

ТЕХНОЛОГИЯ C-UWB – ОСНОВА

ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Сегодня многие говорят об инновационных технологиях со всех трибун и на всех уровнях. Но при этом реальных действий, направленных на появление и развитие этих самых инновационных технологий, предпринимается чрезвычайно мало. Очень многие российские специалисты развивают инновационные технологии в Германии и в США, в Чехии и на Тайване, в Китае и в Южной Корее, Японии, Сингапуре – где угодно, но не в России. Видимо, в нашей стране этим можно заниматься только вопреки общему климату в области инноваций – иначе данную тенденцию не объяснить. Тем бережнее нужно относиться ко всему новому и передовому, что делается в нашей стране. Предлагаемая статья посвящена одной из технологий в области связи (что очень важно, защищенной патентами России и США), которая при должном внимании может стать прорывной – и российской. Отметим, что автор специально описывает предлагаемую технологию в самом общем виде, подчеркивая тем самым ее универсальность для чрезвычайно широкого круга применений.

ТЕХНОЛОГИИ

Несмотря на то, что первые радиосистемы (А.С.Попов, С.Маркони, Н.Тесла) были по своей сути сверхширокополосными, работы в этом направлении активно начали развиваться во второй половине прошлого века. Причем одним из признанных основоположников классических систем связи с широкополосными шумоподобными сигналами является русский ученый Л.Е.Варакин, работавший в этой области в 1960–80-х годах [1]. В 1987 году в США Ларри Фуллертон получил свой первый патент в области сверхширокополосной связи [2] и основал компанию Time Domain [3]. За десять лет работы компания со своей технологией PulsOn (импульсное радио) превратилась в одного из лидеров в области сверхширокополосных (UWB) связанных систем и радаров, по-



А.Галицын, к.т.н.
novsystem@mail.ru

лучив свыше 60 патентов по тематике UWB. В области UWB в мире развязалась нешуточная патентная война, продолжающаяся до сих пор [4].

В отличие от технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA), в которой используется расширение спектра сигнала методом прямой последовательности (DSSS), 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 и обеспечения кодового разделения каналов связи.

Разумеется, какая бы система ни была, вне зависимости от типа модуляции и ширины полосы сигнала, для нее выполняются фундаментальные соотношения полосы пропускания, скорости передачи информации и соотношения сигнал/шум, сформулированные в теореме Котельникова-Шеннона. С точки зрения рынка значительно важнее патентная чистота технологии, присущие ей особые уникальные качества и используемый частотный диапазон. Остальные показатели (в пределах теоремы Котельникова) обычно размещаются один на другой. Таким образом, если посмотреть на UWB-технологии сквозь призму российского рынка, и особенно его государственного сектора, с учетом возможного вступления в ВТО, то гораздо больший интерес для страны может представлять российская C-UWB-технология (контролируемая сверхширокополосная технология) радиосвязи, которая может быть использована как в сверхширокополосном (в диапазоне СВЧ), так и в обычном широкополосном режиме [5].

СУЩЕСТВО C-UWB ТЕХНОЛОГИИ

В традиционных широкополосных системах для расширения спектра используется модуляция амплитуды, фазы или частоты, либо и того, и другого, и третьего, вместе взятых. В предлагаемой C-UWB технологии передача информации основана на модуляции мощности сложного шумового сигнала и переходе к его некогерентной (энергетической) обработке. Это позволяет избавиться от промежуточных частот и гетероги-

