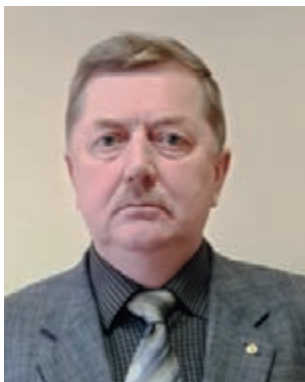




Агейкин

Владимир Иванович,
старший научный сотрудник
ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России
(г. Москва),
капитан 1 ранга в отставке



Каплярчук

Леонид Михайлович,
ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России
(г. Москва), с.н.с., к.т.н.,
полковник в отставке



Степанов

Александр Павлович,
ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России
(г. Москва), с.н.с.,
капитан 2 ранга в отставке

К вопросу использования технологии сверхширокополосных сигналов в интересах создания перспективных средств связи, разведки и РЭБ тактического звена управления

Обеспечение надежной радиосвязи в условиях воздействия организованных помех средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) в тактическом звене управления решается за счет использования в системах радиосвязи сигналов с расширением спектра. Такие сигналы достаточно эффективно обнаруживаются, пеленгуются современными средствами радиоразведки и подвергаются воздействию «интеллектуальных» активных помех. Кроме того, в спектре сигналов, использующих методы расширения спектра, будут присутствовать сосредоточенные составляющие большой интенсивности, приводящие к снижению помехозащищенности радиосвязи. Противник в этих условиях получает возможность адаптивно перераспределить спектральную плотность мощности помехи в соответствии с распределением спектральной мощности излученного сигнала, что по эффективности соответствует постановке прицельной помехи.

Создание устойчивых энергетически скрытых каналов связи в современных условиях имеет первостепенное значение для управления войсками в тактическом звене. Основными факторами, нарушающими работу каналов радиосвязи, являются преднамеренные помехи, а также уничтожение радиосредств высокоточным оружием. Поэтому кардинальным способом обеспечения энергетической скрытности и помехоустойчивости является существенное снижение спектральной плотности сигнала. Именно по этой причине агентством DARPA Министерства обороны США были инициированы разработки помехоустойчивых радиосредств, использующих новые принципы создания радиоканала с высокой энергетической скрытностью на порядки выше, чем у цифровых средств связи, использующих технологии расширения спек-

тра. Для этих целей необходимо было использовать импульсные сигналы с чрезвычайно широким спектром (более 500 МГц). К таким сигналам относится класс сверхширокополосных (СШП) сигналов, в английской аббревиатуре — импульсные UWB (Ultra Wideband) сигналы (рис. 1).

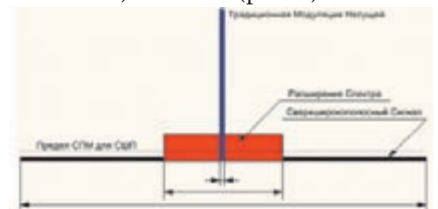


Рис. 1. Ширина спектров сигналов

Определение термина «сверхширокополосные сигналы» (UWB) впервые было введено агентством DARPA Министерства обороны США в 1990 году и скорректировано Федеральной комиссией по связи США (FCC) в 2000 году. По определению FCC, к UWB-сигналам относятся все сигналы со спектральной полосой не менее 1,5 ГГц, а также сигналы, у которых ширина спектральной полосы составляет не менее 25% от значения центральной частоты. Сущность импульсной UWB-технологии на примере связанной UWB-системы раскрыта в патенте основателя корпорации Time Domain Л. Фулертонна «Полнодуплексная система и метод связи». Отличие СШП-систем связи, построенных на импульсной технологии, от традиционных узкополосных — это отсутствие несущей частоты (для передачи информации используется не непрерывный сигнал, а поток импульсов). Передача сигналов ведется короткими (20–0,1 нс) импульсами, следующими друг за другом с интервалом 2–2500 нс. Импульс — моноцикл Гаусса (рис. 2,3) — описывается первой производной от функции распределения Гаусса.

