

УДК 621.391, 621.396

**Сверхширокополосная СВЧ приемопередающая платформа на основе хаотических сигналов**

**Ultrawideband microwave transceiver platform based on chaotic signals.**

А.С. Дмитриев, А.В. Клецов, А.М. Лактюшкин, А.И. Панас, В. Ю Синякин

Dmitriev A.S., Kletsov A.V., Laktushkin A.M., Panas A.I., Sinyakin V.Yu.

**Аннотация**

Показывается, что технология прямохаотической передачи информации может обеспечивать высокоэффективную сверхширокополосную связь для беспроводных сенсорных сетей. Предлагается архитектура приемопередатчика на основе этой технологии. Описывается макет, разработанного малогабаритного устройства со сверхширокополосным хаотическим сигналом диапазона 3,1 – 5,1 ГГц, предназначенного для беспроводных наушников. Предполагается, что потребляемая мощность устройства при использовании технологии КМОП 0,13 микрон составит 20 мВт. На основании полученных результатов делается вывод, что разработанная архитектура может быть использована в качестве универсальной платформы для домашних беспроводных приложений.

In this paper a possibility of efficient information exchange in ultrawideband (UWB) wireless sensor networks by means of direct chaotic communication technology is described. The structure of direct chaotic transceiver is proposed. Miniature testbed of the developed wireless headset using 3,1–5,1 GHz UWB chaotic signal is described. Power consumption of the device built with 0.13  $\mu\text{m}$  CMOS technology is assumed to be 20 mW. The obtained results allow us to draw

a conclusion that the designed architecture can be used as universal platform for wireless home applications.

## **Введение**

С тех пор как в начале 2002 года федеральная комиссия по коммуникациям США (FCC) опубликовала частотный диапазон и спектральную маску мощности для нелицензируемых сверхширокополосных (СШП) систем связи [1], был предложен и исследован ряд интересных подходов для коммерческих приложений в полосе 3,1-10,6 ГГц.

Основной областью применения СШП сигналов являются беспроводные персональные локальные сети (wireless personal area networks – WPAN), для которых особое значение имеют низкая стоимость аппаратуры и малое энергопотребление. Такие сети разрабатываются, в частности, в рамках стандарта IEEE 802.15.4a, предназначенного для передачи данных со скоростями до 1-3 Мбит/с (агрегированная по сети скорость до 10 Мбит /с) на расстояния до 100 метров. Кроме того устройства стандарта должны иметь возможность определять свое местоположение в сети. Для реализации задач стандарта предложено использовать несколько типов сигналов: ультракороткие импульсы и последовательности таких импульсов [2], сигналы с расширением спектра, хаотические радиоимпульсы [3, 4] и сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

Беспроводные сверхширокополосные средства связи для «умных домов и офисов» рассматриваются как одни из наиболее привлекательных продуктов, которые могут существенно расширить рынок WPAN. Кроме того, множество вспомогательных коммуникационных устройств также должны быть беспроводными и едиными, например, с сотовыми телефонами для более удобного использования.

При разработке сверхширокополосных WPAN необходимо учитывать ряд серьезных ограничений на излучаемый сигнал.

Во-первых, максимальная спектральная плотность сверхширокополосных сигналов ограничена величиной  $-41,3$  дБм/МГц, поэтому даже при использовании всего разрешенного диапазона интегральная излучаемая мощность не должна превышать  $-2,4$  дБм.

Вторым ограничением, накладываемым на параметры излучения, является ограничение на пиковую излучаемую мощность, которая не должна превышать  $0$  дБм в полосе  $50$  МГц. Таким образом, для полосы  $500$  МГц мы имеем ограничение в  $20$  дБм и для полосы  $2$  ГГц –  $32$  дБм.

Наконец, третье ограничение на параметры накладывается технологией. Как правило, напряжение питания в СШП нелицензируемых системах связи не превышает  $2$  В. Поэтому и амплитуда напряжения на антенне не будет превышать  $1$  В. Если антенна согласована на  $50$  Ом, то пиковая мощность будет ограничена  $10$  мВт.

Исходной идеей для реализации сверхширокополосной связи была идея использования в качестве носителя информации сверхкоротких импульсов (при полосе частот  $7,5$  ГГц длина импульса около  $150$  псек.). Согласно этой идее каждому импульсу соответствует один бит информации, что делает обработку сигнала в приемнике очень простой.

