

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ СВЯЗЬ

Второе рождение?

И. Шахнович

Становление принципиально новой технологии в связи, особенно в области непосредственной передачи сигнала, происходит не часто. Не успела стать обыденной широкополосная связь с кодовым разделением каналов – CDMA, как появились коммерческие сверхширокополосные системы UWB (UltraWide Band). К достоинствам широкополосной связи – высокой помехозащищенности и адаптивности к реальной эфирной обстановке, низкому (шумоподобному) уровню сигнала, экономичному использованию частотного ресурса, сложности перехвата и постановки прицельных помех – технология UWB добавила выдающуюся особенность: изделия на ее основе технически проще большинства аналогичных систем. Сбывается мечта всех инженеров – однокристалльный приемопередатчик без внешних цепей частотной фильтрации, в развитии которых последние 20 лет почти не было прогресса.

Работы в области сверхширокополосных систем начались в конце 50-х годов в связи с развитием радиолокационной техники как в США, так и в СССР. В США в то время несколько научных центров занимались исследованиями отклика микроволновых систем (например, антенных элементов) на короткоимпульсное (наносекунды и менее) воздействие. Такие работы в рамках создания радаров на фазированных антенных решетках вели и в исследовательском центре Sperry (позднее – Sperry Rand Corporation). В 1965 году сотрудник этого центра Джеральд Росс возглавил группу исследователей “электромагнитных явлений во временной области” (time domain electromagnetics). В результате был опубликован ряд пионерских работ, например [3]. В 1972–1973 годах Д. Росс и другой сотрудник Sperry Rand Corporation, Кеннет Роббинс, получили основополагающие патенты в области сверхширокополосных систем – “Передающая и детектирующая система для генерации и приема импульсных сигналов без искажений для короткоимпульсной коммуникационной системы” [4] и “Короткоимпульсный приемник” [5]. Работы Росса и Роббинса заложили основу короткоимпульсной связи и локации в США. Достаточно сказать, что Росс является автором (самостоятельно или в соавторстве) свыше 40 патентов США в данной области. Всего же к 1989 году сотрудники Sperry Rand получили около 50 патентов США в области UWB-систем и различных аспектов их применения.

Одновременно с Россом и Роббинсом аналогичные исследования проводил Хеннинг Хармут (Американский католический университет), опубликовавший в 1969–1984 годах ряд статей и книг, посвященных UWB. В Римском исследовательском центре BBC США работами по применению UWB-радаров занимался Паул Ван Эттен, обнаруживший ряд важных эффектов. В 1974 году Морей разработал UWB-радарную систему для исследования подземных объектов [6], что явилось толчком для нового направления – UWB-радаров для геолокации и локации “сквозь стены”. 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. Не оставались в стороне и такие исследовательские центры, как Ливерморская и Лос-Аламосская национальные лаборатории. Отметим работы компании Multispectral Solutions, создавшей по заказу правительства США при участии Д. Росса коммуникационную систему с высокой скрытностью и помехоустойчивостью (с малой вероятностью обнаружения и противодействия, LPI/D), принятую в 1987 году. Список исследователей и работ можно продолжать. Однако к восьмидесятым основные теоретические исследования в области UWB уже были завер-

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВОПРОСА

До 1989 года для обозначения сверхширокополосных систем пользовались понятиями сигналов “без несущей”, “импульсных”, “несинусоидальных” и т.п. Определение термина “сверхширокополосные устройства” (UWB) введено агентством DARPA Министерства обороны США в 90 году и скорректировано Федеральной комиссией связи США (FCC) в 2000 году. По определению FCC, к UWB-устройствам относятся все системы со спектральной полосой не менее 1,5 ГГц, а также устройства, у которых ширина спектральной полосы по уровню -10 дБ составляет, по крайней мере 25% от значения центральной частоты (показатель широкополосности $\mu = 2(f_H - f_L) / (f_H + f_L) \geq 0,25$; где f_H – верхняя граница спектральной полосы по уровню -10 дБ, f_L – нижняя граница)* [1].

* В отечественной науке к сверхширокополосным относят сигналы, у которых ширина спектра $\Delta\omega$ соизмерима с центральной частотой ω_0 : показатель широкополосности $\mu = \Delta\omega / \omega_0 = 1$, в то время как у узкополосных сигналов $\Delta\omega / \omega_0 \ll 1$ [2]. Кстати, само понятие “сверхширокополосный сигнал, система” впервые введено Л.Ю. Астаниным.

шены, созданы первые гражданские и военные системы (радиолокация, геолокация, позиционирование, связь и т.д.) [7, 8].

Аналогичные исследования велись и в СССР. Насколько можно судить по публикациям, почти все они (как и за океаном) были связаны с радарной тематикой. Российские и зарубежные эксперты отмечают работы Зернова, Карцевича, Астанина, Кобзарева, Костылева, Кардо-Сысоева, Глебовича, Мелешко и др. Кстати, первые работы по UWB системам связи с кодовым разделением каналов были выполнены в России в середине 80-х годов В.В.Крыловым в Горьковском политехническом институте. Однако с начала 90-х годов многие работы оказались если не замороженными, то сильно заторможенными.

