

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В СОВРЕМЕННЫХ РЭС

Шепета Александр Павлович,
г. Санкт-Петербург, Россия

Махлин Александр Маркович,
г. Санкт-Петербург, Россия

Львовский Сергей Анатольевич,
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье дано определение сверхширокополосной радиолокации, произведен обзор ее основных свойств и применений. Далее исследованы достоинства и недостатки основных схем и алгоритмов обработки сигналов для сверхширокополосной радиолокации. Предложена схема компромиссного решения для схемы и алгоритма обработки сигнала сверхширокополосного сигнала.

Ключевые слова: обработка сигналов; сверхширокополосная радиолокация; ультракороткие импульсы; радиолокация

Сведения об авторе: Шепета А.П., д.т.н., профессор, профессор кафедрой моделирования вычислительных и электронных систем Санкт-Петербургского Университета Аэрокосмического Приборостроения;
Махлин А.М., инженер 1 категории ОАО «Концерн «Гранит-Электрон» Аспирант кафедры моделирования вычислительных и электронных систем Санкт-Петербургского Университета Аэрокосмического Приборостроения;
Львовский С.А., начальник научно-производственного центра, главный конструктор ОАО «Концерн «Гранит-Электрон»

В современном мире к качеству функционирования радиоэлектронных средств (РЭС) предъявляются всё более высокие требования. Для выполнения поставленных требований разработчики РЭС идут либо по пути улучшения технических характеристик узкополосных систем, либо используют новые технологии, основанные на применении сверхширокополосных сигналов (СШПС). Термин «сверхширокополосный» имеет несколько определений. Одно из них предполагает, что верхняя граничная частота полосы сигнала больше чем в два раза превышает нижнюю. В радиолокации же принято считать СШПС сигнал, полоса которого превышает 500 МГц [1]. Однако расширение полосы частот повышает информативность системы в том случае, когда разрешающая способность сигнала st (s – скорость света, $t = 1/Df$ – длительность простого сигнала, f – ширина спектра сигнала) становится намного меньше L – размера излучающей (приемной) апертуры или размера объекта, отражающего сигнал. Это определение связывает понятие ширины полосы системы непосредственно с размерами облучаемого объекта. В данной статье под СШП сигналами понимаются короткие видеоимпульсы формы кривой Гаусса и длительностью порядка 1 нс. Такая форма обусловлена АЧХ любой антенны, не позволяющей передавать сигналы нулевой частоты. В отличие от прямоугольной, форма кривой Гаусса позволяет сосредоточить энергию импульса дальше от «0» по оси частот и, соответственно, передать больше энергии в эфир.

Интенсивные разработки устройств СШП радиоэлектроники велись с середины 1970-х годов, однако их практическая реализация стала возможной только после достижения соответствующего уровня технологии генерации мощных сверхкоротких импульсов с практически неограниченным ресурсом, с высокой стабильностью и большой частотой повторения (лавинно-пролетные транзисторы, диоды с накоплением заряда) и технологии скоростной цифровой обработки больших массивов информации

(ОЗУ, ПЛИС, высокоскоростные АЦП) [2]. РЭС использующие в качестве зондирующих импульсов сверхкороткие наносекундные импульсы обладают следующими преимуществами:

- Возможность проникать сквозь преграды и отражаться от целей расположенных за пределами прямой видимости, что позволяет использовать такие радары для обнаружения людей за стеной или объектов в грунте.
- Высокая скрытность для узкополосных систем ввиду малой спектральной плотности СШП сигнала.
- Точность определения расстояния до нескольких сантиметров из-за малой пространственной протяженности сигнала.
- Возможность мгновенного опознавания и классификации цели по отраженному сигналу и высокой детализацией цели, так как каждый элемент цели, размер которого больше пространственной протяженности сигнала, представляет собой отдельную «блестящую точку». Портрет цели может быть составлен по совокупности отражений от таких точек.
- Определение скорости перемещения объекта без «слепых скоростей» свойственных доплеровским измерителям.
- Повышение эффективности и упрощение конструкции аппаратуры защиты от всех видов пассивных помех – дождя, тумана, аэрозолей, металлизированных полос, поскольку эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) помех в малом импульсном объеме становится соизмеримой с ЭПР цели;
- Устранение интерференционных провалов в диаграмме направленности (ДН) антенны при наблюдении за целью, которая находится под низким углом места, поскольку сигнал, отраженный от цели и сигнал, переотраженный от земли, разделяются во времени, что позволяет произвести их селекцию;

Указанные свойства делают СШП радиолокацию весьма перспективной, однако есть и ряд проблем, которые пока еще стоят перед разработчиками. В частности, дальность действия СШП радара уступает узкополосным системам. В [3] приводится расчет и сравнительная таблица дальности для радаров использующих радиоимпульсы (традиционных) и видеоимпульсы малой длительности (СШП) при одинаковой мгновенной мощности импульсов на нагрузке 50 Ом, а также при следующих условиях: длительность обоих импульсов 5 нс, температура приемника 300 К, ЭПР 0,1 м².

