

## ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 621.391.244

С.Э. ШИПИЛОВ, В.П. ЯКУБОВ, Р.Н. САТАРОВ

КОГЕРЕНТНЫЙ ДЖИТТЕР В ИМПУЛЬСНОЙ РАДИОТОМОГРАФИИ<sup>1</sup>

Представлен новый метод повышения разрешения радиоизображений за счет нелинейной обработки данных при сверхширокополосном зондировании без какой-либо модификации используемых аппаратных средств. Данный подход применим при стробоскопическом способе регистрации сверхкоротких импульсов, при котором всегда присутствует погрешность запуска генератора зондирующих импульсов – джиттер, проявляющийся в зашумленности измеряемых данных. Нелинейная операция выделения когерентной части этих шумов в сочетании с методом синтеза большой апертуры даёт более контрастное радиоизображение по сравнению с операцией сглаживания джиттера. В результате обычно отрицательный физический эффект появления джиттера дает положительный результат. Приведенные примеры работы с экспериментальными данными подтверждают этот вывод.

**Ключевые слова:** джиттер, когерентность, спектр, синтезирование большой апертуры, радиоизображение.

## Введение

Принцип работы стробоскопического осциллографа основан на измерении импульсных сигналов с помощью специальных коротких стробирующих импульсов, позволяющих считывать последовательно сдвигаемые фрагменты от множества измеряемых импульсов. Форма измеряемого импульса выстраивается из множества запоминаемых фрагментов. Иными словами, для стробоскопических измерений требуется достаточно большое число повторяющихся импульсов. Это позволяет обеспечить широкую полосу пропускания и высокую чувствительность осциллографа. При этом возникают нежелательные фазовые и/или частотные случайные отклонения передаваемого сигнала, называемые джиттером. Природа джиттера связана с нестабильностью стробирующего генератора. Обычно мешающий эффект джиттера, неизбежно возникающий при стробоскопических измерениях импульсных сверхширокополосных (СШП) сигналов, приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и, как следствие, ухудшению качества получаемого изображения в системах радиовидения. В общем случае устранение джиттера – одна из основных проблем, возникающих при проектировании цифровой электроники, в частности цифровых интерфейсов. Недостаточно аккуратный учёт джиттера может привести к его накоплению при прохождении цифрового сигнала по тракту и, в конечном счёте, к неработоспособности устройства.

В работах [1–3] разработаны методы снижения влияния джиттера для решения задач зондирования и расчета пропускной способности каналов передачи информации, а также повышения скорости передачи данных по таким каналам. Спектр шумов, связанных с джиттером, лежит в области высоких частот по сравнению со спектром полезного СШП-сигнала. Таким образом, джиттер расширяет спектр полезного сигнала. Обычно считается, что спектральные составляющие джиттера не обладают когерентностью, и это лишь затрудняет использование коротких импульсов для целей передачи сообщений в системах связи.

В данной работе предлагается новый метод, основанный на нелинейной обработке принятых СШП-импульсных сигналов, позволяющий существенно обогатить выкочастотную область их спектра за счет выделения и сохранения когерентной части джиттера.

## 1. Нелинейное выделение когерентной части джиттера

Поясним суть предлагаемого метода на конкретном примере, приведенном на рис. 1. Здесь кривая 1 представляет исходный принятый стробоскопическим способом СШП-сигнал  $S_0(t)$ , в котором легко увидеть шумы, связанные с эффектом джиттера. Операция скользящего сглаживания позволяет устранить эти шумы. Получаемый при этом сигнал  $S(t)$  показан кривой 2. Простое сравнение приведенных кривых указывает на их значительное подобие в среднем. Что касается

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках госзадания № 3.694.2014/К Минобрнауки России.

шумов, связанных с джиттером, то можно обратить внимание на их возрастание в местах наиболее быстрого изменения среднего сигнала, т.е. там, где его производная имеет экстремум. Причем это происходит именно в «теле» основного импульса.