В 1987 году в США Ларри Фуллертон получил свой первый патент в области сверхширокополосной связи [9] и основал компанию Time Domain. За десять лет работы компания со своей технологией PulsOn превратилась в одного из лидеров в области портативных UWB коммуникационных систем и радаров, в ее активе – свыше 60 патентов по тематике UWB. У Time Domain появилось немало последователей. Это не могло не нанести удар по “корифеям” UWB – развязалась патентная война, продолжающаяся до сих пор [10].

Почему же сегодня вновь заговорили о технологии, которой “далеко за сорок”?

МАЛ ЗОЛОТНИК...

В чем суть технологии UWB? Рассмотрим связную UWB-систему на примере описания в патенте Фуллертона “Полнодуплексная система и метод связи” [11]. Передача ведется короткими – 20–0,1 нс – импульсами, следующими друг за другом с интервалом 2–5000 нс (очевидно, что значения параметров в реальных системах могут быть иными). Импульс – моноцикл Гаусса (рис.1) – описывается

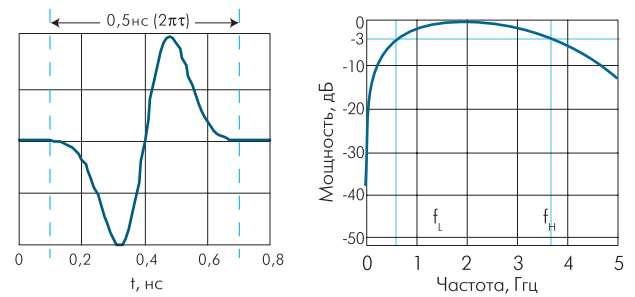


Рис. 1. Моноцикл Гаусса и его спектральная характеристика

первой производной от функции распределения Гаусса:

$$V(t) = A \frac{\sqrt{2e}}{\tau} t e^{-(t/\tau)^2}, \quad (1)$$

где A – амплитуда импульса, τ – временная константа, характеризующая затухание (длительность импульса – $2\pi\tau$). Спектральная плотность сигнала

$$V(\omega) = A\omega\tau^2\sqrt{2\pi e} \cdot t e^{-\frac{\omega^2\tau^2}{2}}. \quad (2)$$

Очевидно, что центральная частота такого сигнала $f_c = 1/2\pi\tau$. По уровню -3 дБ полоса сигнала ограничена частотами $f_L = 0,319f_c$ и $f_H = 1,922f_c$. Таким образом, ширина полосы сигнала в диапазоне 3 дБ составляет около 160% от центральной частоты. Для импульса длительностью 0,5 нс центральная частота – 2 ГГц и ширина полосы – около 3,2 ГГц. Регулярная последовательность таких импульсов не несет никакой информации, ее спектр имеет выраженный

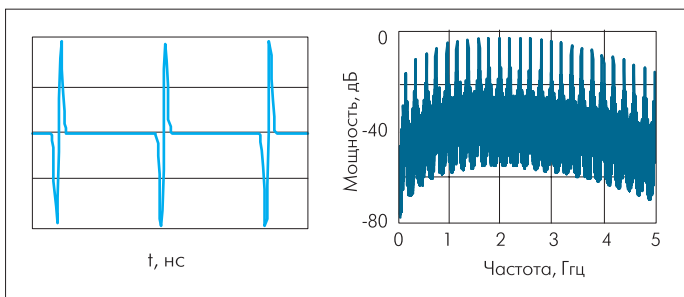


Рис. 2. Спектр регулярной последовательности импульсов

“гребенчатый” характер (рис.2), следовательно, подобный сигнал может интерферировать с другими радиотехническими системами.

В “импульсном радио” (термин Фуллертон) информация кодируется посредством временной позиционно-импульсной модуляции. Смещение импульса относительно его “штатного” положения в последовательности вперед задает “0”, назад – “1”. Время смещения не превышает четверти длительности импульса (рис.3). Так, в последовательности 0,5-нс импульсов с межимпульсным интервалом 100 нс импульс, пришедший на 100 пс раньше, – это “0”, на 100 пс позже – “1”. Один информационный бит кодируется последовательностью многих импульсов, например 200 импульсов на бит.

Однако возникает проблема – как разделить каналы передачи? Для этого “штатное” положение каждого импульса сдвигают на время, пропорциональное текущему значению некоторой псевдослучайной последовательности (разделение посредством временных скачков, Time Hopping). При этом время сдвига на один–два порядка выше, чем смещение при временной модуляции. В результате спектр сигнала существенно сглаживается (рис.4), становится шумоподобным и уже не мешает другим устройствам, работающим в той же полосе.

Применяя систему ортогональных кодов для управления временными задержками импульсов, теоретически можно в одной полосе создавать тысячи голосовых каналов связи [12]. По утверждению Time Domain, пессимистические оценки дают от 200 до 1000 дуплексных каналов со скоростью 64 Кбит/с на одну базовую станцию без использования специальных алгоритмов цифровой обработки сигналов [13]. Таким образом, 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. С другой стороны, импульсное радио можно рассматривать как предельный случай CDMA, в котором полностью отказались от несущей или, что физически почти то же самое, длительность выходного импульса сделала равной одному периоду несущей.

