

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ (РЭБ) ДЛЯ ПОРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Р. П. Быстров, В. А. Черепенин

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

Получена 19 апреля 2010 г.

Аннотация. Статья посвящена теоретическому обоснованию возможности применения метода генерации мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения при создании радиолокационных систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ) для поражения объектов.

Ключевые слова: генерация, наносекундные (импульсы), радиолокатор, распространение, системы связи, объект.

Введение

В настоящее время сфера возможностей и влияния радиоэлектронной борьбы (РЭБ) на борьбу противоборствующих сторон в значительной степени расширилась и становится основой информационного аспекта вооруженной борьбы, затрагивая практически все процессы обнаружения, сбора, передачи, обработки и использования информации. Появление комплексных многоуровневых систем радио–радиотехнической разведки (РРТР), боевого управления, РЭБ и высокоточного оружия определило резко возросшую зависимость хода и исхода боевых действий от готовности и эффективности функционирования этих систем. Целью РЭБ стало не только решение частных задач по нарушению функционирования систем управления оружием и войсками (силами) противника, но и достижение решительного превосходства над ним в оперативности, устойчивости и качестве управления.

Таким образом, радиоэлектронная борьба представляет собой комплекс мероприятий, проводимых для выявления (разведки) и последующего радиоэлектронного подавления (РЭП) радиоэлектронных систем (РЭС)

различного назначения (радиолокационные системы и системы радиосвязи), а также в целях радиоэлектронной защиты (РЭЗ) своих РЭС.

Наряду с эволюционным развитием средств РЭБ в прогнозируемый период за рубежом возможно создание и развертывание нового класса техники – комплексов электромагнитного оружия, создаваемых на основе разработки генерирующих устройств со сверхмощным направленным излучением в СВЧ диапазоне, *определяемых как силовая радиоэлектронная борьба поражения разнотипных РЭС.*

Поэтому совершенствование методов генерации мощных электромагнитных импульсов для создания силовых систем радиоэлектронного подавления различного типа РЭС и, особенно, систем современного высокоточного оружия (ВТО) является актуальной и важной и проблемой в развитии перспективного вооружения и военной техники (ВВТ).

В целом класс объектов РЭС может быть достаточно широк: входные цепи устройств ПВО, аппаратура летательных аппаратов, спутников и т.д. Однако, наиболее актуальное значение в настоящее время приобретает проблема эффективного применения силовой РЭБ для борьбы с высокоточным оружием (ВТО).

Работа по решению данной проблемы (ввиду её крайней актуальности) ведется достаточно давно, но до настоящего времени не известны другие (не считая описанного в настоящей работе) способы и устройства генерирования пачек мощных СВЧ сверхкоротких импульсов (СКИ). Известные и применяемые способы и устройства обладают рядом недостатков. Например, в СВЧ РЛС действующих на основе эффекта параметрического поглощения (ЭПП) в США используются устройства задержки, которые за счет эквидистантных щелевых соединений обеспечивают разложение одиночного сверхмощного (от единиц до сотен мегаватт) СВЧ импульса на пачку мощных СКИ. Недостатки данного способа хорошо известны и описаны в научно-

технической литературе, однако, до настоящего времени иного решения поставленных задач не было.

Известны не только способы использования пачек мощных СВЧ СКИ в целях радиолокационного обнаружения (РЛО) малозаметных летательных аппаратов (МЗЛА), но и попытки использовать такие СКИ в целях создания стабилизированных энергетических образований или сгустков (СЭС). Однако, до настоящего времени, такие попытки приводили к положительным результатам только в США (создание СЭС со временем стабилизации порядка единиц микросекунд). Интерес к такому использованию СКИ, а также и к способам и устройствам генерирования пачек таких СКИ связан с тем, что одиночный электромагнитный импульс (ЭМИ), излучаемый СЭС при дестабилизации, может достигать энергетических показателей сравнимых с ЭМИ ядерного взрыва (ЯВ) средней мощности (что является весьма актуальным как в смысле поражающего фактора, так и в смысле имитации ЯВ).

Целью настоящей работы является теоретическое обоснование возможностей метода генерации наносекундных мощных импульсов, их основных параметров для возможного практического их использования при создании перспективных систем силовой радиоэлектронной борьбы поражения РЭС.

Анализ развития систем силового поражения РЭС на основе современных методов генерации мощного излучения

Современный уровень развития методов генерации мощных электромагнитных импульсов и способов формирования радиоизлучения определяет и возможность разработок широкого класса оружия направленной энергии.

С учетом существующих тенденций развития зарубежных фундаментальных и поисковых исследований в области разработок как методов мощного излучения, так и самого электромагнитного оружия в настоящее время выделяется область создания различного вида *электромагнитного*

оружия, объектами поражения которого являются не только РЭС, но и даже личный состав.

