

Технология передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов (UWB)

На фоне острой конкуренции в области создания беспроводных систем связи, особенно для локальных вычислительных сетей и персонального доступа, разработчики и производители оборудования обратили пристальное внимание на такой раритет радиотехники как импульсная радиосвязь.

Владимир Дмитриев

Термин Ultra Wideband (UWB) означает в настоящее время целый ряд радиотехнических понятий: радиосигнал без несущей, сверхширокополосный радиосигнал (СШПС), очень короткий радиоимпульс, временной импульс (time domain, «чип»). Данный сигнал является широкополосным, так как отношение его ширины полосы к значению центральной частоты спектра сигнала составляет величину, большую единицы (для традиционно используемых радиосигналов в радиосвязи это отношение существенно меньше). Для СШПС понятие несущего колебания не определено (можно рассматривать, и то только условно, центральную частоту спектра). Таким образом, термин СШПС (UWB) скорее является нарицательным именем, которое дали физическому процессу в конце 80-х годов.

Определение термина «сверхширокополосные сигналы» — Ultra Wideband — впервые было введено агентством DARPA Министерства обороны США в 1990 году и скорректировано Федеральной комиссией связи США (FCC) в 2000 году. По определению FCC, к UWB относятся все сигналы со спектральной полосой не менее 1,5 ГГц, а также сигналы, у которых ширина спектральной полосы составляет по крайней мере 25% от значения центральной частоты. Данное определение вполне однозначно связано с достигнутым в настоящее время уровнем развития UWB-сигналов и систем.

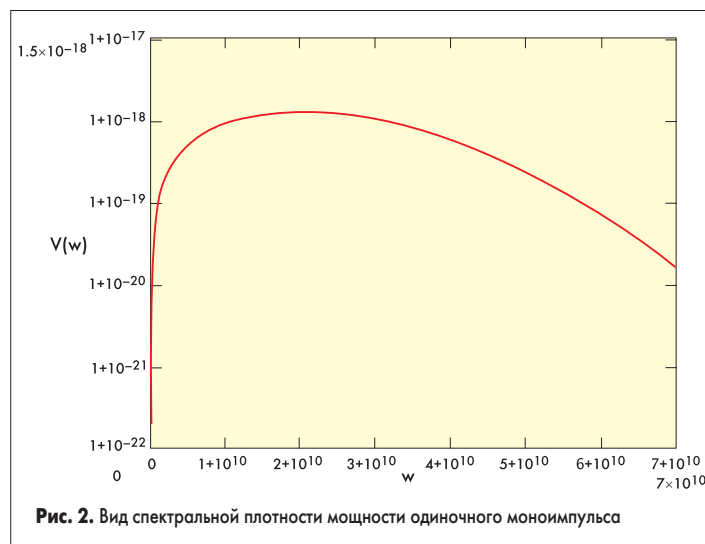
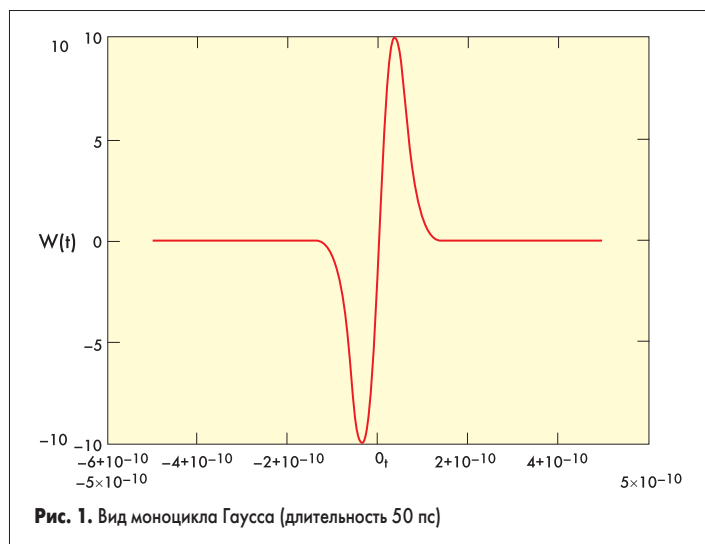
Полное название новой технологии — Ultra Wideband Pulse Technology — сверхширокополосная импульсная технология. Очередной этап становления этой новой технологии наступил в феврале 2003 года, когда IEEE одобрил беспроводной стандарт 802.16a, основанный, в частности, на UWB и ориентированный на использование при строительстве беспроводных сетей масштаба города — Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN).