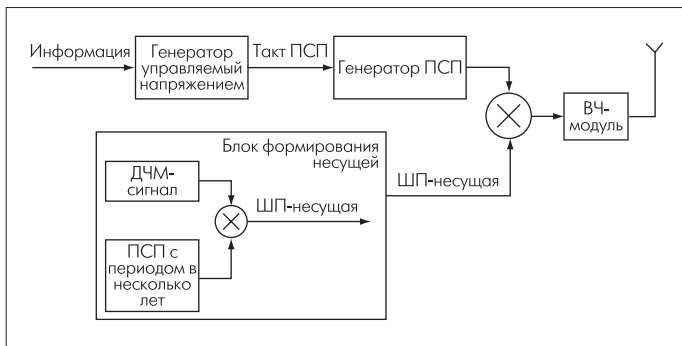


Рис. 1. Обобщенная структура передатчика по технологии C-UWB

нирования, прецизионных фильтров, кварцевых генераторов, прецизионной автоподстройки частоты и т.п. – т.е. от массы весьма сложных механизмов и тех элементов, которые трудно интегрировать на кристалле.

Особенностью C-UWB-технологии являются способы формирования сигнала в передатчике и его обработки в приемнике. Рассмотрим один из возможных вариантов реализации C-UWB-системы. По методу формирования структуры сигнала C-UWB технология в некотором смысле близка к известной технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов CDMA (Code Division Multiple Access) [6]. В обоих случаях сигнал формируют в цифровом виде на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП), а в приемнике его демодулируют корреляционным способом, что позволяет реализовать кодовое разделение каналов. Сами же методы модуляции в C-UWB технологии близки предложенным для UWB-систем компанией Time Domain (США) [7]. Принцип модуляции прост – берется некая ПСП, например, на основе бинарного линейного кода с возвратом к нулю (RZ). Каждому импульсу этой ПСП ставится в соответствие бит информационного сигнала. В зависимости от значения этого бита (0 или 1) соответствующий ему импульс ПСП сдвигается по временной оси вперед или назад (не изменяя общую частоту следования импульсов), например на 1/4 периода повторения импульсов. Далее этот цифровой сигнал в виде ПСП дискретно модулирует заранее подготовленную "широкополосную несущую", структура которой максимально приближена к белому шуму (рис.1). В результате сигнал с информацией будет представлять собой псевдослучайные посылки импульсов идеального шума (рис.2).

В качестве широкополосной несущей (т.е. шумоподобного сигнала, заполняющего импульсы кодированного инфор-

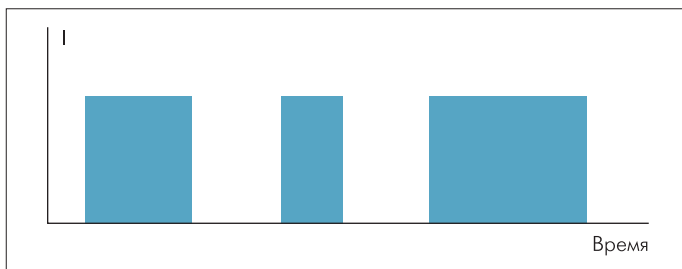


Рис. 2. Последовательность импульсов сообщения C-UWB

мационного сигнала) можно использовать сигналы любого уровня сложности, различного вида и происхождения. Например – дискретный частотно-модулированный сигнал (ДЧМ) с непрерывной фазой, формируемый на основе высокочастотного опорного сигнала и псевдослучайной последовательности. Такой ДЧМ-сигнал будет занимать фиксированную полосу частот $[F_1, F_2]$ (рис.3). Полученный сигнал дополнительно перемножается с ПСП с периодом повторения в несколько лет (см. рис.1), спектр которой имеет вид $(\sin(x)/x)^2$. При этом спектр сигнала несущей, являясь результатом перемножения сигналов с полосовым спектром и спектром вида $(\sin(x)/x)^2$, теряет характерный колоколообразный вид $(\sin(x)/x)^2$ и будет иметь равномерную (в полосе $[F_1, F_2]$) огибающую спектра, по форме близкую прямоугольной (рис.4).