В настоящее время за рубежом проводятся интенсивные исследования по созданию средств функционального поражения с использованием мощных СВЧ генераторов различного диапазона волн, что свидетельствует об актуальности воздействия мощных электромагнитных импульсов на РЭС как средства силовой радиоэлектронной борьбы [1-6].

Основным поражающим фактором силовых систем подавления РЭС является электромагнитное излучение в диапазоне 100 МГц ... 300 ГГц с энергией в импульсе не менее 100 Дж (или пиковая мощность более 100 МВт, или средняя мощность свыше 1 МВт). В отечественной литературе для пояснения таких систем встречаются термины: СВЧ – оружие, СВЧ – генераторы или генераторы электромагнитного излучения (ЭМИ), а в зарубежной – микроволновое оружие, (включающее ЭМИ и супер-ЭМИ боеприпасы).

Анализ имеющихся в наличии результатов работ по созданию СВЧ-оружия показывает, что наиболее активные работы в данной области развернуты в США. В последние годы исследования по данному направлению были развернуты также во Франции, Англии, Германии, Израиле, Японии, Китае и Швеции. Созданием СВЧ – оружия занимаются практически все заказывающие управления министерства обороны США. При этом для тактического СВЧ – оружия ввиду общей развиваемой технологической базы (СВЧ – генераторы, мощные усилительные модули и антенные системы, источники энергоснабжения и т.п.) характерно функциональное сближение или унификация с перспективной радиолокационной техникой и средствами радиоэлектронной борьбы. В частности, в разработках тактического СВЧ – оружия рассматривается концепция комплекса, производящего в режиме пониженной мощности радиолокационное обнаружение и сопровождение цели, а в режиме максимальной мощности – ее функциональное или силовое

поражение. В качестве типовых объектов поражения мощным СВЧ излучением рассматриваются:

цифровые специальные вычислители систем управления межконтинентальных баллистических ракет (МБР), тактических ракет (ТР), оперативно-тактических ракет (ОТР);

системы предохранения и взведения боевого оснащения ракет;

электрические устройства подрыва мин и фугасов;

навигационные приемники системы “ГЛОНАСС”;

РЛС систем ПВО/ПРО;

РЭС ГСН ЗУР и ракет класса “воздух-воздух” и др.

Анализ существующих и разрабатываемых видов СВЧ – оружия, способов боевого применения позволил сформировать общую схему их классификации и выявить общую динамику развития таких систем в США на период до 2017 г., приведенную в табл. 1.

Таблица 1.

Общая динамика развития существующих и разрабатываемых видов СВЧ – оружия в США

Годы		
2002	2003-2009	2010-2012
<i>СВЧ – оружие для защиты объектов ВВТ</i>		
<p>Демонстрация: - малогабаритного широкополосного источника радиоизлучения высокой мощности; - узкополосного источника радиоизлучения с высокой импульсной энергией.</p>	<p>Демонстрация возможностей малогабаритных систем СВЧ-оружия по поражению воздушных целей.</p>	<p>Демонстрация: - корабельных комплексов СВЧ-оружия для защиты от ВТО; - систем СВЧ-оружия для поражения боеприпасов, БЧ ракет.</p>
<i>СВЧ – оружие для поражения систем боевого управления, связи и освещения обстановки</i>		
<p>Теоретические и экспериментальные исследования, технические разработки</p>	<p>Наземные испытания</p>	<p>Испытание в составе средств воздушного базирования</p>

СВЧ – оружие для поражения радиотехнических средств ПВО		
Демонстрация малогабаритного узкополосного источника СВЧ-излучения большой мощности	СВЧ-системы вооружения однократного действия взрывного типа	Импульсные системы многократного действия
СВЧ – оружие космического базирования для ПРО и ПКО		
Теоретические и экспериментальные исследования, анализ эффектов	Моделирование и имитация для развития концепции боевого применения	Наземные испытания комплексов в интересах поражения ОТР, МБР и КА

Современный уровень развития методов генерации мощных электромагнитных импульсов и способов формирования полностью определяет возможность разработок широкого класса оружия направленной энергии.

Проведенный анализ имеющейся зарубежной печати и данных, приведенных в табл. 1, дает возможность полагать, что общая динамика разработок в области создания *электромагнитного оружия* (СВЧ – оружия) за рубежом базируется, в основном, на базе создания следующих типов источников мощного СВЧ излучения:

источники на основе СВЧ – генераторов различных диапазонов волн и фазированных антенных решеток, суммирующих мощности отдельных СВЧ – генераторов в узконаправленный пучок СВЧ излучения;

СВЧ – генераторы на релятивистских электронных пучках;

источники квазиизотропного, в том числе и широкополосного СВЧ излучения на основе взрывомагнитных генераторов;

СВЧ – генераторы на основе специальных ядерных боеприпасов сверхмалой мощности.