Краткий исторический экскурс

Ретроспективу появления и развития данного направления радиолокации, а впоследствии и связи, сделать довольно затруднительно, так как оно родилось в недрах военно-промышленных комплексов Советского Союза и США в разгар «холодной войны». История не нова, достаточно вспомнить кодирование радиосигналов (его могучий отклик в мирной жизни называется CDMA и имеет серьезное будущее как 3G). Другим примером является спутниковая система подвижной радиосвязи Иридиум и т. п. Данное противостояние между отечественной наукой и зарубежными исследователями (и практиками) в области радиотехники продолжается более ста лет, начиная со спора о вкладе в «изобретение радио» А. С. Попова и Г. Маркони.

Известно, что А. С. Попов и его последователь Г. Маркони в своих первых системах радиосвязи также использовали именно искровые сигналы без несущей, появляющиеся при искровом разряде электромагнитные импульсы принимались на расстояниях в десятки километров. В русской армии в те годы в качестве транспортного средства широко использовались двуколки. Так вот, одна полевая радиостанция размещалась более чем на десяти двуколках!

Однако дальше история развития радио сделала резкий поворот в сторону использования гармонических (синусоидальных) сигналов и до сих пор подавляющее большинство систем связи, локации, радионавигации и т. п. использует именно гармонические сигналы. Развитие радиотехники в двадцатом веке свелось к отработке путей использования электромагнитных колебаний разных диапазонов частот и созданию все более эффективных методов их кодирования (модуляции) полезными данными. Причем сами гармонические сигналы выполняют в



этом случае лишь роль переносчиков информации и называются «несущими колебаниями» для импульсных систем локации, радионавигации, цифровых систем связи с шумоподобными сигналами и для подавляющего большинства остальных систем. При этом их общей важной чертой является то, что ширина спектра частот, занимаемых такими сигналами, всегда значительно меньше значения частоты несущих колебаний, поэтому их называют «узкополосными». Несмотря на появление множества достаточно простых способов генерирования и обработки гармонических колебаний, об импульсной технологии радиосвязи забыли не до конца. О том, что сигналы можно передавать как дискретные электромагнитные импульсы, снова вспомнили в 40–50 годах двадцатого столетия, когда быстрыми темпами начала развиваться радиолокация. Предпосылками для этого послужила уже достаточно ясно осознаваемая учеными и инженерами совокупность проблем, связанных с системами на основе гармонических колебаний.

Скорее всего, первые технические приложения и последующие разработки СШПС появились в конце 60-х — начале 70-х годов. (Здесь мы сошлемся на исчерпывающую статью: Terence W. Barrett. History of UltraWideBand (UWB) Radar&Communications: Pioneers and Innovators. Progress In Electromagnetics. Symposium 2000 (PIERS2000). См. также: И. Шахнович. Сверхширокополосная связь. Второе рождение? // Электроника. 2001. № 4.)

В США значительной вехой развития данного направления радиотехники считают патенты Д. Росса и К. Роббинса (№ 3 728 632, датированный 17 апреля 1973 года, «Передающая и детектирующая система для генерации и приема импульсных сигналов без искажений для короткоимпульсной коммуникационной системы» и № 3 662 316 «Короткоимпульсный приемник»). Однако (редкое исключение) американские эксперты в данной области признают очень большое значение работ советских ученых, особенно представителей Военной академии имени Можайского. Важным этапом в развитии UWB-технологий стало появление стробоскопических осциллографов с частотой сканирования свыше 10 ГГц как за рубежом (Hewlett-Packard), так и в СССР.

Таким образом, к началу 1970-х основные технические возможности для создания радиотехнических систем с UWB-сигналами были достигнуты. Это были генераторы, приемники сигналов и антенные системы. Настала пора их совершенствования, внедрения и создания на их основе практических устройств и систем. Конечно, при этом аккумулировались все необходимые достижения технологий в смежных областях, особенно в электронике. Например, туннельный диод, изобретенный нобелевским лауреатом Лео Есаки, является одним из наиболее чувствительных устройств, подходящих для обработки маломощных сигналов длительностью в доли пикосекунды.

