

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО РАДАРА

Г.К. Енокян

Национальный политехнический университет Армении

Сверхширокополосная (СШП) технология представляет значительный интерес для коммуникационных и радиолокационных приложений, требующих низкой вероятности перехвата и обнаружения, многолучевого иммунитета, высокой пропускной способности данных. СШП радиолокационные системы передают сигналы на гораздо более широкой частоте, чем обычные радиолокационные системы, и, как правило, их очень трудно обнаружить. Наиболее распространенным методом генерации СШП сигнала является передача импульсов с очень короткими длительностями (менее 1 нс). Эти короткие импульсы нуждаются в более широкой приемной полосе с использованием обычных радиолокационных систем. Количество спектра, занимаемого сигналом, передаваемым СШП радиолокатором, составляет 25% от центральной частоты. Таким образом, СШП сигнал, центрированный на частоте 2 ГГц, будет иметь минимальную полосу пропускания (500 МГц), а минимальная полоса пропускания сигнала СШП с центром в 4 ГГц составит 1 ГГц. Часто абсолютная полоса пропускания превышает 1 ГГц. Примером типичного СШП радара является импульсный радиолокатор. Этот радиолокатор передает на центральной частоте одиночные импульсы 24 ГГц с длительностью в несколько наносекунд и мощностью 4 мВт. Поэтому его пропускная способность составляет 8 ГГц. Рассмотрены основные особенности СШП радиолокаторов и показаны пути их развития. Особый интерес представляет проблема, связанная с разницей в конструкциях между СШП и обычными радиолокаторами, работающими в узкой полосе частот. Описаны трудности, вызванные этими различиями при создании СШП радаров. Также обсуждены способы противостояния этим трудностям, что позволяет расширить области применения СШП радара и реализовать преимущество над обычными радарными системами.

Ключевые слова: сверхширокополосные системы, частотный диапазон, радиолокатор, обработка сигналов.

Введение. Количество информации H , передаваемой через любой информационный канал, определяется известной формулой Шеннона:

$$H = \Delta f \log(1 + P_s/P_n) \text{ бит} / \text{с}, \quad (1)$$

где Δf - шумная полоса частот информационного канала; P_s/P_n - отношение сигнал/шум по мощности.

Основным способом увеличения информационного наполнения системы является расширение полосы частот передаваемых сигналов или уменьшение длительности сигналов. Таким образом, единственно существенный способ ре-

шения проблемы увеличения информационных потенциалов современного общества - это применение сигналов СШП импульсом [1].

Термин "сверхширокополосный" для сигналов и систем был введен Агентством перспективных исследований обороны (DARPA) Министерства обороны США в 1990 году. В качестве СШП сигналов понимаем сигналы с относительной полосой частот:

$$\eta = (f_{\text{выс}} - f_{\text{низ}}) / (f_{\text{выс}} + f_{\text{низ}}), \quad (2)$$

где $0,25 < \eta \leq 1$.

Проектирование СШП систем показывает, что многие сигналы, обладающие свойствами СШП сигналов, не попадают в это определение. Это хорошо видно на рисунке.