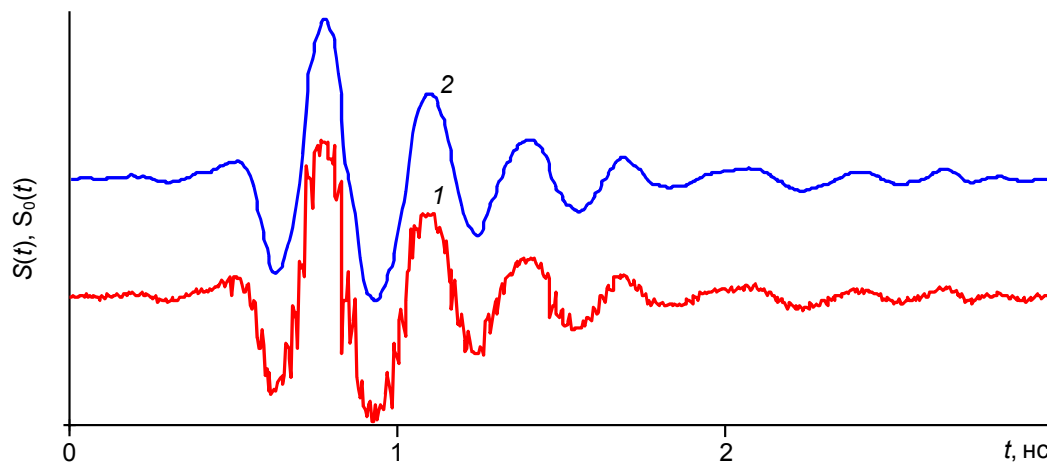


Рис. 1. Измеренный стробоскопическим методом импульсный СШП-сигнал до (кр. 1) и после (кр. 2) усреднения

Для явного выделения джиттера вычтем из принятого сигнала его сглаженную форму:

$$\Delta S(t) = S_0(t) - S(t).$$

Дальнейшая операция состоит в выявлении когерентной части джиттера. Эта операция осуществляется умножением  $\Delta S(t)$  на оконную функцию в виде огибающей сглаженного сигнала  $\tilde{S}(t)$ :

$$S_j(t) = \Delta S(t) \tilde{S}(t). \quad (1)$$

Огибающая для нестационарного сигнала находится как модуль соответствующего аналитического сигнала [4]. Взвешенный таким образом джиттер полностью когерентен с измеряемым сигналом, но особо подчеркивает его высокочастотные (быстро изменяющиеся) фрагменты. Будем называть его когерентным джиттером (КД). Поведение обоих сомножителей в (1) показано на рис. 2.

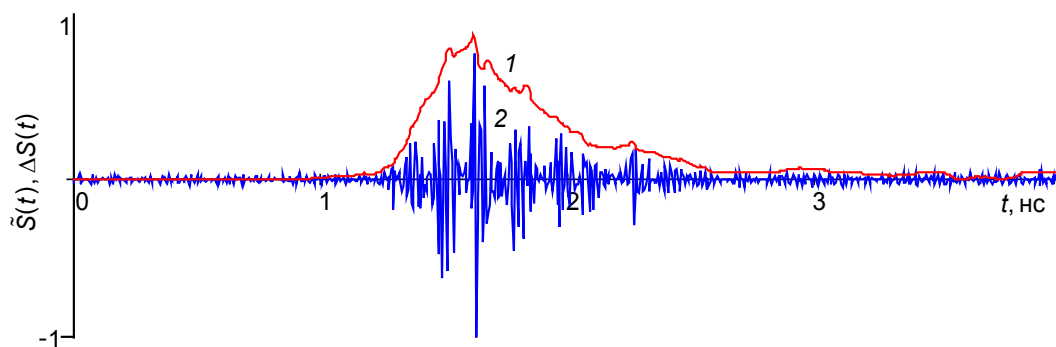


Рис. 2. Нормированные огибающая сглаженного импульсного сигнала (кр. 1) и выделенный джиттер (кр. 2)

Из рис. 2 видно, что джиттер заметно увеличивает свой размах в области сосредоточения центра тяжести огибающей сглаженного импульса. КД ещё более локализован. Для иллюстрации этого на рис. 3 показан характер изменения огибающей  $\tilde{S}_j(t)$  уже для КД (кривая 2), изображенной на фоне исходного сигнала (кривая 1). Видно, что огибающая  $\tilde{S}_j(t)$  действительно заметно более локализована во времени, а его максимумы подчеркивают положения наиболее быстро изменяющихся фрагментов исходного сигнала – в местах экстремумов производной основного сигнала.

