

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Ху Босюн

**Разработка низкоэнергетической беспроводной сверхширокополосной
(IR-UWB) системы передачи данных, работающей в условиях мощных интер-
ференционных помех**

Направление подготовки

11.06.01 – Электроника, радиотехника и системы связи

Направленность

11.06.01_01 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Ху Босюн

Научный руководитель: профессор, д.т.н., Макаров Сергей Борисович

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ: – Величко Елена Николаевна, к.ф.-м.н,
доцент

Научный руководитель: – Макаров Сергей Борисович, д.т.н.,
профессор.

Рецензент: – Крячко Александр Федотович, д.т.н.,
профессор, заведующий кафедрой радиотехнических и оптоэлектронных комплексов

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Введение

Системы мониторинга и управления работой различных двигателей являются развитыми информационно-управляющими системами, имеющими большое количество датчиков различных типов. Это датчики частоты вращения роторов двигателя, датчики, измеряющие температуру и давление на входе двигателя, датчики углового и линейного перемещения исполнительных механизмов и устройств двигателя, датчики температуры и расхода топлива и другие типы датчиков.

Подключение к системе такого большого количества датчиков, которые имеют информационные линии связи и цепи питания, осуществляется через соответствующие электрические соединители и кабели. При этом кабели, как правило, защищены металлическими экранами. Для повышения надежности работы электронных систем управления многие датчики имеют резервирование, что приводит к увеличению массы кабелей. Масса этих кабелей может составлять до 20...30% от всей массы электронной системы управления авиадвигателем. Отказы в электрических соединителях составляют до 40% всех отказов электронных систем управления двигателями. Кроме этого, такие громоздкие и разветвленные кабели затрудняют компоновку «обвязки» двигателя и его техническое обслуживание.

Альтернативным решением задачи построения системы мониторинга и управления двигателем является применение беспроводной сети передачи данных, расположенной на двигателе. Применение таких сетей позволяет упростить организацию сбора данных о различных параметрах работы двигателя среды, облегчает монтаж и предоставляет возможность гибкого расширения системы. Одним из путей построения беспроводной сети передачи данных является использование сверхширокополосных сигналов.

Сигналы UWB обеспечивают высокую степень защищенности связи от преднамеренных помех. Приемники обычных радиосистем воспринимают UWB-сигналы как случайные помехи, которые к тому же нередко оказываются и по амплитуде полностью скрыты в естественных шумах. Различные сверхширокополосные системы используют разные алгоритмы построения кодирующих псевдослучайных последовательностей, общее число которых, в принципе, весьма велико. Поэтому случайные совпадения кодов у разных систем практически исключены, а целенаправленный подбор кода представляет собой весьма сложную и трудоемкую задачу.

Шумоподобная структура и обычно довольно малые уровни сигналов UWB-систем с использованием кодирования, в том числе для сглаживания спектра мощности, практически не создают помех для других устройств.

Технология UWB, по сравнению с традиционными системами, допускает работу со значительно меньшими мощностями передатчика, а, следовательно, и с малыми энергозатратами. Кроме этого, так как UWB-системы оперируют с импульсами очень малой длительности при коэффициенте заполнения импульсной последовательности всего около 0,5...1%, это, в свою очередь, также снижает потребление энергии UWB-устройствами.

Целью научно-исследовательской работы является разработка схемотехнических решений, проектирование и экспериментальные исследования макета низкоэнергетической беспроводной сверхширокополосной (IR-UWB) системы передачи данных, работающей в условиях интерференционных помех.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих основных задач.

- Анализ методов построения беспроводных сенсорных сетей и выбор конкретной конфигурации.
- Исследование свойств распространения сверхширокополосных сигналов в рабочем пространстве авиационного двигателя.
- Разработка и реализация устройства формирования сверхширокополосных сигналов с заданными характеристиками и низким энергопотреблением
- Разработка и реализация устройства обнаружения сверхширокополосного сигнала, работающего в беспроводной сенсорной сети на фоне многолучёвости и наличия узкополосных помех.

Методы построения беспроводных локальных сетей

Для мониторинга и управления работой двигателя используются беспроводные сенсорные сети (Wireless Sensor Network (WSN)). Они состоят из четырех основных узлов: передатчик, процессор, датчик и батарея. Эти узлы отличаются энергоэффективными схемотехническими решениями, универсальными протоколами работы, возможностью использования альтернативных источников энергии, распределенными методами обнаружения, локализация времени синхронизация и покры-

тия. Наиболее часто используется беспроводная сеть, основанная на стандарте IEEE 802.15.4, обычно именуемого Zigbee.

Обеспечение адекватной мощности для сенсоров является одной из самых сложных проблем, которая сдерживает использование WSN сетей в промышленных установках. Она решается путем управления питанием, уменьшая потребность в нем, созданием новых физических устройств, таких как батареи более высокого качества и добавлением батарей и аккумуляторов, а также совершенствованием технологий замены батарей.

Наибольшее распространение в промышленных сетях получили для большинства WSN сетей протоколы WirelessHART и ISA 100.11a. Эти два протокола (стандарта) широко используются в WSN сетях в обрабатывающей и энергетической промышленности, но потенциал WSN сетей данных стандартов значительно превышает пределы этого прикладного сектора.

WirelessHART является самоорганизующейся и самовосстанавливающейся сетью. Это означает, что каждое устройство обладает возможностью обнаружения работающих соседних сенсоров, способностью измерения высокочастотного сигнала, способностью к синхронизации и скачкообразной перестройке частоты передачи данных и установлению пути и связей с соседними устройствами.

Свойства распространения сверхширокополосных сигналов

При реализации сверхширокополосной беспроводной сенсорной сети используются различные формы сверхширокополосных (СШП) сигналов:

- импульсы гауссовой формы;
- радиоимпульсы;
- импульсы Эрмита.

С аппаратной точки зрения в настоящее время достаточно просто сформировать гладкие импульсы по форме близкие к гауссовским, используя диоды с накоплением заряда и ключевые транзисторы. Импульсы, описываемые полиномами высоких порядков, точно совпадающие по форме с найденными аналитическим путем, сформировать сложнее. Для этого, например, можно использовать подключение к нагрузке на короткое время гармонического СВЧ сигнала, как было описано выше.

При наличии различных сред распространения радиоволн для систем беспроводной связи, использующих СШП, разработано большое число моделей каналов,

учитывающих результаты экспериментальных измерений, потери энергии на трассе, многолучевое распространение и др.

Стандартная модель распространения указывает, что на любом расстоянии передачи и приема потери на трассе являются случайными и подчиняются логарифмически нормальному распределению. При этом специфика окружающей среды определяет параметры логарифмического случайного распределения.

В беспроводной сенсорной сети, ориентированной на измерение характеристик авиационного двигателя, СШП-сигнал, как правило, распространяется в сложной среде, и на него неизбежно влияет большое количество препятствий (металлические детали, трубопроводы и т.п.). В таком канале импульсная характеристика канала $h(t, \tau)$ в любой точке трехмерного пространства может быть выражена следующим образом:

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^N a_n \delta(t - \tau_n) e^{j\varphi_n}. \quad (1)$$

Цель моделирования канала состоит в том, чтобы описать статистические характеристики параметров a_n , τ_n и φ_n с помощью подходящего метода. С точки зрения проектирования беспроводной системы исследования каналов с СШП-сигналами в основном сосредоточены на оценке амплитуд a_n многолучевого распространения и задержек τ_n .

