

УДК: 623.454.254; 621.391

DOI: 10.53816/20753608_2022_2_90

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ НЕКОНТАКТНЫХ ВЗРЫВАТЕЛЕЙ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

INCREASING THE ACCURACY AND RELIABILITY OF NON-CONTACT FUSES WHEN USING ULTRA-WIDEBAND SIGNALS

А.Е. Чванов, чл.-корр. РАН Е.А. Хмельников, Т.Е. Заводова

*Нижнетагильский технологический институт (филиал)
«Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»*

A.E. Chvanov, E.A. Khmelnikov, T.E. Zavodova

Сверхширокополосные радиосигналы дециметрового и сантиметрового диапазонов находят все более широкое применение в ряде областей, в том числе в электронных системах неkontaktных взрывателей. Использование сверхширокополосных сигналов позволяет значительно улучшить характеристики радиолокационной системы, такие как разрешение по дальности, помехозащищенность, возможность распознавания наблюдаемых объектов. Переход к сверхширокополосной радиолокации позволяет рассматривать использование сигналов в виде короткого немодулированного импульса. Корреляционная функция такого сигнала не имеет боковых лепестков, что позволяет ожидать лучшего отношения сигнал-помеха при их использовании. Следует оценить, насколько значительным будет выигрыш, поскольку использование сигналов в виде короткого импульса может быть технически сложным. Представлены качественные характеристика систем и перспективы их использования.

Ключевые слова: сверхширокополосные сигналы, неkontaktные взрыватели, гранатометный выстрел.

Ultra-wideband radio signals of the decimeter and centimeter ranges are increasingly being used in a number of areas, including in electronic systems of non-contact fuses. The use of ultra-wideband signals can significantly improve the characteristics of the radar system, such as range resolution, noise immunity, and the ability to recognize observed objects. The transition to ultra-wideband radar allows consider the use of signals in the form of a short unmodulated pulse. The correlation function of such a signal does not have side lobes, which allows us to expect a better signal-to-noise ratio when using them. It is necessary to assess how significant the gain will be, since the use of signals in the form of a short pulse can be technically difficult. The qualitative characteristics of the systems and the prospects for their use are presented.

Keywords: ultra-wideband signals, non-contact fuses, grenade launcher shot.

Введение

В соответствии с определением сверхширокополосных (Ultra Wide Band — UWB) сигналов, введенным экспертами DARPA МО США и уточненным FCC (Федеральной комиссией по

связи), сверхширокополосный радиолокатор — это радиолокатор, у которого ширина спектра сигнала значительно больше 25 % от центральной частоты. Излучение в таком радиолокаторе происходит в виде одиночных импульсов или нескольких периодов колебания на центральной частоте. В типовых случаях длительность им-

пульса находится в пределах от 100 пс до 1,5 нс, центральная частота — в диапазоне от 650 МГц до 5 ГГц, а ширина спектра — до нескольких гигагерц. Для UWB-радиолокаторов характерно не только использование сверхкоротких импульсов, но также очень низкий уровень излучаемой мощности. Тем не менее при таких уровнях средняя дальность составляет от нескольких метров до нескольких километров. На рис. 1 и 2 показаны сверхширокополосный импульс и его спектр.

UWB-радиолокаторы вызывают к себе большой интерес, и развитие сверхширокополосной радиолокации идет достаточно интенсивно. Перечисленные ниже потенциальные информационные преимущества UWB-радиолокаторов перед радиолокаторами, использующими «узкополосные» сигналы, основаны именно на работе со

сверхкороткими импульсами и, соответственно, в сверхширокой полосе:

- широкая полоса UWB-радиолокаторов обеспечивает им более высокую разрешающую способность по дальности и точность измерения расстояния до цели. Высокое пространственное разрешение предоставляет еще и возможность для выделения цели из фоновых помех;