Кроме временного кодирования можно применять и дополнительные поднесущие – информационный сигнал предварительно модулируется тем или иным традиционным методом модуляции (AM, FM, PM, FSK, PSK, PCM и т.д.). Далее модулированные поднесущие подвергаются временной модуляции (вместо информационного сигнала модулируется поднесущая, модулированная информационным сигналом) [14].

Приемное устройство импульсного радио функционально представляет собой приемник (детектор) прямого преобразования и коррелятор. На более привычном языке его можно назвать синхронным приемником без промежуточного преобразования частоты ($f_{гет}=0$) с системой ФАПЧ, где частота гетеродина заменяется им-

пульсной последовательностью, позволяющей выбрать канал связи. Будучи синхронизированным с передатчиком и зная псевдослучайную последовательность канала, коррелятор определяет отклонения принятых импульсов, формируя на выходе +1, если сигнал, например, пришел на 100 пс раньше 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 коррелятора от случайных помех будет 0. Разумеется, описанный метод корреляционного детектирования последовательности сверхкоротких импульсов – далеко не единственный.

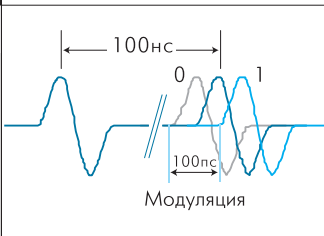


Рис. 3. Временная импульсно-позиционная модуляция

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 интервала к длительности импульса ($100/0,5=200$) составит 23 дБ, еще столько же – поскольку 200 импульсов задают один бит.

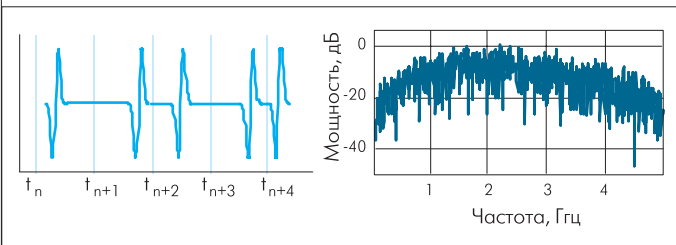


Рис. 4. Спектр последовательности импульсов после импульсно-кодовой модуляции

Одно из существенных достоинств импульсного радио – отсутствие 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. В импульсном радио отраженный сигнал попадет в коррелятор с задержкой и будет восприниматься как случайная помеха, никак не воздействуя на прямой сигнал. Кроме того, благодаря широкополосности затухание короткоимпульсного сигнала в различных средах достаточно мало – короткие импульсы легко проходят сквозь различные препятствия, поскольку подавление сигнала происходит не во всем диапазоне.

Из-за высокого эффективного усиления системы UWB могут работать с очень малой средней мощностью передатчика. Так, в октябре 1997 года Time Domain продемонстрировала полнодуплексную связь



по технологии UWB с центральной частотой 1,7 ГГц на дистанции свыше 900 м и скоростью 32 Кбит/с. При этом средняя мощность передатчика составляла около 2 мВт. Система одновременно определяла расстояние с точностью до 3 см. Разработана полнодуплексная 1,3-ГГц система передачи со скоростью 39–156 Кбит/с на дистанции до 16 км. Средняя мощность ее передатчика – 250 мкВт. Также компания создала демонстрационную беспроводную локальную сеть со скоростью передачи 5 Мбит/с и радиусом действия свыше 10 м (через две стены внутри здания) при мощности излучения 50 мкВт. С такой же средней мощностью работает радар “RadarVision 1000”.

ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ СОЕДИНЕННЫХ ШТАТОВ

Средняя мощность излучения UWB-устройств может быть чрезвычайно низкой, поэтому они не должны мешать существующим радиотехническим системам, работая в одном с ними диапазоне. И сами нисколько не страдают от них. Поскольку UWB-сигнал распределен по столь широкому спектру, обнаружить его, а тем более перехватить или заглушить, – весьма проблематично. Разумеется, совокупность таких свойств, как высокая помехозащищенность, скрытность, малое энергопотребление и простота реализации, не могла не заинтересовать военные и государственные организации. Собственно, в США (равно как в СССР) практически любая деятельность в этой сфере до конца 70-х носила закрытый характер. До недавнего времени в США заказчиками UWB-систем могли выступать только правительственные и военные организации, работы имели статус правительственных программ. Ситуация изменилась в 1994 году, когда в США был снят ряд ограничений, и UWB-технологии стали стремительно развиваться. Не последнюю роль сыграла и относительная техническая простота в сочетании с возможностью интегральной реализации сверхширокополосных систем. Однако по-прежнему для использования таких систем требовалось специальное разрешение FCC.