Ряд предложений по использованию этой технологии был внесен при разработке стандарта IEEE 802.15.3a. Однако расчеты показывают, что дальность передачи при технологическом ограничении на амплитуду будет не более  $10$  метров.

Это обстоятельство не было принципиальным при разработке стандарта для высокоскоростной передачи данных, но является очень существенным при разработке стандарта IEEE 802.15.4a для низкоскоростной передачи данных. В этом стандарте дальность передачи должна быть, как минимум,  $30$  м. Для того, чтобы реализовать такие дальности нужно иметь на входе антенны напряжение  $\sim 3$  В, что входит в противоречие с технологическими тенденциями к снижению напряжения питания и потребляемой мощности.

Еще более драматичной ситуация будет, если потребуется обеспечить дальность передачи на 50-60 и более метров.

Заметим, что из трех ограничений на излучаемую мощность именно третье ограничение является наиболее тяжелым для импульсных систем. Действительно, первое ограничение можно обойти, снижая скорость передачи, т.е. уменьшая число излучаемых в единицу времени импульсов. Второе ограничение оставляет возможность обеспечить дальность передачи до 1000 м (в полосе 2 ГГц и при скорости 1000 бит/с). Но третье ограничение снижает максимальную дальность передачи до 10 метров.

Выходом из этого положения является переход от передачи одного бита одним импульсом к передаче одного бита серией импульсов. В этом случае, при сохранении энергии излучаемой на один бит, можно снизить энергию, приходящуюся на один импульс, пропорционально числу импульсов в серии. Это означает переход от сигналов с единичной базой (процессингом) к сигналам с большой базой.

Переход к сигналам с большой базой содержится в той или иной форме в большинстве предложений по стандарту IEEE 802.15.4a. Однако при этом исходная идея простоты импульсных систем начинает размываться.

Под прямохаотическими системами будем понимать системы, у которых хаотический носитель формируется непосредственно в области частот передачи информации, например в радио- или СВЧ-диапазоне частот. Полезная информация вводится в хаотический сигнал и извлекается из хаотического сигнала непосредственно в этом диапазоне. Подробнее прямохаотические системы связи описаны в [5].

С некоторыми оговорками к прямохаотическим системам можно отнести и системы, в которых несущий хаотический сигнал в радио или СВЧ-диапазоне получают путем некоторого преобразования исходного (более низкочастотного) хаотического сигнала, например, путем воздействия его на ГУН.

Для прямохаотических систем связи могут быть использованы следующие виды сигналов:

- маломодовые (многомодовые) хаотические колебания, генерируемые нелинейными системами в указанных диапазонах частот;
- фазовый хаос, получаемый с помощью систем ФАПЧ;
- хаос, получаемый в указанных частотных диапазонах, путем преобразования «амплитудно-частотного хаоса» в «фазовый хаос».

Прямохаотические сигналы могут быть узкополосными, широкополосными и сверхширокополосными.

Среди прямохаотических систем особо выделим системы с хаотическими радиоимпульсами. Хаотический радиоимпульс является базовым понятием для этих систем. В широкополосных и сверхширокополосных прямохаотических системах спектр мощности потока таких импульсов близок к спектру мощности порождающего немодулированного хаотического сигнала.

Прямохаотические системы, у которых спектр мощности не зависит от длины импульса, а, следовательно, и от величины базы сигнала не имеют энергетических ограничений свойственных системам с короткими импульсами и при любой скорости передачи сохраняют в системах связи идеологию «один бит – один импульс». Это является одним из главных их естественных преимуществ по сравнению с сверхширокополосными системами, использующими сверхкороткие импульсы, и существенно упрощает аппаратные решения.

Хаотические сигналы обладают рядом свойств, которые делают их привлекательными для использования в локальной связи: естественная сверхширокополосность, обеспечивающая простоту генерации и модуляции сигнала по сравнению с традиционными системами расширения спектра; устойчивость к эффекту затухания сигнала в средах с многолучевым распространением, типичных для жилых помещений, офисов и промышленных сооружений; возможность использования некогерентного

приема, который может быть легко реализован с меньшим по сравнению с альтернативными решениями числом компонент (без смесителей и ФАПЧ).

В статье вводится архитектура маломощной приемопередающей платформы, основанной на прямохаотической технологии для применения в системах типа «умный дом и офис». Предполагается, что вся хаотическая система целиком будет потреблять около 20 мВт при использовании технологии КМОП 0,13 микрон.