Построение аппаратуры UWB-систем с точки зрения схемотехнических решений — существенно более простая задача, чем создание сходных узкополосных систем. Ведь по сути UWB-передатчик может состоять всего из одного транзистора, работающего в ключевом режиме «открыт-закрыт». А короткий импульс с его выхода может непосредственно подаваться на специальную сверхширокополосную антенну, которая сейчас обычно реализуется с использованием диэлектрической подложки с малыми потерями и в типовом случае имеет размеры, сравнимые со стандартной пластиковой карточкой. На другом конце канала связи находится UWB-приемник, который также по построению проще узкополосных приемников. Чисто технически UWB-системы уже сегодня могут строиться полностью на основе готовых функциональных узлов (таймер — для кодирования входной информации в UWB-сигнал, коррелятор — для демодуляции сигналов, цифровой процессор — для выработки модулирующего сигнала и др.), что обеспечивает реализацию UWB-устройств даже в виде единых микросхем, первая из которых была в 1997 году создана американской компанией Time Domain совместно с IBM. Неплохо обстоят дела и с созданием мощных UWB-передатчиков, несмотря на жесткие требования к параметрам генерируемых сигналов по частоте их повторения, точности позиционирования во времени и т. п. Идеи и технологии решения этой проблемы появились в нашей стране, когда в начале 80-х годов двадцатого века в Ленинградском физико-техничес-

ком институте им. Иоффе были открыты эффекты сверхбыстрого восстановления напряжения и сверхбыстрого обратимого пробоя в высоковольтных переходах. Это привело к созданию принципиально новых полупроводниковых приборов, способных формировать сверхкороткие импульсы нано- и пикосекундных длительностей мощностью до десятков мегаватт с частотой повторения до десятков мегагерц, при точности контроля их временного положения лучше десяти пикосекунд. При этом сами приборы имеют практически неограниченный рабочий ресурс, что и позволяет создавать на их основе мощные передатчики сверхширокополосных сигналов.

Были сформулированы основные принципы проектирования устройств на основе СШПС, а также созданы первые военные и гражданские системы радиолокации, подземной геолокации, позиционирования, связи и т. п. Всего же к концу 80-х в мире насчитывалось уже около 50 патентов, связанных с генерированием и обработкой коротких импульсных сигналов, однако единая терминология еще не выработалась и для их обозначения пользовались понятиями «сигналов без несущей» (carrier-free), «импульсных» (impulse), «несинусоидальных» (not sin wave) и т. п. Сегодня подобные средства, в принципе, могут работать в ряде диапазонов частот (включая полосы 30–50 МГц, 225–400 МГц и др.), однако чаще всего это они используют интервал от 1 до 11 ГГц.

Физические основы использования СШПС

Электрический импульс — моноцикл Гаусса (рис. 1) — описывается первой производной от функции распределения Гаусса:

$$W(t) = [At\sqrt{(2e)/\tau}] \exp[-(t/\tau)^2],$$

где A — амплитуда импульса, τ — длительность импульса. (Рис. 1–5 получены автором с использованием представленных аналитических выражений и пакета прикладных программ для проведения инженерных расчетов MathCad.)

Спектральная плотность сигнала в этом случае имеет вид, как на рис. 2.

На уровне -3 дБ относительно центральной частоты полоса f_0 сигнала ограничена частотами $f_1 = 0,319f_0$ и $f_2 = 1,922f_0$, что можно условно определить как ширину спектра СШПС. Таким образом, ширина полосы сигнала составляет около 160% от центральной частоты и его смело можно определить как СШПС. Для импульса длительностью 0,5 нс центральная частота — 2 ГГц и ширина полосы — около 3,2 ГГц. Изменяя длительность моноцикла, можно управлять его центральной частотой и шириной спектра на уровне -3 дБ (рис. 3 соответствует длительности моноцикла 100 пс, а рис. 4 — 1 нс).

