

Применение согласованной фильтрации для обработки сверхширокополосных сигналов

10, октябрь 2013

DOI: 10.7463/1013.0623000

Чернышев С. Л.

УДК 621.396.677

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

chernshv@bmstu.ru

Сверхширокополосными (Ultra-Wideband, UWB) системами, как следует из определения DARPA (США) называют такие системы передачи или извлечения информации, которые имеют относительную полосу пропускания частот, превышающую 50%.

Такие системы обладают самыми широкими полосами частот среди всех других радиосистем, что придает им уникальные свойства [1, 2].

К одному из таких свойств относится их предельная пропускная способность. В соответствии с основной формулой Шеннона пропускная способность при теоретическом бесконечном увеличении полосы частот достигает предельной величины $C_m \approx 1,44P_c / N_0$, где P_c и N_0 - средняя мощность сигнала и спектральная плотность мощности белого шума. Скорость же передачи сверхширокополосных (СШП) сигналов может достигать десятков миллиардов импульсов в секунду.

Скрытность действия СШП систем также велика вследствие низкой спектральной плотности мощности сигнала, которая может быть ниже внутреннего шума приемного устройства противника. К тому же передача такого СШП сообщения будет продолжаться миллионные доли секунды. Эти предельно достижимые характеристики СШП систем делают их привлекательными для многих областей

применения: в системах передачи данных, медицинских системах, охранных, радиолокационных и др.

Следует отметить, что СШП радиолокационные системы позволяют обнаруживать предметы и людей, расположенных за ограждающими стенами, дверями, под землей, то есть действовать не только в пределах видимости, но и скрытно для нарушителей. Это может быть использовано для создания переносных солдатских радаров для городского боя, в системах связи, службах безопасности.

Специфика применения СШП радиолокационных систем основана на очень малой длительности сигналов. В настоящее время она колеблется от десятков пикосекунд до нескольких наносекунд. При этом толщина излучаемого фронта радиоволны составляет от всего нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Такой узкий фронт волны оказывается значительно меньше геометрических размеров облучаемого объекта. В результате отраженный от него сигнал несет в себе информацию о профиле объекта. Соответствующая обработка отраженного сигнала позволяет в результате решать задачу распознавания радиолокационных портретов целей.

Следует отметить серьезное отношение к разработке СШП технологий и техники, проявляемое правительством США. Существует правительственная программа развития UWB технологий, и 14 февраля 2002 года Федеральной комиссией по коммуникациям (ФКК) был опубликован Первый отчет и Распоряжение, уполномочивающее коммерческое развертывание UWB технологий под названием «Новые применения сверхширокополосных технологий для обеспечения безопасности и широкополосного доступа к Интернету для пользователей, уполномоченных ФКК».

Распоряжение ФКК включает в себя и стандарты, разработанные для обеспечения существующих и планирующихся радиослужб и служб безопасности. Эти стандарты касаются частотных диапазонов и допустимых мощностей.

В США также создана Рабочая группа по сверхширокой полосе (Ultra-Wideband working group), которая включает в себя фирмы, представителей правительства и отдельных ученых и предназначена для выработки приоритетных направлений в СШП технологиях и обсуждения их проблем.

Важность, которую придают разработкам СШП технологий в США, также подчеркивает тот факт, что одним из ведущих исполнителей программы является знаменитая Лос-Аламосская лаборатория Военно-воздушных сил США. В Лос-Аламосе состоялся и Первый семинар по сверхширокополосным технологиям.

Сверхширокополосные системы, в силу своей специфики, не могут опираться на традиционную элементную базу, присущую узкополосным системам. Сверхширокая полоса требует разработки новых устройств, обеспечивающих необходимые характеристики на всех рабочих частотах, начиная от генераторов и заканчивая антеннами. Обработка информации также должна вестись новыми оригинальными методами, поскольку цифровая обработка при столь широкой полосе пока невозможна из-за отсутствия соответствующих АЦП с полосой до десятков ГГц. Кроме этого, перенос сверхширокополосных сигналов на промежуточную частоту невозможен, поэтому обработка таких сигналов должна проводиться во входном тракте радиолокационного приемника.

В настоящее время обработка сигналов в СШП РЛС осуществляется в основном с помощью стробоскопического преобразования. Тем не менее методы прямой обработки остаются более привлекательными. Такая обработка возможна с применением специальных устройств фильтрации, созданных на базе нерегулярных линий передачи (НЛП) с Т-волной, в частности согласованных фильтров (СФ), чему и посвящена настоящая статья.