### **Хаотический сверхширокополосный приемопередатчик**

Хаотический сверхширокополосный приемопередатчик состоит из хаотического генератора, ключа-модулятора, усилителя мощности, детектора огибающей, малошумящего усилителя и цифрового блока. Конфигурация приемопередатчика, а также форма сигналов в его основных узлах показаны на рис. 1. В качестве детектора огибающей используется СВЧ сверхширокополосный логарифмический детектор с дополнительным малошумящим усилителем на входе и фильтром нижних частот на выходе. Использование такого некогерентного приемника существенно упрощает структуру всей системы в целом.

Работает приемопередатчик следующим образом. Хаотический генератор производит непрерывный хаотический сверхширокополосный сигнал в полосе частот 3,1-5,1 ГГц. Выходной сигнал генератора усиливается на 10 дБ и затем модулируется с помощью ключа-модулятора методом «On-Off keying» модуляции. Ключ помимо функции модулятора выполняет также функцию коммутации антенны между передатчиком и приемником. Например, в режиме передачи один из каналов ключа соединяет выход усилителя мощности с антенной, в то время как второй канал, соединяющий антенну и детектор, отключен. В режиме приёма всё происходит с точностью до наоборот. Модулятор управляется информационным сигналом, поступающим с цифровой платы (на рис.1. - сигнал 2). Модулированный сигнал (на рис.1. - сигнал 3) и принимаемый сигнал с антенны (на рис.1. -

сигнал 4) выглядят почти одинаково, за исключением присутствия в последнем шумовой составляющей. Сверхширокополосная СВЧ антенна приемопередатчика используется как для излучения сигналов в эфир, так и для приема сигналов.

В режиме приема, формирующийся на выходе демодулятора поток НЧ импульсов (на рис.1. - сигнал 5) оцифровывается с помощью АЦП, или, в простейшем случае, порогового устройства (на рис.1. - сигнал 6), после чего поступает в цифровой блок, где подвергается дальнейшей обработке.

*Генератор хаоса* должен обеспечивать стабильную генерацию сигнала при допустимой неравномерности спектральной плотности в заданной полосе частот. Существует несколько различных типов хаотических генераторов. В рассматриваемой конструкции приемопередатчика используется генератор хаоса кольцевого типа [6], структура которого представлена на рис. 2. Генератор включает в себя три усилительные интегральные схемы. Все усилители соединены последовательно, формируя кольцо обратной связи, в которое включен также частотно-избирательный ответвитель. Частотно-избирательный ответвитель отводит большую часть мощности сигнала в выходную нагрузку, а оставшуюся часть подает на вход первого усилителя. Таким образом, три усилителя и ответвитель образуют замкнутое кольцо. Для улучшения спектральных характеристик генерируемого сигнала, между усилителями помещены дополнительные частотно-избирательные структуры. Наличие между усилительными каскадами частотно-избирательных структур, равно как и использование частотно-избирательного ответвителя, не нарушает общей концепции генерации, но помогает формировать хаотический сигнал с заданными спектральными характеристиками. Полоса частот генерируемого хаотического сигнала определяется соответствующей рабочей полосой используемых усилительных интегральных схем. Например, если рабочая полоса усилителя составляет 100-5500 МГц, то спектр мощности располагается точно в этом же диапазоне частот.

В макете приемопередатчика генератор хаоса реализован в виде микрополоскового устройства. В качестве усилителей используются микрочипы ADA4743. Функцию ответвителя выполняет балансный микрополосковый элемент с коэффициентом ответвления 10 дБ, рассчитанный на среднюю частоту требуемого диапазона частот (4 ГГц).

Анализ токов через усилители показывает, что первый усилитель (по направлению распространения сигнала по кольцевой схеме) работает в режиме малого сигнала, второй – в нелинейном режиме, а третий – в ограничительном режиме. Настройка режимов генератора осуществляется либо путем варьирования напряжения питания, либо путем изменения двух переменных емкостей (рис. 2), располагаемых между усилителями.

Сигнал на выходе ответвителя имеет полосу шире, чем 2 ГГц, и простирается в область низких частот. Поэтому на его выходе помещен фильтр высоких частот с частотой среза 3 ГГц. Созданный генератор производит хаотический сигнал мощностью 1 мВт в полосе частот 3,1-5,1 ГГц (рис. 4).