Как показывает анализ, при изготовлении авиационных двигателей и другой подобной продукции возникает явление кластеризации в многолучевом канале, и его импульсный отклик может быть описан моделью SV (Салеха–Валенсуэла):

$$h(t) = \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K \beta_{l,k} e^{j\phi_{l,k}} \delta(t - T_l - \tau_{l,k}), \quad (2)$$

где T_l – задержка l -го кластера (по первому импульсу) относительно передаваемого импульса; $\tau_{l,k}$ – задержка k -го импульса в l -м кластере относительно первого импульса кластера; $\beta_{l,k}$ – амплитуда k -го импульса в l -м кластере; $\phi_{l,k}$ – фаза k -го импульса в l -м кластере относительно первого импульса кластера, и равномерно распределена в диапазоне $[0, 2\pi]$; L – номер кластера, для первого кластера $l = 0$; K – номер импульса в кластере, для первого импульса в кластере $k = 0$.

В традиционной модели время прихода кластеров подчиняется распределению Пуассона, а интервал времени прихода кластеров – экспоненциальному распределению. Однако при измерениях в реальных беспроводных сенсорных сетях было обнаружено, что из-за неслучайной локальной специфической структуры двигателя

интервал времени прихода кластеров в большей степени соответствует следует распределению Вейбулла:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(x/\lambda)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

где $k > 0$ – коэффициент формы; $\lambda > 0$ – масштабный коэффициент. Для типичных каналов беспроводных сенсорных сетей диапазон значений k составляет от 2 до 3, а диапазон значений λ – от 20 до 40 нс.

В традиционной модели амплитуда импульса в кластере подчиняется распределению Рэлея; затухание мощности кластеров – экспоненциальному распределению; затухание мощности импульса в кластере – распределению Лапласа. По результатам исследования реальных каналов беспроводных сенсорных сетей обнаружено, что линейная модель с двумя наклонами может лучше соответствовать затуханию мощности импульсов в кластере.

Если отношение $f(T_l)$ мощности первого импульса в кластере к общей мощности при задержке T_l (выраженное в децибелах) определить выражением

$$f(T_l) = \begin{cases} p_{11}T_l + p_{10} & T_l \leq b1 \\ p_{21}T_l + p_{20} & T_l > b1 \end{cases} \quad (4)$$

где $b1$ – точка останова с задержкой по времени кластерной линейной модели с двумя наклонами; p_{11} и p_{21} – угол наклона кластера линейной модели с двумя наклонами; p_{10} и p_{20} — точка пересечения кластера линейной модели с двумя наклонами, то отношение $g(T_l + \tau_{l,k})$ мощности k -го импульса в l -м кластере к общей мощности (выраженное в децибелах) будет равно

$$g(T_l + \tau_{l,k}) = f(T_l) - \gamma(T_l)\tau_{l,k}. \quad (5)$$

В выражении (3.12) $\gamma(T_l)$ — коэффициент затухания импульсов в кластере, равный

$$\gamma(T_l) = \begin{cases} q_{11}T_l + q_{10} & T_l \leq b2 \\ q_{21}T_l + q_{20} & T_l > b2 \end{cases}, \quad (6)$$

где: $b2$ – точка останова с задержкой по времени кластерной линейной модели с двумя наклонами; q_{11} и q_{21} — угол наклона импульсов в кластере линейной модели с двумя наклонами; q_{10} и q_{20} — точка пересечения импульсов в кластере линейной модели с двумя наклонами.

Экспериментальные испытания показали, что обычно $b_1 = b_2$ около 30 нс , $p_{11} (-1 \sim -2 \text{ дБ/нс})$; $p_{21} (-0,5 \sim -1 \text{ дБ/нс})$; $p_{10} (-5 \sim -10 \text{ дБ})$; $p_{20} (-15 \sim -30 \text{ дБ})$; $q_{11} (-0,01 \sim -0,1 \text{ дБ/нс}^2)$; $q_{21} (-0,005 \sim -0,05 \text{ дБ/нс}^2)$; $q_{10} (-5 \sim -15 \text{ дБ/нс})$; $q_{20} (-5 \sim -15 \text{ дБ/нс})$;

С целью обоснованного выбора модели канала связи для сверхширокополосной сенсорной сети необходимо создание имитационной модели канала, и проведении на основе такой модели статистического эксперимента.

Сценарий моделирования выглядит следующим образом

- Моделируется время прихода кластеров $T_0 = d/c$, где d – расстояние между приемопередающими антеннами, а c – скорость распространения радиосигналов (скорость света); время прихода второго кластера определяется временем прихода первого кластера плюс время интервала кластера, которое подчиняется распределению Вейбулла. Далее происходит аналогичный процесс для получения времени прихода третьего и четвертого кластеров.
- Рассчитывается зависимость затухания амплитуды кластера от времени прихода по формуле (3.11);
- По формулам (3.12) и (3.13) рассчитывается зависимость затухания импульсов для каждого кластера от времени прихода.
- Строится модель профиля задержки мощности уровня сигнала с помощью кривой зависимости маломасштабного затухания, построенной на предыдущих двух этапах, плюс модель крупномасштабных потерь на трассе по формуле (3.6).
- Добавляется нормально распределенная случайная величина к профилю задержки мощности для построения полной модели канала связи сверхширокополосной сенсорной сети.

Рассмотрим некоторые результаты имитационного моделирования.

На рис. 1 показана зависимость потерь уровня сигнала (в децибелах) от расстояния (в логарифмическом масштабе) между точками передачи и приёма, а на рис. 2 – эмпирическая функция распределения (т.е. статистический аналог интегральной функции распределения) колебаний таких потерь.