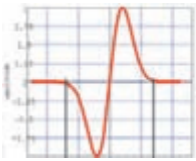


Рис. 2. Гауссовский видеоимпульс

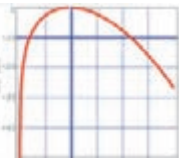


Рис. 3. Спектр видеоимпульса длительностью 2 нс шириной 500 МГц

К преимуществам импульсной UWB-технологии можно отнести:

- высокую скорость передачи информации. Как известно из фундаментальной формулы Шеннона, пропускная способность гауссовского канала связи повышается с увеличением полосы пропускания канала и соотношением сигнал/помеха на входе приемного устройства. Таким образом, теоретически, для средств связи, построенных на основе импульсной UWB-технологии с полосой частот более 1 ГГц, скорость передаваемой информации может превышать 1 Гбит/с;
- энергетическую скрытность и помехоустойчивость. Оценить помехоустойчивость импульсной UWB технологии можно, используя понятие усиление обработки. В системах с расширением спектра усиление обработки определяется как отношение ширины полосы канала к ширине полосы информационного сигнала. Так, для систем расширения спектра методом прямой последовательности с шириной канала 5 МГц и информационным сигналом 10 кГц усиление составит 500 раз (27 дБ). Такой же сигнал, передаваемый импульсным радио с шириной полосы 2 ГГц, будет усилен в 200 тыс. раз (53 дБ). В виду высокого эффективного усиления системы связи UWB могут работать с очень малой средней мощностью передатчика, что обеспечивает им высокую энергетическую скрытность. В октябре 1997 года корпорация Time Domain продемонстрировала полнодуплексную связь на основе импульсной UWB-технологии с центральной частотой 1,3 ГГц на расстоянии до 16 км и скорости передачи информации 39–156 кбит/с. При этом средняя мощность передатчика составляла около 250 мкВт. Поскольку UWB-сигнал распределен по столь широкому спектру, обнаружить его, а тем более перехватить и подлавить, будет крайне проблематично;
- отсутствие переотражений от различных поверхностей и способность проникновения сквозь стены, пере-

борки и другие различные препятствия. Одно из существенных достоинств импульсной UWB-технологии — отсутствие интерференции прямо распространяющегося сигнала с отражениями от различных объектов. Переотражения — проблемы для многих связанных и локационных технологий. Именно из-за них затруднена связь внутри помещений, в условиях сложного рельефа и других труднодоступных местах. В импульсной UWB-технологии отраженный сигнал будет попадать в приемник с задержкой и восприниматься как случайная помеха, не воздействуя на прямой сигнал. В США-системах затухание импульсного сигнала в различных труднодоступных средах достаточно мало, и короткие импульсы легко проходят сквозь различные препятствия, поскольку подавление полезного сигнала происходит не во всем диапазоне.

Еще одним важным свойством импульсной UWB-технологии является то, что она позволяет сочетать в одной UWB-системе функции связи, локального позиционирования и радиолокации. Корпорация Time Domain (США) разработала модуль P-440 (рис. 4), который может использоваться в режиме сетевой UWB-радиостанции, функционирующей на расстоянии от 300 до 1100 метров. Модуль P-440 также имеет встроенные функции радара (точность определения расстояния до 2 см и отслеживания местоположения с точностью до 3 см). К основным недостаткам импульсной UWB-технологии можно отнести потенциальную интерференцию с существующими радиоэлектронными системами. Однако до настоящего времени этот вопрос до конца не изучен и требует дополнительных исследований.



Рис. 4. Модуль P-440

Практической реализацией технологии импульсного радио являются UWB-радиостанции DRACO и ORION, разработанные компанией MultiSpectral Solution Inc. Термин «Импульсное радио» введен Л. Фулertonом. В импульсном радио информация кодируется посредством времен-

ной позиционно-импульсной модуляции PPM (Pulse Position Modulation). Смещение импульса относительно его «штатного» положения в последовательности вперед задает «0», назад — «1». Один информационный бит кодируется последовательностью 150–200 импульсов на бит.

Мобильная радиостанция DRACO, UWB использует комбинацию частотного уплотнения (FDM) и множественного доступа с временным разделением каналов (TDMA). Приемопередатчик рассчитан на работу в расширенном диапазоне с дальностью в несколько километров, DRACO поддерживает как защищенную передачу речевых сообщений и данных, так и незашифрованную видео-передачу с повышенной скоростью. Дальность действия двух передатчиков DRACO составляет приблизительно 1–2 км в зависимости от местности. Конфигурация аппаратуры одного узла приемопередатчика DRACO показана на рис. 5.