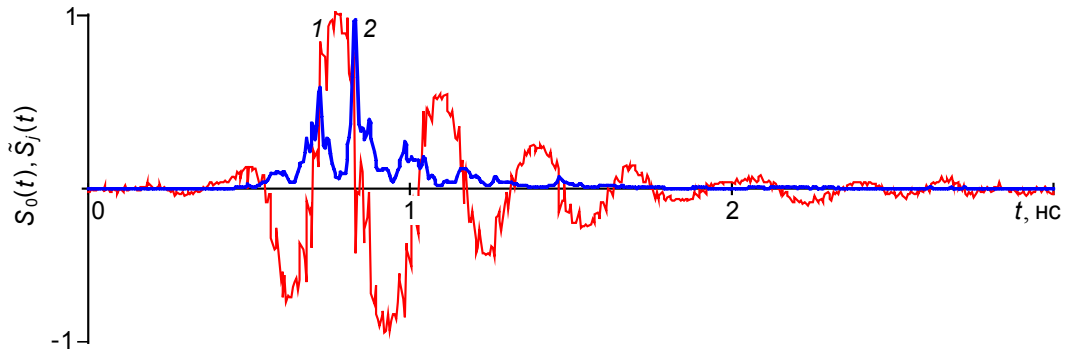


Рис. 3. Нормированные измеренный стробоскопическим методом исходный импульсный СШП-сигнал (кр. 1) и огибающая когерентной части выделенного джиттера (кр. 2)

Резкие изменения КД и их временная локализация свидетельствуют о наполненности его высокочастотными спектральными составляющими. Сказанное выше хорошо иллюстрирует сравнительная картина спектрального состава исходного  $S_0(t)$  - и КД  $S_j(t)$ -сигналов. На рис. 4 представлены соответствующие спектры. Если основная часть спектра исходного сигнала, взятая, например, по уровню выше 0.2, сосредоточена в области частот 1.5–4.5 ГГц, то для КД она приходится на частоты 1.5–6.5 ГГц. Это означает, что спектр КД обогащен высокочастотными составляющими. В конечном счете, это указывает на возможность усиления высокочастотных составляющих в зондирующих сигналах, а значит, и способность повышения пространственного разрешения импульсной СШП-радиотомографии в соответствующее число раз.

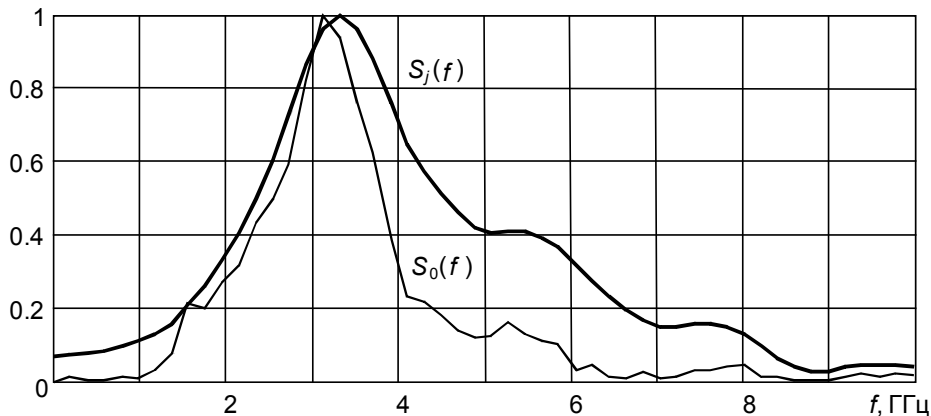


Рис. 4. Нормированные амплитудные спектры исходного импульсного сигнала и выделенного КД