Естественно, подобное положение существенно ограничивало сбыт продукции создателей UWB-систем и закрывало дорогу к ним для многих инвесторов. Масло в огонь подливал тот факт, что средний уровень излучения маломощных UWB-устройств не превосходит разрешенный при непреднамеренном излучении частью 15 (“Правила использования радиочастотных устройств”) раздела 47 (Телекоммуникации) Кодекса федерального регулирования FCC (Code of Federal Regulations, CFR). Эта часть правил CFR распространяется на различные электрические приборы, компьютеры и т.д., излучающие электромагнитную энергию как побочный эффект (допустимый уровень излучения для электромагнитной совместимости). Но передающие UWB-устройства под это положение не попадают, поскольку излучают преднамеренно, хотя и с допустимой средней мощностью. Раз так, то работать в диапазоне, уже занятом другими системами, им нельзя. А сверхширокополосные устройства неминуемо “залезают” в “чужие” диапазоны.

В начале 1998 года три американские компании – U.S. Radar, Time Domain и Zircop – обратились в FCC с запросом о разрешении использовать их UWB-системы (радары, способные “видеть” сквозь стены и коммуникационные системы) в порядке эксперимента на безлицензионной основе, так же, как устройства, на которые распространяется действие 15-й части CFR относительно непреднамеренных источников излучения. Петиции этих фирм, а также общее давление производителей и разработчиков привели к тому, что в сентябре 1998 года FCC опубликовала обращение [15] ко всем заинтересованным и компетентным организациям с рядом вопросов, касающихся возможности массового и безлицензионного использования

UWB-систем и соответствующего изменения 15-й части CFR. Отклики были неоднозначны. Ряд организаций высказали беспокойство возможностью интерференции сигналов UWB-устройств и сигналов системы глобального позиционирования GPS, возможностью помех для радиоастрономических станций, систем спутникового вещания (многие из них работают в диапазоне около 2 ГГц и используют принципы шумоподобных сигналов, т.е. повышение общего уровня шума для них весьма критично).

10 мая 2000 года FCC опубликовала “Извещение о предлагаемом изменении правил” [1], касающемся 15-й части и разрешила опытное безлицензионное использование UWB-систем трем обратившимся с петицией фирмам. Для каждой из них были оговорены типы устройств, общее количество, потенциальные потребители и т.п. Одновременно ряд организаций, в частности Национальное управление телекоммуникаций и информации NTIA, приступили к исследованиям реальных взаимных помех UWB и других систем, в том числе и GPS. Широкомасштабный эксперимент, начатый FCC, должен вот-вот завершиться. Уже опубликованы отчеты NTIA об исследованиях характеристик UWB-сигналов [16] и совместимости UWB-систем и приемников GPS [17], содержащие рекомендации по ограничению мощности UWB-передатчиков при различных видах модуляции.

Если результаты эксперимента окажутся положительными, коммуникационный мир ожидает мощное потрясение. В самом деле, при малой мощности UWB-системы способны передавать данные со скоростями свыше 20 Мбит/с, причем внутри помещений и объектов со сложной архитектурой. Телефония, локальные сети, системы “последней мили” и т.д. – во все эти области может вторгнуться мощный конкурент. И это – только в области связи. А есть еще локация, системы позиционирования, медицинская техника, транспорт и т.д. Недаром ряд крупнейших фирм, например Siemens, инвестируют средства в UWB-компании. Многие производители полностью подготовились к открытию массового рынка.

В частности, агрессивная Time Domain разрабатывает комплект IC PulsOn для UWB-приложений. Уже готовы к серийному производству ИС коррелятора (три независимых корреляционных приемника и управляемый усилитель, в последней модификации – пять корреляторов) и таймер с точностью около 10 пс по Si-Ge-технологии компании IBM. Только что завершена разработка относительно простого (300 тыс. вентиляей) контроллера на основе RISK-процессорного ядра ARM, включающего несколько АЦП и обеспечивающего интерфейс к внешним устройствам. По утверждению Time Domain, на основе данного комплекта ИС можно создавать законченные решения систем импульсного радио стоимостью ниже 20 долл. (в серии) [13].

Еще один немаловажный аспект применения маломощных UWB-систем – им не требуется выделенный частотный диапазон, они могут использовать уже занятые спектральные участки. А сегодня, когда частотные диапазоны – один из самых дорогих и дефицитных товаров, подобное свойство особенно привлекательно.

Все это в совокупности с потенциальными инвестициями не может не дозвезать на законодателей электросвязи США. Если технология окажется жизнеспособной, а американский эксперимент – удачным, вслед за США пойдет остальной мир, как уже случилось не раз. Вплоту известную формулу “Что хорошо Форду, хорошо и Америке” перефразировать в “Что хорошо Америке, хорошо всему миру”. Совершенно очевидно, что ни одна национальная администрация электросвязи не устоит (да и зачем!?) против проникновения новой технологии, в которую вкладывают средства гигантские корпорации. Поэтому результаты перипетий со скромной 15-й частью CFR FCC США так важны и нам.

Массовый рынок требует специализированной элементной базы. Когда она станет доступной – а это неизбежно произойдет при воз-

возможности безлицензионного применения UWB-устройств, – перед производителями всего мира откроются новые перспективы. Учитывая огромный задел отечественных специалистов в области UWB, Россия может оказаться “на коне” (если, конечно, не получится “как всегда”).