- UWB-радиолокаторы способны распознавать тип и форму цели, поскольку принятый эхо-сигнал несет информацию не только об объекте в целом, но и о его элементах. Протяженность пикосекундного импульса в пространстве st (где c — скорость света, t — длительность импульса) намного меньше длины цели, и в этом случае цель является уже не точечным отражателем, как для традиционного радиолокатора, а матрицей отражающих элементов (микроцелей). Зондирующий сигнал UWB-радиолокатора, поочередно отражаясь от отдельных элементов, образует импульсную последовательность, параметры которой зависят от геометрии объекта и импульсных характеристик цели. Эта последовательность, называемая «портретом цели»;

- обеспечивается электромагнитная совместимость UWB-радиолокатора с обычной узкополосной РЛС. При совместной работе этих радаров в полосу частот узкополосного попадает лишь небольшая часть энергии сигнала UWB радиолокатора. Поскольку их полосы частот отличаются на три порядка, за время действия UWB-радиолокатора помеха, возникающая от него в приемнике узкополосной РЛС, не успевает достичь заметной величины. Кроме того, при равной мощности излучения обоих радаров удельная мощность на единицу частоты у UWB-радиолокатора примерно на три порядка ниже, т.е. в приемник узкополосной РЛС попадет лишь тысячная доля энергии сверхширокополосного сигнала. При обратном влиянии от помех эффективно защищает частотная режекция, вырезающая из спектра сигнала UWB-радиолокатора полосу частот, занимаемую сигналом узкополосной РЛС. При совместной работе двух или нескольких UWB-радиолокаторов возможно временное разделение сигналов;

- существенное уменьшение эффективной площади рассеивания (ЭПР) пассивных помех — дождя, тумана, аэрозолей и т.п. — облегчает наблюдение цели на их фоне;

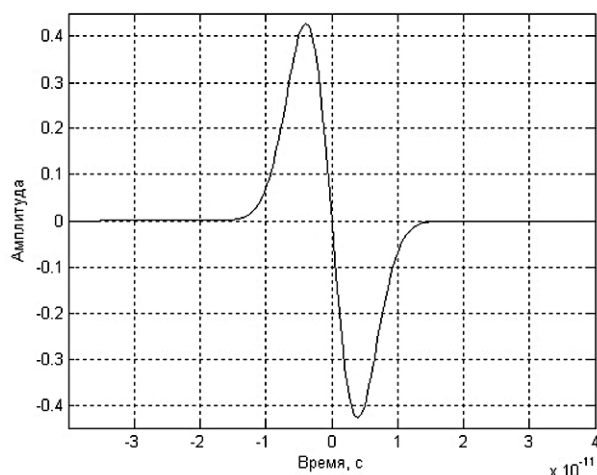


Рис. 1. Сверхвысокочастотный импульс

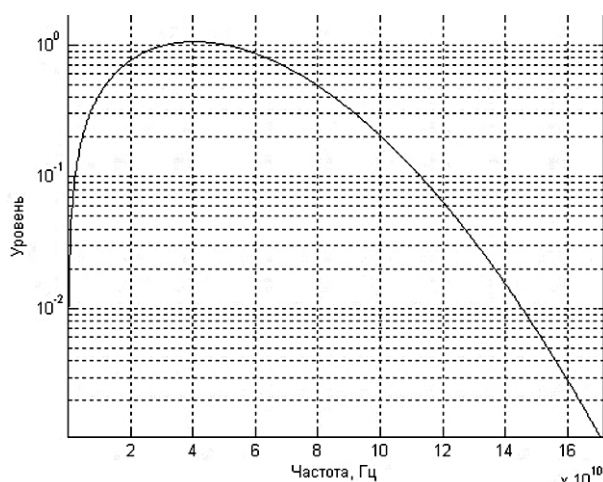


Рис. 2. Спектр импульса

– реализация UWB-радиолокаторов осуществляется очень простыми и дешевыми аппаратными средствами. В частности, приемная аппаратура обычно строится по схеме прямого преобразования (без канала промежуточной частоты (ПЧ), вернее, с использованием так называемой гомодинной схемы);

– определение скорости перемещения объекта без «слепых скоростей» свойственных доплеровским измерителям;

– 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.

Преимущества UWB-радиолокаторов особенно важны при их применении в военных системах для распознавания и получения изображений целей и их селекции, обеспечения скрытной от систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ) работы и низкой вероятности перехвата сигналов, предотвращения поражения со стороны противорадиолокационных управляемых ракет.