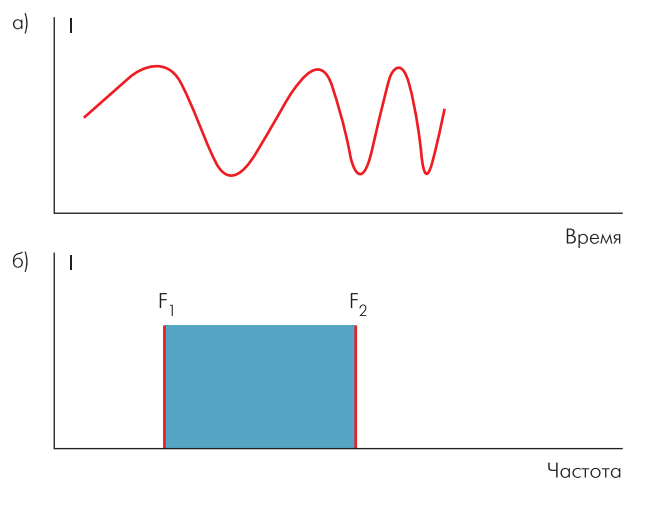


Рис. 3. ДЧМ-сигнал с непрерывной фазой: а) форма, б) спектр

В результате перемножения "широкополосной несущей" и ПСП (модулированной информационной последовательности) структура сигнала полностью скрывается, представляя собой совершенно случайный (шумовой) сигнал. Его скрытность близка к идеальной, поскольку на любой из конкретных частот в полосе приема и на кратных гармониках отсутствует периодическое повторение мощности. Поэтому данный шумоподобный сигнал практически невозможно идентифицировать ни специальными приемниками, ни панорамными сканерами.

Классическую UWB-технологии компании Time Domain можно рассматривать как предельный случай C-UWB-технологии, в которой длительность шумовой посылки выходного сигнала сделали равной одному периоду сверхкороткого импульса.

ОБРАБОТКА СИГНАЛА. ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ

Классические шумоподобные системы обеспечивают наивысшую помехозащищенность по сравнению с любыми другими классами систем радиосвязи. Тем не менее, попадание помех любого вида в приемный радиотракт существенно сни-

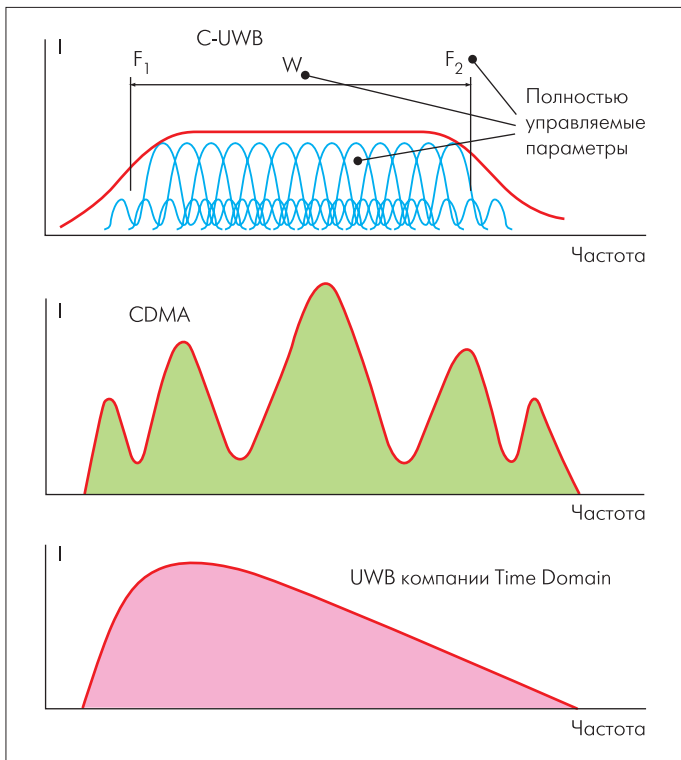


Рис.4. Спектр сигнала в технологии C-UWB в сравнении со спектрами сигналов CDMA и UWB компании Time Domain