В России аналогичные работы по созданию средств генерации мощного излучения также проводятся. К таким работам, прежде всего, относятся работы, проводимые по созданию импульсных источников мощного широкополосного микроволнового излучения.

Для этого воспользуемся результатами, проведенных в ИРЭ РАН в 2000-х годах под руководством проф. Черепенина В.А. по разработке новых методов обнаружения объектов на основе эффектов использования сверхкоротких импульсов. Это связано, прежде всего, с проводимыми работами по исследованию характеристик радиолокационных систем с широкополосными импульсами для обнаружения малозаметных объектов. Были проведены работы по моделированию и оценке параметров сверхширокополосного лоцирующего импульса при *одноимпульсной* локации малозаметных объектов. Проведены исследования пеленгации объекта сложной формы на фоне подстилающей поверхности моноимпульсными системами.

В итоге создано и испытано устройство, где в качестве источника напряжения используется мощный наносекундный генератор импульсных напряжений. Правомерным источником для указанного вывода предполагаются полученные результаты исследований нового метода радиолокации обнаружения малоразмерных и слабоизлучающих объектов (типа «Стелс») на основе мощных наносекундных импульсов. Вследствие сказанного ниже, целесообразно более подробно остановиться на основных положениях данного интересного направления исследований, результаты которых с успехом могут быть положены в основу создания генераторов большой мощности для силовых радиоэлектронных средств РЭБ.

Общие положения метода одноимпульсной локации.

Известно, что наиболее часто применяемый в современной радиолокации модуляционный метод формирования сигнала угловой ошибки, определяет глубину модуляции, а фаза определяется направлением рассогласования оси антенны.

Существенным недостатком метода моноимпульсного метода радиолокации является одноканальный метод пеленгования с коническим и линейным сканированием луча, а также с последовательным переключением диаграммы направленности. Этот недостаток одноимпульсной локации

радиолокации отсутствует. При этом отраженный импульс содержит полную информацию об угловом положении цели с двумя независимыми приемными каналами. В этом случае пеленгование ведется по одному импульсу и по одновременно двум независимым каналам приема в координатной плоскости. При этом флуктуации отраженного сигнала практически не оказывают влияния на точность измерения угловых координат.

Три основных способа определения координат одноимпульсных в системах: амплитудный, фазовый и комплексный. Модуляционный метод формирования сигнала угловой ошибки требует последовательности отраженных импульсов, что определяет его чувствительность к флуктуациям амплитуды принимаемых сигналов. Это наиболее существенный недостаток одноканального метода пеленгования, использующее коническое, линейное и последовательное переключение диаграммы направленности. Этому недостатка лишена одноимпульсная пеленгация. Таким образом, пеленгование осуществляется по одному импульсу, при этом два независимых канала приема в каждой координатной плоскости практически не влияют на точность измерения угловых координат.

Одноимпульсная локация перспективна при обнаружении объектов на земной поверхности, а также при обнаружении низко летящих объектов.

Сложная задача возникает при локации небольших объектов на земной и морской поверхности, а также при обнаружении низко летящих самолетов. С помощью длинных импульсов в РЛС разрешение по дальности улучшается с применением частотной модуляции, расширяющий эффективный его спектральный диапазон. Однако, при этом возникают паразитные боковые полосы, через которые могут подаваться мощные помехи, вследствие чего малая цель может маскировать большую цель. Такая проблема не существует для РЛС с короткими микроволновыми импульсами, так как нет вообще необходимости изменения схем сжатия импульсов.

Уменьшение длительности импульса сокращает дальность действия одноимпульсной локационной системы (обнаружения объекта и воздействия по

нему). Это подтверждает необходимость применять в радиолокационных системах сверхмощные микроволновые импульсы. В этом случае также необходимо при переходе к более коротким импульсам сохранять и общую мощность, что позволяет также и более высокое разрешение объектов.

Характеристика параметров радио и видеоимпульсов одноимпульсной локации

Какими же путями в настоящее время идут наши и зарубежные исследователи при создании средств генерации большой мощности?

1-е направление. С помощью релятивистской лампы обратной волны были получены в Институте прикладной физики и в Институте сильноточной электроники (г. Томск) мощные наносекундные радиоимпульсы дециметрового диапазона [7,8]. В результате были генерированы радиоимпульсы с частотой 10 Гц длительностью 5 нс. и с частотой повторения 100 ГГц. Средняя мощность генератора составила 250 Вт. Наносекундный цифровой локатор состоял из приемной и передающей антенн. Развязка антенн составила 60 дБ.