Основные зарубежные разработчики UWB-аппаратуры — фирма Time Domain, Ливерморская национальная лаборатория (LLNL), фирмы Multispectral Solutions, McEwan Technologies, Калифорнийский университет. Различную UWB-аппаратуру предлагают также компании Aether Wire & Location, QDS и др. [1].

Сверхвысокочастотный импульс и его спектр

Радиолокаторы со сверхширокополосными сигналами (рис. 1, 2) [2, 3] в качестве мобильных технических средств используются для оснащения поисково-спасательных групп для поиска живых людей (рис. 3) [4].

Радиолокатор работает по принципу радиоинтерферометра и обладает следующими параметрами: рабочая частота 1,6 ГГц, коэффициент усиления 40 дБ, полоса регистрируемых сигналов 0,03–3 Гц, динамический диапазон принимаемых сигналов 60 дБ, частота снятия отсчетов 20 Гц. СВЧ рупорная антенна имеет габариты: диаметр 120 мм, высота

200 мм. Обнаружение дыхания на глубине до 3 метров, через 60 см щебня, в течение 40 с, вес — менее 4,5 кг.

На рис. 4 приведена осциллограмма сигналов, отраженных от спокойно дышащего человека, а на рис. 5 — осциллограмма сигналов говорящего человека.

Использование преимущества сверхширокополосных сигналов в неконтактных взрывателях [2, 6]

Очертим эти преимущества более четко:

- повышение точности измерения дальности;
- сигнал проникает через визуальные преграды;
- сигнал не подвержен воздействию аэрозолей, включая пыль, дым и туман;
- сигнал незначительно подвержен сильному (10 мм/час) дождю;
- дневной/ночной режим;
- сверхширокополосный радиолокатор более надежен, чем узкополосный;
- радиолокатор более устойчив к помехам;
- возможность совместной работы нескольких устройств;
- простота, низкая стоимость, низкая мощность;
- очень малый слепой диапазон;
- высокая точность при проникновении.

Рассмотрим отдельные пункты более подробно.



Рис. 3. Радиолокатор для поиска живых людей

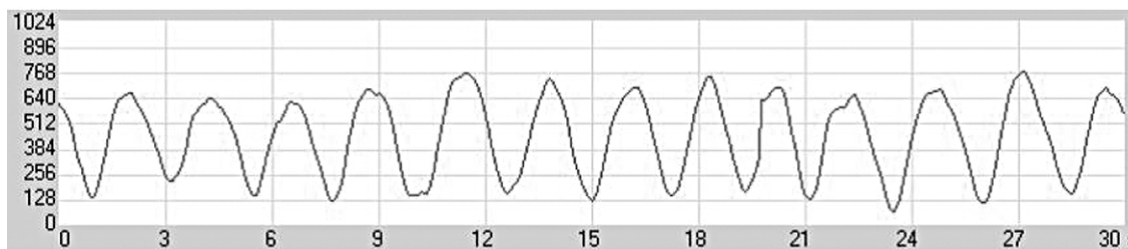


Рис. 4. Осциллограмма сигналов, отраженных от спокойно дышащего человека



Рис. 5. Осциллограмма сигналов говорящего человека

1. Дальность измеряется, как и в обычном радаре (рис. 6).

Как и в обычном радаре, разрешение по дальности определяется:

$$\Delta R = \frac{c}{2BW}.$$

Сравнение обычного радиолокатора с радиолокатором со сверхширокополосным сигналом приведено в таблице.

2. Потери из-за тумана и дыма незначительны.