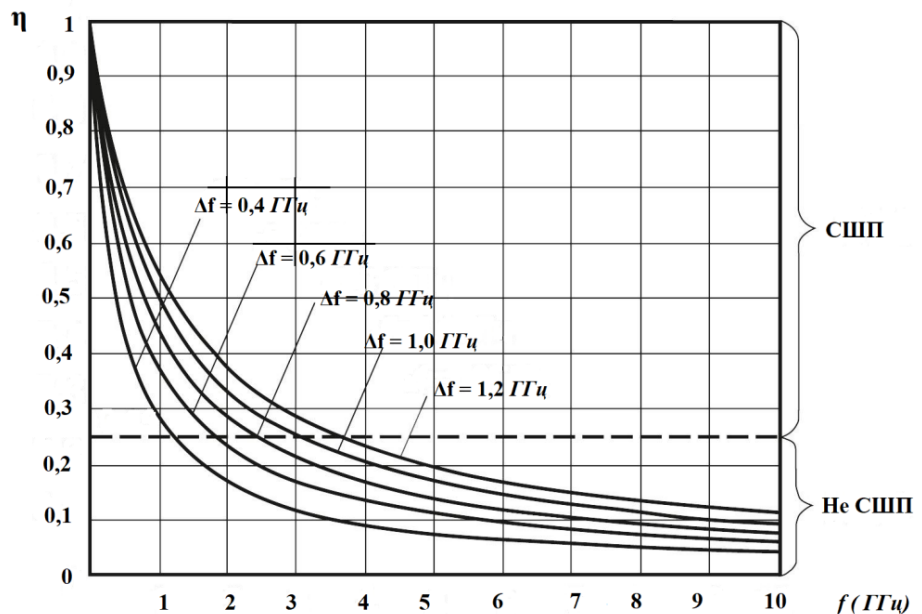


Рис. График, посвященный проектированию СШП систем

В то же время эти свойства всегда проявляются, когда длительность пробега сигнала st (s - скорость света, $\tau = 1 / \Delta f$ - длительность простого сигнала или ширина его автокорреляционной функции, Δf - ширина сигнала спектра) становится намного меньше L , т.е. меньше размера излучающей (принимающей) апертуры или размерности объекта, отражающего сигнала.

Условие $L \gg st$ действует всегда, когда нам требуется высокое целевое разрешение не только в широкополосном диапазоне, но и в угловых координатах. Для этого нужны достаточно большие размеры диафрагмы L .

Таким образом, сигналы и, соответственно, системы, которые удовлетворяют условию $L \gg \lambda$, могут в большей степени относиться к классу сверхширокополосных [1,2].

Основные возможности СШП радиолокаторов. Уменьшение длины сигнала СШП радиолокаторов до одной наносекунды и менее позволяет:

- улучшить точность измерения целевого диапазона;
- идентифицировать целевой класс и тип, потому что принятый сигнал несет информацию не только о цели целиком, но и о ее отдельных элементах;
- повысить защиту от пассивных помех: от дождя, тумана, аэрозолей, металлизированных полос и т.д.;
- улучшить стабильность наблюдения цели при низких углах возвышения из-за устранения интерференционных зазоров в диаграмме направленности антенны;
- увеличить вероятность обнаружения цели и стабильности наблюдения цели за счет устранения лепестковой структуры образца вторичного излучения рассеивающих мишеней;
- сузить диаграмму направленности антенны из-за возможности изменения характеристик излучаемого сигнала;
- улучшить устойчивость радиолокатора к эффектам и шуму внешнего узкополосного электромагнитного излучения;
- уменьшить радиолокационную "мертвую зону";
- скрыть радарную работу из-за излучения сигналов, которые трудно обнаружить.

Перечисленные выше преимущества могут быть потенциально реализованы, что требует создания теоретической базы, обеспечивающей вычисление характеристик СШП радаров. Эта база также необходима для разработки соответствующего оборудования. Однако до сих пор еще не разработана удовлетворительная и систематизированная теория СШП радаров. В данной работе рассмотрены основные проблемы, возникающие при проектировании СШП систем [2,3].

Основные характеристики и проблемы проектирования СШП радиолокаторов. Узкополосные - синусоидальные и квазисинусоидальные - сигналы имеют уникальное свойство. В ходе широко распространенных преобразований сигналов, таких как сложение, вычитание, дифференциация и интеграция, форма (форма волны) синусоидального и квазисинусоидального сигналов остается неизменной; сигналы имеют форму, идентичную форме исходной функции, и могут отличаться только их амплитудой и временным сдвигом. В дальнейшем форма понимается как закон изменения сигнала во времени. Напротив, при

СШП сигнале при указанных (и других) преобразованиях изменяются не только параметры, но и форма. Рассмотрим причины этого явления.