В настоящее время прошли успешно испытания аналогичной РЛС в Англии: на 100 км был отчетливо виден маленький самолет с ЭПР 1 м^2 . Разрешение по дальности обеспечивалось 1 м. Частота повторения РЛС была 150 Гц. Ширина диаграммы составила 3° . При цифровой обработке сигнала был снижен уровень помех на 30 дБ.

Оказалось, что метровое разрешение давало возможность на этой дальности идентифицировать различные цели, и в том числе, отчетливо наблюдалось вращательное движение лопастей вертолета на этом же расстоянии.

2-е направление. Другой режим генерации видеоимпульсов СВЧ существенно отличается из-за отсутствия заполнения высокочастотных колебаний, при этом обладает относительно большой шириной спектра. Фактически видеоимпульс представляет собой 1- 2 колебания с выбранной несущей частотой. Волна напряжения генератора может быть эффективно

преобразована в электромагнитную волну при прямом излучении специальной антенной, при этом высокочастотное заполнение отсутствует, видеоимпульс характерен относительно большой шириной спектра. Разработки наносекундных высоковольтных мощных генераторов основана на вырезании короткого из большого длинного импульса с помощью газового разрядника (слейсера). Разрядники работают в азотной атмосфере под давлением 60 атмосфер и запитывались от передающих высоковольтных наносекундных генераторов (драйверов) через 50 - омную линию в качестве емкостного накопителя энергии.

С помощью такого устройства были получены импульсы 1-5 нс с выходной мощностью до 400 МВт с перспективой увеличения до 1 ГВт. с частотой повторения 100 Гц со стабильностью не более 3%; стабильность же длительности импульса оказалась менее 10%, что является недостаточной для обнаружения малой ЭПР. Для излучения наносекундных мощных видеоимпульсов могут применяться ТЕМ – рупоры в виде неоднородных полосковых линий.

На рис 1 представлена форма такого мощного видеоимпульса генератора.

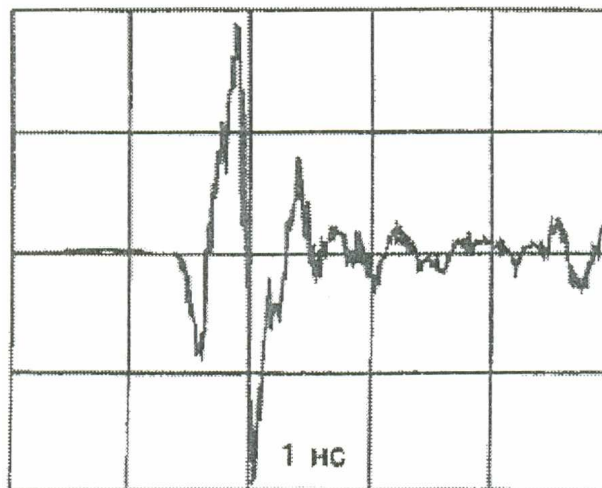


Рис. 1. Форма мощного видеоимпульса генератора

Адаптация спектральных характеристик лоцирующего импульса

Методы генерации мощных наносекундных электромагнитных импульсов в принципе допускают оперативную перестройку параметров излучаемых сигналов и, в частности, изменение спектра излучения, в том числе за счет использования блочно-модульного способа построения излучающей системы. Процедура адаптации параметров лоцирующего импульса может быть в этом случае построена по следующему принципу.

На первом этапе адаптивной процедуры производится облучение пространства мощным сверхширокополосным электромагнитным импульсом и по отраженному сигналу принимается решение об обнаружении объекта. Параллельно с излучением зондирующего импульса проводится его спектральный анализ и результаты $S_0(\omega)$ записываются в блок хранения информации. В случае положительного решения об обнаружении производится анализ спектра отраженного сигнала $S(\omega)$. Для нахождения максимума в спектральной характеристике отражающей поверхности цели $\sigma(\omega)$ в вычислительной системе образуется отношение $\sigma(\omega) = S(\omega)/S_0(\omega)$ и проводится анализ максимумов этой величины. Если один или несколько максимумов оказываются выше среднего значения эффективной отражающей поверхности, то производится подстройка спектра излучаемого импульса так, чтобы максимальные компоненты спектра лоцирующего импульса приходились на максимальное значение эффективной спектральной отражающей поверхности. При этом ширина спектра излучаемого импульса также должна согласовываться с зависимостью $\sigma(\omega)$, чтобы энергия отраженного сигнала принимала максимально возможное значение. Конкретные законы изменения спектра излучаемого импульса в зависимости от измеренной величины $\sigma(\omega)$ должны быть разработаны для конкретных экспериментальных параметров генерирующей системы, в частности, числа независимых каналов излучения, частотного перекрытия диапазона генерации, возможных характеристик предполагаемых целей, коэффициента возможного сужения спектра импульса

генерации около несущей частоты и т. п.. Отметим, что при наличии ошибок определения спектральных амплитуд эффективной отражающей поверхности цели адаптацию следует проводить, когда разность максимального значения $\sigma(\omega)$ и среднего значения станет больше ошибки определения спектральных компонент $\sigma(\omega)$.

