

УДК 621.384.852

“НЕЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ” ПРИЕМ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

С. Г. Бунин

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев, Украина

Предложены метод приема импульсных сигналов сверхмалой длительности (IR-UWB) и реализующий его приемник, использующий не накопление энергии этих импульсов, а селекцию их временного положения. Вероятность ошибки при приеме оценивается отношением количества импульсов, сгенерированных одновибратором и соответствующих коду сигнала, к количеству импульсов, вызванных шумами и помехами. Исследованы вероятность правильной селекции импульсов кода и вероятность обнаружения импульсов шума. Проведено моделирование приема ультракоротких импульсных сигналов, подтвердившее реализуемость предложенного приемника и правильность результатов теоретических исследований.

A method and a receiver for reception of Impulse Radio Ultra Wide Band (IR-UWB) signals are proposed. Instead of impulse energy accumulation the receiver selects impulses temporal positions by comparing amplitude of impulses to noise mean level. Selected impulses are used to start single-shot multivibrator which generates impulses of preset duration and amplitude. The series of generated impulses are selected by a delay line match filter. Error probability of reception is estimated by the ratio of amount of the impulses generated by single-shot multivibrator corresponding to the signal code to the amount of the impulses caused by noise and interference. The method avoids difficulties of recognition and accumulation of very small energy of IR-UWB signals and simplifies construction of matched filter.

Введение

Вопросам использования сверхширокополосных импульсных (Impuls Radio Ultra Wide Band — IR-UWB) сигналов в системах связи [1] уделяется все большее внимание. Причиной этого является целый ряд положительных свойств таких сигналов, позволяющих осуществлять передачу информации с высокими скоростями при небольших мощностях передатчиков и относительной простоте приемопередающих устройств.

В IR-UWB системах для передачи каждого бита информации чаще всего используют последовательности импульсов. Коды последовательностей соответствуют передаваемым символам и являются адресами приемников. Кодирование потоков импульсов взаимортогональными, чаще всего, псевдослучайными последовательностями позволяет осуществлять селекцию сигналов на фоне других импульсных сигналов при множественном доступе к среде передачи (в радиосетях). Кроме того, передача символов серийой импульсов позволяет осуществлять прием при низком соотношении “энергия импульса — энергия шума” путем накопления энергии множества импульсов перед подачей сигнала на вход решающей схемы приемника.

Амплитуда и длительность импульсов, составляющих сигнал, определяют ширину спектра, его

положение на оси частот и спектральную плотность мощности. В США и Европейском Сообществе введены ограничения на размещение спектра сигнала на оси частот и допустимую спектральную плотность мощности [2]. Так, выделенный для сверхширокополосных сигналов диапазон лежит в пределах 3,1—10,6 ГГц, а максимальная плотность мощности не должна превышать $-41,3$ дБм/МГц. Эти ограничения призваны предотвратить помехи от IR-UWB сигналов более узкополосным радиосистемам, работающим в совместном диапазоне частот. Указанные ограничения позволяют реализовывать эффективные системы радиосвязи (и радиолокации) лишь на расстояниях до десятка метров.

По мере развития техники импульсной сверхширокополосной связи и использования ее потенциальных преимуществ перед сигналами на основе синусоидальных несущих, импульсные системы будут использоваться для связи и на больших расстояниях.

При подаче коротких импульсов постоянного тока на передающую антенну излучаемые поля в результате дифференцирования импульсов антенной преобразуются в так называемые гауссовские моноциклы [3]. В первом приближении моноцикл можно рассматривать как один период синусоидального сигнала. Его длительность определяет ширину спектра сигнала, а период — центральную частоту.

Таким образом, чем короче импульс, тем шире его спектр и выше центральная частота спектра [4]. В рамках указанных ограничений без дополнительной полосовой фильтрации спектра исходного передаваемого импульса его длительность должна быть $\tau_i = 1/[(10,6 - 3,1)10^9 \text{ Гц}] = 0,13 \cdot 10^{-9} \text{ с}$.

Постановка задачи

Целью работы является создание метода приема ультракоротких импульсных сигналов, основанного на определении их временного положения, а не накоплении их энергии, и его практическая реализация с помощью предлагаемого приемника.

Рассмотрим целесообразность укорочения длительности импульсов в IR-UWB сигналах. Уменьшение длительности импульсов в радиосетях позволяет увеличить среднюю скважность сигналов $\bar{Q} = T_c / (n\tau_i)$, где T_c — длительность сигнала; n — количество импульсов в сигнале; τ_i — длительность импульса.

Увеличение средней скважности позволяет увеличить объем взаимоортогональных сигналов. С увеличением скорости передачи информации длительность бита уменьшается.