- Излучение СШП сигналов. Разработка эффективных сверхширокополосных передающих и приемных антенн является одной из основных проблем при проектировании СШП радаров.

Теория позволяет определить форму импульса электромагнитного поля, излучаемого простой антенной (диполем) и диаграммой направленности антенны при $L \gg \lambda$. В этом случае важной особенностью являются вариации формы импульса в зависимости от угла наблюдения Θ . Изменения формы импульса приводят к изменениям пространственного положения диаграммы направленности антенны по полю в течение времени, когда импульс тока проходит вдоль антенны. Итак, в теории антенн используем определение структуры антенны, неподвижной во времени по энергии. При выводе теоретических правил предполагаем, что импульсный генератор тока согласован с антенной во всем диапазоне частот сигнала [3,4].

Но все же довольно сложно использовать эту теорию при проектировании СШП антенн. Большинство известных антенн были разработаны для излучения относительно узкополосных сигналов.

- Антенны для приема СШП сигналов. Форма поля, создаваемого излучаемым СШП сигналом, зависит от угла наблюдения Θ . Это означает, что форма импульса в нагрузке приемной антенны и, следовательно, параметры антенны зависят от взаимных положений между передающей и приемной антеннами. Здесь имеем противоречие с принципом взаимности; этот принцип используется в антенной технике для определения параметров приемной антенны с использованием ее характеристик в режиме излучения.

Принцип взаимности основан на лемме Лоренца, которая формулирует связь между нерелевантными токами в двух разных пространственных точках и электромагнитным полем, индуцированным этими токами.

Анализ показывает, что лемма Лоренца справедлива для гармонических полей, когда параметры взаимодействия между токами и полями любых двух источников равны. Таким образом, процесс приема-передачи гармонических волн остается неизменным при взаимной замене передающих и приемных антенн, и параметры антенн, например диаграмма направленности антенны, будут одинаковыми в режимах излучения и приема гармонических волн.

Для негармонических волн лемма Лоренца не может быть формализована. Форма тока в нагрузке приемной антенны, вызванная полем передающей антенны, отличается от формы тока, возбуждающего передающую антенну. В результате в этом случае принцип взаимности недействителен. Это делает невозмож-

ным определением параметров антенны СШП в режиме приема. Эта особенность должна учитываться при проектировании СШП систем [4,5].

- Форма сигнала, отраженного от цели. Целевая эффективная площадь рассеяния (ЭПР). Мишень обычно представляет собой набор вторичных излучателей ("ярких точек"), расположенных вдоль целевой длины L_0 . В случае СШП сигнала $st \ll L_0$ вторичные излучатели считаются разрешенными в рамках диапазона. СШП сигнал, который, в свою очередь, рассеивается от отдельных вторичных излучателей, формирует последовательность импульсов с параметрами (количество импульсов, задержка импульса, интенсивность), которые зависят от геометрии и аспекта цели, а также от импульсных параметров целевых элементов. Такая последовательность обычно называется "целевым изображением". Изображение формируется за время $T = 2L_0/c$. Энергия поля, отраженная другими вторичными излучателями, не влияет на целевые ЭПР, и, по сути, ее можно рассматривать как потерю [5,6].

Разработанный оптимальный алгоритм выполняет следующие функции:

- суммирование некоторых частей реализации принятого сигнала $u(t)$ на временных интервалах T , где эти сигналы ожидаются;
- вычисление энергии этой суммы;
- сравнение энергии, полученной с пороговым значением, которое определяется заданной ложной скоростью сигнала:

$$U_{\text{выход}} = \int_0^T \left[\sum_{k=1}^{M-1} u(t + kT_r) \right]^2 dt \underset{<}{\underset{>}{\geq}} U_{\text{порог}} . \quad (3)$$