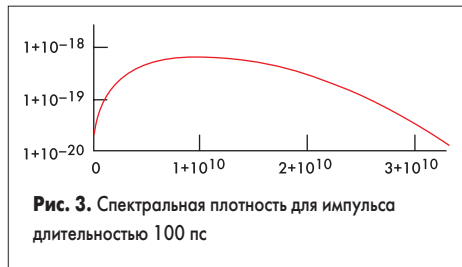


Рис. 3. Спектральная плотность для импульса длительностью 100 пс

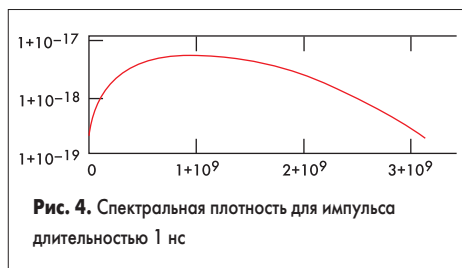


Рис. 4. Спектральная плотность для импульса длительностью 1 нс

Регулярная последовательность таких немодулированных импульсов не несет никакой информации, ее спектр имеет выраженный «решеччатый» характер, то есть характеризуется неравномерностью спектральной плотности средней мощности. Подобный сигнал потенциально может мешать работе других радиотехнических систем.

Итак, одиночный моноцикл является широкополосным сигналом с центральной частотой и шириной полосы, полностью определяемыми его длительностью. Его центральная частота обратно пропорциональна длительности импульса. Спектральная плотность мощности такого сигнала оказывается очень мала (мощность сигнала распределена в широком диапазоне частот) и напоминает обычный шумовой фон.

Необходимо отметить, что СШПС полностью подчиняются известным физическим законам, меняются только некоторые акценты в известном многограннике: полоса частот сигнала, его мощность, особенности распространения в реальных средах, требуемое отношение «сигнал — шум» для качественного приема.

Вспомогательное понятие объема элементарного дискретного сигнала — это произведение его ширины полосы частот, длительности и спектральной плотности средней мощности. В итоге получаем энергию сигнала как произведение его средней мощности на длительность. В теории электрической связи отношение энергии сигнала к спектральной плотности средней мощности аддитивных помех является определяющим в теории потенци-

альной помехоустойчивости. Для СШПС длина электромагнитного импульса очень мала, обратная величина — ширина спектра сигнала — очень велика. Остается управление мощностью сигнала. Оно ограничено по меньшей мере двумя факторами — возможностями передатчиков и мешающим действием данного сигнала на другие радиотехнические системы, работающие в этой полосе частот.

Возможным решением потенциальной проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) системы с СШПС и другими конкурирующими системами является пространственная канализация энергии при использовании узконаправленных антенных систем, что широко применяется в спутниковой и радиорелейной связи. Антенны с «хорошими характеристиками», то есть с заданными направленными свойствами (иными словами, с конкретно распределенным в пространстве коэффициентом направленного действия), достаточно большим коэффициентом бегущей волны во всем диапазоне частот и, в целом, с высоким коэффициентом усиления являются достаточно сложными, дорогими и крупногабаритными. Для такой ниши, как связь ПК с периферией, данный подход сейчас неприемлем. Остается только оптимальное управление мощностью передатчиков, дабы не навредить другим (особенно большие опасения вызывает воздействие СШПС на работу сети GPS, которая чувствительна к помехам). Во многом именно поэтому пока планируются небольшие дальности работы в радиолинии с СШПС (до 50 метров).

Искусственное расширение спектра сигнала и, соответственно, увеличение скорости передачи в радиолинии (относительно скорости передачи информации) применяется уже относительно давно с целью повышения помехозащищенности радиолиний и борьбы с интерференцией узкополосных сигналов в точке приема. Это программная перестройка радиочастоты — ППРЧ (военные системы связи, Bluetooth) или так называемое прямое расширение спектра (IEEE802.11x). Однако ранее это осуществлялось с узкополосными сигналами, у которых отношение ширины радиочастотного спектра к номиналу частоты несущего колебания составляло доли или единицы процентов. Таким образом, производилось расширение ширины полосы исходно узкополосного сигнала, который имеет несущую и для генерации и приема которого применяются резонансные устройства, настроенные на частоту несущего колебания. В СШПС выраженной несущей нет, это — всплеск электромагнитной энергии (как раньше говорили, «эфира»).