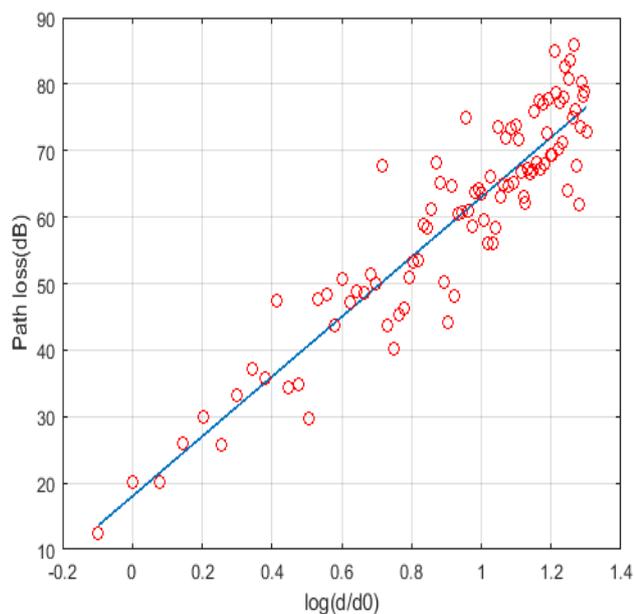


Рис. 1. Потери уровня сигнала при многолучёвом распространении

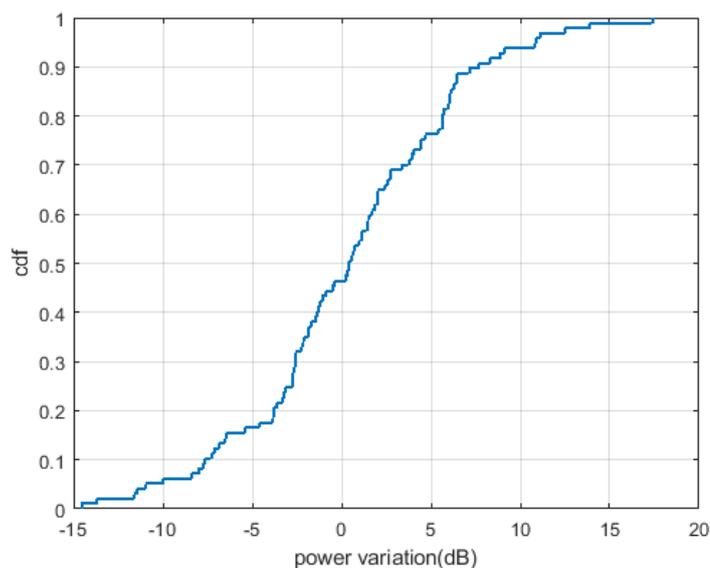


Рис. 2. Эмпирическая функция распределения колебания уровня сигналов

Как следует из анализа результатов, представленных на рис. 1 и 2, распределение Вейбула лучше соответствует характеристикам сверхширокополосного канала связи по сравнению с распределением временем прихода, подчиняющимся по закону Пуассона и распределением интервалов времени прихода, подчиняющимся по экспоненциальному закону традиционных моделей СШП-каналов.

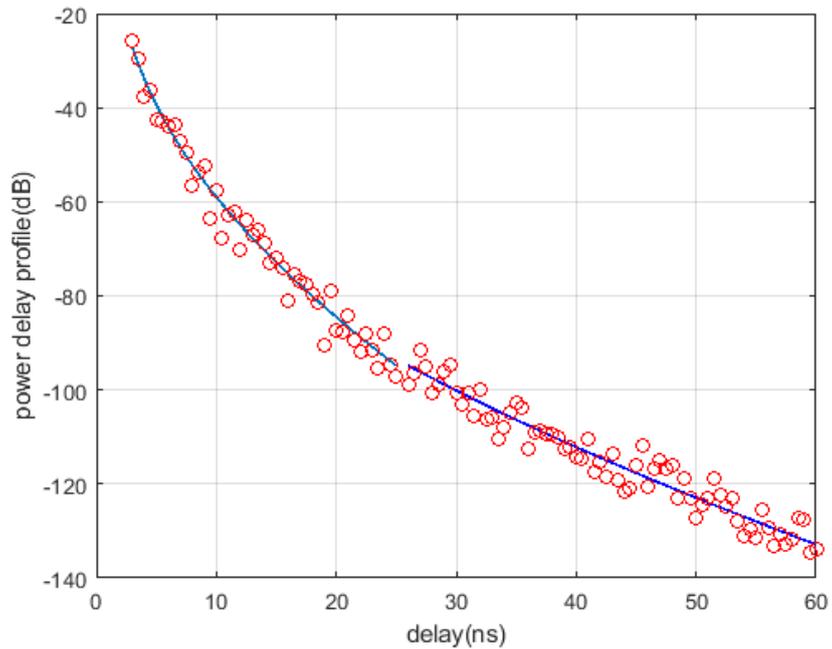


Рис.3. Профиль задержки мощности

На рис. 3 представлен профиль задержки мощности, который характеризует зависимость принимаемой мощности СШП от задержки по времени. Из-за более плотного отражения и рассеяния металла различие между кластерами и импульсами в кластере не является очевидным.

Устройство формирования сверхширокополосного сигнала

Обратимся к задаче разработки СШП-модуля с низким энергопотреблением. Такой модуль является ключевым узлом эффективно функционирующих беспроводных сенсорных систем.

Схемы генерации СШП импульсов условно можно разделить на два типа. В первом типе для генерации требуемых сигналов используют цифровые логические схемы. Этот метод является относительно простым и обеспечивает генерирование однополярные импульсы, но при этом трудно удовлетворить требованиям по амплитуде импульс. Другим типом является использование полупроводниковых приборов (лавинные транзисторы, туннельные диоды и диоды со ступенчатым восстановлением), обеспечивающих генерацию импульсов с в субнаносекундном или даже пикосекундном диапазоне с приемлемой амплитудой.

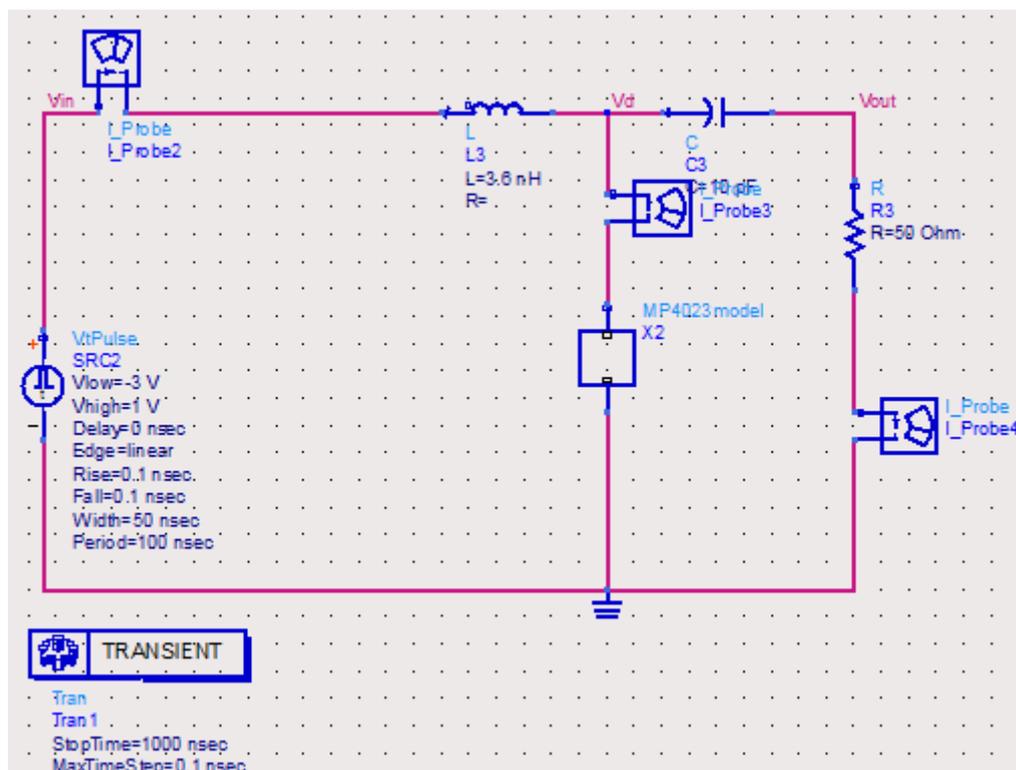


Рис. 4. Принципиальная схема генерации СШП импульсов

На рис. 4 показано принципиальная схема генерации СШП импульсов. Использовалась модель диода со ступенчатым восстановлением MP4023, время жизни носителей заряда 15 нс, время переноса заряда в р-п-переходах 50 с, емкость перехода 0,5 пФ, катод диода заземлен, и генерируется импульс с отрицательной полярностью;

На рис. 5 представлены результаты моделирования работы схемы генерации СШП импульсов.