Результаты проведённых расчётов затухания электромагнитных волн (ЭМВ) миллиметрового диапазона в зависимости от водности тумана и температуры окружающей среды показали, что влияние тумана в рассматриваемом миллиметровом диапазоне на затухание ЭМВ даже при высокой водности тумана невелико (при температуре

Таблица

Сравнение характеристик классического радиолокатора с радиолокатором со сверхширокополосным сигналом

Параметр	Обычный	Широкополосный
Центр. частота	8 ГГц	8 ГГц
Полоса частот %	5	45
Полоса частот	400 МГц	3,6 ГГц
Длительность импульса	2,5 нс	278 пс
Длина импульса	76,2 см	8,38 см
Разрешение	38,1 см	4,19 см
Ошибка по дальности	> 38,1 см	> 4,19 см

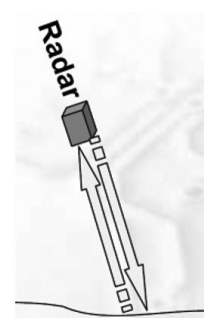
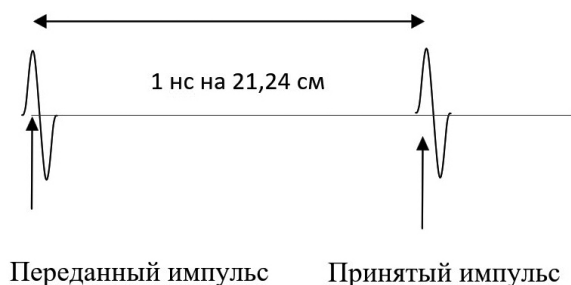


Рис. 6. Измерение дальности

0 °С, влажности 1,5 г/м³ на частоте даже 79 ГГц на расстоянии 200 м ослабление равно 1,04 дБ [7]. Потери на интересующих нас частотах приведены на рис. 7.

Анализ графиков показывает существенный рост (более чем в 2 раза) ослабления ЭМВ с увеличением интенсивности дождя. Так, на дальности 300 м это затухание при частоте 80 ГГц составит почти 10 дБ. Тем не менее на рабочих дальностях работы 100–150 м это затухание не является столь критическим и составляет порядка 1–1,5 дБ [7] (рис. 8).

3. Потери из-за пыли.

Концентрация пыли $M = 3,7 \times 10^{-1}$ г/м³ соответствует оптической видимости около 10 м, то есть оптические сенсоры в таких условиях не работают. При этом анализ графиков показывает, что в случае высокой концентрации пыли затухание ЭМВ в миллиметровом диапазоне длин составляет не более 1 дБ. Тем самым подтверждается тот факт, что работа РЛС не зависит от наличия пыли, песка в зоне работы радара [7].

4. Работа сквозь листву.

UWB предлагает возможность работы на достаточно низкой частоте, чтобы проникать сквозь листву, но при этом поддерживать требуемое высокое разрешение. Взрыватель может видеть сквозь листву и точно срабатывать над целью.

5. Обнаружение цели подо льдом.

Радиовзрыватель с обычным датчиком не сработает по листу металла, покрытого слоем льда толщиной 1 мм, из-за поглощения микроволн.

Импульсы UWB-радиолокатора обнаруживает поверхность.

6. Взрыватели не оказывают влияния друг на друга.

Несколько устройств UWB могут сосуществовать посредством кодирования. Это та же техника, которую используют сотовые телефоны CDMA. Этот метод уже успешно применяется в продуктах TDC.

7. Возможность защиты от помех.

То же кодирование PN, которое позволяет сосуществовать нескольким UWB-взрывателям, также обеспечивает возможность защиты от помех. Коррелирующий PN-код в приемнике снижает мощность некогерентного источника помех. Защита от узкополосных помех реализуется фильтрами. Оба метода успешно используются в продуктах TDC UWB.

8. Простая схемотехника (архитектура) взрывателя.

Архитектура и схемы системы UWB по своей сути просты (рис. 9, 10). Многие функции могут быть реализованы в ASIC (многие уже реализованы).

Это обеспечивает небольшие размеры, низкую мощность и относительно низкую стоимость.

9. Широкополосные антенны.

Для того, чтобы излучить импульс с максимальной эффективностью и минимальными искажениями его формы, антенна должна иметь полосу пропускания, сравнимую с полосой частот, занимаемой спектром импульса тока (например, полосу, в которой сосредоточено не менее 90 % энергии электромагнитного импульса на входе в антенну).

Если требуется лишь обеспечить максимальную эффективность излучения, то основными характеристиками являются:

- форма диаграммы направленности;
- входной импеданс или степень согласования с фидером.