КЛЮЧИ К УСПЕХУ

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.5). Отметим, что в UWB-системе нет мощных усилителей, ее приемник – прямого преобразования (без гетеродина и элементов частотной фильтрации), устройства детектирования и модуляции/демодуляции достаточно просты и реализуются средствами обычной цифровой логики (с развитием GaAs и Si-Ge интегральной технологии 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) на сотни пикосекунд (или по крайней мере иметь фронты открывания/закрывания длительности порядка 10–100 пс) с мегагерцовой частотой повторения при очень высокой стабильности. При этом коммутируемое напряжение измеряется сотнями вольт и киловольтами.

В начале 80-х годов в ФТИ им. А.Ф. Иоффе были открыты два интереснейших явления – эффекты сверхбыстрого восстановления напряжения и сверхбыстрого обратимого пробоя в высоковольтных переходах. Это открытие привело к созданию принципиально новых полупроводниковых приборов, способных коммутировать большие мощности в малых временных промежутках, в том числе приборов на задержанной ударно-ионизационной волне и дрейфовых приборов с резким восстановлением (табл.1 во врезке). И идея, и ее материальное воплощение принадлежит группе разработчиков во главе с А.Ф. Кардо-Сысоевым, за что они были удостоены Государственной премии СССР.

На основе этих приборов создано семейство генераторов различного назначения, позволяющих формировать сверхкороткие импульсы нано- и пикосекундной длительности с мощностью до десятков МВт и частотой повторения до десятков МГц, контролируя при этом их временное положение с точностью лучше 10 пс. Максимальное импульсное напряжение может достигать десятков киловольт, а импульсные токи – тысяч ампер. С ростом частоты повторения пиковая мощность падает, но по-прежнему остается намного выше, чем полученная с помощью любых других полупроводниковых устройств. Это позволяет с успехом применять разработанные генераторы в локационных и связных UWB-системах (табл.2 во врезке). Причем ресурс этих приборов чрезвычайно высок.

Работы Кардо-Сысоева и коллег не ограничиваются генераторами и элементной базой для них. Учеными созданы уникальные антенные конструкции типа “сложенного рупора”, позволяющие при небольших геометрических размерах добиться эффективности традиционных антенн с диаметром в несколько метров [18, 19].

ЭРА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ СВЯЗИ?

Мы очень кратко рассмотрели связной аспект UWB-систем. Не менее интересное – радарное – приложение этой технологии, причем

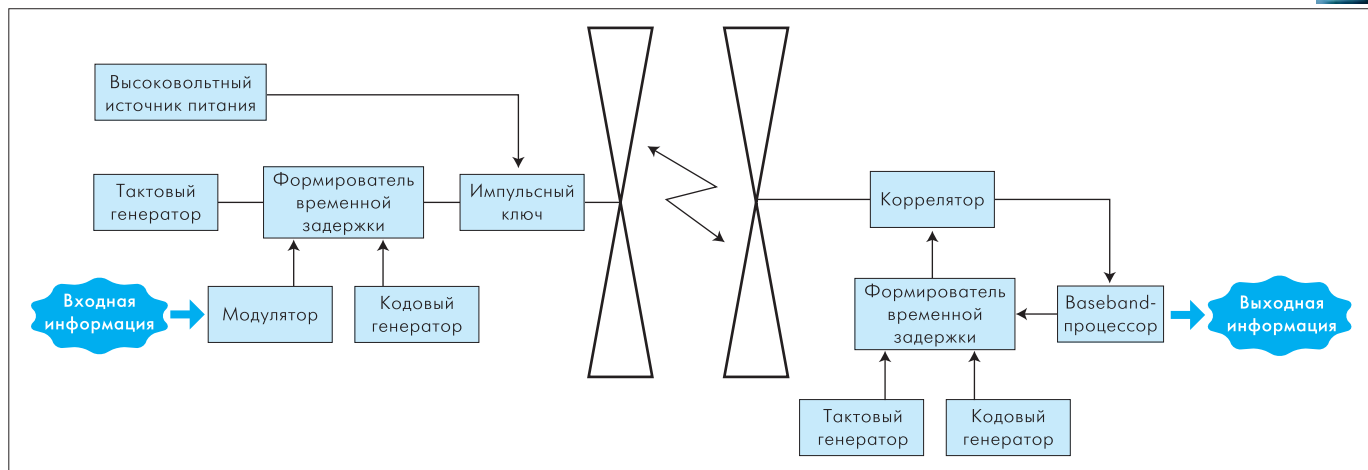


Рис. 5. Структура приемопередающей UWB-системы

не только в радиолокации, но и в гидролокации, осталось за рамками данной статьи. Но в одну публикацию невозможно вместить наработанное более чем за 40 лет. Отметим только, что связанное применение UWB относительно молодо. Да, есть системы армейской тактической связи (со скоростью канала T1, 1,54 Мбит/с). В опытной эксплуатации – беспроводные микромощные локальные сети со скоростями порядка 20 Мбит/с. Однако получат ли подобные системы массовое распространение, несмотря на радужные перспективы и заявления ряда разработчиков, – большой вопрос.