Рис. 5. Узел UWB-радиосвязи DRACO (ручной интерфейс MBITR — справа, UWB-приемопередатчик с блоком обработки сети — слева)

Радиостанция ORION предназначена для операций сухопутных войск в масштабе рот и взводов с возможностью встречных перемещений как ближнего (1 км), так и дальнего (50–60 км) радиуса действия. В 2002 году радиостанция прошла испытания и поступила на вооружение армии США. ORION имеет фиксированную TDMA-архитектуру и использует «звездную» сетевую конфигурацию, в которой для координации передач нескольких подчиненных устройств применяется единственный оригинал, обеспечивающий связь на уровне соединения, где все приемопередатчики находятся в пределах дальности связи с боевой радиостанцией. Приемопередатчик UWB-радиостанции ближнего действия (рис. 6) работает в диапазоне L (1–2 ГГц). При мгновенной максимальной выходной мощности приемопередатчика 0,8 Вт и максимальной скорости передачи данных 2 Мбит/с обеспечивается средняя мощность 4 мВт с шириной полосы



приемопередатчика 500 МГц в пределах прямой видимости (примерно 1 км). Для достижения полной дуплексной цифровой речи и данных при скоростях до 1 Мбит/с используется пакетная передача.

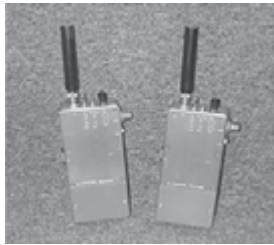


Рис. 6. UWB-приемопередатчик диапазона L типа ORION

При тактической связи с малым радиусом действия работа системы осуществляется с использованием единственного «ведущего» устройства, которое осуществляет перекрытие всех других «ведомых» устройств (станций) в обычной звездообразной топологии. Если доступ к каналу гарантирован ведущим устройством, то ведомая станция продолжает передавать речь или информационные пакеты через ведущую станцию в конечный пункт назначения. Кроме возможности связи в зонах прямой видимости (LOS) диапазона L ORION обеспечивает также дополнительную возможность магистральной линии связи дальнего действия (50–60 км). Для режима непрямой видимости ORION был выбран поддиапазон военного диапазона рабочих частот 30–88 МГц. При мгновенной максимальной мощности приблизительно 120 Вт приемопередатчики достигали дальности связи свыше 8 миль на земле и свыше 60 морских миль над водой. Пропускная способность канала передачи данных составила 850 кбит/с, позволяя осуществлять передачу одновременно сжатых видеосигналов и другой информационной нагрузки.

В России подобные средства связи находятся в стадии разработки. Отечественная технология сверхширокополосной связи СШП-И позволит создавать системы тактической связи, разведки и РЭБ, превосходящие зарубежные аналоги. В технологии СШП-И используется аналогичный импульсному радио способ формирования СШП-импульсов. Для возбуждения импульсного сверхширокополосного сигнала без несущей частоты используются биполярные видеопульсы в виде формы первой производной функции Гаусса, а на практике — в виде одного периода синусои-

ды, который наилучшим образом подходит по энергетическим параметрам. Спектр импульса наиболее приближен к частотным характеристикам штыревой антенны. Длительность сверхкороткого видеопульса 1–2 нсек позволяет иметь небольшие габариты СШП-антенны и полосу излучения в диапазоне 200–1000 МГц, обеспечивающую дальность связи более 1 км.

К отличительным особенностям технологии СШП-И можно отнести:

1. **Структуру сигнально-кодовой конструкции СШП-канала.** В отличие от импульсного радио в технологии СШП-И предусматривается передача одного информационного бита двумя-тремя мощными СШП-импульсами и с такой амплитудой, чтобы в точке приема СШП-сигнал превышал уровень шумов, сохраняя при этом среднюю энергетическую плотность СШП-сигнала. Такой способ формирования сигнала с энергетической точки зрения равноценен передаче 1 бита информации в виде 200–300 СШП-импульсов с небольшой амплитудой, который потом на уровне шума извлекается с помощью коррелятора. При таком способе формирования СШП-сигнала помехозащищенность системы связи (без существенного уменьшения скорости передачи) определяется выбором оптимального способа кодирования информации (ансамбля сигналов). Для этого необходимо осуществить преобразование частотной избыточности в кодовую избыточность — тогда кроме повышения помехозащищенности канала и получения большого количества вариантов кодирования используемых сигналов можно получить высокую энергетическую эффективность

и низкую спектральную плотность. Для передачи информации СШП-сигналом, как и в импульсном радио, так и в технологии СШП-И, используется временная позиционная модуляция РРМ, позволяющая получить более равномерный спектр. Кодирование передаваемой информации заключается в изменении позиции импульсов в группе импульсов, которая называется кадром (рис. 7).