Таблица 1

Максимальная дальность обнаружения цели при различных мощностях и видах лоцирующих импульсов.

	Максимальная дальность обнаружения цели, км	
	Мощность импульса 0,5 ГВт	Мощность импульса 1 ГВт
Традиционный радар	550	655
СШП радар	260	310

Другой важной проблемой СШП радиолокации является непредсказуемость формы отраженного сигнала. В то время как в традиционной узкополосной РЛС излучается синусоидальный сигнал, который не претерпевает нелинейных изменений проходя через пространство - изменяются только его амплитуда и фаза, СШП сигнал претерпевает изменения как спектрального состава в частотной области, так и формы во временной области. Видеоимпульсы, составляющие “портрет”, могут иметь разную амплитуду. Она зависит от ЭПР соответствующей блестящей точки цели. Полярность этих видеоимпульсов может меняться. Это зависит от магнитной проницаемости материала, который отражает сигнал. При отражении от проводника электрическая составляющая поля изменяет свою полярность. При отражении от материалов с высокой магнитной проницаемостью эта полярность не меняется. Наконец, видеоимпульсы, отраженные от цели, могут изменить свою первоначальную (например, прямоугольную) форму. Это произойдет в том случае, когда блестящие точки цели обладают резонансными свой-

ствами и имеют полосу частот меньше ширины спектра СШП сигнала. Кроме того, форма отраженного сигнала будет усложнена переотражениями видеоимпульса между блестящими точками цели. Одним из решений обеих проблем является использование пачек импульсов вместо одиночных зондирующих импульсов.

Поскольку сами СШП сигналы, ввиду своих временных и частотных характеристик, являются нетипичными в инженерной практике и элементная база для их прямой обработки весьма ограничена, то в первую очередь необходимо выбрать метод регистрации импульсов длительностью 1 нс и менее. Существуют несколько методов:

- Аналоговый приемник с линией задержки и перемножителем. Позволяет быстро обнаружить цель. Не годится для движущихся целей [4].
- Стробоскопический приемник. Позволяет получить хороший портрет цели. Требуется много времени для сбора информации. Не годится для движущихся целей [5,6].
- Приемник с частотным разделением каналов, предлагаемый в данном докладе. Позволяет быстро обнаружить цель, получить ее портрет и работать с движущимися целями.

Структурная схема такого приемника СШП сигналов приведена на рис.1. При появлении СШП сигнала возрастает энергия в достаточно широком диапазоне частот. В работе [4] предложено разделить этот диапазон полосовыми фильтрами на несколько поддиапазонов и контролировать уровень сигнала в каждом поддиапазоне отдельно. При одновременном увеличении энергии в этих поддиапазонах принимается решение о наличии в этот момент времени СШП сигнала, то есть фиксируется обнаружение СШП сигнала.