Рис. 7. Потери из-за тумана

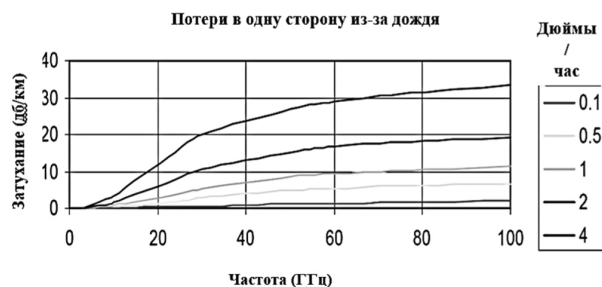


Рис. 8. Потери из-за дождя



Рис. 9. Архитектура взрывателя UWB #1



Рис. 10. Архитектура взрывателя UWB #2

Если к тому же требуется обеспечить минимальные искажения формы импульса, то необходимо добавить к основным такие параметры, как:

- поляризационная характеристика;
- наличие и положение фазового центра.

Примеры антенн для передачи сверхширокополосных сигналов [5]:

- антенна Вивальди (рис. 11, 12, 13) (частотный диапазон — 5,8–8,7 ГГц; коэффициент стоячей волны (КСВ) — не более 2,2; размеры антенны — 62×35×1,5 мм);



Рис. 11. Общий вид

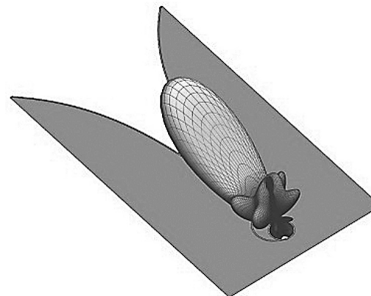


Рис. 12. Диаграмма направленности

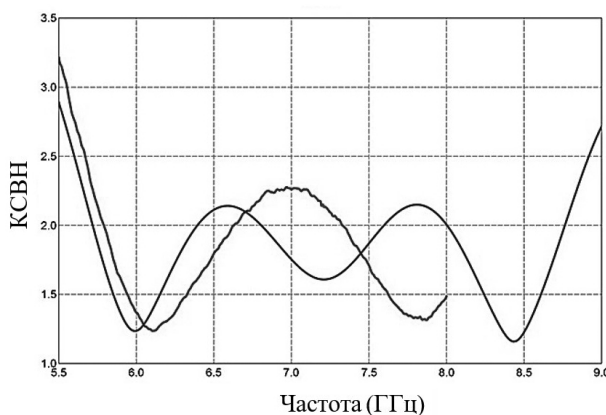


Рис. 13. КСВ антенны в диапазоне

– эллиптический монополь (рис. 14, 15) (частотный диапазон — 3–10 ГГц; КСВ — не более 2,0; размеры — 42×43×0,83 мм);
– спиральная антенна (рис. 16).

Компания Time Domain предложила экспериментальный взрыватель с UWB сигналами. Проведены успешные испытания. Ошибка по дальности составляет < 15 см.

10. Неконтактные взрыватели.

TDC (Tele-Denmark Communications) в свое время выиграла грант на разработку взрывателя с UWB для нелетальных и боевых 40-мм гранат для гранатомета Mk.47 (рис. 17).

Mk.47 или «Striker 40», — это наиболее совершенный американский станковый автоматический гранатомет с ленточным питанием. Как и большинство моделей подобного оружия, разработанных в странах НАТО, он изначально создавался под использование боеприпаса 40×53 мм и

допускает использование всех типов гранат данного калибра.