В отличие от импульсного радио в технологии СШП-И положение ансамбля СШП-сигнала из набора импульсов на временной оси соответствует позиционному коду синхросигнала, информационного байта и служебной информации. Точная привязка на временной оси синхросигнала и позиционного кода информационных байтов обеспечивается за счёт повышения крутизны переднего и заднего фронтов каждого из СШП-импульсов. Поэтому с энергетической точки зрения символ сигнально-кодовой конструкции СШП-сигнала должен состоять из небольшого (4–10) количества СШП-импульсов, размещенных на значительном расстоянии, которые образуют большой ансамбль сигналов. Таким образом, интервальное кодирование с небольшим количеством импульсов позволит получить коды малой плотности с высокой энергетической эффективностью.

2. **Метод обнаружения и приема СШП-сигнала.** В технологии СШП-И используется пороговая обработка входного сигнала. В этом случае сигнал после порогового устройства сохраняет свою структуру, т. е. срабатывает по наличию импульса на входе. Интервальное кодирование с небольшим количеством импульсов

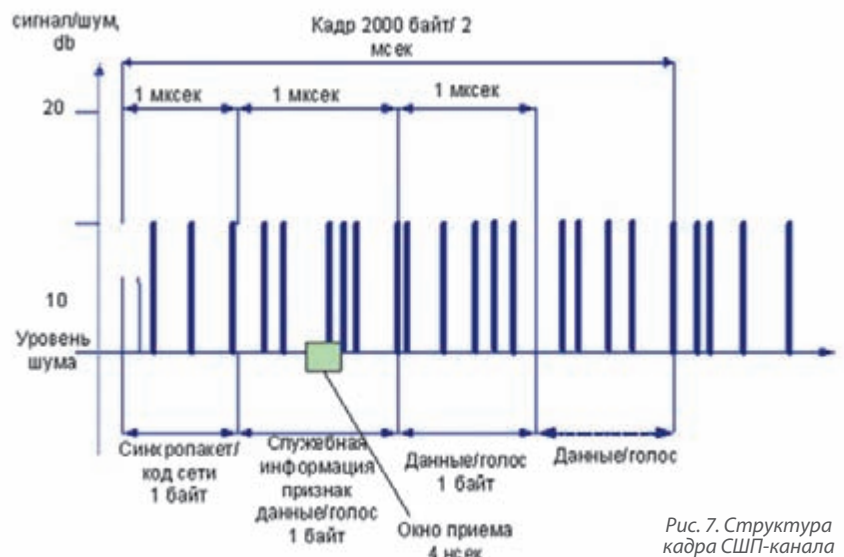


Рис. 7. Структура кадра СШП-канала

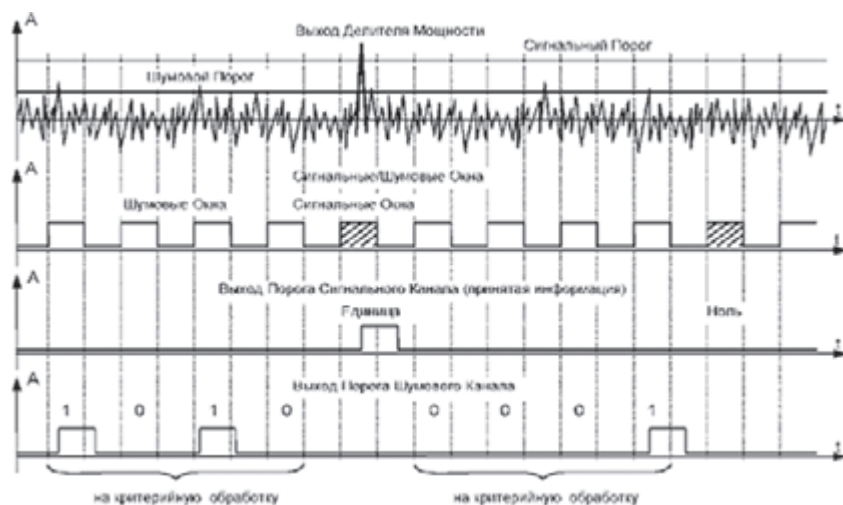


Рис. 8. Временная диаграмма работы сигнального и шумового каналов

с кодами малой плотности с высокой энергетической эффективностью подразумевает использование энергетического безкорреляционного порогового метода. Простота задания порога, схемотехническая простота порогового обнаружителя и его высокое быстродействие позволяют реализовать самую высокую скорость приема информации. Для выбора порога сравнения и выделения СШП-импульса с заданной вероятностью ошибки (ложного срабатывания) необходимо использовать два независимых канала приема. Два канала приемного устройства осуществляют параллельный прием. Один канал служит для приема сигнала, второй — для оценки уровня внешних шумов и помех, по которому регулируется чувствительность СШП-приемника. Основу каждого канала составляют чувствительные пороговые устройства, выполненные на базе ключевых туннельных диодов, предназначенных для работы в диапазоне СВЧ. Прием в сигнальном и шумовом каналах осуществляется во временных интервалах (временных окнах). Прием сигнала осуществляется в окне длительностью 4 нс, величина которого обеспечивает высокую защиту от импульсных помех (рис. 8).

3. Способ безпоисковой синхронизации СШП-канала. Импульсные сигналы малой плотности (большой скважности), состоящие из небольшого числа ($n = 4 \dots 8$) импульсов, могут практически без заметных потерь в помехоустойчивости приниматься некогерентно. Некогерентный прием позволяет исключить необходимость поиска по фазе и на основе применения дискретной техники строить оптимальные фильтры сигналов, не нуждающиеся в поиске сигнала