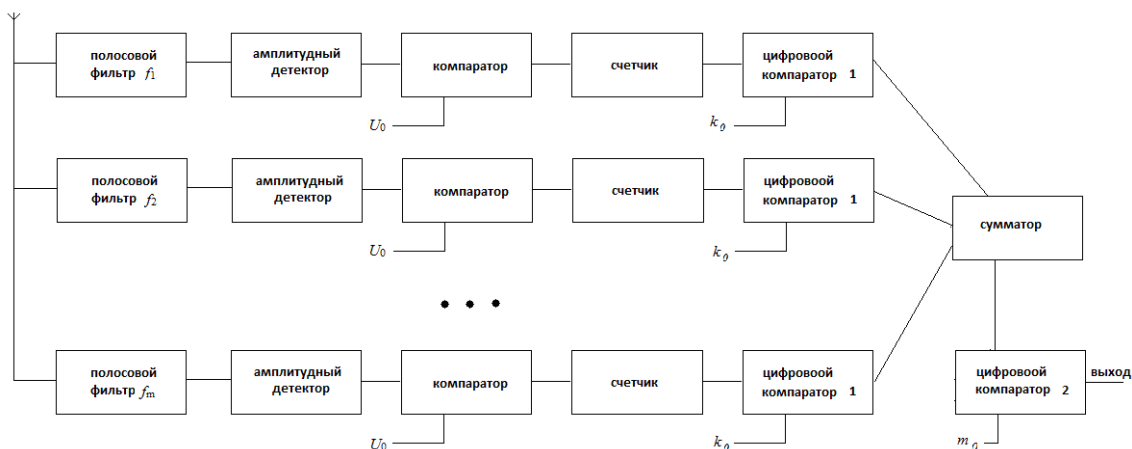


Рис.1. Структурная схема приемника сверхширокополосного сигнала.

Из схемы видно, что приемник состоит из n каналов, отличающихся только центральными частотами полосовых фильтров $f_1, f_2, f_3, \dots, f_m$, остальные блоки для всех каналов одинаковы. Поскольку полосы фильтров также одинаковы, то при равенстве спектральной плотности шумов, в каждом из каналов мощности шумов будут равны. В практической реализации подобной схемы этого всегда можно добиться путем введения в каждом канале автоматической регулировки усиления (АРУ).

Результаты математического моделирования одного из каналов вышеописанной схемы приведены на рис. 2. На рис. 2а показаны исходные импульсы длительностью 1 нс поступающие на вход широкополосного приемника. На рис. 2б показаны те же импульсы на выходе полосового фильтра с шириной полосы 35 МГц. На рис. 2в показаны импульсы после амплитудного детектирования.

Вышеописанный метод приема СШП сигналов не является оптимальным. В данной ситуации, как известно, оптимальным алгоритмом обработки пачки сигналов будет простое накопление сигнала [7] без использования полосовых фильтров. Однако подобное накопление СШП импульсов требует использования очень дорогостоящих элементов и критично к технологии выполнения схемы. Предлагаемое же решение обладает технологическим преимуществом – короткий видеоимпульс, попадая в полосовой фильтр, превращается в достаточно широкий радиоимпульс, огибающую которого, после детек-

тирования, можно регистрировать с помощью компаратора или АЦП со средним быстродействием, что не только упрощает технологию изготовления таких устройств, но и существенно улучшает экономические показатели приемника.

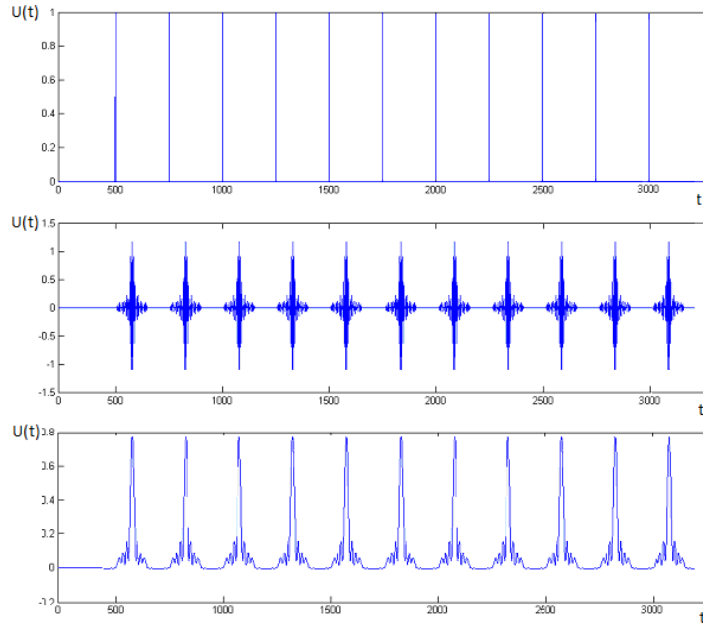


Рис. 2. Эпюры сигналов в разных точках схемы: а) исходная импульсная последовательность; б) импульсы на выходе полосового фильтра; в) импульсы на выходе амплитудного детектора

Дальнейшая обработка могла бы заключаться в накоплении сигнала в каждом из каналов с последующим использованием «метода голосования» по совокупности обнаружения сигнала в канальных обнаружителях. Подобная обработка была бы оптимальной канальной обработкой. Однако известно, что при бинарном квантовании сигнала с последующим использованием критерия « k из n » проигрыш в отношении сигнал/шум не превосходит 1.5-2.0 дБ [8], то есть критерий « k из n » является простым и достаточно эффективным. Кроме того, вместо использования «метода голосования» при межканальной обработке, можно опять же воспользоваться критерием « k из n ». При таком подходе мы и получаем схему приемника-обнаружителя СШП сигналов, приведенную на рис. 1. На рис. 3 показаны эпюры напряжения в одном из каналов после амплитудного детектирования.