## 2. Повышение разрешения импульсной СШП-радиотомографии

Для получения радиоизображения по данным СШП-зондирования использовались подходы, разработанные радиофизиками ТГУ [5]. Основная идея обработки СШП-данных восходит к технологии синтезирования апертуры и программно-аппаратной фокусировки излучения [5–7]. Фокусировка осуществляется путем последовательного суммирования принятых сигналов с выравниванием временных задержек импульсов, рассеянных точкой с заданными координатами. Для этого необходимо внести в принятый сигнал  $S(\rho, t)$  задержку, соответствующую суммарному времени прохождения сигнала от передатчика до объекта и обратно. Затем требуется рассчитать время задержки для каждого из импульсов. При этом все зарегистрированные в различных точках излучения-приема  $\rho_j$  сигналы  $S(\rho_j, t)$  суммируются с выравнивающей задержкой для каждой задаваемой точки фокусировки  $r$ . В результате происходит когерентное усиление суммарного сигнала в точках истинного расположения рассеивающих неоднородностей. В приближении однократного рассеяния принятый томографический сигнал формируется как [5]

$$F(r) \equiv \sum_j S\left(\rho_j, t = 2 \frac{|r - \rho_j|}{c}\right) = \iiint_V \Delta \varepsilon(\rho_1, z_1) Q(\rho_1, z_1; r) (d^3 r_1).$$

Ядро уравнения

$$Q(\mathbf{p}_1, z_1; \mathbf{r}) = \sum_j S_0 \left( t = 2 \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{p}_j|}{c} - 2 \frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{p}_j|}{c} \right) \frac{k_0^2}{(4\pi|\mathbf{r}_1 - \mathbf{p}_j|)^2} \quad (2)$$

играет роль аппаратной функции системы, а  $S_0(t)$  означает зондирующий СШП-сигнал. Величина  $\Delta\varepsilon$  характеризует искомое распределение неоднородностей зондируемого пространства. При достаточном объеме зарегистрированных данных и коротких зондирующих импульсах эта функция приближается к «размазанной»  $\delta$ -функции, что позволяет отождествить результаты фокусировки с распределением неоднородностей  $\Delta\varepsilon$ :

$$F(\mathbf{r}) \sim \Delta\varepsilon(\mathbf{p}, z).$$

Эта запись представляет собой приближенное решение задачи томографии.

Полученное решение по сути своей представляет собой некое интерференционное поле, имеющее максимумы в точках истинного положения точек рассеяния. В других точках сигналы будут складываться со случайной задержкой, и там будут наблюдаться более низкие значения сфокусированного поля. Результат тем лучше, чем больше независимых слагаемых участвует в фокусировке. Если в выражении (2) принятый сигнал  $S_0(t)$  заменить на выделенный КД  $S_j(t)$ , то реализуется возможность повышения разрешения импульсной СШП-радиотомографии.

На рис. 5 представлены результаты восстановления двумерного радиоизображения тестового объекта при зондировании СШП-импульсами длительностью 0.2 нс. Тестовый объект состоял из семи металлизированных полосок разной ширины, расстояние между которыми варьировалось от 3 до 0.5 см с шагом 0.5 см. Зондирование проводилось с использованием механического сканера вдоль оси  $X$  на дальности  $Z = 20$  см от плоскости расположения полосок  $XY$ . Приемная и передающая СШП-антенны располагались на каретке механического сканера, который перемещался с шагом 0.5 см.

Для получения изображения сначала использовались исходные отраженные СШП-импульсы (рис. 5, слева), а затем данные с выделенным КД (рис. 5, в центре). Здесь же (справа) представлен внешний вид самого тестового объекта. Полученное радиоизображение тестового объекта, по сути, представляет двумерный срез пространства вдоль плоскости  $XZ$ . Видно, что при использовании КД повышается контрастность и уменьшается количество артефактов радиоизображения.