Итак, особенностями СШПС являются: отсутствие несущего колебания, очень короткая длительность (единицы и доли наносекунд) и связанная с этим естественным образом очень широкая полоса частот. Малая длительность элементарного сигнала позволяет передавать его очень часто во времени, то есть появляется возможность высокой скорости передачи информации (десятки, сотни мегабит в секунду, что уже реализова-

но). Кроме того, приятным фактом является сравнительно хорошее прохождение СШПС сквозь препятствия (здесь это — стены). Короткие импульсы позволяют реализовать практически очень полезную функцию — точное местоопределение объекта (в том числе корреспондента), так как в импульсной радиолокации действует известный принцип — чем короче импульс, тем меньше ошибка определения дальности объекта.

Далее, как мы увидим позже, сама конструкция приемопередатчиков существенно упрощается, передатчики по внешним командам просто очень часто создают электромагнитные импульсы (ЭМИ), а приемники из супергетеродинов превращаются в приемники прямого усиления.

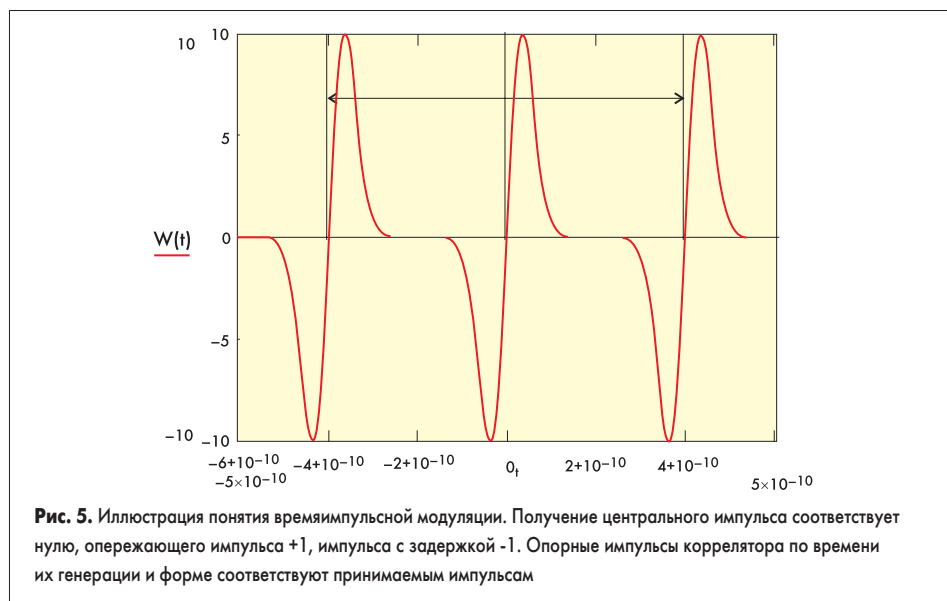
Такая радужная картина настораживает, что совершенно естественно, поэтому перейдем к рассмотрению основных недостатков данной технологии. Их немного, но они существенны.

Во-первых, обладая широкой полосой (сейчас это диапазон примерно 3–10 ГГц) и значительной мощностью, СШПС могут оказывать мешающее действие существующим и перспективным системам.

Во-вторых, по этой же причине упомянутые системы могут в свою очередь оказывать мешающее действие линиям связи с СШПС.

Наконец, прием СШПС достаточно сложен из-за очень малой длительности сигнала. Для обнаружения сигнала (то есть его приема) может использоваться коррелятор или согласованный фильтр (предпочтительным является первый вариант). Не вдаваясь в подробности, отметим, что при этом сложной задачей становится синхронизация приема, которая, кроме всего прочего, требует очень точного и стабильного генератора тактовой частоты. Далее, различные составляющие спектра неодинаково ослабляются препятствиями (обычно, чем больше частота, тем она сильнее ослабляется). Таким образом, спектр импульса, прошедшего сквозь препятствие, искажается, а значит, приемник, согласованный с формой исходного сигнала, становится несогласованным с пришедшим сигналом. В итоге, вследствие широкой полосы пропускания входных цепей приемника мощность принимаемых помех и собственного аддитивного белого гауссовского шума достаточно велика, а приемник оказывается рассогласованным с принимаемым сигналом. Достоверный прием требует повышения мощности передаваемого сигнала и, таким образом, усложняет проблему ЭМС. Выход один — сбалансированная оптимизация параметров устройств сетей связи, использующих СШПС.