Если на вход радиолокационного приемника поступает смесь $y(t)$ финитного во времени известного сверхширокополосного детерминированного полезного сигнала $x(t)$ длительностью T , имеющего спектр $U(\omega)$, и стационарной помехи $n(t)$ с неравномерной плотностью мощности $S_n(\omega)$:

$$y(t) = x(t) + n(t) .$$

Тогда импульсная характеристика СФ $g(t)$, обеспечивающего максимальное отношение сигнал / шум на выходе, должна быть согласована с некоторым эквивалентным сигналом $x_g(t)$ и удовлетворять условию

$$g(t) = x_{\varepsilon}(t_0 - t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U^*(\omega)}{S_n(\omega)} e^{[i\omega(t-t_0)]} d\omega,$$

t_0 - время наблюдения сигнала.

В приближении белого шума, как известно, $g(t) = k \cdot x(t_0 - t)$.

Таким образом, согласованный фильтр на НЛП должен быть синтезирован так, чтобы его импульсная характеристика удовлетворяла упомянутым условиям.

В случаях, когда известны импульсные характеристики целей, СФ может быть настроен на них. В этом случае сразу могут решаться и вопрос обнаружения и вопрос распознавания. Для этого набирается база данных о возможных импульсных характеристиках целей под разными ракурсами. Такие исследования, например, в США проводятся в безэховых камерах лабораторий Военно-морского центра авиации NAWCAD в г. Мэриленд, Air Force Research Laboratory, г. Арлингтон [3]. Созданные на основе их данных СФ предназначены для распознавания различных целей.

Однако, как правило, такой путь трудоемок даже при применении цифровой обработки и требует большого числа каналов по целям, ракурсам и поляризациям. Кроме этого, при крупных целях длина аналогового СФ на НЛП оказывается весьма значительной.

Обнаружение же СШП сигнала без априорной информации о возможной его форме представляет собой сложную задачу. В [4] показано, что возможно обнаружение СШП сигналов при знании периода повторения зондирующих импульсов. Однако кроме этого периода известной является и форма зондирующего сигнала. Поэтому предпочтительным выглядит промежуточный вариант, когда СФ настроен не на отраженный сигнал, а на зондирующий. В этом случае СФ может играть роль преселектора, «очищающего» входную смесь от помехи.

Сигнал, отраженный от цели, представляет собой свертку сверхширокополосного зондирующего сигнала $s(t)$ (рис.1) длительностью τ_u и импульсной характеристики цели $g_u(t)$:

$$x(t) = \int_0^{\infty} g_u(\tau) s(t-\tau) d\tau$$

(см. рис. 2), а спектр его равен $U(\omega) = G_u(\omega) \cdot S(\omega)$.

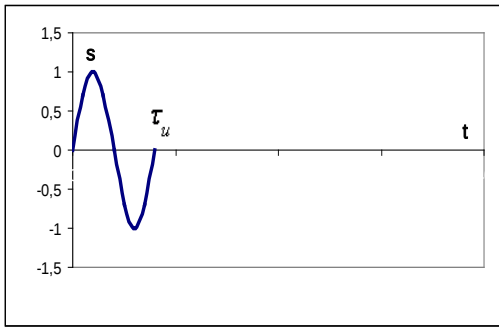


Рис. 1. СШП зондирующий сигнал

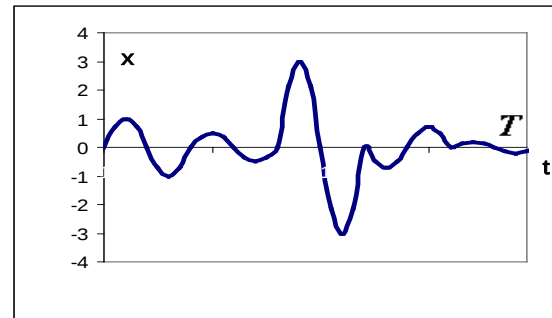


Рис. 2. СШП отраженный сигнал

В дискретном виде отраженный сигнал ∇

$$x(k) = \sum_{i=0}^{\infty} g_u(i) s(k-i)$$

В результате, если СФ согласован с сигналом $s(t)$, $g(t) = k_0 \cdot s(t_0 - t)$ и сигнал на его выходе будет имеет вид

$$z(t) = k_0 \int_0^{\infty} s(t_0 - \theta) \left[\int_0^{\infty} g_u(\tau) s(\theta - \tau - t) + n(\theta - t) \right] d\tau d\theta.$$