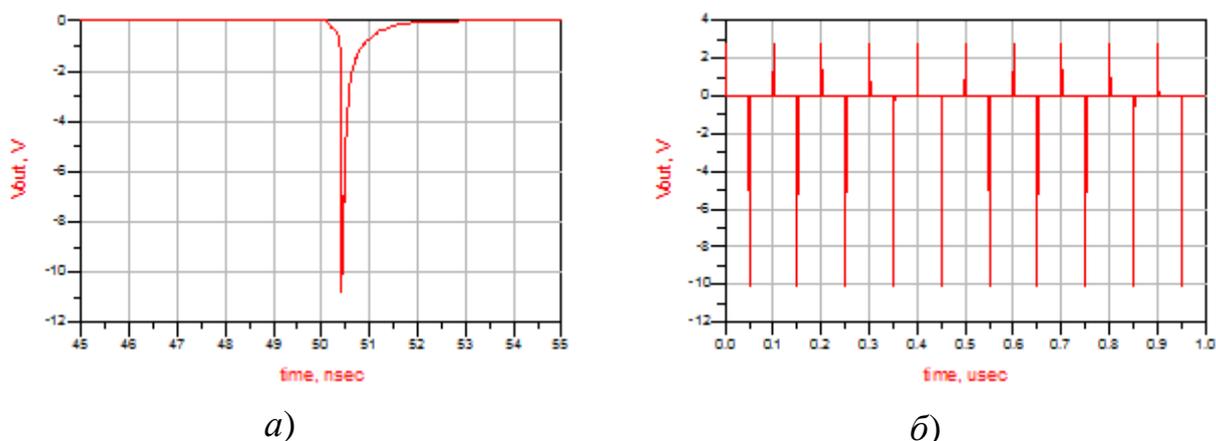


Рис. 5. Результаты моделирования генерации СШП импульс: а) – форма одиночного импульса; б) – последовательность импульсов

На генерацию узких импульсов оказывают влияние следующие факторы: индуктивность возбуждения, напряжение смещения диода и скважность источника импульса возбуждения. При имитационном моделировании задавались частота импульса возбуждения 10 МГц; длительность фронта и спада источника импульса возбуждения 0,1 нс; напряжение обратного смещения источника возбуждения импульса –3 В.

Анализ результатов моделирования показывает, что амплитуда импульса изменяется немонотонно с увеличением напряжения смещения и существует точка максимума при напряжении смещения 1 В. При этом ширина импульсов изменяется незаметно. С уменьшением напряжения смещения потребляемая мощность значительно уменьшается. Например, когда напряжение смещения равно 0,9 В, потребляемая мощность составляет всего 3,82 мВт, а потребление энергии за каждый импульс составляет всего 0,38 нДж/импульс. Следует также отметить, что амплитуда импульса увеличивается с увеличением индуктивности возбуждения.

Сравнение теоретической схемы генерации СШП импульсом со схемой моделирования показывает, что в теоретическом анализе с целью упрощения дифференциального уравнения не рассматривался блокирующий конденсатор постоянного тока, в то время как при моделировании блокирующий конденсатор постоянного тока и сопротивление нагрузки образуют цепь фильтра верхних частот. Увеличение амплитуды и ширины импульса при увеличении индуктивности возбуждения приводит к появлению более низкочастотных составляющих, которые отфильтровываются при прохождении через цепь фильтра верхних частот.

Изменение значения индуктивности возбуждения мало влияет на потребляемую мощность и КПД схемы: КПД находится на уровне от 12,5% до 12,9%, а потребляемая мощность составляет от 17 мВт до 17,6 мВт.

На основе имитационного моделирования были получены оптимальные значения основных параметров, при которых удовлетворяются требования к амплитуде и ширины импульса системы и одновременно обеспечивается наибольший КПД генерации импульсов.

Таблица 1. Параметры моделирования узких импульса при оптимальной комбинации параметров

Параметры им-	Ампли-	Шири	Пик.	Средн.м	Потребл.	КП	Потреб.
---------------	--------	------	------	---------	----------	----	---------

пульса	туда (В)	на (пс)	значен. мощн. (Вт)	оцн. (мВт)	Мощн. (мВт)	Д (%)	энергии (нДж / импульс)
d = 20% V _b = 0,9В L = 2,4 нГн	-9,85	940	1,94	2,07	3,35	61,8	0,33

В табл. 1 представлены оптимальные значения параметров: индуктивность возбуждения 2,4 нГн, скважность импульса возбуждения 20% и напряжение смещения диода 0,9 В. При этом КПД схемы достигает 61,8%, потребляемая мощность составляет всего 3,35 мВт, а потребление энергии за каждый импульс составляет 0,33 нДж/импульс.

Как правило, основными требованиями для схем генерации СШП импульсов являются:

- коэффициент умножения высокого напряжения (т. е. отношение амплитуды выходного узкого импульса к напряжению источника импульса возбуждения);
- ширина выходного импульса: он не должен быть слишком широким или слишком узким, что связано с потерями при распространении;
- высокий КПД и малая потребляемая мощность.

Чтобы реализовать эти основные требования, необходимо учитывать топологическую структуру и параметры схемы генерации импульсов, а также рабочие характеристики источника импульса возбуждения: длительность фронта и спада источника импульса возбуждения, и возможность генерации высокого выходного импульсного тока источника импульсов и т.д.

Топологическая структура и параметры схемы генерации, как правило, могут быть получены путем моделирования и оптимизации, но получить источник импульса возбуждения, который удовлетворится требованиям нелегко. По этой причине была разработана схема для генерации высокого выходного импульсного тока источника импульса возбуждения и крутого фронта нарастания и спада источника импульса возбуждения, а также более высокого коэффициента умножения напряжения, как показано на рис. 6.