Норвежско-финской компанией NAMMO специально для американского автоматического гранатомета Mk.47 был разработан 40-мм боеприпас воздушного подрыва MK285 PPHE [8]. Во многом он по своей конструкции похож на C171 PPHE-RF, только вместо антенны на нем установлено контактное кольцо. Передача данных на взрыватель происходит за счет этих контактов еще при нахождении гранаты в патроннике. При этом при подрыве оба боеприпаса образуют 1450 поражающих фрагментов. В дополнение к уже существующим 40-мм гранатам для станкового автоматического гранатомета Mk.47 были также созданы комбинированные кумулятивно-осколочно-фугасные боеприпасы двойного назначения с функцией воздушного подрыва: MK314 HEDP-RF с радиочастотным

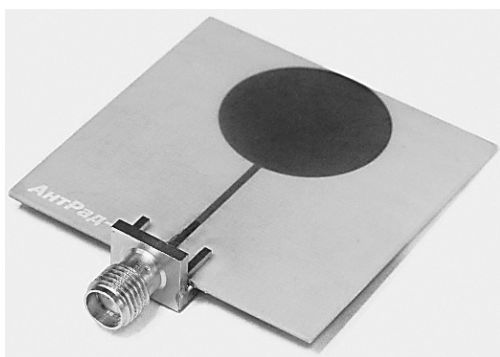


Рис. 14. Общий вид

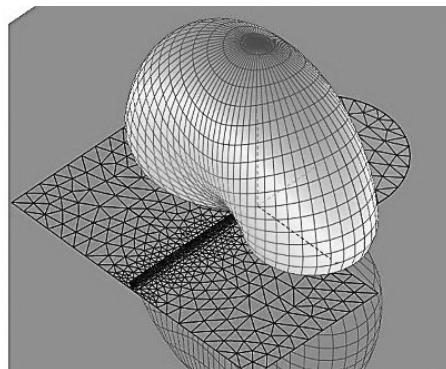


Рис. 15. Диаграмма направленности

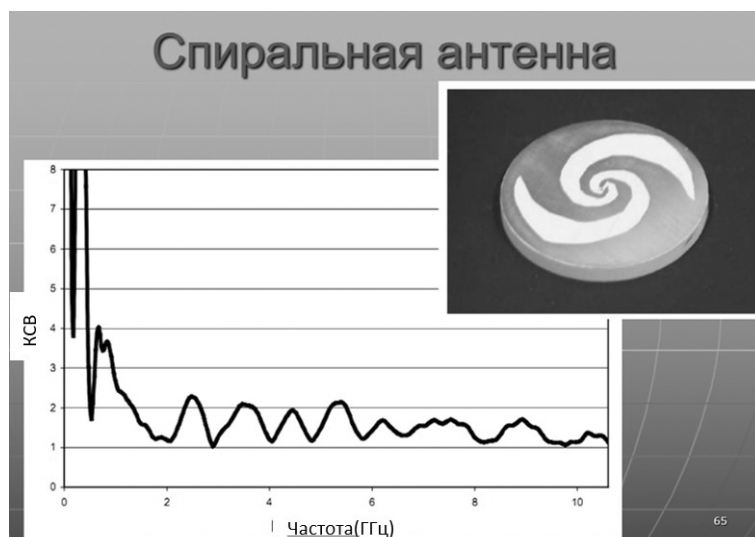


Рис. 16. Спиральная антенна и ее КСВ



Рис. 17. Автоматический гранатомет Mk.47 с прицельным комплексом Lightweight Video Sight II

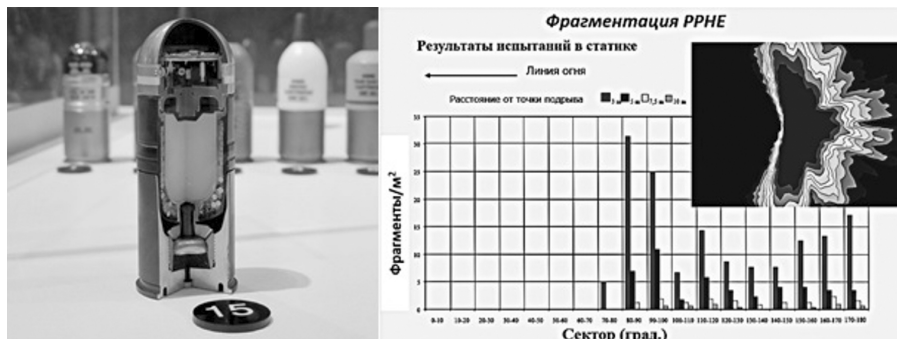


Рис. 18. Фрагментация боеприпаса

программированием и МК314 HEDP-AB с контактным программированием. В случае воздушного подрыва в осколочно-фугасном режиме данные боеприпасы образуют 1200 поражающих фрагментов (рис. 18), а в режиме формирования кумулятивной струи они в состоянии обеспечить пробитие 65 мм гомогенной брони. При этом все четыре перечисленных 40-мм боеприпаса (С171 РРНЕ-RF, МК285 РРНЕ, МК314 HEDP-AB и HEDP-RF) имеют начальную дульную скорость 240 м/с, а время их подрыва можно запрограммировать с точностью до одной миллисекунды.