Для сверхширокополосного зондирующего сигнала длительность τ_u много меньше, чем длительность отраженного от цели сигнала T . Поэтому можно принять приближение, что

$$g_u(t) = g_{um} = \text{const} \quad \text{при} \quad (m+1) \cdot \frac{\tau_u}{\Delta t} > t \geq m \frac{\tau_u}{\Delta t},$$

где Δt - период дискретизации по времени, определяемый по теореме Котельникова, $m \leq M$, $M = T / \tau_u$. В этом случае отраженный сигнал имеет в дискретной форме вид

$$x(k) = \sum_{m=0}^{M-1} g_{um} s(k - m \frac{\tau_u}{\Delta t});$$

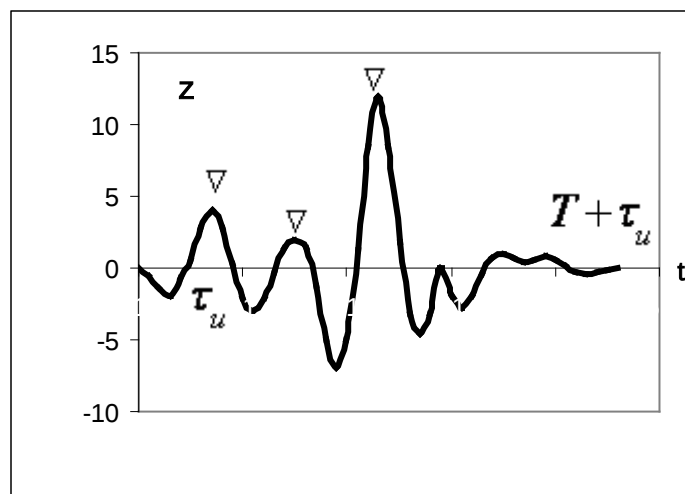
а сигнал на выходе СФ равен

$$z(k) = k_0 \sum_{l=0}^{\infty} s(\frac{t_0}{\Delta t} - l) [\sum_{m=0}^{M-1} g_{um} s(l - m \frac{\tau_u}{\Delta t} - k) + n(l - k)]$$

При некоррелированных сигнале и помехе

$$z(k) = k_0 \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{M-1} g_{um} s(l - m \frac{\tau_u}{\Delta t} - k) s(\frac{t_0}{\Delta t} - l)$$

На рис. 3 приведен пример такого сигнала на выходе СФ (треугольниками отмечены максимумы корреляционных функций).



**Рис. 3. Сигнал на выходе СФ, согласованного
с зондирующим сигналом**

Каждый дискрет такого сигнала, длительностью τ_u , представляет собой корреляционную функцию зондирующего сигнала и отношение сигнал/шум на нем будет максимальным. В целом для отраженного сигнала такая фильтрация, конечно, не будет оптимальной, но это дает возможность применить в последующем черезпериодную обработку, которая дает более высокое отношение сигнал/шум, нежели без описанного преселектора.

В общем случае шумовая составляющая на выходе СФ все же имеет место. Рассмотрим отраженный сигнал в смеси с шумом. На рис. 4 приведен пример «зашумленного» сигнала (сплошная линия) на фоне сигнала без шума (пунктирная линия).

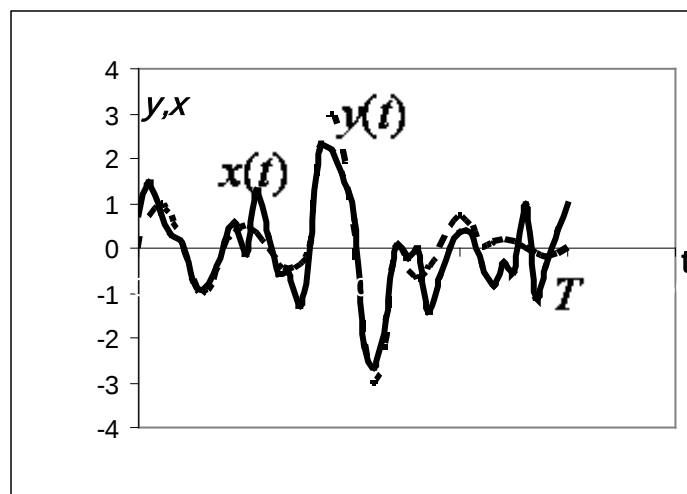


Рис. 4. Смесь сигнала с шумом (сплошная линия) и «чистый» сигнал (пунктир)

После пропускания смеси через СФ, согласованный с зондирующим сигналом на выходе СФ сигнал имеет вид, изображенный на рис. 5.