Это известный "энергетический" детектор, который используется для суммы реализации принятого сигнала. Если цель движется относительно и ее угол обзора является переменным, то импульсы в импульсном пакете будут отличаться. Но если период повторения T_r достаточно короткий, мы можем рассматривать два соседних импульса как совпадающие. Таким образом, на практике обработка двух соседних импульсов очень важна. В этом случае оптимальный алгоритм имеет вид

$$U_{\text{выход}} = \int_0^T u^2(t) dt + \int_0^T u^2(t + T_r) dt + 2 \int_0^T u(t) u(t + T_r) dt \underset{<}{\underset{>}{\geq}} U_{\text{порог}} . \quad (4)$$

Здесь первый и второй интегралы описывают энергетические детекторы сигналов, которые ожидаются в первом и втором периодах, третий интеграл описывает обработку корреляции между периодами [6].

Выбор времени для СШП сигналов. СШП сигналы распространяются в широком диапазоне частот, который может достигать нескольких гигагерц. Все помехи естественного и искусственного происхождения, присутствующие в этой полосе частот, поступают в СШП приемник. Методы выбора помех, которые используются в узкополосных системах, не дают результатов в этом случае. Та-

ким образом, наиболее эффективным способом защиты СШП приемника является выбор времени полученных сигналов. Это может быть выполнено устройством стробирования времени, включенным во входную схему радара [6,7].

В радарх такое устройство принимает отраженные сигналы, соответствующие только данной ячейке диапазона, которая ограничена узким стробом. В системах связи стробирующее устройство обеспечивает прием сигналов только в ожидаемые промежутки времени. В обоих случаях нам нужна правильная синхронизация между излучаемым сигналом и сигналом, управляющим стробирующим устройством. Нестабильность в синхронизации приводит к увеличению продолжительности стробирования времени и, соответственно, повышению уровня помех на входе приемника [7,8].

Защита СШП радаров от пассивных помех. Кратковременная длительность СШП сигнала делает невозможным получение заметных изменений частоты сигнала при отражении от движущейся цели. Таким образом, в СШП радаре невозможно использовать доплеровскую фильтрацию для перемещения целевого выбора. Для этой цели более эффективным является метод компенсации межпериодических сигналов (МПК), отражаемых пассивной помехой.

Но следует отметить, что применение системы МПК в СШП радарх для защиты от естественных и искусственных помех имеет некоторые особенности. С одной стороны, короткая длительность СШП сигнала уменьшает количество помех в импульсном объеме и его ЭПР соответственно, тем самым улучшая обнаружение цели против помех; с другой стороны, при уменьшении длительности импульса увеличивается относительная часть помех; при атаке ветра он может ввести импульсную громкость и выйти за промежуток времени между импульсами. Нужно изучить защиту радара от помех с учетом двух противоположных факторов: уменьшение объема импульса (т.е. уменьшение пассивной мощности помех) и увеличение интерпериода декорреляции пассивной интерференции (т.е. уменьшение коэффициента подавления в системе МПК).

Таким образом, при уменьшении длительности СШП сигнала эффективность системы МПК растет вначале из-за уменьшения объема радиолокационных импульсов. При дальнейшем уменьшении длительности импульса имеем активное действие интерференционной декорреляции; эффективность МПК снижается. После полной декорреляции помех и с дальнейшим уменьшением длительности сигнала эффективность МПК начинает возрастать из-за уменьшения объема импульса [8].

Результаты исследования. Уравнение радарного диапазона, учитывающее особенности сигналов СШП, позволяет оценить требуемую пиковую мощность для различных параметров радара. Расчеты показали, что для радара, работающего на расстоянии до 100 км, передатчик должен иметь максимальную мощ-

ность около десятков гигаватт; для радара, работающего на расстоянии до 10 км, излучаемая пиковая мощность должна составлять около десятков мегаватт; для радара, работающего на расстоянии до 1 км, излучаемая пиковая мощность должна быть равна единицам ватт.