жает соотношение сигнал/шум и, соответственно, ухудшает все качественные характеристики системы связи (в соответствии с теоремой Шеннона-Котельникова). Более того, помеха легко может привести к превышению предельного соотношения сигнал/шум и полному выводу из строя даже сверхширокополосной системы связи. Поскольку широкополосные системы по своей природе (в этом суть механизма корреляции) восприимчивы лишь к помехам с очень сходной структурой сигнала, да еще и синхронизированным с работой приемника, то такие "специальные" помехи действительно большой мощности, в широкой полосе и на большом пространстве – исключительная редкость, даже в военное время. Наиболее реальный и опасный тип помех для систем широкополосной связи – это мощные помехи (случайные и преднамеренные) от близкорасположенных мощных узкополосных станций, попавшие в полосу пропускания приемника.

Для борьбы с такого рода помехами в рамках C-UWB технологии предлагаются новые методы повышения помехо-

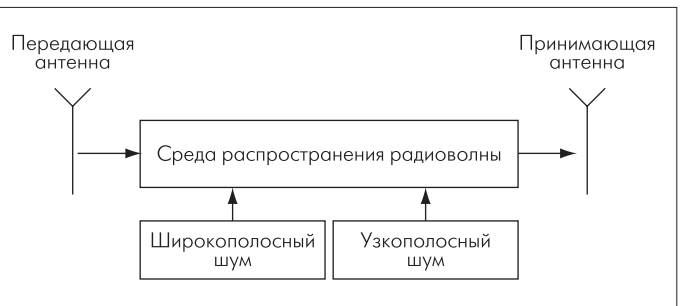


Рис.5. Схема прохождения радиосигнала в эфире

защищенности [8–10]. Они способны дополнительно повысить ее на несколько порядков (при прочих равных условиях) по отношению к классическим широкополосным системам, в которых помехозащищенность обеспечивается исключительно за счет увеличения базы сигнала. Отметим, что в данной работе мы обозначаем лишь базовые и запатентованные для C-UWB технологии способы повышения помехозащищенности и методы обработки сигналов в приемнике.

Рассмотрим принцип реализации механизма подавления узкополосной помехи в рамках C-UWB технологии. В передающем тракте формируют широкополосный шумовой сигнал в полосе частот $[F_1, F_2]$, мощность которого модулируют по заданному закону модуляции с частотой модуляции $F_{\text{мод}} \ll (F_2 - F_1)$, например, как это было описано ранее. Говоря о модуляции мощности, мы обращаем внимание на тот факт, что в приемном тракте высокочастотный сигнал обрабатывается интегрально во всей полосе, а не по отдельным значениям его амплитуды. Полученный сигнал передается в среду распространения, например, радиоэфир. Предположим, что в среде распространения на сигнал передатчика накладывается узкополосная помеха (узкополосный шум) и широкополосный шум (рис.5). Под узкополосным шумом понимаем сигнал с частотой $F_{\text{узк}} \in [F_1, F_2]$ и шириной спектральной полосы $\Delta f_{\text{узк}} \ll F_2 - F_1$.

Узкополосная помеха (или группа узкополосных помех в ограниченной полосе частот) может быть амплитудно-модулированной, частотно-модулированной, сканирующей и т.д., но частотная полоса спектра изменения ее мощности (квadrата амплитуды напряжения) $\Delta F_{\text{узк}}$ должна быть много меньше, чем частотная полоса спектра модулированного широкополосного шумового сигнала в точке приема. Таким образом,