по времени. Время вхождения системы в синхронизм не превышает двух периодов следования синхронизирующего сигнала (за время не более 200 мкс). При обмене синхросигналами с информацией об уровне принимаемого СШП-сигнала определяется и устанавливается необходимый уровень мощности сигнала в канале. Условие синхронизма (передача в каждом кадре синхросигналов) поддерживается непрерывно во время сеанса связи, а не в дискретных точках, что характерно для технологии импульсно-го радио.

4. Способ защиты от помех. Использование метода компенсации помех на дисперсионной линии задержки позволяет в сочетании с пороговым обнаружителем получить максимальную пропускную способность СШП-канала при отношении сигнал/помеха на входе приемника до $-30 \dots -40$ дБ и при соотношении сигнал/помеха на выходе устройства обработки — более 10 дБ. Компенсационный метод повышения отношения сигнал/помеха для узкополосных помех с известными свойствами состоит в компенсации помехи путем ее сложения со специально созданными противофазными сигналами, которые отличаются от помехи фазой на π . Основным элементом компенсатора узкополосной помехи является фазовращатель, выполненный в виде:

- линии задержки;
- дисперсионной линии задержки;
- на основе программируемого трансверсального фильтра (адаптивное устройство подавления помех).

Для дальнейшего повышения параметров помехоустойчивости СШП-канала проведено математическое моделирование с введением в приемную

часть СШП-приемника цифрового вейвлет-фильтра, который повышает помехозащищенность устройства при приеме импульсного СШП-сигнала минимум на 10 дБ в условиях воздействия шумов и помех и позволяет вести уверенный обмен информацией в условиях, когда полезный сигнал на входе приемника системы связи не превышает уровень шумов.

Таким образом, технология СШП-И позволит создать сверхширокополосные средства со следующими техническими преимуществами:

- высокая кодовая селективность принимаемого сигнала;
- обеспечение совместимости работы большого количества аналогичных сетей связи;
- обеспечение энергетической и структурной скрытности сигнала;
- высокая помехоустойчивость канала связи;
- значительное уменьшение энергопотребления и масса-габаритных характеристик;
- высокая скорость передачи информации и энергетическая эффективность радиоканала;
- использование энергетического (безкорреляционный, пороговый) принципа приема сигнала;
- шумоподобный спектр СШП-сигнала.