Следовательно, суммарная длительность импульсов в сигнале при двоичной передаче в канале “точка — точка” с помощью псевдослучайных их последовательностей, не может превышать 50 % длительности сигнала, т. е. средняя скважность должна быть $\bar{Q} \geq 2$.

При множественном доступе к общему каналу связи значение средней скважности должно быть существенно выше для того, чтобы обеспечить необходимый уровень взаимной ортогональности или, по крайней мере, квазиортогональности между сигналами различных абонентов сети, т. е. повысить емкость сети.

Повышение значения \bar{Q} эквивалентно увеличению свободного временного пространства для размещения в нем импульсов сигналов других абонентов сети. При этом уменьшается вероятность наложения во времени импульсов сигналов различных абонентов.

На рис. 1 показана зависимость максимальной скорости передачи от количества n и длительности импульсов τ_i в сигнале при значении $\bar{Q} = 10$.

Видно, что уменьшение длительности импульсов сигналов позволяет увеличить скорость передачи информации и емкость сети.

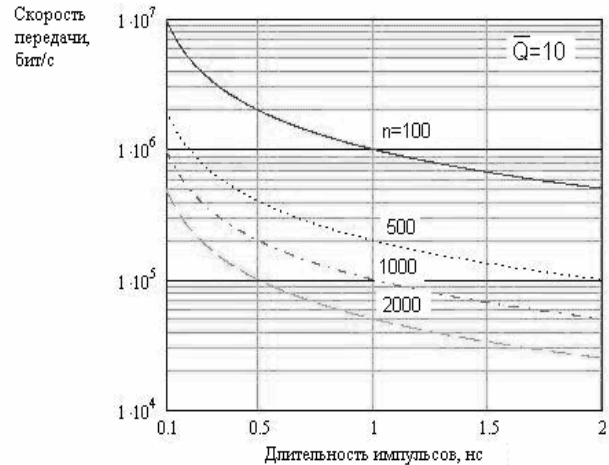


Рис. 1. Зависимость максимальной скорости передачи от количества n и длительности импульсов в сигнале при значении $\bar{Q} = 10$

Возможно, идея уменьшения длительности импульсов вызовет у читателей сомнение в отношении возможности использования таких импульсов в реальных системах из-за несоответствия их спектров указанным выше ограничениям FCC [2]. Однако можно показать, что формирование спектра сигнала в соответствии с разрешенной маской сигнала возможно не только путем выбора длительности импульсов для соответствия их спектра частотной маске, но и за счет полосовой фильтрации спектра сигнала при различных длительностях импульсов. Искажение формы импульсов при такой фильтрации не играет большой роли, поскольку при приеме с накоплением импульсов важна их энергия, а не форма. Можно также предположить, что в будущем определяющим будет допустимая спектральная плотность сигналов, а не частотное их позиционирование.

Поэтому, с одной стороны, если отвлечься от выбора положения максимума спектра сверхширокополосного сигнала на оси частот, то сокращение длительности импульсов полезно еще и с точки зрения расширения спектра сигнала, что, при прочих равных условиях, снижает спектральную плотность сигнала и, следовательно, возможные помехи другим системам связи, использующим общий диапазон частот.

К этому можно добавить, что сокращение длительности импульсов означает смещение спектра в более высокочастотную область радиоспектра. Так, например, при длительности импульсов, равной 20 пикосекундам, центральная частота спектра будет расположена вокруг частоты 50 ГГц. Дальнейшее сокращение длительности импульсов перенесет

спектры сигналов в верхнюю, сравнительно мало загруженную часть освобожденного радиодиапазона, где размещение импульсных сверхширокополосных систем связи не будет проблемой.

Однако сокращение длительности импульсов означает снижение энергии импульсов, поскольку энергия пропорциональна площади импульса. Компенсировать это снижение можно, увеличивая амплитуду импульсов. Увеличение амплитуды импульсов при сохранении их исходной энергии позволяет выделять их по амплитуде на фоне шума.

С другой стороны, при кодировании сигналов ортогональными импульсными последовательностями информация о символе сигнала, его принадлежности тому или иному источнику и адресе приемника содержится в коде сигнала, т. е. в расположении импульсов на оси времени. Если приемнику каким-либо образом удастся определить это расположение, то дальнейшая обработка сигнала может быть осуществлена внутренними механизмами. Именно такой механизм предлагается в данной ра-

боте: вместо классического способа накопления энергии импульсов за время длительности сигнала для подачи ее на вход решающего устройства, в приемнике селективируются импульсы, амплитуда которых превышает усредненное значение уровня шумов. Эти импульсы являются запускающими для внутреннего генератора импульсов заданной амплитуды и длительности, а значит и определенной заданной энергии, которые далее используются для корреляционной обработки сигнала с помощью согласованного фильтра*.