Разработка генератора базировалась на основе схемотехнического моделирования в пакете Agilent ADS. Подбор режимов генерации осуществлялся на основе анализа карт режимов генерации при изменении параметров. На рис. 3 представлен фрагмент реализации хаотических колебаний для одного из типовых режимов генератора. Применявшаяся методика моделирования СВЧ генераторов хаоса изложена в [7].

**Ключ-модулятор** выполняет две функции. Первая из них – формирование последовательности хаотических радиоимпульсов на выходе приемопередатчика в соответствии с передаваемой цифровой информацией. В соответствии с другой функцией это устройство по-сути является электронным переключателем, который соединяет общую антенну с передатчиком или приемником в зависимости от управляющего сигнала. Модулятор реализован на основе микросхемы НМС 336.

*Приемник огибающей* СВЧ сигнала усиливает сверхширокополосные хаотические радиоимпульсы с полосой частот 3-5 ГГц и длительностью 100 нс, затем демодулирует их, фильтрует для получения огибающей и усиливает последнюю. Амплитуда сигнала на выходе приемника представляет собой логарифмическую функцию от мощности входного сигнала. Приемник реализован на основе логарифмического детектора AD8318. Данная микросхема предназначена для работы в полосе от 1 МГц до 8 ГГц. Её динамический диапазон простирается от -60 до 0 дБм. Максимальная частота повторения импульсов 60 МГц.

*Цифровая плата* производит обмен данными с персональным компьютером через LPT порт, формирует пакеты данных, осуществляет помехоустойчивое кодирование данных ПК, посылает поток низкочастотных импульсов (закодированных данных) на модулятор СВЧ передатчика. Кроме того, она принимает и декодирует поток низкочастотных импульсов от СВЧ демодулятора для передачи и извлечения данных в ПК, осуществляет переключение между режимами прием/передача и управляет потреблением мощности приёмопередатчика. Цифровой блок включает в себя микроконтроллер (микросхема ATmega48), ПЛИС (микросхема EPM7064STC44-10), систему управления питанием и источник тестовых сигналов.

### **Моделирование статистических характеристик**

Для оценки статистических характеристик разрабатываемого хаотического сверхширокополосного приемопередатчика было проведено компьютерное моделирование, посредством которого для передаваемой информации определялась вероятность ошибок на бит (BER) и на пакет (PER), а также рассчитывался энергетический потенциал канала связи.

Сначала характеристики системы были оценены на основе компьютерного моделирования в канале с белым гауссовым шумом и в нескольких многолучевых каналах CM1 - CM9 (CM - channel model),

рекомендованных в стандарте IEEE 802.15.4a. Модели CM1 и CM2 описывают среду распространения сигнала с прямой видимостью (Line of sight - LOS) и без прямой видимости (Non line of Sight - NLOS) в жилых помещениях. Модели CM3 и CM4 описывают LOS и NLOS каналы в офисных помещениях, а модели CM5 и CM6 описывают эти каналы вне помещений. Среда распространения сигнала в условиях заводского помещения является одной из самых важных сред с точки зрения стандарта 802.15.4a. Эти среды представлены моделями CM7 и CM8 для LOS и NLOS каналов, соответственно. Модель канала CM9 описывает среду распространения для сельской местности.

Моделировались 100 различных импульсных откликов канала. Характеристики BER и PER хаотической СШП системы для многолучевого канала стандарта IEEE 802.15.4a показаны на рис. 5 и 6, причём случай передачи данных в канале с белым гауссовым шумом (БГШ канале) изображён знаком  $\circ$ , в жилом помещении с прямой видимостью (CM1) -  $\diamond$ , вне помещения с прямой видимостью -  $\cong$ , в заводском помещении -  $+$ . Если считать, что работоспособность системы сохраняется при  $PER \leq 10^{-2}$ , то можно ожидать, что для хаотических приемников минимальная величина  $E_b/N_0$  будет изменяться в пределах от 18 до 20 дБ в зависимости от канала. Оказалось, что в условиях многолучевого распространения система испытывает лишь незначительное ухудшение рабочих характеристик. Это, главным образом, вызвано широкополосностью хаотического сигнала и достаточным защитным интервалом между импульсами.

Далее был рассчитан энергетический потенциал канала связи. Таблица 1 содержит анализ энергетического потенциала канала для различных скоростей передачи данных - от 1 кБит/с до 1 Мбит/с. Излучаемая передатчиком мощность ( $P_T$ ) соответствует  $-8,3$  дБм, что удовлетворяет спектральной маске FCC, равной  $-41,3$  дБм/МГц.