Кроме того, данный стандарт подразумевает использование не подлежащего лицензированию радиодиапазона, в котором работают различные бытовые устройства, вроде автоматических гаражных замков и автомобильных сигнализаций, поэтому для широкого распространения стандарта необходимо обеспечить его защищенность от помех. Еще одним недостатком является действующее в США ограничение на мощность передатчиков в диапазоне UWB, поэтому действующие системы связи



на базе этого стандарта имеют радиус действия, не превышающий 10 метров. Что касается передачи небольших объемов данных между бытовыми устройствами, то здесь все козыри имеются у технологии ZigBee, основанной на протоколе IEEE 802.15.4.

Фактически приемник СШПС скорее осуществляет не прием, а выполняет задачу обнаружения сигнала и обычные сигналы оказывают на него специфическое воздействие. Очевидным является такое утверждение — обычные методы анализа ЭМС систем с СШПС и систем с обычно применяемыми в настоящее время сигналами неадекватны. Кроме того, модель аддитивного белого гауссовского шума, традиционная для анализа потенциальной помехоустойчивости узкополосных сигналов, здесь также требует уточнения, так как, имея теоретически бесконечную полосу, мощность шума становится бесконечной. К тому же полоса частот широкополосного сигнала с прямым расширением спектра определяется скоростью передачи первичных электрических сигналов (информационных импульсов), для СШПС передаваемые сигналы имеют длительность и ширину спектра, определяемые методом их генерации для передачи в эфир. Для увеличения достоверности связи (роста величины отношения «сигнал — шум» на входе демодулятора) для обычных систем можно уменьшать скорость передачи радиоимпульсов, увеличивая тем самым энергию элементарного сигнала. В случае СШПС для этого теоретически можно использовать когерентное сложение нескольких импульсов при передаче одного информационного импульса (для надежной передачи информации в UWB используются длинные серии моноциклов, большая частота следования которых позволяет использовать для передачи каждого бита информации пачки из 100 и более импульсов, что и обеспечивает их высокую защиту от помех) или увеличивать амплитуду радиосигнала, что крайне нежелательно. Дело в том, что импульсное оружие, практически примененное в Югославии и Ираке, как раз и генерирует СШПС с очень большой пиковой мощностью.

Особенности СШПС, особенно их физическое отличие от традиционных технологий радиотехники, породило ряд мифов.

Одно популярное неправильное представление о СШПС — то, что аналогично традиционным ШПС отношение ширины полосы радиосигнала к полосе частот информационного канала определяет выигрыш в отношении «сигнал — шум» при обработке UWB. Здесь ширина полосы радиосигнала определяется его длительностью и очень косвенно влияет на эффективность работы коррелятора.

Другое популярное неправильное представление касается представления о том, что множество импульсов когерентно складываются до коррелятора и этим увеличивается отношение «сигнал — шум». В действительности энергетический выигрыш наблюдается в результате некогерентного сложения многих откликов коррелятора, относящихся к передаче одного элементарного информационного импульса.

Можно привести еще ряд существенных отличий моделей работы линий с традиционными сигналами и СШПС, определяющих разницей их физических сущностей. Мы же скажем лишь, что их сложно сравнивать на данном уровне и проще сразу обратиться к их потребительским свойствам.

Технические особенности технологии СШПС

На практике длительность импульсов составляет от 200 пикосекунд до одной наносекунды, а интервалы следования импульсов лежат в пределах от 10 до 1000 нс. Обычно (но не обязательно) UWB-сигналы имеют форму идеализированных гауссовских моноциклов, параметры которых подобраны таким образом, чтобы основная часть спектра излучения была сосредоточена в диапазоне частот от 1–2 до 6–7 ГГц.