В процессе сопровождения цели возможны медленные изменения спектральной характеристики эффективной отражающей поверхности, вызванные, например, поворотом цели и т. п. В этом случае для сохранения высокой точности определения динамических параметров цели необходимо периодически проводить коррекцию спектра лоцирующего импульса, которая будет состоять в повторном измерении спектра отраженного сигнала, определении $\sigma(\omega)$ и изменении в соответствии с этой новой зависимостью спектральных характеристик излучаемого импульса.

Отметим, что измерение спектральных характеристик эффективной отражающей поверхности цели позволяет также определять, какого класса объект находится в воздушном пространстве. В случае создания банка информации по спектральным портретам возможных целей периодическая коррекция параметров лоцирующего импульса может проводиться без обратной связи (без повторных измерений $\sigma(\omega)$) только по данным, хранящимся в банке информации, и динамическим характеристикам цели (дальность, скорость, угол наблюдения и т. п.).

Максимальная дальность обнаружения оптимальным приемником на фоне шума

При отсутствии активных помех шумовую составляющую сигнала можно считать белым гауссовым шумом со спектральной плотностью $N_0 = kT$, где k - постоянная Больцмана.

Отношение сигнал/шум оптимального приемника согласованного сигнала будет:

$$\mu = \frac{1}{N_0} \int_0^\tau \xi(t) dt = \frac{E}{N_0}, \quad (1)$$

где $E = \int_0^\tau \xi(t) dt$ - представляет полную энергию $\xi(t)$ за время длительности импульса τ .

Сигнал считается обнаруженным, если отношение сигнал/шум оказывается больше некоторого порога $\zeta(\alpha_1, \alpha_2)$, зависящего от параметров вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги: $\mu > \zeta(\alpha_1, \alpha_2)$.

Максимальная дальность обнаружения цели будет:

$$R_{\max} \leq \frac{G_t A_t \sigma}{(4\pi)^2 \zeta} \cdot \frac{E}{N_0}. \quad (2)$$

По формуле (2) был произведен расчет для исходных данных: $\sigma = 0,1 \text{ м}^2$, длительность импульса $\tau = 5 \text{ нс}$, $T = -300 \text{ К}$, параметр $\zeta(\alpha_1, \alpha_2) = 5$. Допускалось, что приемная и передающая антенны одинаковы, выходная апертура видеоимпульсов $50 \lambda^2$, и ЭПР составляет 10 м^2 .

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальная дальность цели при разных мощностях и видов лоцирующих импульсов

	Максимальная дальность обнаружения объекта, км	
	Мощность импульса 0,5 ГВт	Мощность импульса 1 ГВт
Радиоимпульсы	550	655
Видеоимпульсы	250	310

Обнаружение и оценка параметров объекта по пачке лоцирующих импульсов

Улучшить характеристики обнаружения и сопровождения цели при моноимпульсной локации малозаметных объектов оказывается возможным, используя для локации несколько одинаковых импульсов. В этом случае по-

прежнему возможно определение всех параметров цели по каждому из импульсов, однако, оценка параметров по пачке оказывается тем лучше, чем больше импульсов в пачке. Кроме того, для эффективного использования адаптивной процедуры локации необходима сравнительно большая величина отношения сигнал/шум, что также требует использования нескольких лоцирующих импульсов.

Оценка отношения сигнал/шум и дальности обнаружения для пачки лоцирующих импульсов.

Устройства, генерирующие сверхширокополосные мощные импульсы СВЧ, допускают работу в частотном режиме с частотой повторения порядка 100 - 200 Гц. Поэтому возможна моноимпульсная локация как одиночными импульсами, так и пачкой импульсов, включающей вплоть до нескольких тысяч импульсов.