## Экспериментальный макет и его исследование

Макеты приемопередатчиков были исследованы в ряде экспериментов, целями которых были:

- отработка техники настройки приемопередатчиков;
- проверка эффективности передающей системы в целом;
- оценка качества связи (BER);
- демонстрация беспроводной передачи реальных цифровых потоков на примере цифровых звукозаписей;
- анализ работоспособности системы в зависимости от дальности.

После предварительных настроек и испытаний макет хаотического приемопередатчика, внешний вид которого изображён на рис. 7, использовался для передачи аудио файлов в формате MP3. Такие файлы состоят из множества независимых фреймов длиной около 1 Кбайт каждый. Для передачи фрейма ПК разбивает его на пакеты. После этого каждый пакет получает уникальный номер, который включает в себя число пакетов внутри фрейма и номер фрейма. Процесс передачи и проигрывания музыкальных файлов производится следующим образом. ПК, воспроизводящий MP3 файл (плеер), посылает запрос другому ПК, на котором этот файл хранится. Если пакет по какой-то причине не получен, производится повторный запрос. Принятые фреймы записываются в буфер плеера ПК. Когда буфер заполняется, данные буфера распаковываются и направляются на музыкальное устройство ПК.

Скорость передачи в экспериментах примерно соответствовала битрейту файла, и составляла 64 – 196 кбит/с. Устройство испытывалось при передаче аудио данных на расстояниях до 30 метров. На дистанции 30 метров максимальная скорость передачи данных составила 64 Кбит/с. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 8.

Созданный сверхширокополосный СВЧ приёмопередатчик, может послужить прототипом устройства беспроводной связи для беспроводных наушников.

## **Заключение**

В техническом плане разработанные макеты удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым стандартом IEEE 802.15.4a. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что создана оригинальная сверхширокополосная платформа для приемопередатчиков, которая обладает большой гибкостью и масштабируемостью как по скорости передачи (от 100 Кбит/с до 20-50 Мбит/с), так и по дальности. Это обстоятельство обеспечивает платформе широкие области применения. В частности, такие приемопередатчики покрывают основные потребности в каналах связи для «беспроводных домов и офисов» со скоростями передачи, соответствующими требованиям 4G.

Производство продуктов на основе платформы не требует «сверхтехнологичных» производств и может быть реализовано на типичных отечественных предприятиях радиотехнического профиля. Потенциальный рынок для продуктов на основе платформы только в секторе DECT и сотовой телефонии составляет 100-150 млрд. рублей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, First Report and Order. Federal Communications Commission (FCC), ET Docket 98-153, FCC 02-48; Adopted: February 14, 2002; Released: April 22, 2002.
2. *Win, M. Z., Scholtz, R. A.*, Impulse Radio: How it works. – IEEE Communications Letters, 1998, Vol. 2, No. 2.
3. *Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О., Кяргинский Б.Е.* Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне. – Радиотехника и электроника, 2001, Т. 46, №2.
4. *Dmitriev, A.S., Kletsov, A.V., Kuznetsov, A.V., Laktushkin, A.M., Panas, A.I.* Ultrawideband direct chaotic communications for low-bitrate information transmission. – Proc. ICCSC'2004, June 30 - July 2, Moscow, Russia
5. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. – М.: Физматлит. 2002.
6. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кяргинский Б.Е., Лактюшкин А.М., Панас А.И.* Способ генерирования широкополосных СВЧ хаотических сигналов и Генератор широкополосных СВЧ хаотических сигналов, заявка рег. № 2005110493, от 12.04.2005.
7. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Хилинский А.Д.* Принципы компьютерного моделирования транзисторных генераторов хаоса в пакете ADS (Advanced Design System), Препринт ИРЭ РАН. 2003. № 5(633).