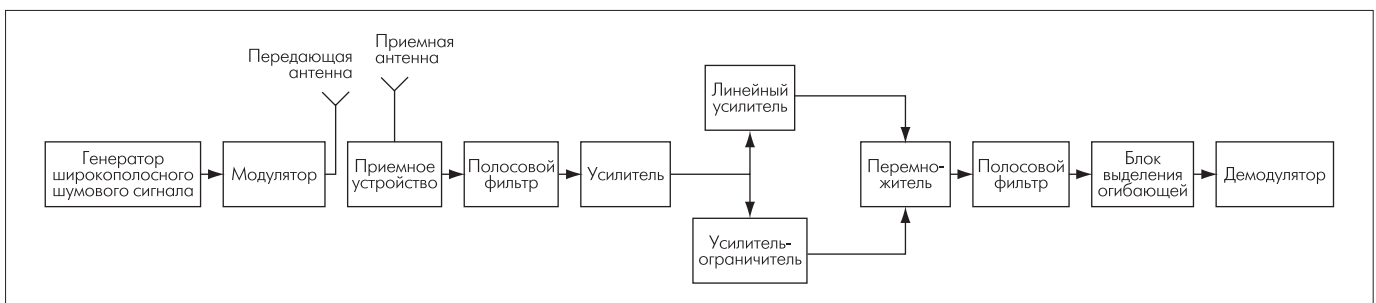


Рис.6. Обработка ВЧ-сигнала в приемнике



на вход принимающего устройства (рис.6) поступает сигнал, равный векторной сумме напряжений полезного сигнала $U_{\text{сиг}}$ и узкополосной помехи $U_{\text{узк}}$. Этот смешанный сигнал поступает на вход полосового фильтра с полосой пропускания частот $[F_1, F_2]$. Затем отфильтрованный сигнал, предварительно усиленный усилителем, разделяют на два сигнала. Первый сигнал поступает в усилитель-ограничитель. При прохождении сигнала с помехой через усилитель-ограничитель помеха подавит полезный сигнал и на его выходе сформируется сигнал нормированной величины $U_{\text{узк}}/|U_{\text{узк}}|$. Второй сигнал поступает на линейный усилитель, который не изменяет форму исходного сигнала. Полученные два сигнала поступают в перемножитель, на выходе которого формируется результирующий сигнал, спектр которого представлен на рис.7. Этот сигнал фильтруют полосовым фильтром с полосой пропускания $[\Delta F_{\text{узк}}, (F_2 - F_1)]$. В результате составляющая узкополосной помехи удаляется из спектра сигнала – узкополосная помеха играет роль частоты гетеродина для полезного сигнала (рис.8). Выделяя далее огибающую из отфильтрованного сигнала, получаем полезный сигнал, модулированный по мощности, который в дальнейшем обрабатывается корреляционным способом по известным законам демодуляции для получения информационного сигнала. При этом модуляция мощности может быть самой различной – например, амплитудно-частотной или импульсной с применением любых способов кодирования, псевдослучайных и криптографических последовательностей.

Главное в предложенном методе – что информация закладывается в изменение мощности широкополосного сигнала и передается во всей полосе частот $[F_1, F_2]$, а при переносе спектра во время обработки в приемнике переносится вместе со спектром. Следует заметить, что описанные выше методы повышения помехозащищенности применимы и для других систем на основе широкополосных радиосигналов, передача информации у которых основана на модуляции мощности широкополосного сигнала. Их можно реализовать как аналоговыми, так и цифровыми методами.

Определяющим фактором для данного способа подавления узкополосной помехи является частотная полоса спектра изменения мощности помехи, а не частотная полоса, занимаемая помехой в эфире. Это позволяет подавить и относительно широкополосные сканирующие помехи или даже группы помех (с собственной шириной помехи до 20% от полосы пропускания приемника), включая сканирующие (причем с любой скоростью и во всей полосе пропускания) помехи, не зная реального месторасположения помехи в спектре сигнала. Причем мощные узкополосные помехи, у которых модуляция мощности отсутствует вообще, не будут являться помехами для систем радиосвязи, основанных на C-UWB технологии. Как показали испытания, проведенные в ряде ведущих российских научных институтов, рассмотренные выше спо-