Выводы

В заключение следует сказать, что несмотря на интенсивное развитие, сверхширокополосная радиолокация содержит еще множество нерешенных проблем. В первую очередь

это касается научных основ — до сих пор отсутствует систематизированная теория. Одну из трудностей представляет аналитическое описание принятого широкополосного сигнала, который имеет сложную форму. Другая состоит в вычислительной части радара (как аппаратной, так и программной), являющейся достаточно сложной, причем в первую очередь из-за высокой информативности принимаемого сигнала. В то время как в UWB-радаре по сравнению с узкополосным разрешение увеличивается примерно на три порядка, соответственно во столько же раз растет и объем памяти системы обработки. Следует отметить, что названные проблемы успешно разрешаются [9]. Далее, хотя предполагалось, что UWB-радиолокаторы смогут лучше обнаруживать малозаметные цели, пока никто еще не внес полной ясности в эту проблему [4].

Литература

1. Щербак Н. Сверширокополосная радиолокация, что это такое. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес* 3/2002 [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.electronics.ru/article_1332_929.pdf, свободный.
2. Ultra Wideband Technology for Precision Proximity Fuzing. 49th Annual Fuze Conference NDIA Seattle, WA April 2005.
3. Импульсные сверширокополосные сигналы и перспективы их применения в РЭС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://myslide.ru/presentation/impulsnye-sverxshirokopolosnye-signal-y-i-perspektivy-ix-primeneniya-v-res>
4. Кипайкин М.Н. Разработка приемопередающего модуля системы обнаружения людей, находящихся за преградой. Бакалаврская работа, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», — Саранск, 2018. 79 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nauchkor.ru/pubs/razrabotka-priemopere-dayuschego-modulya-sistemy-obnaruzheniya-lyudey-nahodyaschihsya-za-pregradoy-5bbb1-1c27966e104f1dd9ed1>
5. Сайт ООО «ФПК «ЭСТРА» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://uwbs.ru>, свободный.
6. Ultra-wideband Radar Technology Edited by James D. Taylor, P.E. CRC Press Boca Raton, London, New Work, Washington 2000 [Electronic resource]. Режим доступа: <http://kniga.seluk.ru/k-raznoe/1284777-1-ultra-wideband-radar-technology-edited-james-taylor-crc-press-boca-raton-london-new-work-washington-2000.php>
7. Буй Чи Тхань, Марин Д.В., Расторгуев В.В. Сравнение ослабления электромагнитных волн миллиметрового и инфракрасного диапазонов в гидрометеорах и пыли // Труды МАИ. Выпуск № 84 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://mai.ru/upload/iblock/b31/buy-chi-tkhan_-marin_rastorguev_rus.pdf
8. Necia Jerome. MK285 Mod0 PPHE/SD Programmable Prefragmented High Explosive Ammunition [Electronic resource]. 2012. Режим доступа: <https://www.slideserve.com/necia/mk285-mod0-pphe>
9. III Всероссийские Арmandовские чтения. — Муром, 25–27 июня 2013 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2013/srsa-2013/index.html>
10. MK285 Mod0 PPHE/SD, Programmable Prefragmented High Explosive Ammunition, 50th Annual Joint Services Small Arms Jarl Eirik Straume Las Vegas, NV, May 11, 2004 [Electronic resource]. Режим доступа: https://www.powershow.com/view/1c010-MGNiN/MK285_Mod0_PPHE/SD_Programmable_Prefragmented_High_Explosive_Ammunition_powerpoint_ppt_presentation