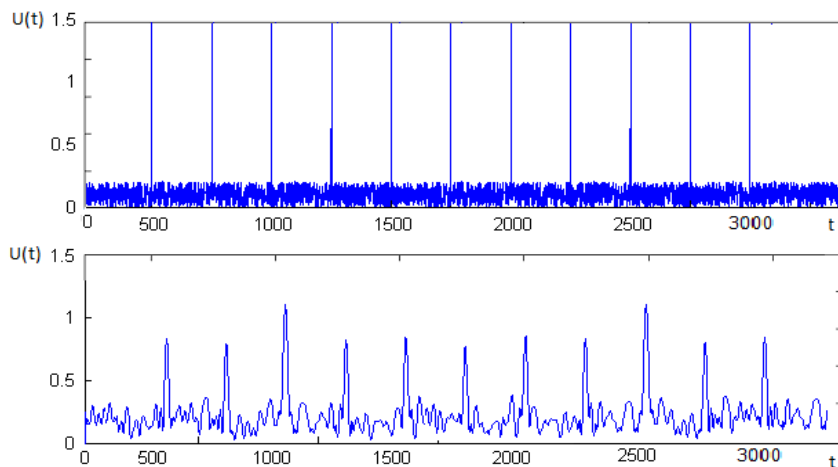


Рис. 3 Результат моделирования работы схемы в условиях шумов

После детектирования импульсы с амплитудой больше U_0 (порог компаратора) регистрируются аналоговым компаратором и бинарная последовательность, состоящая из «0» и «1» с его выхода, подается на счетчик, цифровой сигнал которого поступает на цифровой компаратор. Если число импульсов в счетчике меньше n_0 - порога цифрового компаратора, то на его выходе появляется «0», в противном случае «1». Затем, полученные «0» и «1» всех каналов суммируются в сумматоре и сравниваются с порогом m_0 , в случае его превышения, цифровой компаратор вырабатывает «1» - обнаружен СШП сигнал или «0» - СШП сигнал не обнаружен. В результате математического моделирования была получена формула вычисления вероятности правильного обнаружения

$$P_{no} = \sum_{l=m_0}^m C_m^l P_{no}^{*l} (1 - P_{no}^*)^{m-l} . \quad (1)$$

На рис. 4 показаны кривые обнаружения для разных моделей сигналов, рассчитанных по (1): 1 – дружно-флуктуирующих пачек импульсов и 2 – шумоподобных пачек, а также приведены кривые правильного обнаружения, полученные на макете приемника СШП сигналов – 3,4, собранного по схеме рис. 1.

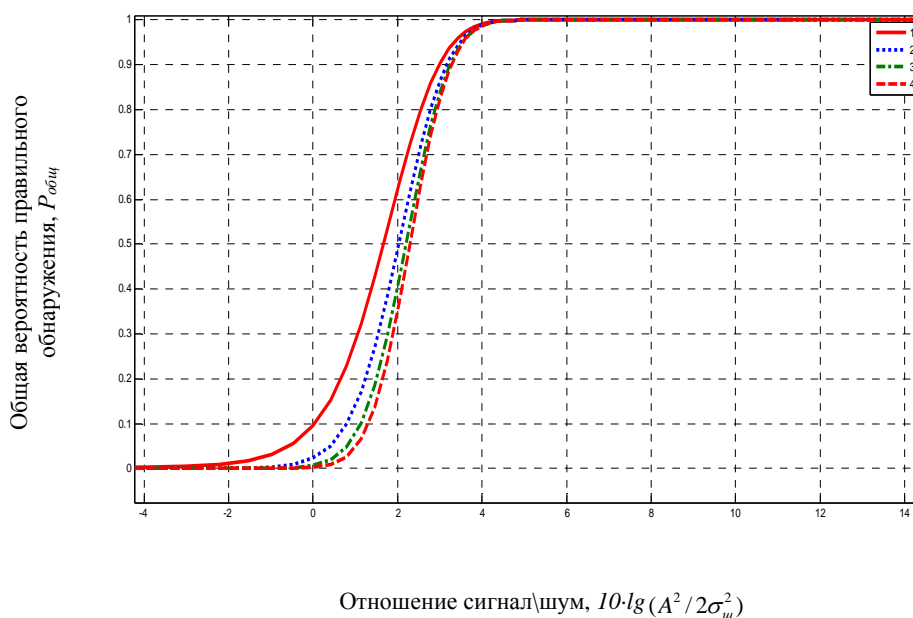


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум $10 \cdot \lg(A^2 / 2\sigma_w^2)$ для разных сигналов