В случае приема k импульсов на фоне стационарного случайного процесса характеристики качества обнаружения оказываются такими же, что и при приеме одного импульса, но имеющего в k раз большую энергию. Действительно, энергия лоцирующего сигнала пропорциональна мощности передатчика, умноженной на длительность импульса. В случае пачки импульсов общая длительность сигнала возрастает в k раз, что соответственно увеличивает в k раз отношение сигнал/шум. В табл. 2 показаны значения дальности обнаружения цели в случае локации радиоимпульсами и видеоимпульсами с разным количеством импульсов в пачке. Как нетрудно видеть, максимальная дальность локации видеоимпульсами при 100 импульсах в пачке может достигать 1000 км, а при локации радиоимпульсами даже оказывается больше 2000 км. Общая длительность лоцирующего сигнала в данном случае составит 1 секунду при частоте повторения импульсов 100 Гц.

Необходимо отметить, что указанный выигрыш в дальности обнаружения может быть достигнут только в случае когерентной фильтрации всех импульсов пачки (фазы всех импульсов должны совпадать). Такое возможно в случае

одновременного обнаружения и оценки скорости цели. Тогда скорость цели является параметром, и оказывается возможным когерентно накапливать все импульсы пачки. "Платой" за увеличение чувствительности является существенное усложнение оптимального приемника, так как в этом случае требуется наличие как минимум трехмерной гребенки фильтров для оценки скоростей по дальности и двум углам. В то же время имеется возможность параллельной обработки всей информации, необходимой для когерентного накопления, что в принципе допускает сохранение таких же временных характеристик (скорости обработки отраженного сигнала), как и для одного импульса в пачке.

Таблица 2.

Максимальная дальность обнаружения цели при различных мощностях и видах лоцирующих импульсов и для разного количества импульсов в пачке.

				Максимальная дальность обнаружения цели, км	
				Мощность импульса 0.5 ГВт	Мощность импульса 1 ГВт
Лоцирующие радиоимпульсы					
Один радиоимпульс				550	655
Пачка	из	5	820	980	
радиоимпульсов					
Пачка	из	20	1160	1385	
радиоимпульсов					
Пачка	из	100	1740	2070	
радиоимпульсов					
Лоцирующие видеоимпульсы					
Один видеоимпульс				260	310
Пачка	из	5	390	460	
видеоимпульсов					
Пачка	из	20	550	655	
видеоимпульсов					
Пачка	из	100	820	980	
видеоимпульсов					

Оценки параметров объекта для локации пачкой импульсов.

Увеличение отношения сигнал/шум при локации пачкой импульсов позволяет также существенно улучшить точность оценки параметров объекта - скорости, углового положения, угловых скоростей и др. Заметим, что улучшение точности оценки параметров пропорционально корню квадратному из энергии принимаемого сигнала, т. е. отношения сигнал/шум, и оказывается существенно более заметным, чем увеличение дальности обнаружения. Действительно, для 5 лоцирующих импульсов в пачке точность оценки параметров цели увеличивается в 2, 2 раза, для 20 импульсов - в 4.5 раз, а для 100 импульсов - даже в 10 раз. Опять, как и в случае обнаружения, увеличение точности оценок связано с существенным усложнением оптимального приемного устройства, требующего наличия гребенки оптимальных фильтров для каждого параметра сигнала, так как в противном случае не удастся осуществить когерентное накопление импульсов.

Значительное увеличение отношения сигнал/шум при локации пачкой импульсов повышает также эффективность использования адаптивной процедуры локации. Действительно, пусть при использовании только одного лоцирующего импульса объект может быть обнаружена (отношение сигнал/шум составляет несколько единиц). Этого оказывается явно недостаточно для эффективного использования адаптивной процедуры - относительная точность оценки частот, на которых спектральные амплитуды эффективной отражающей поверхности цели достигают максимумов, составляет десятки процентов. В то же время применение пачки из 100 лоцирующих импульсов для той же цели обеспечивает отношение сигнал/шум уже несколько сотен, что вполне достаточно для адаптивной процедуры подстройки спектра лоцирующего импульса, так как относительная ошибка определения требуемых частот локации составляет не более пяти процентов.

Отметим, что измерение спектра с помощью пачки, содержащей k импульсов, оказывается полностью эквивалентным усреднению по ансамблю,

состоящему из k реализаций. Уменьшение дисперсий оценок происходит в этом случае также в k раз.

Таким образом, применение пачки импульсов вместо одиночных лоцирующих импульсов при моноимпульсной локации малозаметных объектов позволяет существенно улучшить характеристики обнаружения и оценки параметров цели. Так, увеличение дальности обнаружения может составлять более 3 раз для 100 импульсов в пачке. Одновременно с этим значительно уменьшаются ошибки оценки параметров объекта и повышается эффективность адаптивной процедуры локации.