Модуляция таких импульсов полезными данными в принципе может осуществляться любым из известных методов на основе изменения их амплитуды, длительности, частоты следования и т. п. Однако на практике сейчас чаще всего используется технология

TM-UWD, при которой сигналы формируются с помощью времяимпульсной модуляции (Pulse-Position Modulation — PPM), то есть информационным параметром является временное положение переднего фронта импульса. При PPM, в зависимости от мгновенного значения модулирующего сигнала, позиция каждого рабочего импульса изменяется во временной области по отношению к положению периодических опорных импульсов, генерируемых приемником. Другими словами, для передачи логического «0» рабочий импульс посылается, например, немного раньше своего «стандартного» временного положения в импульсной последовательности, а для передачи «1» — немного позже. Типовая величина временного сдвига составляет 1/4 от длительности импульса.

Другим вариантом может быть следующее. Если принятый импульс пришел раньше эталонного, то на выходе коррелятора установится +1, если позже, то -1; отсутствие сдвига дает нулевое значение (см. рис. 5, где данные пропорции изменены).

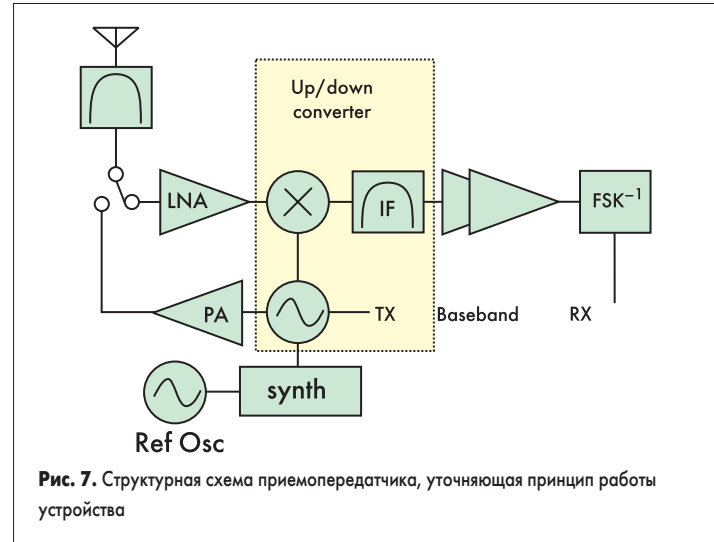
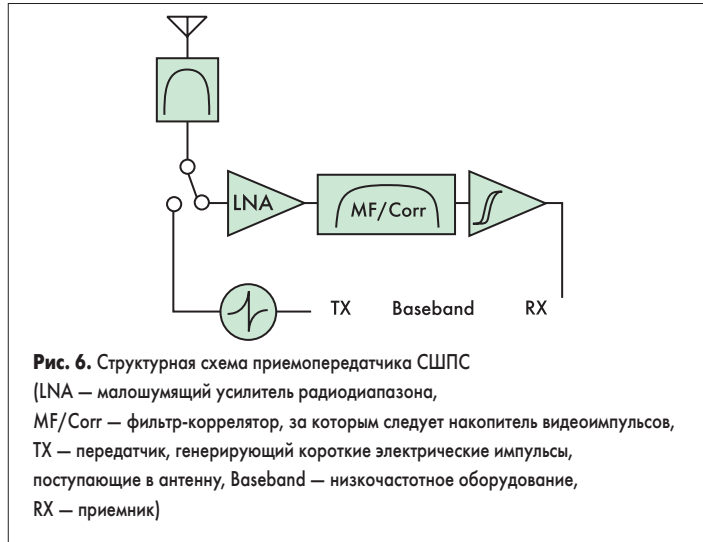
Один информационный бит кодируется последовательностью многих импульсов, например 200 импульсов на бит, средний период повторения импульсов определяет в конечном итоге скорость передачи данных. Так, при периоде повторения импульсов 10 нс максимальная скорость передачи составит 100 Мбит/с.

Многоканальная передача (мультиплексирование) может быть обеспечена временным разделением каналов при соответствующей синхронизации. Применение известных ортогональных кодов для управления временными задержками импульсов позволяет создать в одной полосе до 1000 и более дуплексных каналов связи на одной станции.

В отличие от технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA), системы импульсного радио используют ортогональные псевдослучайные последовательности не для расширения спектра сигнала (спектр короткого импульса и так достаточно широк), а только для сглаживания его спектральной характеристики, формирования отдельных каналов связи и защиты от помех.