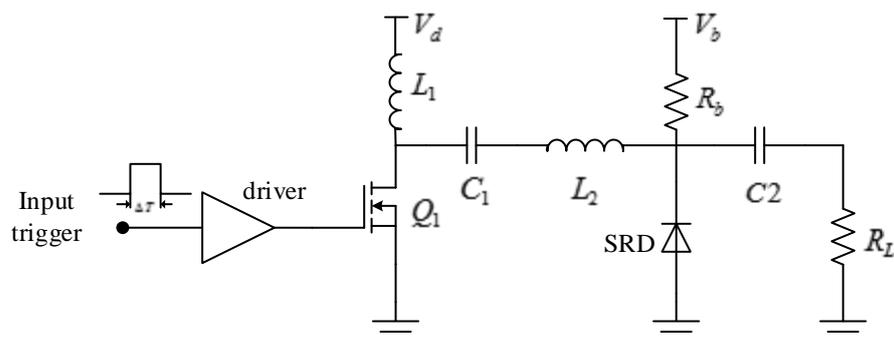


Рис. 6. Новая схема генерации импульсов с удвоением амплитуды

Принцип работы схемы таков: в начале полевой МОП-транзистор Q_1 выключен, в цепи нет тока, конденсатор C_1 заряжается до $V_d - V_b$ ($V_d > V_b$), а конденсатор C_2 заряжается до V_b . Когда поступает триггерный импульс длительностью ΔT (обычно десятки наносекунд), полевой МОП-транзистор включается, индуктивность L_1 заряжается от V_d , конденсатор C_1 , индуктивность L_2 и диод со ступенчатым восстановлением (SRD) образуют разрядный контур, диод со ступенчатым восстановлением находится в прямом включении, и заряд вводится; После исчезновения триггерного импульса длительностью ΔT полевой МОП-транзистор снова выключается. В это время энергия, накопленная в индуктивности L_1 , может быть передана на L_2 только через C_1 . L_1, C_1, L_2 и диод со ступенчатым восстановлением (SRD) образуют разрядный контур. Заряд, накопленный в диоде, извлекается. Когда заряд исчерпывается, на индуктивности L_2 генерируется обратное индуцированное напряжение, формируя острый узкий импульс, который передаётся нагрузке через блокирующий конденсатор C_2 постоянного тока.

На рис. 7 показана имитационная модель предложенной новой схемы генерации импульсов, а табл. 2 – параметры моделирования.

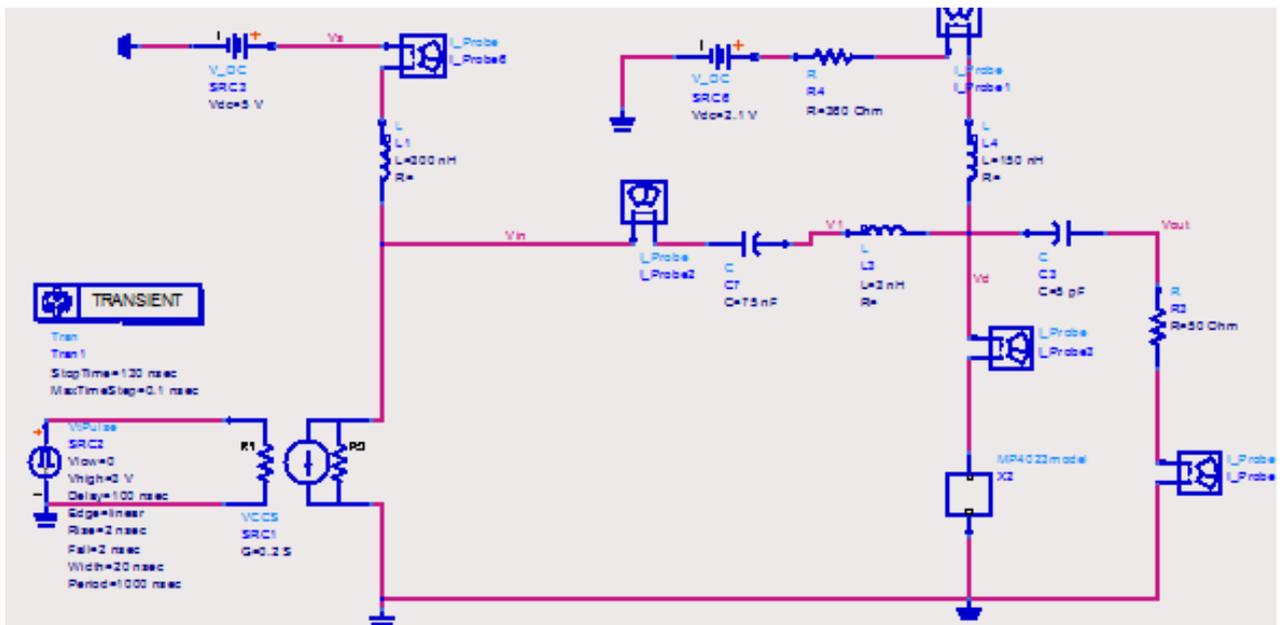


Рис. 7. Моделирование новой схемы генерации импульсов с удвоением амплитуды

На рис. 7 показана имитационная модель предложенной новой схемы генерации импульсов, а в табл. 2 – параметры моделирования.

Таблица 2. Параметры моделирования новой схемы генерации узких импульсов

Параметры импульса	Амплитуда (В)	Ширина (нс)	Пиков. значен. мощн. (Вт)	Средн.м оцн. (мВт)	Потреб. мощн. (мВт)	КПД (%)	Потреб. энергии (нДж / импульс)
$F = 1 \text{ МГц}$ $t_s/tr = 2 \text{ нс}$ $p_w = 20 \text{ нс}$	10,1	1500	2,04	2,2	18,2	12,2	18,2

На рис. 8 показан разработанный и реализованный передатчик СШП импульса, включающий в себя модуль сбора данных, модуль обработки данных, модуль генерации узких импульсов и передающую антенну; рабочее напряжение модуля составляет 3,3 В, ток 30 мА. Блок сбора и обработки данных реализован с помощью микроконтроллера, включающего цифроаналоговое преобразование, кэш данных, проверку целостности данных (CRC-код), кодирование, формирование пакетов данных.

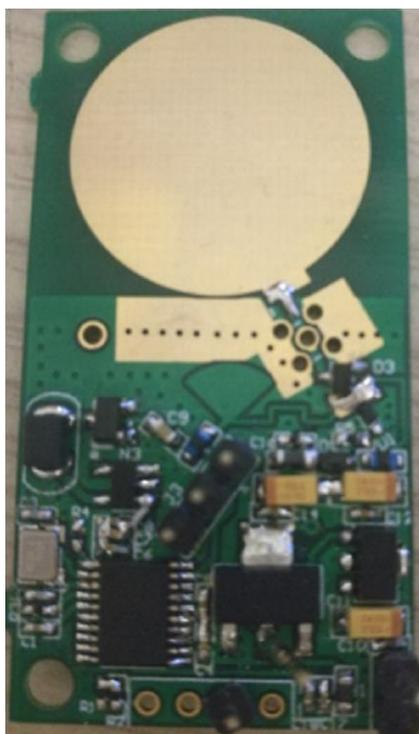


Рис.8. Разработанный передатчик СШП импульсов

На рис. 9 и 10 показана форма СШП импульса и последовательности таких импульсов на экране осциллографа, полученных в результате тестирования; амплитуда импульса составляет 12 В, его длительность 1,2 нс.