Предельная точность оценки параметров отраженного сигнала

Для оценки предельной точности параметров при моноимпульсной локации воспользуемся неравенством Крамера- Рао [9-12]. В этом случае дисперсия ошибок измерений определяется следующим выражением:

$$\sigma_{\lambda}^2 = - \left(\frac{d^2 S(\lambda)}{d\lambda^2} \right)_{\lambda=\lambda_0},$$

где $S(\lambda) = \frac{2}{N_0} \int_0^{\tau} s(t, \lambda) s(t, \lambda) dt$; $s(t, \lambda)$ – сигнал; λ_0 – истинное значение параметра λ .

Получено для оценки ошибки следующее выражение: $\sigma_R^2 \geq c \tau \left(\frac{E}{N_0} \right)^{-1}$. (3)

Проведенные расчеты по (3) показали, что при большом отношении сигнал/шум ошибка определения дальности может в прицепе быть меньше длины импульса электромагнитного излучения в пространстве τ .

Дисперсия определения угловых координат, исходя из неравенства Крамера-Рао, имеет следующий вид:

$$\sigma_{\theta}^2 \geq \theta_{1/2} \left(\frac{E}{N_0} \right)^{-1},$$

где $\theta_{1/2}$ -характерная ширина диаграммы направленности приемной антенны.

Анализ, полученных результатов исследований метода одноимпульсной радиолокации по обнаружению малоразмерных и слабоизлучающих объектов (типа «Стелс») на основе мощных наносекундных импульсов показывают, что имеется целый ряд новых существенных преимуществ сверхкоротких мощных импульсов в локации, которые можно сформулировать следующим образом.

1. Использование наносекундных коротких и мощных импульсов обеспечивает дальность в несколько сот километров, что позволяет сопровождать объекты с малой ЭПР на фоне больших стационарных помех.

2. При моноимпульсной локации мощными наносекундными импульсами при доплеровской модуляции проблема слепых скоростей полностью исчезает.

3. При длительности импульса ~ 5 нс и длительности интервала между импульсами около 0,01 с проблема мертвого времени исчезает, когда блокируется приемник радиолокационной станции и получение сигнала об объекте в этом случае отсутствует.

4. Так как при одноимпульсной радиолокации определении всех параметров объекта происходит по одному импульсу, то при частоте повторения импульсов в 100 Гц не возникает неоднозначности по дальности до цели. Действительно за время 0,01 с все эхо импульсы успевают достигнуть приемной антенны, если максимальная дальность обнаружения не превышает 1500 км.

5. Высокое разрешение по дальности позволяет проводить идентификацию по единственному отраженному импульсу. Действительно все детали объекта с размерами порядка 1 м^2 (плоскости, винты) будут работать как независимые отражатели, создавая как бы пространственный портрет объекта.

6. Высокое разрешение по дальности может дать информацию о высоте низколетящих самолетов над относительно гладкой местностью объекта по временному разделению одиночного отклика и диффузного эхо-сигнала от подстилающей поверхности.

В целом, одноимпульсная локация мощными наносекундными импульсами представляет новое направление в радиолокации, представляющий несомненный интерес для гражданского и военного применения.

Использование наносекундных импульсов обеспечивает хорошее разрешение по дальности и позволяет обнаруживать и сопровождать движущиеся цели с малой эффективной площадью рассеяния на фоне больших стационарных помех.

Данные выводы позволяют сделать и другие выводы, которые являются и основной целью настоящей работы, т.е. дать предложения для возможностей использования метода генерации наносекундных мощных импульсов для их практического использования при создании перспективных систем силовой радиоэлектронной борьбы поражения РЭС.

Основные положения в создании генераторов большой мощности для силовых систем РЭБ

На основе итогов результатов и высказанного здравого смысла научных предположений в данной работе определяется прогноз по формулированию следующих положений для реализации метода генерации наносекундных мощных импульсов в силовой борьбе поражения РЭС.

1. Для облегчения проникновения электромагнитного излучения в поражаемую аппаратуру желательно использовать наиболее коротковолновое излучение СВЧ. Оптимальным для станций функционального поражения является миллиметровый диапазон радиоволн. Наиболее подходящим для использования в подвижных станциях является черенковский генератор, дающий в 8-мм диапазоне мощность более 1 ГВт, что более чем на порядок превышает мощность других генераторов СВЧ в этом диапазоне.

2. Для излучения СВЧ импульсов миллиметрового диапазона целесообразно использовать активные ФАР. Это дает увеличение мощности излучаемого сигнала и, следовательно, дальности поражения. При этом происходит процесс сложения мощности в пространстве.

3. Из анализа схемно-конструктивных решений приёмных трактов современных радиоэлектронных средств показано, что среди полупроводниковых элементов наиболее подвержены воздействию точечно-контактные диоды с барьером Шоттки, при этом возможно как силовое воздействие в полосе пропускания, так и внеполосное поражение входных цепей РЭС.