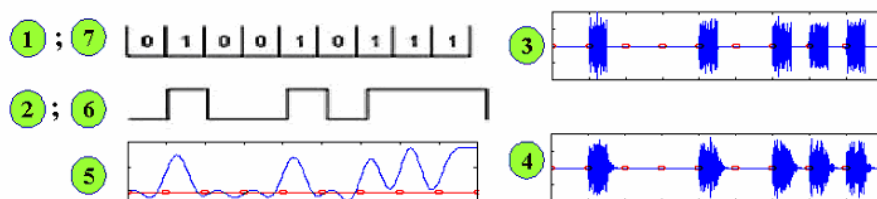
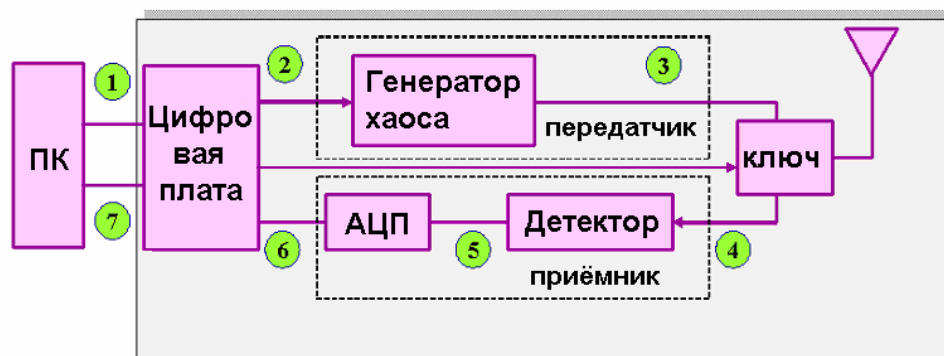


Рис.1.

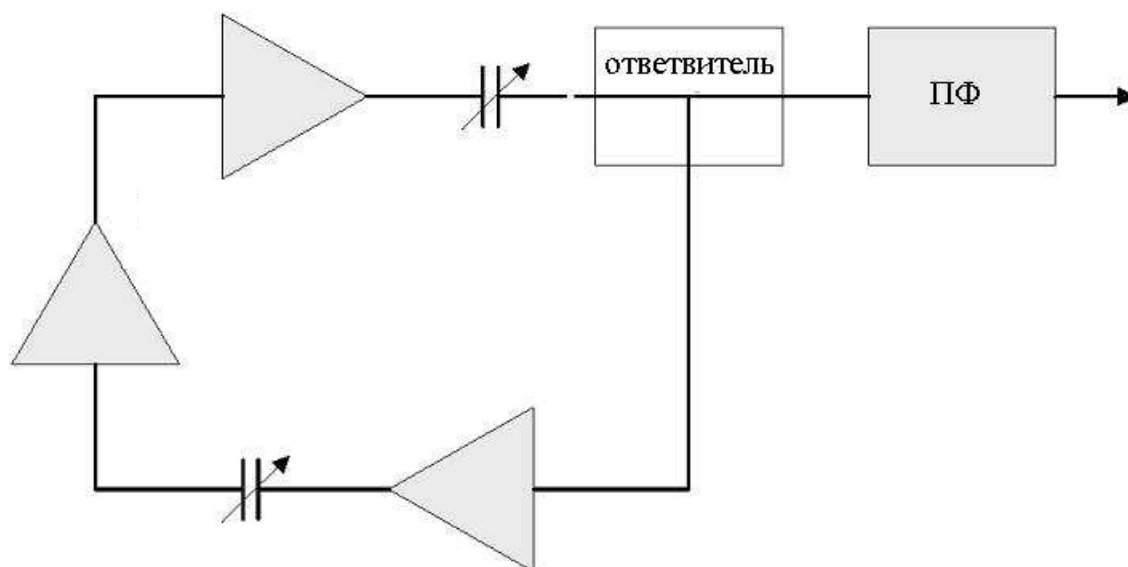


Рис.2.

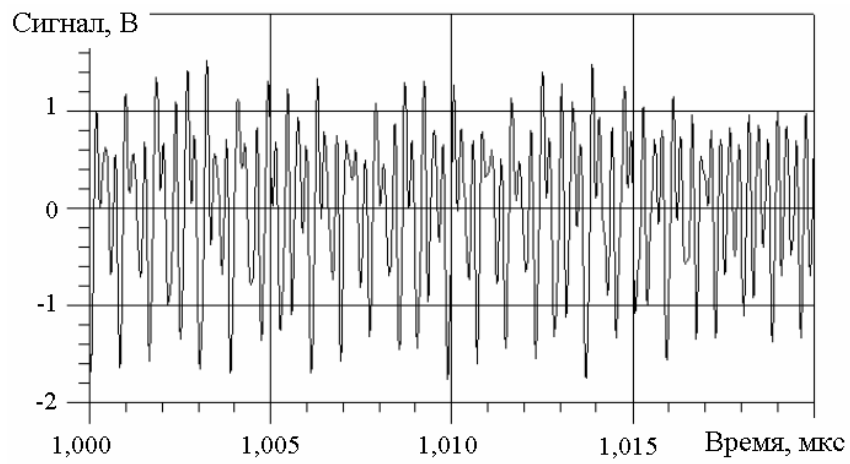


Рис.3.