Приемное устройство импульсного радио функционально представляет собой приемник (детектор) прямого усиления и коррелятор. На более привычном языке его можно назвать синхронным приемником без промежуточного преобразования частоты с системой ФАПЧ, где гармоническое колебание гетеродина заменяется импульсной последовательностью, позволяющей выбрать канал связи (рис. 6).

Будучи синхронизированным с передатчиком (это — одна из основных технических сложностей) и зная закон формирования во времени псевдослучайной последовательности импульсов, приемник синхронно генерирует последовательность опорных импульсов и при наличии реакции на выходе коррелятора определяет отклонения принятых импульсов, формируя на выходе +1, если сигнал, например, пришел на 100 пс ран-



ше окончания межимпульсного интервала, -1 — если на 100 пс позже, и 0 — в остальных случаях. Эти значения накапливаются в интеграторе. В результате узкополосная помеха от передатчика с непрерывной несущей или сигнал от другого импульсного передатчика способны помешать приему отдельных импульсов, но не информационного бита в целом. Накопленным значением откликов коррелятора от случайных помех в среднем примерно будет 0. Разумеется, описанный метод корреляционного детектирования последовательности сверхкоротких импульсов — далеко не единственный, также ведутся работы по целенаправленному управлению формой импульсов.

Оценить помехозащищенность импульсного радио можно, используя понятие усиления 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). Если один бит задается последовательностью 200 импульсов с частотой следования 10 млн импульсов в секунду (через 100 нс) и шириной импульса 0,5 нс, скорость информационного потока составит 48,8 кбит/с, а эффективное усиление — 46 дБ. При этом усиление за счет отношения ширины межимпульсного интер-

вала к длительности импульса ($100/0,5 = 200$) составит 23 дБ, еще столько же дает некогерентное накопление 200 импульсов при передаче одного бита информации.

Одно из существенных достоинств импульсного радио — малая вероятность интерференции прямо распространяющегося сигнала с его отражениями от различных объектов. Переотражения — бич для многих связанных и локационных технологий (за исключением широкополосных шумоподобных систем связи). Именно из-за них затруднена связь внутри помещений, в условиях сложного рельефа и т. п. При этом следует различать частотно-селективные замирания, вызванные наложением в противофазе гармонических составляющих спектров интерферирующих сигналов, и межсимвольную интерференцию импульсов. В импульсном радио отраженный сигнал поступает в коррелятор с задержкой относительно ожидаемого момента прихода и не попадает в «строб», а значит, он будет восприниматься как случайная помеха, никак не воздействуя на прямой сигнал, так как не совпадает с ним во времени. Таким образом, очень малая длительность импульсов защищает их от искажений данного вида.

Любая UWB-система включает антенную систему, формирующую короткие импульсы электромагнитного излучения; мощный импульсный ключ, управляющий антенной системой; устройство модуляции-демодуляции; прецизионный высокочастотный опорный генератор, приемный детектор и коррелятор (рис. 7).

Здесь показан высокостабильный опорный генератор, сигнал которого преобразуется в последовательность импульсов, используемых для формирования передаваемой кодированной последовательности и последовательности опорных импульсов для работы коррелятора.

Отметим, что в UWB-системе принципиально нет мощных усилителей радиодиапазона, ее приемник работает по принципу прямого усиления (без гетеродина и элементов частотной фильтрации), устройства детектирования и модуляции-демодуляции достаточно просты и реализуются средствами обычной цифровой логики (с развитием интегральной технологии GaAs и Si-Ge ИС гигагерцового диапазона перестали быть диковиной), без сложных алгоритмов цифровой обработки сигналов. Антенные системы также достаточно просты по исполнению и могут изготавливаться непосредственно на печатных платах. Один из важнейших элементов для UWB-технологии — мощные импульсные ключи, особенно актуальные для локационных систем. Требования к коммутирующим элементам достаточно жесткие — они должны открываться (закрываться) за сотни пикосекунд и на сотни пикосекунд (или по крайней мере иметь фронты открывания и закрывания длительностью порядка 10–100 пс) с мегагерцовой частотой повторения при очень высокой стабильности. При этом коммутируемое напряжение измеряется сотнями вольт и киловольтами.

Окончание следует