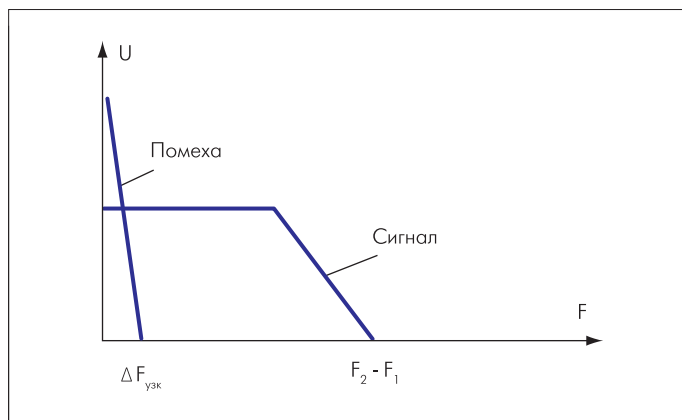


Рис.7. Спектр сигнала на выходе перемножителя

собы обеспечивают повышение помехозащищенности широкополосной шумоподобной системы связи более, чем на два порядка, по сравнению с традиционной ее реализацией. Естественно, что имеются и другие положительные последствия удаления мощнейших узкополосных помех (в соответствии с теоремой Шеннона-Котельникова).

Фантастическая простота и дешевизна запатентованных способов заключается в удалении мощных узкополосных помех из широкополосного спектра сигнала посредством обычной аналоговой фильтрации, причем без применения сложнейших алгоритмов, да и вообще методов цифровой обработки сигналов, либо сложных адаптивных или режекторных фильтров – что, казалось бы, невозможно.

ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ДОСТОИНСТВА

Современные системы связи, ориентированные на интегральную реализацию, строятся на основе процессоров цифровой обработки сигналов, подразумевающих предварительную оцифровку спектра радиосигнала (и, тем самым, серьезно ограничивающих верхнюю границу принимаемого частотного диапазона предельными параметрами АЦП), чтобы затем полностью процессорным способом (сложно, дорого и медленно) обрабатывать цифровой сигнал (например, посредством Фурье-преобразований). Наличие в таких системах АЦП и процессоров определяет их относительную дороговиз-

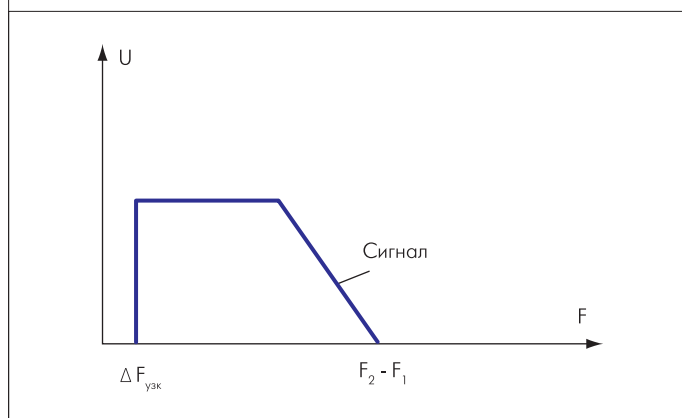


Рис.8. Спектр результирующего сигнала

ну даже при интегральной реализации. В отличие от них, в рамках С-UWB-технологии дешевым аналоговым способом до "уровня огибающей" обрабатывается широкополосный сигнал и одновременно повышается помехозащищенность, т.е. эффективно вырезаются даже сканирующие помехи. И лишь затем корреляционным методом, причем уже на низкой частоте, выделяется информация. В сочетании с предложенными способами повышения помехозащищенности и формирования самого шумоподобного сигнала одновременно обеспечиваются идеальная имитоскрытность и высочайшая информационная безопасность С-UWB систем. Более того, разработаны уникальные аппаратные методы криптозащиты, чрезвычайно дешевые в реализации, обеспечивающие эффективнейшую криптозащиту обоих уровней: как криптозащиту структуры сигнала, так и криптозащиту собственно информации. Но, поскольку патент на них еще не получен, раскрывать эту информацию мы не можем.