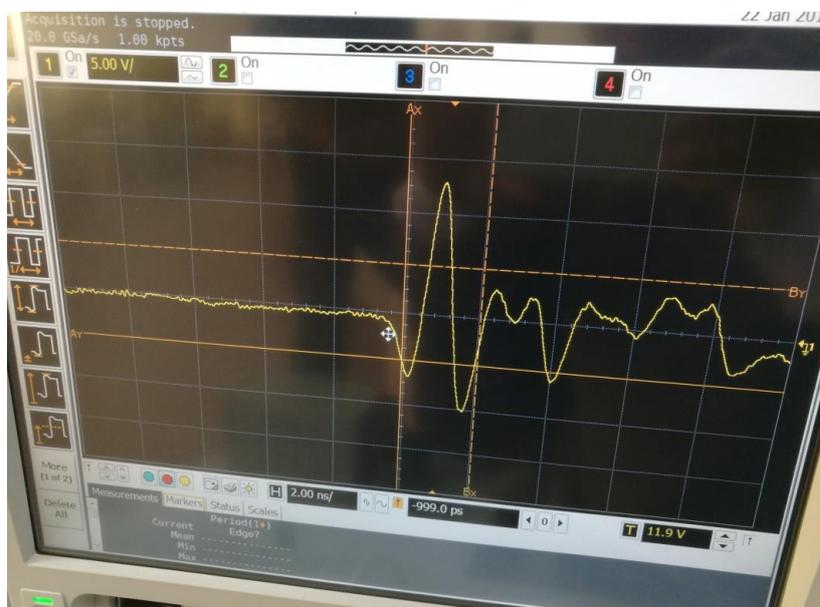


Рис. 8. Форма реального СШП импульса



Рис. 9. Последовательность сгенерированных СШП импульсов

Обнаружение сверхширокополосных сигналов

Обратимся к задаче разработки приёмного устройства СШП сигналов беспроводной сенсорной сети.

На сверхширокополосную передачу сигнала влияют такие факторы, как потери на трассе, эффекты затенения замирание уровня сигнала при многолучевом распространении и др. Следовательно, форма сигнала, поступающего в приемник, сильно искажена; в то же время, на сигнал могут также влиять помехи множественного доступа, узкополосные помехи и фоновый шум. С другой стороны, указанные особенности СШП сигнала на входе приёмника увеличивают диапазон поиска преамбулы для обнаружения начала сигнала. Более того, из-за наличия многолучевого распространения, может иметь место несколько многолучевых сигналов, которые удовлетворяют условиям для принятия решения о обнаружении, что вызывает снижение точности обнаружения. Исходя из перечисленных факторов необходима разработка приёмного устройства СШП сигналов, обеспечивающего работу системы с приемлемыми характеристиками на фоне всех описанных негативных факторов.

Сверхширокополосный когерентный приемник в основном реализован приемником RAKE. В соответствии с режимом комбинирования ветвлений RAKE он де-

лится на приемник комбинации ARAK с полной ветвью, SRAKE - селективный приемник RAKE (выбрать самую сильную комбинацию многолучевого распространения) и PRAKE - частичный приемник RAKE (выбрать комбинацию частичного многолучевого распространения, достигнутую ранее). Сверхширокополосные некогерентные приемники в основном включают приемники с обнаружением энергии и автокорреляционные приемники. Некогерентные приемники не нужно выполнять предварительные анализы канала связи, поэтому структура и алгоритм приемника относительно просты, Коэффициент ошибок по битам относительно высоки, и она используется чаще в условиях ближнего радиуса действия и низкой скорости передачи.

В работе реализован некогерентный RAKE-приёмник, функционирующий по принципу обнаружения полезной энергии. Принцип его действия основан на том, что вначале производится усиление и фильтрация принятого радиосигнала, затем выполняется квадратичное детектирование и интегрирование с целью получения энергии сигнала, а далее – сравнение с выбранным пороговым значением для принятия решения о наличии или отсутствии полезного сигнала.

На рис. 10 показана структурная схема некогерентного обнаружения СШП сигнала.

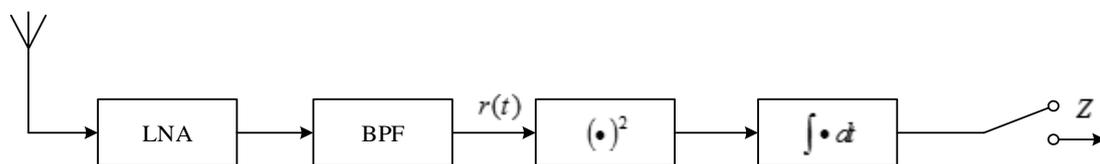


Рис. 10. Структурная схема некогерентного обнаружения СШП сигнала

Из-за наличия большого числа металлических и трубопроводных деталей в пространстве происходит «размывание» энергии СШП сигнала, что приводит к необходимости увеличения времени интегрирования. Однако, с другой стороны, из-за использования квадратичного устройства увеличение времени интегрирования приводит к возрастанию средней мощности шумов и, как следствие, снижению отношения сигнал/шум. Таким образом, необходимо найти наилучшее значения времени интегрирования и уровень порога, обеспечивающих минимизацию вероятности ошибочного приёма.

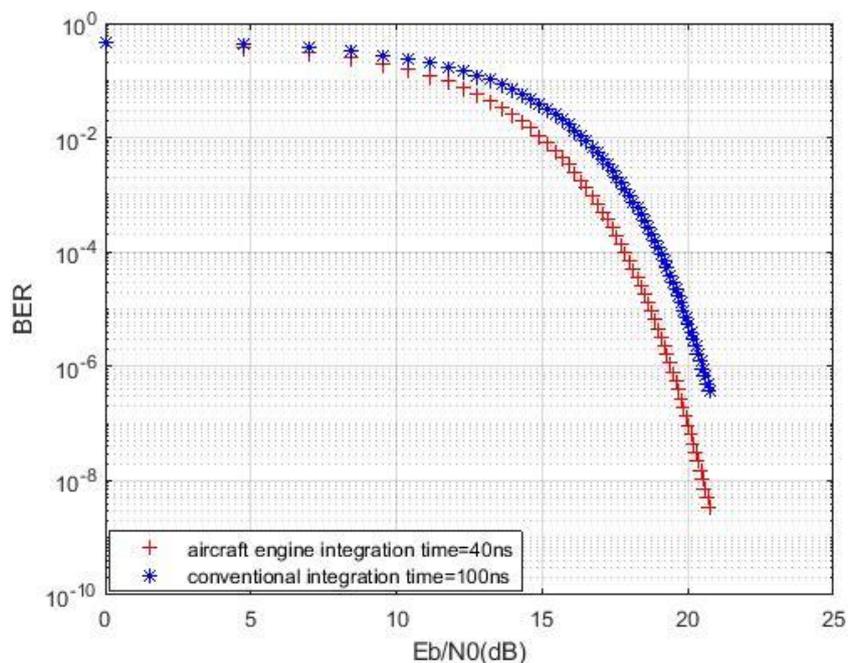


Рис. 11. Кривая помехоустойчивости обнаружения СШП сигнала

На основе методов оптимального обнаружения и имитационного моделирования была решена задача оптимизации параметров – времени интегрирования и уровня порога – для алгоритма некогерентного обнаружения СШП сигнала.

На рис. 11 показаны результаты моделирования кривой помехоустойчивости обнаружения СШП сигнала с типичным (синие маркеры *) и оптимальным (красные маркеры +) временем интегрирования, равным 40 нс. Как видно из анализа рис. 11, применение оптимального значения времени интегрирования позволяет обеспечить энергетический выигрыш около 1,2 дБ.