4. Предполагается, что уровень поступающей к указанным элементам от внешних источников энергии СВЧ импульсов в значительной степени определяется избирательными и прочими характеристиками антенно-фидерных устройств и входных цепей (АФУ и ВЦ). В зависимости от взаимного расположения на оси частот полосы пропускания АФУ и спектра СВЧ импульса с его средней частотой критериальные уровни поражения РЭС определяются фильтрующими свойствами АФУ в целом, а также фильтрующими свойствами входной цепи приёмника.

5. В качестве критериальных уровней поражения СВЧ-диодов и транзисторов могут быть следующие:

при облучении импульсами наносекундной длительности, следующими с частотой повторения $F_p \leq 1000$ Гц; до 12 Вт (в диапазонах частот до 10 ГГц), до 100 Вт (в диапазонах частот до 20 ГГц) и до 30 Вт (в диапазонах частот до 36 ГГц);

при облучении импульсами длительностью 1 мкс, следующими с $F_p = 25 - 50$ Гц - менее 26 Вт (при воздействии на биполярные транзисторы сантиметрового диапазона);

при облучении импульсами длительностью 1 нс - 1 мкс, следующими с $F_p = 4$ кГц - 8-20 Вт (при воздействии на малошумящие усилители);

при облучении импульсами длительностью 1,5 - 10 нс, следующими с $F_p = 10 - 100$ Гц - 4 - 30 Вт (при воздействии на биполярные транзисторы см диапазона).

6. Критериальный уровень поражения СВЧ-диодов уменьшается с увеличением длины его рабочей волны. Уменьшается он и с расширением

рабочей полосы частот диода. В зависимости от места и условий размещения чувствительных приборов в аппаратуре, от вида связей с элементами монтажа, от возможности концентрации и канализации энергии внешних полей элементами и контурами внутри блока действительный критериальный уровень может изменяться на порядок и более.

7. Может рассматриваться не только как новый метод регистрации СВЧ колебаний, но и как механизм вывода из строя входных элементов РЭС и возможность трансформации мощного наносекундного электромагнитного импульса в акустический.

Под руководством профессора Перунова Ю.М. также проводятся теоретические и экспериментальные исследования по созданию мощных коротких СВЧ импульсов в целях радиолокационного обнаружения или поражения воздушных объектов. Делаются выводы, что применение мощных короткоимпульсных радиолокационных сигналов в РЭБ с радиотехническими системами является весьма перспективным.

Литература

1. Бункин Б.В., Гапонов-Грехов А.В., Месяц Г.А., Осипов М.Л. и др. // Письма в ЖТФ, 1992, т.18, вып.9; Осипов М.Л. // Радиотехника, 1995, № 3 (а.с. СССР № №:1080246, 862800, 1979г., патент России № 2107384, 1998г.).

2. Бункин Б.В., Реутов А.П. Направления развития радиолокационных систем.//Научное обозрение, № 4,2002. - с.8-12.

3. Пат. 2165628 Россия, МПК 7 G 01 S 3/00, 3/46/Воен. Инж.-косм. Ун-т Дикарев В.И., Замарин А.И. Рахматуллин А.М., Косырев Д.Ф. № 2000102155/09; Заявл. 26.01.2000; Оpubл. 20.04.2001.

4. Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств – участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. Технические средства разведывательных служб капиталистических государств. – ВИНТИ, 1998, № 9. - с. 25-32.

5. Jane's International Defense Review. – 2007. January. – p.25. Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств – участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. Технические средства разведывательных служб капиталистических государств. – ВИНТИ, 2008, № 1 (О программе модернизации радаров системы ПВО Словакии).

6. Millitary Technology – 2007, №5. p. 74-82. Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств – участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. Технические средства разведывательных служб капиталистических государств. – ВИНТИ, 2008, № 7 (О роли средств наведения и контроля за воздушным пространством при управлении боевыми действиями авиации).

7. Осипов В.Л Радиотехника ,1995, вып. 3.

8. Бункин Б.В и др. Письма в ЖТФ ,1992,т 18,с.61.

9 Cluitet al.in Strong Microwaves in Plasma, ed by A.G.Luvak (Institute of Applied Phyzics,Nizhny Novgorod), v.2,p 886.

10. Губанов В.П., Шпак В.Г, Шунайлов С.А. и др. Генерация мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения. // Письма в ЖТФ,1994,т.20,вып 14. –с. 89-93.

11. Ван Трис Г. Теория обнаружения оценок и модуляции. Т.1. –М.: Сов. Радио,1974.

12. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь,1983.