Сегодня крайне актуальным является вопрос о создании отечественных средств связи, разведки и РЭБ с использованием СШП-И технологии (рис. 9).

В декабре 2009 года специалистами АО «Концерн «Созвездие» и ИРЭ РАН с участием представителей ГШ ВМФ и управления связи СФ проведены экспериментальные испытания аппаратуры СШП-И-связи на атомном крейсере «Петр Великий» и атомной подводной лодке «Гепард». Результаты испытаний подтвердили возможности использования технологии на основе сверхкоротких импульсов в качестве внутрикорабельной связи, обеспечивающей гарантированное прохождение сигналов через водонепроницаемые переборки.

В октябре 2014 года в ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России было проведено совещание по вопросам внедрения цифровой высокоэффективной системы скрытной СШП-радиосвязи для управления подразделениями в тактическом звене управления. В ходе проведения совещания было принято решение о признании систем радиосвязи с применением сверхширокополосных сигналов пер-



Рис. 9. Современные средства разведки и РЭБ

спективным направлением развития СШП-И-технологии, а также о целесообразности дальнейшего выполнения научно-исследовательских работ по данной теме.

К настоящему времени в инициативном порядке ведутся разработки и реализованы отечественные образцы средств СШП-И-связи, сопоставимые с зарубежными аналогами. Предприятием АО «ВНИИ «Вега» разработана микроразомная система радиосвязи на базе сверхширокополосных сигналов, которая обеспечивает скорость передачи информации до 40 Мб/с. Система радиосвязи предназначена для построения внутриобъектовой связи и локальных вычислительных сетей, проектируемых в труднодоступных местах (подземные сооружения, временные командные пункты, подводные лодки и т. д.), где невозможно осуществить радиосвязь традиционными видами связи. В апреле 2016 года проведены успешные испытания данной системы радиосвязи на шахте в Белгородской области.

По сообщению газеты «Известия» от 5 декабря 2016 года, Военной академией войск ПВО имени маршала Василевского и организацией «Смоленский научно-инновационный центр радиоэлектронных систем «Завант» продемонстрирована СШП-система «Изумруд», работающая на основе сверхширокополосных сигналов. При проведении испытаний данной систе-

мы специалисты Минобороны, ФСБ и ФСО, используя современные системы радиоперехвата, не смогли обнаружить работу устройства на местности, пока им не был подсказан квадрат, где стояла аппаратура «Изумруд».

К сожалению, до настоящего времени не разработаны отечественные технологии по разведке и подавлению UWB-связи, а в планах НИОКР разработка таких технологий и средств РЭБ не предусматривается. Отечественным разработчикам целесообразно обратить внимание на возможности радиоэлектронного подавления средств UWB-связи при использовании их в тактическом звене зарубежных сухопутных войск. В противном случае это может привести помимо дальнейшего технологического отставания к отрицательным последствиям при ведении современных боевых действий.

Таким образом, на базе полученного коммерческого опыта производства и эксплуатации СШП-И-связи будут решаться многие задачи, ранее недоступные для существующих радиосредств:

- внутриобъектовые, локальные сети, имеющие энергетически скрытые СШП-каналы связи со сверхвысокой пропускной способностью для летательных аппаратов, кораблей, транспорта;
- промышленные системы беспроводной связи в условиях мощных индустриальных помех;

- теле/радиоуправляемые системы технологическими процессами и оборудованием атомной отрасли, транспортом, строительством и робототехническими комплексами при чрезвычайных обстоятельствах;
- специальные системы связи для управления военными силами и средствами, БЛА и РТК;
- специальные системы связи для антитеррористических подразделений ФСБ, ПВ, ВВ, ГРУ ГШ и т. д.

Статья написана на основе материалов «Recent System Applications of Short-Pulse Ultra-Wideband (UWB) Technology», Robert J. Fontana, Senior Member, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 52, NO. 9, SEPTEMBER 2004 и российских патентов на изобретения в области сверхширокополосной связи.

1. Акт проведения испытаний аппаратуры внутрикорабельной СШП-И радиосвязи (утвержден командирами в/ч 20402 и 45794 18 декабря 2009 года).
2. Презентация «Скрытная СШП-система радиосвязи» (ООО «НаноИмпульс», Москва 2014 год).