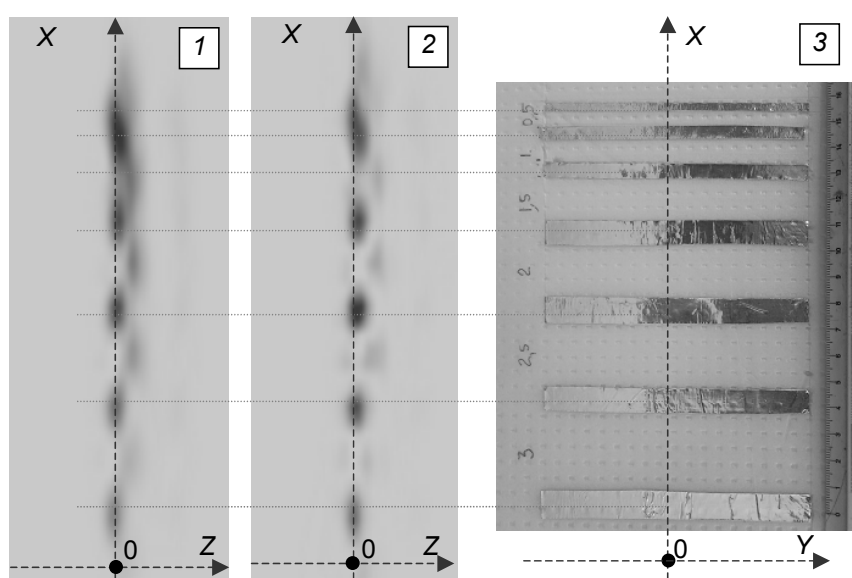


Рис. 5. Восстановленные радиоизображения двумерной тестовой сцены из металлических полосок (справа) без использования (1) и с использованием (2) операции выделения КД

На рис. 6 представлено относительное распределение интенсивности радиоизображения тестового объекта по срезу вдоль оси  $X$  поперек расположения металлических полосок на фоне самих полосок. Видно, что при использовании КД (кривая 2) провалы между максимумами интенсивно-

сти резко увеличиваются по сравнению с результатами без использования КД (кривая 1). Это говорит об улучшении разрешающей способности приблизительно в 1.5 раза.

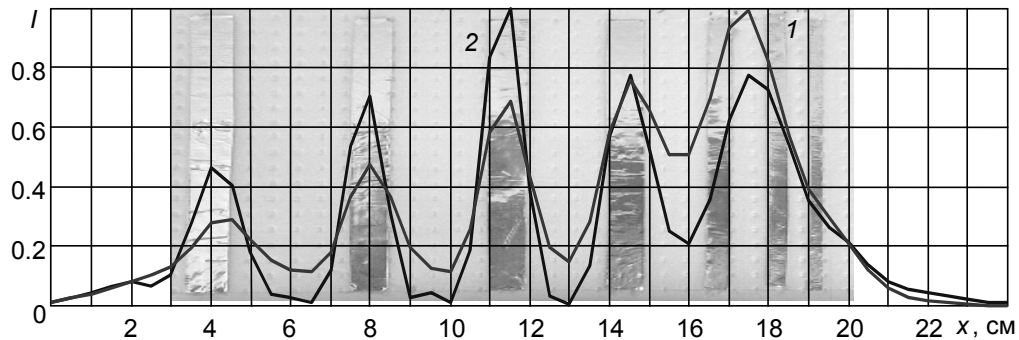


Рис. 6. Относительное распределение интенсивности сечения радиоизображения тестового объекта без использования (кр. 1) и с использованием (кр. 2) операции выделения КД

Аналогичная проверка проводилась для случая зондирования трех металлических цилиндров с использованием линейной СШП-тактированной решетки [6]. Схема эксперимента по зондированию тестовой сцены представлена на рис. 7. Решетка состояла из 16 приемных и 6 передающих СШП-антенн (позиция 1). В процессе тактирования реализовывалось 16 ракурсов зондирования. Цилиндры имели диаметр 6 см (позиция 2), причем два из них располагались на расстоянии 40 см, а третий — на расстоянии 50 см от решетки.