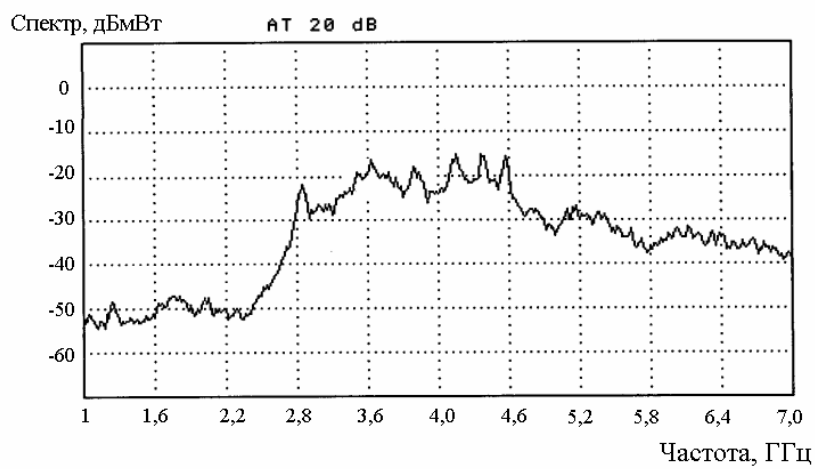


Рис.4.

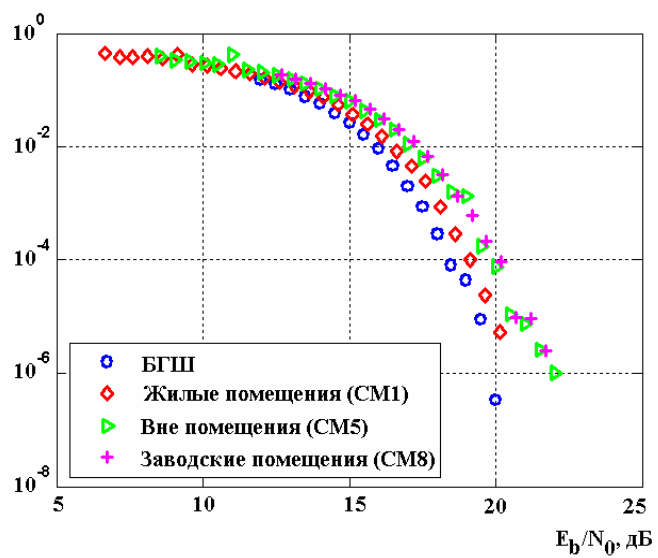


Рис.5.

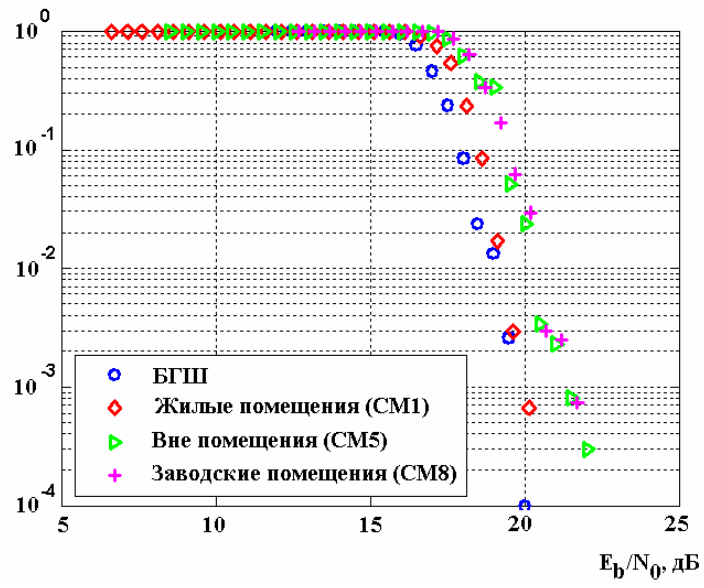


Рис.6.