Минимальная стоимость является одним из главных преимуществ С-UWB технологии. Причем автоматически (аналоговая реализация обработки вместо процессорной) достигается предельная скорость обработки сигнала и, соответственно, предельная пропускная способность радиосистемы, т.е. обеспечивается предельно возможная скорость передачи и обработки информации. В ряде применений это может иметь решающее значение.

Немаловажно, что С-UWB технологию можно реализовать в любом частотном диапазоне – ведь разные частотные диапазоны обеспечивают разные потребительские качества. Главное же достоинство технологии – кардинальное упрощение аналоговой части приемника, что принципиально упрощает его реализацию на кристалле и, соответственно, снижает их стоимости в десятки (если не в сотни!) раз. Это существенно увеличивает надежность радиосистем и открывает возможность их действительно массового производства.

Также важно, что С-UWB технология обеспечивает принципиально более высокую стабильность эксплуатационных параметров изделий, так как температурные изменения электрических параметров компонентов не столь значительно влияют на основной передаваемый информационный параметр С-UWB систем – излучаемую мощность, какое они оказывают в традиционных фазово-частотных системах радиосвязи на фазу и частоту.

ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Благодаря некогерентной (энергетической) обработке шумоподобных сигналов и отказу от частотно-фазовых методов модуляции в С-UWB-системах на несколько порядков снижается влияние эффекта Доплера по сравнению с любыми другими технологиями. Действительно, в технологии С-UWB механизм приема и обработки высокочастотного сигнала, включая помехоподавление и переход на низкую частоту, не тре-

бует генераторов промежуточных частот (в отличие от супергетеродинных приемников). Поэтому С-UWB-приемник "не замечает" каких-либо смещений фаз и изменений частот принимаемого высокочастотного сигнала, обусловленного эффектом Доплера. Следовательно, при обработке высокочастотного сигнала не нужна ни автоподстройка частоты, ни прецизионные генераторы опорных частот. Сигнал демодулируется корреляционным способом уже на низкой частоте. А влияние эффекта Доплера на низкочастотный сигнал на несколько порядков слабее, чем его влияние на фазу и частоту высокочастотного радиосигнала. Наиболее критичны к эффекту Доплера СВЧ-системы, поэтому С-UWB-технология особенно актуальна для авиационных, спутниковых, ракетных и связанных с ними наземных комплексов и систем.

ЭФФЕКТ ЗАМИРАНИЯ СИГНАЛА

Одним из важных достоинств широкополосных и UWB-систем, основанных на корреляционных принципах обработки сигнала, является отсутствие интерференции прямо распространяющегося сигнала с сигналами, отраженными от плоских морских и наземных поверхностей. Переотражения и последующая интерференция радиоволн – это бич всех систем радиосвязи, за исключением широкополосных и сверхширокополосных, в которых эффект замирания выражен не так резко [5]. Благодаря тому, что получить сложение прямого и отраженного сигналов строго в противофазе, причем сразу на всех несущих частотах в пределах всей полосы пропускания приемника – дело такое же непростое, как и получить отраженный сигнал, строго синхронный работе коррелятора по основному сигналу. В большинстве широкополосных систем отраженный сигнал просто поступает в коррелятор с запазданием и воспринимается им как случайная помеха, никак не воздействующая на демодуляцию прямого сигнала. Поэтому сверхширокополосные системы весьма слабо подвержены воздействию эффекта замирания сигнала.