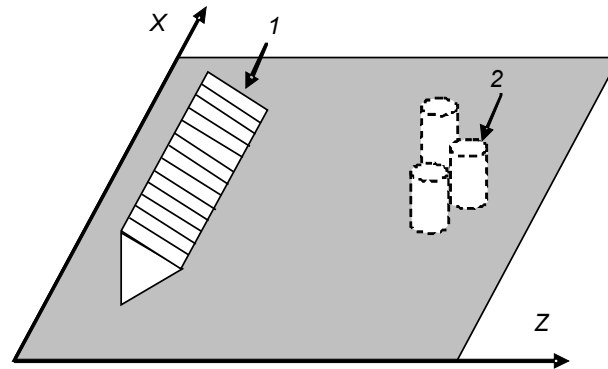


Рис. 7. Схема эксперимента по зондированию тестовой сцены цилиндрических объектов: 1 — прямо-передающая СШП антенная решетка; 2 — объекты зондирования

Сравнение радиоизображений, представленных на рис. 8, показывает, что использование в качестве входных данных КД позволяет существенно повысить разрешение изображения и снизить уровень артефактов, связанных с взаимными переотражениями между близко расположенными ме-

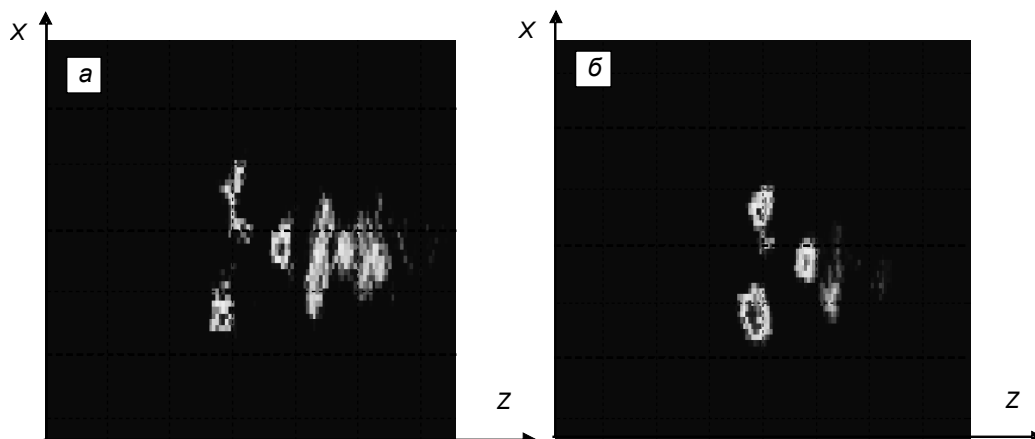


Рис. 8. Двумерное изображение (в плане) тестовой сцены из 3 объектов без использования (а) и с использованием (б) операции выделения КД

таллическими цилиндрами. Аналогичные результаты были получены при обработке данных СШП-георадара «ОКО-2» [7].

### Заключение

В работе представлен новый метод повышения разрешающей способности радиоизображений за счет выделения из принятого сигнала когерентной части джиттера. Данная операция является нелинейной и позволяет усилить высокочастотные составляющие в зондирующих сигналах, а значит, и улучшить пространственное разрешение импульсной СШП-радиотомографии не менее чем в 1.5 раза.

Результаты восстановления радиоизображений тестовых объектов при зондировании СШП-импульсами подтвердили возможность заметного повышения разрешения изображений и снизить уровень артефактов, связанных с взаимными переотражениями между близко расположенными объектами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu-Hao Chang, Shang-Ho Tsai, Xiaoli Yu, and C.-C. Jay Kuo. // Proceedings Global Communications Conference GLOBECOM'2007. IEEE. – Washington, DC, USA, 2007. – P. 3063–3067.
2. Xiliang Luo, Liuqing Yang, and Giannakis G.B. // J. Commun. Networks. – December 2003. – V. 5. – No. 4. – P. 344–353.
3. Ko C.C., Lei Huang, Boon Hor Poh // Wireless Person. Commun. – January 2007. – V. 40. – Iss. 1. – P. 19–33.
4. Якубов В.П. Статистическая радиофизика: учеб. пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 132 с.
5. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы. – Томск: Изд-во НТЛ, 2014. – 264 р.
6. Сатаров Р.Н., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8. – С. 26–30.
7. Клоков А.В., Запасной А.С., Шипилов С.Э., Якубов В.П. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 8/2. – С. 174–175.

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова  
Национального исследовательского Томского государственного университета,  
г. Томск, Россия  
E-mail: shipilov@mail.tsu.ru; yvlp@mail.tsu.ru; satarov.rail@gmail.com

Поступила в редакцию 25.05.15.