Таким образом, применение СШП радаров для обнаружения и идентификации целей на дальнем расстоянии (100 км и более) представляет собой множество проблем на современном этапе разработки СШП технологии.

Можно решить энергетическую проблему в СШП радаров, используя сложные сигналы с большой базой. В этом случае любой обычный метод может применяться для формирования СШП сигналов. Другим способом достижения высокого потенциала в СШП радаров является использование активных антенных массивов, состоящих из относительно маломощных передатчиков.

Самым реальным способом использования технологии СШП в радаров и связи является проектирование относительно маломощных систем, работающих на расстоянии единиц и десятков метров. Такие радары и системы связи находят широкое применение в различных сферах человеческой деятельности и обладают высокими рыночными возможностями.

Заключение. В начале 1970-ых годов импульсные или базовые методы применялись к большому числу потенциальных приложений, начиная от недорогого радара высокого разрешения и заканчивая специализированными системами связи с низкой вероятностью обнаружения и низким потенциалом помех.

В США большая часть ранней работы в области СШП (до 1994 года), особенно в области импульсных коммуникаций, проводилась в рамках классифицированных государственных программ США. С 1994 года большая часть работы была проведена без ограничений классификации, и развитие технологии СШП значительно ускорилось. Этот документ иллюстрировал ряд недавних разработок СШП в области связи, радиолокации и локализации.

Основные и прикладные исследования в области СШП технологии продемонстрировали, что такая технология имеет потенциальные преимущества для радиолокационных приложений. Возможность сверхвысокого разрешения сигналов позволяет весьма точно идентифицировать как подвижные, так и неподвижные объекты. Указанное преимущество может быть весьма полезным при проектировании автомобильных радаров.

Литература

1. **Иммореев И.А.** Обработка сигналов в сверхширокополосном диапазоне // Пятая международная конференция по радарным системам. – Брест, 1999.- С. 11-18.

2. **Бердышев В.П., Гарин Е.Н.** Радиолокационные системы. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011.- 400 с.
3. <http://www.radartutorial.eu>
4. **Гуляев Ю.В., Черепенин В.А.** Радиолокация и радиосвязь. - М.: Издательство МГУ, 2011. - 517 с.
5. <http://ieeexplore.ieee.org>
6. **Иммореев И.А., Тейлор Ж.Д.** Выборочная целевая детектирующая короткоимпульсная сверхширокополосная радиолокационная система // Шестая международная конференция по радарным системам. – Эдинбург, 2001. С. 17-22.
7. www.ixbt.com
8. **Иммореев И.А.** Основные характеристики сверхширокополосных (СШП) радаров и отличие от общих узкополосных радиолокаторов // Седьмая международная конференция по радарным системам. – Вашингтон, 2002. С. 22-29.

*Поступила в редакцию 16.10.2017.
Принята к опубликованию 21.12.2017.*

ԳԵՐԼԱՅՆԱՇԵՐՏ ԱՎՏՈՄՈՒԼԱՅԻՆ ՌԱԴԱՐԻ ՍՏԵՂԾՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ

Գ.Կ. Ենոքյան

Գերլայնաշերտային տեխնոլոգիան բավականին մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում հեռահաղորդակցության և ռադիոլուկացիայի բնագավառներում: Այդ բնագավառները պահանջում են տվյալների հայտնաբերման և խափանման ցածր հնարավորություններ՝ բազմալիքային կայունություն և թողունակության բարձր ունակություններ: Գերլայնաշերտ ռադիոլուկացիոն համակարգերն ազդանշանը հաղորդում են ավելի լայն հաճախություններում, քան սովորական ռադիոլուկացիոն համակարգերը, և, որպես կանոն, դրանց հայտնաբերումը շատ բարդ է: Գերլայնաշերտ ազդանշանի գեներացման ամենատարածված մեթոդը շատ կարճ տևողությամբ իմպուլսների հաղորդումն է (1 նանովայրկյանից քիչ): Այդ շատ կարճ իմպուլսները կարիք ունեն ավելի լայն ընդունման տիրույթի՝ օգտագործելով հասարակ ռադիոլուկացիոն համակարգերը: Գերլայնաշերտ ռադիոլուկատորով հաղորդվող ազդանշանի սպեկտրների քանակը կազմում է կենտրոնական հաճախության 25%-ը: Այսպիսով, գերլայնաշերտ ազդանշանը, որը կենտրոնացված է 2 ԳԳ հաճախության վրա, կունենա նվազագույն թողանցման շերտ (500 ՄԳ), իսկ 4 ԳԳ հաճախականային կենտրոնով գերլայնաշերտ ազդանշանի նվազագույն թողանցման շերտը կկազմի 1 ԳԳ: Հաճախ բացարձակ թողանցման շերտը գերազանցում է 1 ԳԳ: Տվյալ գերլայնաշերտ ռադիոլուկատորի լավագույն օրինակ է իմպուլսային ռադիոլուկատորը: Այդ ռադիոլուկատորը 24 ԳԳ կենտրոնական հաճախության վրա հաղորդում է մի քանի նանովայրկյան տևողությամբ և 4 մՎտ հզորությամբ միայնակ իմպուլսներ: Այդ պատճառով նրա թողանցման շերտը կազմում է 8 ԳԳ: Ուսումնասիրվել են

գերլայնաշերտ ռադիոլոկատորների հիմնական յուրահատկությունները և զարգացման ուղիները: Առանձնակի հետաքրքրություն են ներկայացնում նեղ հաճախականային տիրույթում աշխատող հասարակ և գերլայնաշերտ ռադիոլոկատորների կառուցվածքային տարբերության խնդիրները: Որոշվել են գերլայնաշերտ ռադիոլոկատորների ստեղծման ժամանակ այդ տարբերություններով պայմանավորված բարդությունները: Քննարկվել են նաև այդ բարդությունների հաղթահարման միջոցները, ինչը թույլ է տալիս ընդլայնել գերլայնաշերտ ռադիոլոկատորների կիրառման տիրույթը և օգտագործել նրա առավելություններ:

Առանցքային բաներ. գերլայնաշերտ համակարգեր, հաճախականային տիրույթ, ռադիոլոկատոր, ազդանշանի վերամշակում:

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF CREATING AN ULTRA-WIDEBAND AUTOMOBILE RADAR

G.K. Yenokyan

Ultra-wideband (UWB) technology is of considerable interest for communication and radar applications, requiring low probability of interception and detection, multipath immunity, high data throughput. UWB radar systems transmit signals at a much broader frequency than conventional radar systems and, as a rule, they are very difficult to detect. The most common method for generating an UWB signal is the transmission of pulses with very short durations (less than 1 nanosecond). These very short pulses need a wider receiving band, using conventional radar systems. The amount of spectrum occupied by the signal transmitted by the UWB radar is 25% of the center frequency. Thus, the UWB signal centered at 2 GHz will have a minimum bandwidth (500 MHz), and the minimum bandwidth of the UWB signal centered at 4 GHz will be 1 GHz. Often the absolute bandwidth is greater than 1 GHz. An example of a typical UWB radar is pulsed radar. This radar transmits on a central frequency single pulses of 24 GHz with a duration of several nanoseconds and a pulse power of 4 mW. Therefore, its bandwidth is 8 GHz. The basic features of ultra-wideband (UWB) radars and the ways of development are considered. Of particular interest is the problem of connectivity with the difference in design between UWB and conventional radar, operating in a narrow frequency band. The difficulties caused by these differences in the creation of UWB radars are determined. Also, ways to withstand these difficulties were discussed, which allows to expand the scope of the UWB radar and realize the advantage over conventional radar systems.

Keywords: ultra-wideband systems, frequency range, radar, signal processing.