В работе дан краткий обзор СШП радиолокации и ее свойств, а также описана схема приемника-обнаружителя сверхширокополосных сигналов. Приведены эпюры напряжений в разных точках схемы, поясняющие ее работу. Рассчитаны характеристики обнаружения. Работоспособность схемы проверена на макете. Подобные схемы могут найти практическое применение в СШП РЛС различного назначения.

Литература

1. Ian Opperman, Matti Hamalainen, Jari Linatti "UWB Theory and applications", Helsinki, 2004.
2. J.H. Reed, "An Introduction to Ultra Wideband Communication Systems". Prentice Hall, 2005.
3. «Адаптация спектра зондирующего сигнала при моноимпульсной локации сверхширокополосными импульсами», с.н.с В.В. Кулагин, проф. В.А.Черепенин, ГАИШ МГУ РАН, ИРЭ РАН.
4. M. Anis R.Tielert «Design of UWB pulse radio transceiver using statistical correlation technique in frequency domain», Advances in Radio Science, том 5, 2007, С. 297-304 5) «Indoor UWB Communication System».

5. «Final Project Design Report», The State University of New Jersey, 2014.
6. «FEATURE EXTRACTION FOR LANDMINE DETECTION IN UWB SAR VIA SWD AND ISOMAP», School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology (NUDT), Changsha, Hunan 410073, China, Progress In Electromagnetics Research, том. 138, С. 157-171, 2013
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1-я. М.: Сов. радио, 1974. 552 с.
8. Клюев Н.Ф. Обнаружение импульсных сигналов посредством накопителей дискретного действия. М. «Сов. Радио», 1973.

THE FEATURES OF UWB SIGNALS APPLICATION IN MODERN RADAR STATIONS

Shepeta Aleksandr Pavlovich,
St. Petersburg, Russia

Makhlin Aleksandr Markovich,
St. Petersburg, Russia

L'vovskiy Sergey Anatol'evich,
St. Petersburg, Russia

Abstract. The definition of UWB signals and short overview of its features and application are given. The major advantages and disadvantages are discussed and a receiver structure and processing algorithm, staisfying all the requirements is analyzed.

Keywords: signalprocessing, radar, ultrawideband, short pulses.

References

1. Ian Opperman, Matti Hamalainen, Jari Linatti "UWB Theory and applications", Helsinki, 2004
2. J.H. Reed, "An Introduction to Ultra Wideband Communication Systems". Prentice Hall, 2005.
3. VV Kulagin, V.A.Cherepenin «Adaptation of the spectrum of the probe signal at the location monopulse UWB pulses», Sternberg Astronomical Institute RAS, IRE (In Russian).
4. M. Anis R.Tielert «Design of UWB pulse radio transceiver using statistical correlation technique in frequency domain», Advances in Radio Science, vol. 5, 2007, p. 297-304) «Indoor UWB Communication System
5. Final Project Design Report», The State University of New Jersey, 2014
6. «FEATURE EXTRACTION FOR LANDMINE DETECTION IN UWB SAR VIA SWD AND ISOMAP», School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology (NUDT), Changsha, Hunan 410073, China, Progress In Electromagnetics Research, vol. 138, pp. 157-171, 2013.
7. Levin B.R. Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering. Bk. 1st. M.: Sov. radio, 1974, 552 p. (In Russian)
8. Klyuev N.F. Detection of pulsed signals by discrete action drives. M. Sov. radio, 1973. (In Russian)

Information about authors:

Shepeta A.P., Ph.D, Professor of the Department of computational simulation of electronic systems and St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation;
Makhlin A.M, 1st category Engineer of JSC "Concern "Granit-Electron", student of computational simulation of electronic systems and St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation;
L'vovskiy S.A., Head of the Research and Production Center, Chief Designer of JSC "Concern "Granit-Electron".