ПОЛОЖЕНИЕ СРЕДИ КОНКУРЕНТОВ

По своей идеологии и способам обработки сигналов С-UWB технология подобна классической UWB-технологии, основанной на передаче сверхкоротких радиоимпульсов. Именно эта технология сегодня наиболее помехоустойчива и дешева в реализации. Однако спектральные характеристики классических UWB-систем формируются в результате импульсных преобразований сигнала и определяются в основном физическими характеристиками уникальных выходных полупроводниковых элементов и антенн, которые не могут быть ни стабильными, ни управляемыми. Они не способны обеспечить сложную структуру сигнала, что обуславливает низкий уровень защиты информации. Недостатками этой технологии являются также практически неуправляемый диапазон рабочих частот и целый шлейф патентно-судебных споров.



Напротив, в С-UWB технологии посылки радиоимпульсов имеют контролируемую ширину и прецизионное, формируемое электронными схемами, наполнение спектра шумоподобного сигнала. Это обеспечивает абсолютную управляемость диапазоном частот и шириной полосы сигнала, а также любую, наперед заданную, сложность структуры, что при плоской форме спектра и полном отсутствии периодического повторения мощности на любой конкретной частоте обеспечивает идеальную имитоскрытность.

По сравнению с CDMA, у С-UWB в сотни раз более высокая помехозащищенность в отношении мощнейших узкополосных помех (наиболее опасных). С-UWB обеспечивает в десятки раз более высокий уровень информационной безопасности как в плане имитоскрытности, так и в плане собственно возможности "вскрытия" структуры сигнала.

OFDM-системы имеют на порядки большую сложность и стоимость, предполагают DSP-реализацию и несопоставимы с С-UWB-технологией в плане имитоскрытности, помехозащищенности и информационной безопасности.

Таким образом, С-UWB технология обладает преимуществами лидирующих (конкурирующих) технологий и свободна от их недостатков, как технико-экономических, так и в части прозрачности прав на интеллектуальную собственность. Поэтому она должна представлять интерес в первую очередь для отечественных производителей и заказчиков. Особенно важным является тот факт, что выпуск изделий на основе С-UWB технологии не требует технологического переоснащения существующих полупроводниковых производств.

Таким образом, мы предлагаем технологию, способную на качественно новом уровне решать широчайший круг задач в области телекоммуникаций, систем позиционирования, локализации и т.п. Но эффективной и востребованной данная технология станет лишь при ее интегральной реализации и массовом применении. Именно в этом случае сможет в полной мере проявиться одно из основных ее достоинств – чрезвычайно низкая себестоимость и высокая технологичность по

сравнению с функциональными аналогами. Однако для того, чтобы технология стала массовой, только усилий разработчиков уже недостаточно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Варакин Л.Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985.
2. Пат. 4641317 США. Spread Spectrum Radio Transmission System/Larry W.Fullerton. – Приоритет 3.12.84.
3. **Шахнович.И.** Сверхширокополосная связь. Второе рождение? – ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2001, №4.
4. Warren Webb. ULTRAWIDEBAND: an Electronic Free Lunch? – EDN, 21 December, 2000.
5. **Галицын А.А.** Технология широкополосной высокочастотной радиосвязи (С-UWB): что лежит "под сукном" у российских чиновников? – ПЕРВАЯ МИЛЯ, 2008, №1.
6. **R.Klostermeyer.** Theory and Applications of OFDM and CDMA: Wideband Wireless Communications. – John Wiley & Sons. 2005.
7. Пат. 5687169 США. Full Duplex Ultrawide Band Communication System and Method/Larry W.Fullerton. – Приоритет 27.04.95.
8. Патент №2127021 RU. Способ повышения помехозащищенности при передаче и приеме широкополосного сигнала с расширением спектра/Калугин В.В, Смирнов В.А., Бобков М.Н. Приоритет от 25.06.1998.
9. Патент №2232464 RU. Способ подавления узкополосной помехи в системе широкополосной связи/ Бобков М.Н., Галицын А.А., Калугин В.В. Приоритет от 22.08.2002.
10. US Patent № 7.250.541 B2. Method for suppressing narrowband noise in a wideband communication system/ М. Bobkov, А. Galitsyn, V. Kalugin. Приоритет от 22.08.2002.