Так, ряд экспертов высказывают вполне обоснованное сомнение в безопасности UWB-передатчиков для других устройств, указывая на то, что хотя средняя мощность может быть и небольшой, но пиковая – весьма велика. А поскольку на столь высоких частотах и при столь широкой полосе метрологические проблемы до конца не раз-

решены, возможны любые неприятности. Не до конца исследованы возможные реакции узкополосных приемников на импульсы с очень крутыми фронтами. Кроме того, специалисты справедливо отмечают, что достоинство UWB-передатчика – простота, обусловленная в том числе и сверхширокополосной антенной, – может превратиться в недостаток: стоит прикоснуться этой антенне к проводящему предмету или задеть ее рукой – все равно что подключить режекторный фильтр, спектральная характеристика сигнала сразу же изменится, полоса из широкополосной может превратиться в множество узкополосных. Высказываются опасения, что когда UWB-передатчиков станет много, они настолько повысят общий уровень шума, что возникнут проблемы приема слабых узкополосных сигналов.

Вопросов много. Однако несмотря на утверждения некоторых специалистов, что все фундаментальные работы в области UWB бы-

ли проделаны до окончания 70-х [8] и с тех пор ничего принципиально нового в этой сфере не происходит, сверхширокополосные системы становятся все более массовыми. Динамика процесса велика. Что будет дальше?

ЛИТЕРАТУРА

1. Notice of Proposed Rule Making. – FCC, 10 May 2000.
2. Варганов М.Е., Зиновьев Ю.С., Астанин Л.Ю. и др. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов. – М.: Радио и связь, 1985.
3. Ross G.F. A Time Domain Criterion for the Design of Windband Radiating Elements. – IEEE Trans. Antennas Propogot., Vol. 16, №3, 1968.
4. Пат. 3728632 США. Transmission and Reception System for Generation and Receiving Base-Band Duration Pulse Signals without Distortion for Short Base-Band Pulse Communication System/Gerald F.Ross. – Приоритет 12.03.71.
5. Пат. 3662316 США. Short Base-Band Pulse Receiver/Kenneth W.Robbins. – Приоритет 12.03.71.
6. Пат. 3806795 США. Geophysical Subveying System Employing Electomagnetic Imulses/Rexford M.Morey. – Приоритет 3.01.72.
7. C.Leonard Bennett, Gerald F. Ross. Time-Domain Electromagnetics and Its Applications. – Proceedings of the IEEE, vol.66, №3, 1978.
8. Terence W. Barrett. History of UltraWideBand (UWB) Radar & Communications: Pioneers and Innovators. – Progress in Electromagnetics Symposium 2000, July 2000.

9. Пат. 4641317 США. Spread Spectrum Radio Transmission System/Larry W.Fullerton. – Приоритет 3.12.84.
10. Warren Webb. ULTRAWIDEBAND: an Electronic Free Lunch? – EDN, 21 December, 2000.
11. Пат. 5687169 США. Full Duplex Ultrawide-Band Communication System and Method/Larry W.Fullerton. – Приоритет 27.04.95.
12. R.A. Scholtz. Multiple Access with Time-Hopping Impulse Modulation (invited paper). – IEEE MILCOM'93, 1993.
13. PulsON Technology. Time Modulated Ultra-Wideband for Wireless Applications. – Time Domain Corporation, 2000.
14. Пат. 5677927 США. Ultrawide-Band Communication System and Method/Larry W.Fullerton, Ivan A. Cowie. – Приоритет 20.09.94.
15. Notice of Inquiry. – FCC, 1 September, 1998.
16. The Temporal and Spectral Characteristics of Ultrawideband Signals – NTIA Report 01-383, January 2001.
17. David S. Anderson, Edward F. Drocella, Steven K. Jones, Mark A. Settle. Assessment of Compability between Ultrawideband (UWB) Systems and Global Position System (GPS) Receivers. – NTIA Special Publication – 01-45, U.S. Department of Commerce, February 2001.
18. Kardo-Sysoev A.F., Brylevsky V.I. et al. Powerful Sources of Ultrawide Band Pulsed Coherent Signals. – "EUROEM 2000" Euro Electromagnetics, Edinburgh, 30 May – 2 June 2000.
19. Kardo-Sysoev A.F. et al. Ultra Wide Band Solid State Pulsed Antenna Array. – "EUROEM 2000" Euro Electromagnetics, Edinburgh, 30 May – 2 June 2000.

Короткоимпульсные силовые ключи, разработанные группой А.Ф. Кардо-Сысоева

Дрейфовые диоды и транзисторы с резким восстановлением (ДДРВ и ДТРВ) были разработаны в середине 80-х. Принцип действия диода с резким восстановлением иллюстрирует рис.6 [18].

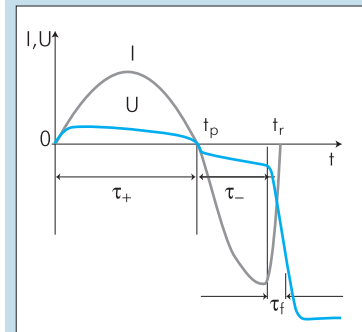


Рис. 6. Временная диаграмма работы диода с резким восстановлением

В начальный момент через диод пропускают ток в прямом направлении в течение интервала τ_+ . Тем самым в области p-n-перехода образуется достаточно много свободных носителей. Затем направление тока инвертируется. В течение времени τ_- диод остается открытым, после чего он скачкообразно закрывается, и напряжение на нем

бьоры с особой геометрией примесных профилей, где этот момент можно точно задавать внешней схемой, за счет управления током через диод. Цепочка последовательно включенных ДДРВ работает как один диод (см. табл.1).