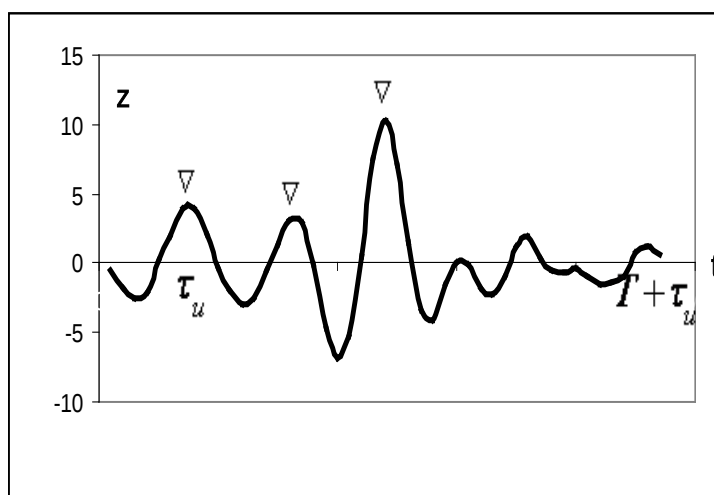


Рис. 5. Сигнал на выходе СФ

Видно, что по сравнению с рис.3 величины максимумов изменились незначительно, а их положения практически не изменились, то есть в таком СФ происходит подавление

помехи. Исследования показывают, что отношение сигнал/шум при этом улучшается до 5-6 дБ.

Выводы. Обработка СШП сигналов, для которых цифровые методы неприменимы, предпочтительнее во входных цепях приемников РЛС с использованием фильтров на нерегулярных линиях передачи. В связи с короткой длительностью СШП сигналов, их геометрическая глубина много короче продольного размера цели, что позволяет дискретизировать отраженный сигнал с периодом, равным длительности сигнала. Это дает возможность согласованной фильтрации отраженного сигнала на первом этапе с целью улучшения отношения сигнал/шум.

Список литературы

1. Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems / Edited by J.Taylor. CRC Press, 1995.
2. Aiello R., Batra A. Ultra Wideband Systems. Technologies and Applications. Elsevier Inc., 2006.
3. Ашихмин А.В. Проектирование и оптимизация сверхширокополосных антенных устройств и систем для аппаратуры радиоконтроля. М.: Радио и связь, 2005. 486 с.
4. Иммореев И.Я., Черняк В.С. Обнаружение сверхширокополосных сигналов, отраженных от сложных целей // Радиотехника. 2008. № 4. С. 3-10.

Application of matched filtering for processing ultra-wideband signals

10, October 2013

DOI: 10.7463/1013.0623000

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

chernshv@bmstu.ru

The author considers a possibility of using matched filtering of UWB signals. Maximum achievable characteristics of UWB systems make them promising for many application domains such as data transmission systems, medical systems, security systems, radars, etc. Processing is possible with the use of special filtration devices created on the basis of irregular transmission lines with the T-wave, in particular, on the basis of matched filters, which is the main topic of this paper. For a UWB sounding signal duration is much shorter than duration of a signal reflected from the target; therefore, it could be taken as a sampling period. In this case, application of preliminary matched filtering of the reflected signal, followed by traditional processing, is possible.

Publications with keywords: [signal processing](#), [Ultra-Wideband signal](#), [matched filtering](#), [irregukar line](#)

Publications with words: [signal processing](#), [Ultra-Wideband signal](#), [matched filtering](#), [irregukar line](#)

References

1. Taylor J., ed. *Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems*. CRC Press, 1995.
2. Aiello R., Batra A. *Ultra Wideband Systems. Technologies and Applications*. Elsevier Inc., 2006.
3. Ashikhmin A.V. *Proektirovanie i optimizatsiya sverkhshirokopolosnykh antennykh ustroystv i sistem dlya apparatury radiokontrolya* [Design and optimization of UWB antenna devices and systems for radio control equipment]. Moscow, Radio i svyaz', 2005. 486 p.
4. Immoreev I.Ya., Chernyak V.S. Obnaruzhenie sverkhshirokopolosnykh signalov, otrazhennykh ot slozhnykh tseley [The Detection of Ultrawideband Signals Reflected from Complex Targets]. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2008, no. 4, pp. 3-10.