRA по ISO 9001:2008

Торговые партнеры компании Keysight  
[www.keysight.com/find/channelpartners](http://www.keysight.com/find/channelpartners)  
Получите двойную выгоду: богатый опыт и широкий выбор продуктов Keysight в сочетании с удобствами, предлагаемыми торговыми партнерами.

[www.keysight.com/find/AD](http://www.keysight.com/find/AD)

Российское отделение

### Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб.,  
52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954  
8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902  
e-mail: [tmo\\_russia@keysight.com](mailto:tmo_russia@keysight.com)

[www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

Сервисный Центр  
Keysight Technologies в России  
115054, Москва, Космодамианская наб.,  
52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930  
Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: [tmo\\_russia@keysight.com](mailto:tmo_russia@keysight.com)

(BP-07-10-14)