Простейший пример схемы формирования импульсов на основе ДДРВ приведен на рис.7. Изначально вся энергия накапливается в емкостях C1 и C2. В начальный момент открывается ключ S1, затем в момент t_p – ключ S2. В момент t_r ток через диоды прекращается, и вся запасенная в индуктивностях L1, L2 энергия попадает в нагрузку R1. Существенно, что напряже-

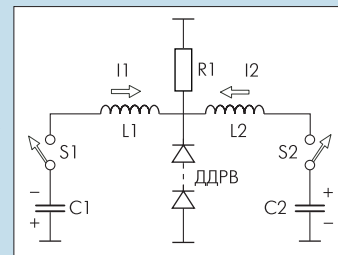


Рис. 7. Простейшая схема оконечного каскада короткоимпульсного генератора на ДДРВ

сть же быстро нарастает. Скорость изменения напряжения достигает $2 \cdot 10^{12}$ В/с и не зависит от максимального напряжения на диоде U_m . Последовательно соединяя такие диоды, можно достичь высоких значений коммутируемого напряжения. Однако известные до работ группы А.Ф.Кардо-Сысоева диоды с резким восстановлением имели большой разброс момента начала восстановления t_r , в результате их последовательное соединение было невозможно. Отечественные ученые создали при-

Таблица 1. Семейство силовых импульсных полупроводниковых приборов для связанных сверхширокополосных систем. КР – ключ-размыкатель, КЗ – ключ-замыкатель

Семейство приборов	Технология изготовления прибора	Тип прибора	Основные параметры приборов (один прибор/сборка из нескольких структур)				
			Время переключения, нс	Макс. частота, МГц	Макс. импульсный ток, А	Макс. напряжение, кВ	Минимальный период повторения, нс
Дрейфовые приборы с резким восстановлением (КР)	Глубокая диффузия легирующих примесей, протонное облучение	ДДРВ	0,5–5	5	20–2000	0,5–2/400	100–500
		ДТРВ	2–10	5	5–100	0,5–2	200–1000
	Эпитаксия, твердофазное сращивание, ионная имплантация, селективное травление, мелкая диффузия легирующих примесей	ДДРВ	0,1–0,4	100	1–1000	0,1–0,4/10	5–50
		ДТРВ	0,3–1	100	1–40	0,1–0,4	10–100
Приборы на задержанной ударно-ионизационной волне (КЗ)	Глубокая диффузия легирующих примесей, протонное облучение	Диодные лавинные обострители (ДЛО)	0,05–0,2	0,001–0,2	20–2000	1,5–15/50	5–200

Две команды роботов – коробки на колесах – замерли друг перед другом. Прозвучал свисток, и на поле величиной со стол для пинг-понга вокруг небольшого мяча развернулась настоящая баталия. Игроки-роботы каждой из команд стремились забить его в ворота противника, и стиль их движения напоминал поведение живых спортсменов. В это время разработчики с тревогой и азартом следили за игрой своих творений, сознавая невозможность оказать им какую-либо помощь, ведь все действия роботов на поле были абсолютно самостоятельны.

Вообще робобол (robosoccer), или футбол для роботов, – один из новейших экспериментов робототехники, популярность которого в мире растет с невероятной быстротой. Соревнования роботов проходят как на национальном, так и международном уровне. Самое значительное состязание – ежегодный чемпионат RoboCup. В прошлом году он проходил в австралийском Мельбурне и привлек более 70 участников в четырех лигах. В этом году подано уже более 140 заявок на участие – как от профессионалов, так и от студентов.

Каждая из четырех лиг RoboCup имеет свои цели и правила. Первая лига объединяет программы-симуляторы. Центральный сервер симулирует поле и игру, а противники – это автономно работающие программы, управляющие действиями игроков.

Вторая лига – малые роботы. Команда включает пять колесных или гусеничных роботов размером не более 18 см в ширину и 15 см в высоту. Команды устанавливают по одной видеокамере для наблюдения за игрой, изображение обрабатывается компьютером, который по радио управляет каждым роботом команды. Третья лига –

роботы среднего размера, также на колесном или гусеничном ходу. В каждой команде – четыре робота, играющих обычным футбольным мячом на поле площадью с девять столов для пинг-понга. Каждый робот имеет свои органы зрения и процессор, может “общаться” по радио со своими товарищами по команде, однако не может управляться извне. И, наконец, четвертая лига – четвероногие роботы, представляющие собой специальные версии Рободогов корпорации SONY.

Интерес к новому виду “спорта” объясняется не только тем, что это одновременно и игра, и забавное зрелище. Робобол поставил перед разработчиками широкий спектр задач. Системы зрения должны отслеживать поле, положение мяча и игроков (своих и чужих), механические и электронные системы должны быть надежными, а искусственный интеллект – обеспечивать взаимодействие робота с командой и приводить к результативной игре. Роботам приходится действовать в реальном времени в условиях постоянно изменяющейся ситуации. Таким образом, робобол представляет собой идеальный полигон для отработки множества технологий, необходимых и в чрезвычайных ситуациях, и при исследовании космического пространства.