Полученное решение применимо в условиях, как превалирующими являются помехи, вызванные многолучевостью сигнала. Однако зачастую не меньшей проблемой является наличие на входе приёмника узкополосных помех, попадающих в полосу обработки сигнала. Причиной таких помех может является наличие близко работающих радиосистем различного предназначения: связных, управляющих, телеметрических и др. Таким образом, необходимо предусмотреть в приёмнике беспроводной сенсорной сети механизма, обеспечивающего приемлемое функционирование в условиях воздействия внешней узкополосной помехи.

На рис. 11 показана принципиальная схема приемника с подавлением узкополосных помех по квадратичному закону.

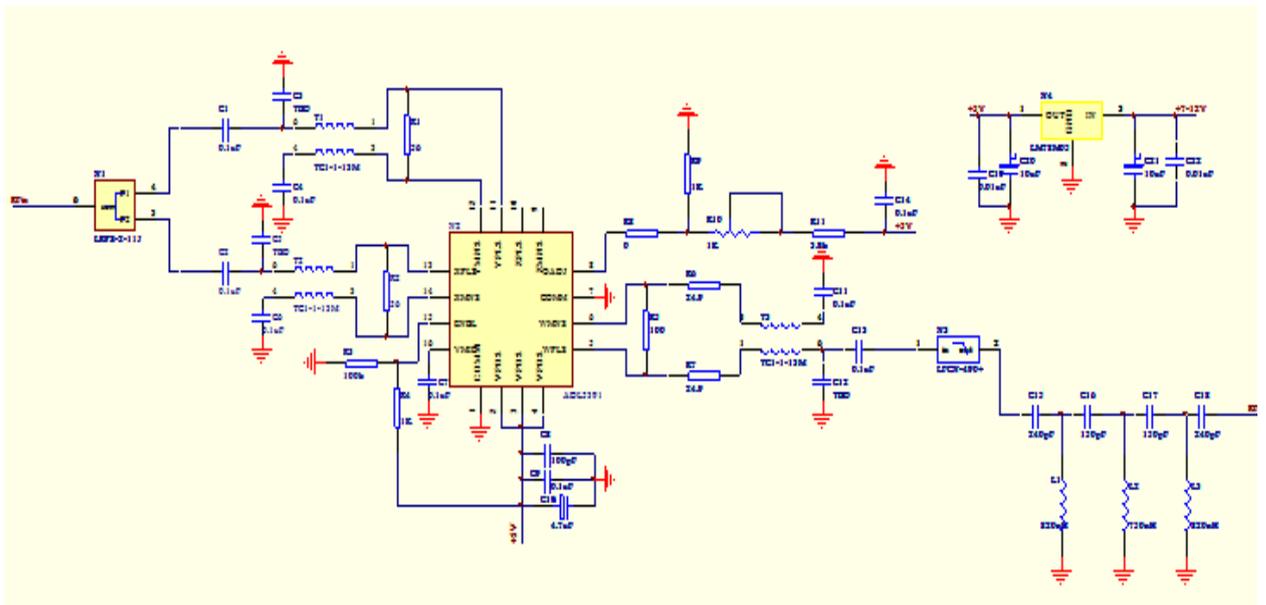


Рис. 11. Принципиальная схема приемника с подавлением узкополосных помех по квадратичному закону.

Квадратичное устройство реализовано с помощью умножителя ADL5391 компании ADI. Его максимальная рабочая частота составляет 2,5 ГГц, коэффициент усиления равен 0 дБ. Частота среза фильтра нижних частот по уровню -3 дБ составляет 650 МГц; Частота среза фильтра верхних частот по уровню -3 дБ составляет 8 МГц. Синтезированная полоса частот полосового фильтра 8 МГц... 650 МГц.

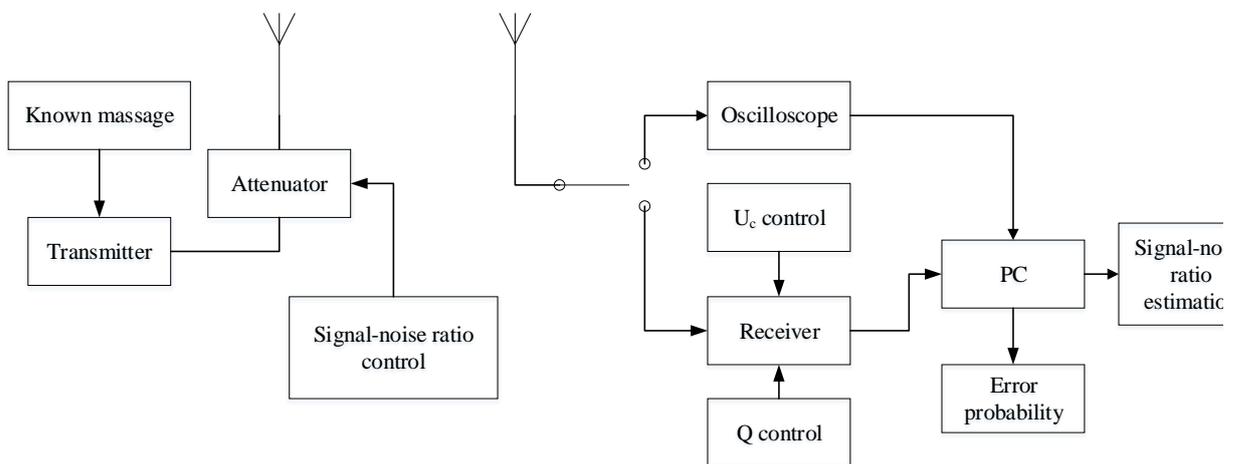


Рис. 12. Блок-схема тестирования по подавлению узкополосных помех с использованием квадратичного закона фильтрации

Для проверки работоспособности спроектированного устройства было проведено тестирование по подавлению узкополосных помех по схеме, представленной на рис. 12 и 13.