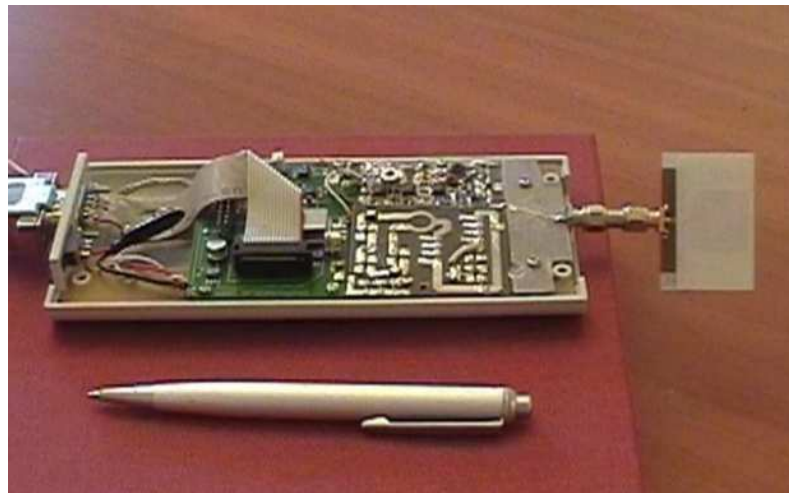


Рис.7.

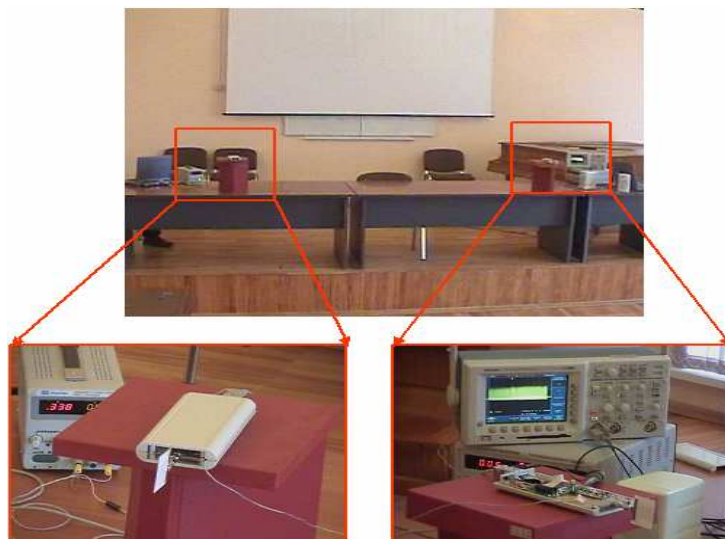


Рис.8.

ТАБЛИЦА 1. Анализ бюджета связи хаотической сверхширокополосной системы для различных скоростей передачи данных

Параметр	Значение	Значение	Значение
Скорость передачи ( $R_b$ ), Кбит/с	1	10	2500
Средняя мощность сигнала передатчика ( $P_T$ ), дБм	-30	-20	-6
Геометрическая центральная частота ( $F_c$ ), ГГц	4.1	4.1	4.1
Ослабление сигнала на 1 м ( $L_1$ ), дБ	44.7	44.7	44.7
Ослабление сигнала на 30 м ( $L_2$ ), дБ	29.5	29.5	29.5
Усиление антенны передатчика ( $G_T$ ), дБ	0	0	0
Усиление антенны приёмника ( $G_R$ ), дБ	-3	-3	-3
Мощность на приёмнике на 30 м ( $P_R = P_T + G_T + G_R - L_1 - L_2$ ), дБм	-107.2	-97.2	-83.2
Средняя мощность шума на бит ( $N = -174 + 10 \cdot \log_{10}(R_b)$ ), дБм	-144.0	-134.0	-110.0
Коэффициент шума приёмника относительно антенны ( $NF$ ), дБ	4.0	4.0	4.0
Общая средняя мощность шума на бит ( $P_N = N + NF$ ), дБм	-137	-127	-107
Минимум $E_b/N_o$ ( $S$ ), дБ	18.5	18.5	18.5
Скорость передачи в непрерывном режиме, кбит/с	2	20	2000
Степень кодирования	0.5	0.5	0.5
Потери при реализации ( $I$ ), дБ	3	3	3
Энергетический запас линии связи на 30 м ( $M = P_R - P_N - S - I$ ), дБ	8.3	8.3	0.2
Чувствительность приёмника, дБ	-115.5	-105.5	-85.3