Амбиции организаторов чемпионата, пожалуй, чрезмерны: к 2050 году создать команду человекообразных роботов, способных участвовать в настоящих, человеческих футбольных первенствах. Сегодня же доминируют роботы на колесах, которые передвигают мяч либо специальным манипулятором, либо наезжая на него, т.е. совсем не так, как люди.

Источник: IEEE Spectrum Online, <http://www.institut.ieee.org>

ние в нагрузке R1 может быть во много раз выше, чем на конденсаторах C1 и C2 – высокое напряжение присутствует в схеме в течение короткого времени, что уменьшает опасность ее повреждения.

Основной недостаток схем на ДДРВ – большой межимпульсный интервал, обусловленный скоростью срабатывания ключей S1, S2 и временем зарядки конденсаторов C1, C2. Разрешить эту проблему помогают дрейфовые транзисторы с резким восстановлением (ДТРВ). Эти приборы благодаря особой n+-p-n+-структуре могут формировать резкое падение напряжения на коллекторном p-n-переходе так же, как и ДДРВ. Однако время нарастания напряжения у них ниже, чем у диодов. Зато они, как трехэлектродные приборы, гораздо лучше управляются. В схеме на рис.8 ДТРВ, управляемый внешним коммутирующим элементом через трансформатор T1, используется как управляющий ключ для ДДРВ. В результате достоинства ДДРВ-схем (высокая скорость нарастания напряжения) сочетаются с высокой частотой повторения импульсов и точным их позиционированием во временной последовательности. На основе ДДРВ и ДТРВ создан ряд генераторов с уникальными параметрами (табл.2).

Таблица 2. Семейство генераторов электрических импульсов для сверхширокополосных связанных систем

Модель	Тип силовых ключей	Время нарастания, нс	Ширина импульса, нс	Амплитуда, В	Средняя (макс.) частота повторения, МГц	Габариты, мм
HFPG-1-0.5	ДДРВ/ ДТРВ	<0,7	<2	500	2 (3)	80×60×32
HFPG-1-2.5		<0,7	<2	2500	(2)	300×300×200
HFPG-1-5		<0,7	<2	5000	(0,5)	нет данных
HFPG-5-0.05		<0,14	<0,3	50	10 (20)	80×60×32
HFPG-7-0.15		<0,3	<0,7	150	10 (20)	80×60×32
HFPG-7-0.5		<0,3	<0,7	500	2	200×120×100
HFPG-7-1	<0,3	<0,7	1000	1	200×120×100	
HFPG4-0.5	ДДРВ/	<0,1	<0,5	500	(0,2)	100×50×32
HFPG4-1-10	ДТРВ/	<0,1	<0,25	1100	0,01	100×50×32
HFPG4-1-50	ДЛО	<0,1	<0,25	1100	0,05	115×64×34

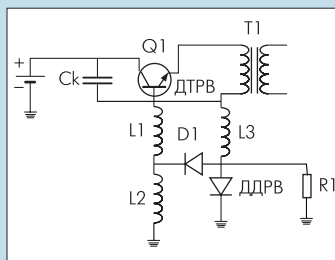


Рис. 8. Короткоимпульсный генератор на основе ДТРВ и ДДРВ

Семейство приборов на задержанной ударно-ионизационной волне было разработано группой А.Ф. Кардо-Сысоева раньше дрейфовых приборов с резким восстановлением. Одни из представителей этого семейства – диодные лавинные обострители (ДЛО). Фактически это диоды, работающие в режиме лавинного пробоя, однако у них при высокой скорости нарастания напряжения на обратном смещенном p-n-переходе напряженность поля в области перехода может превосходить статический порог пробоя (рис.9). Происходит “задержка ионизации” области перехода, во время которой напряжение на диоде можно довести до значений, гораздо более высоких (киловольты), чем на обычных лавинных диодах. Время спада напряжения у ДЛО составляет 50–200 пс, а максимально допустимое напряжение – до 15 кВ (табл.1). Однако для работы таких приборов необходимы устройства, формирующие броски напряжения со скоростями нарастания порядка 10^{12} В/с. С появлением ДДРВ/ДТРВ данная проблема разрешилась. Приборы этих двух типов – ДЛО и ДДРВ/ДТРВ идеально дополняют друг друга. Используя ДЛО в качестве оконечного каскада схемы на основе ДТРВ/ДДРВ, был создан ряд генераторов мощных сверхкоротких импульсов (табл.2). Однако частота повторения импульсов у таких приборов относительно невелика и ограничена величинами порядка 100 кГц.

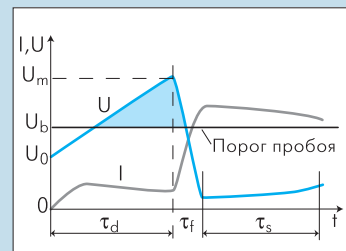


Рис. 9. Временная диаграмма работы ДЛО