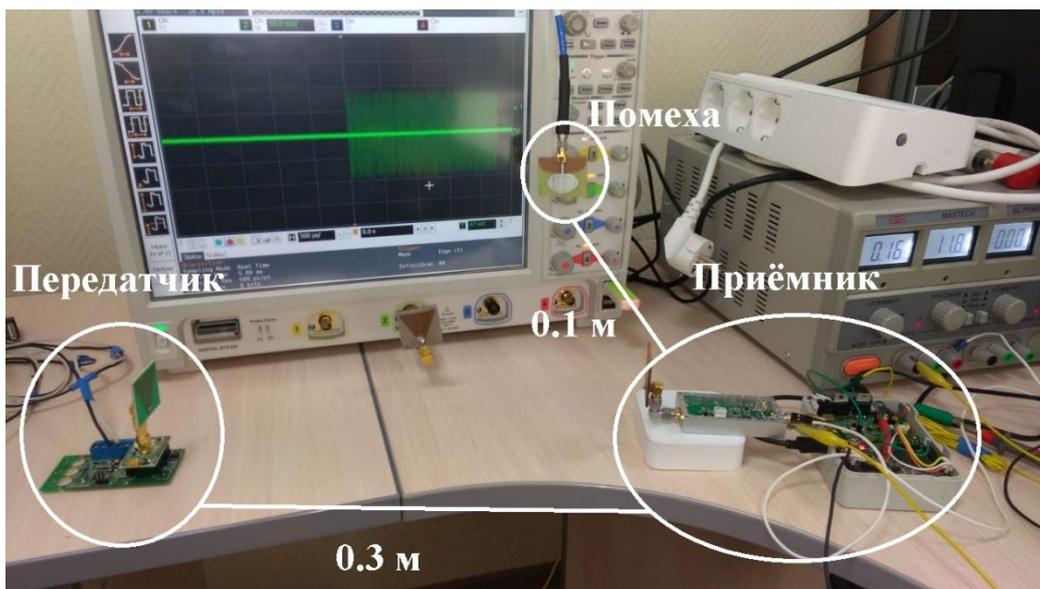


Рис. 13. Макет для тестирования подавления узкополосных помех

Передающий модуль передает 100 пакетов данных в секунду в течение 10 минут, и общий пакет данных составляет 60 000 ($2,34 \times 10^6$ бит). Во время тестирования отношение сигнал-шум регулируется путем изменения расстояния между передающим модулем и приемником или аттенюатора.

На рис. 14 показаны кривые помехоустойчивости, полученные в результате тестирования при использовании (сплошная линия) и отсутствия (пунктирная линия) квадратичной фильтрации.

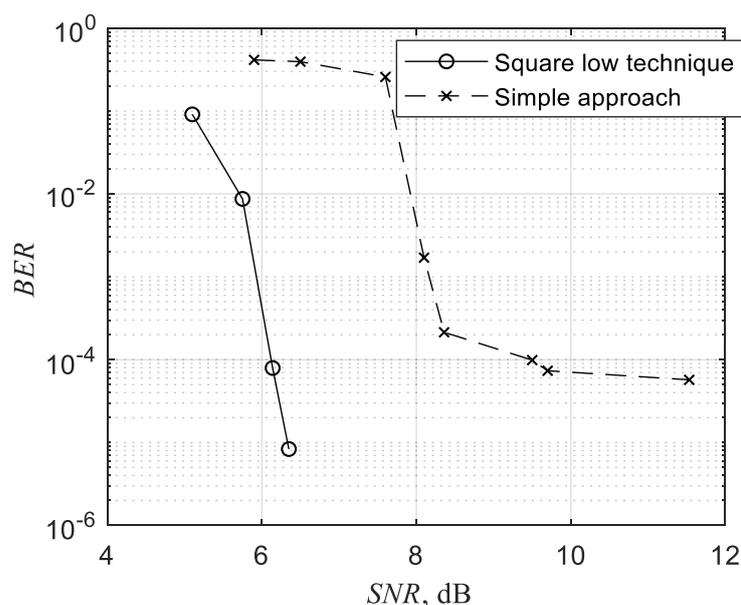


Рис. 14. Кривые помехоустойчивости, полученные при тестировании

Как видно из анализа зависимостей, представленных на рис. 14, применение квадратичной фильтрации позволяет обеспечить энергетический выигрыш при обнаружении СШП сигнала около 3,5 дБ.

Выводы

В работе проведены исследования, связанные с построением беспроводной сенсорной сети на основе сверхширокополосных сигналов, и получены следующие основные результаты.

- При разработке беспроводной сенсорной сети целесообразно использовать протоколы WirelessHART и ISA 100.11a.

- Из-за неслучайной локальной специфической структуры пространства авиационного двигателя распределение интервала времени прихода кластеров заметно отличается от распределения Пуассона и с хорошей степенью точности аппроксимируется распределением Вейбулла. Распределение амплитуд импульсов в кластере заметно отличается от распределения Рэлея, а распределение мощности кластеров заметно отличается от экспоненциального распределения. Обнаружено, что линейная модель с двумя наклонами может лучше соответствовать затуханию мощности импульсов в кластере.

- Разработано устройство формирования СШП сигналов с низким энергопотреблением на основе диода со ступенчатым восстановлением МР4023. Исследованы режимы работы устройства при изменении различных параметров схемы. На основе имитационного моделирования найдены оптимальные значения параметров, при которых удовлетворяются требования к амплитуде и ширины импульса системы и одновременно обеспечивается наибольший КПД генерации импульсов.

- Исследованы алгоритмы обнаружения СШП сигналов в условиях многолучёвости распространения и наличии узкополосных помех. Найдены наилучшие значения времени интегрирования и уровень порога, обеспечивающих минимизацию вероятности ошибочного приёма (энергетический выигрыш около 1,2 дБ). Предложен метод квадратичного детектирования, обеспечивающий устойчивость к воздействию узкополосных помех.

- Реализован лабораторный макет приёмопередатчика СШП сигналов, проведены тестовые испытания его работы и показана возможность его работы в составе беспроводной сенсорной сети анализа характеристик авиационного двигателя.

Результаты исследования были апробированы на различных российских и международных конференциях и семинарах. По результатам апробации опубликованы следующие работы.

1. Yu Chongzhi, Shang Xinwen, Hu Boxiong, A novel parallel two-box model for power amplifier, Vacuum Electronics, March, 2017.

2. Andrey V. Zhuravlev, G. Dong, V. Razevig, Margarita A. Chizh, B. Hu. Design of Experimental Setup for Imitation Modeling of the Radar System for Personnel Screening in Motion, PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium, p96, December 17–20, 2019, Xiamen, China.

3. Andrey V. Zhuravlev, G. Dong, V. Razevig, Margarita A. Chizh, B. Hu. Using Captured Data by RGB-D Video Sensor in Numerical Simulation Environment for the Development of New Microwave Personnel Screening System. PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium, p96, December 17–20, 2019, Xiamen China.

4. Yu Chongzhi, Hu Boxiong, Tang Kangsong, Wang Gang. Micro-strip predistortion circuit for millimeter-wave travelling wave tube” Journal of Electronics & Information Technology, Vol. 39, No. 2, Feb. 2017.

5. Boxiong Hu, Ge Dong. Analysis and simulation of a higher amplitude expansion millimeter wave predistortion linearizer, IEEE ICMMT, 2016, Beijing.

6. Yu Chongzhi, Shang Xinwen, Hu Boxiong, Novel type of Ultra-wideband Linearizer based on schottky diodes and phase shift, Chinese Journal of Vacuum Science and technology, Vol. 37, No. 4, April 2017.

7. Dong Ge, Hu Boxiong, Xi Aoxi. Study on influence of electric power conductor circuits on travelling wave tube amplifier phase stability. Journal of Electronics & Information Technology, Vol. 39, No. 2, Feb 2017.

8. Ge Dong, Boxiong Hu. Study on the Phase Stability of High-Power Traveling-Wave Tube Amplifiers. IEEE ICMMT, 2016, Beijing.

9. Б. Ху, Ю. Тропкина, А. Удодов, С. Макаров. Избегание узкополосных помех в СШП беспроводное сенсорное устройство, использующее квадратичную технологию. Материалы XLVII Недели Науки СПбПУ, Санкт-Петербург, 2019.