Термин “неэнергетический” означает отсутствие механизма накопления энергии высокоамплитудных, но низкоэнергетических импульсов, поступающих на вход приемника от антенны. Это и является основным отличием данного “неэнергетического” метода от классического — с накоплением.

*Положительное решение на полезную модель № u2010 06786 от 01.06.2010. “Способ приема коротких импульсных радиосигналов”

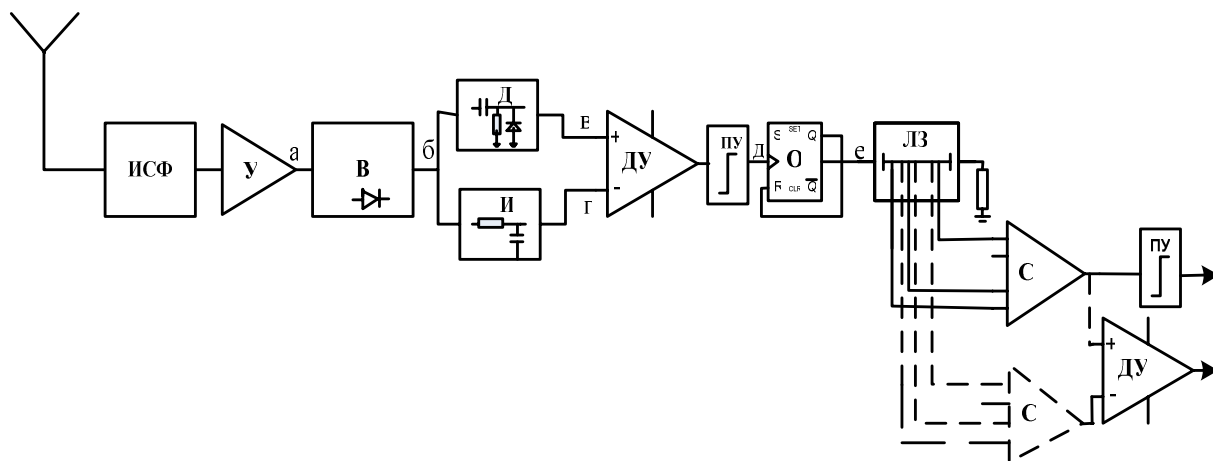


Рис. 2 Функциональная блок-схема приемника: ИСФ – фильтр, согласованный с импульсом, У – усилитель, В – выпрямитель, Д – дифференцирующее устройство, ДУ – дифференциальный усилитель, И – интегратор, ПУ – пороговое устройство, О – одновибратор, ЛЗ – линия задержки, С – сумматор.

Приемник ультракоротких импульсных сигналов

Как известно, вероятность ошибки при приеме определяется отношением величины энергии сигнала к спектральной плотности шумов E_c / N_0 на входе решающего устройства приемника. В системах IR-UWB энергия сигнала является суммой энергий отдельных импульсов за время приема одного бита информации.

Оптимальный или квазиоптимальный прием осуществляется путем корреляционного приема сигналов с помощью активных корреляторов или согласованных с сигналом пассивных фильтров [4]. В первом случае необходима синхронизация опорного сигнала коррелятора с принимаемым сигналом. Осуществить такую синхронизацию в случае приема ультракоротких импульсных сигналов весьма сложно: малая длительность импульсов требует исключительно высокой точности совпадения во времени импульсов в корреляторе, увеличивается

время установления синхронизации из-за необходимости отследить множество мелких шагов сдвига опорной последовательности при поиске корреляционного пика на выходе коррелятора.

Задача несколько упрощается, если вместо когерентного приема, основанного на совпадении форм импульсов сигнала и опорной последовательности, применить некогерентный прием. Для этого вместо перемножителя коррелятора необходимо применить ключевые схемы, открывающие вход приемника на время ожидания прихода импульсов.

Если вместо активных корреляторов использовать пассивные согласованные фильтры, построенные на линиях задержки, то, несмотря на то, что временная синхронизация в принципе не требуется, необходимая точность выполнения отводов от линии задержки должна быть весьма высокой.

Энергия передаваемого сигнала, приходящаяся на один бит информации, пропорциональна суммарной площади импульсов постоянного тока, подаваемых в антенну передатчика. Уменьшение длительности импульсов уменьшает энергию каждого из импульсов. Это уменьшение можно скомпенсировать увеличением амплитуды импульсов (их пиковой мощности). При этом можно соблюсти баланс между допустимой спектральной плотностью сигнала и импульсной мощностью составляющих его импульсов. При современных технических возможностях генерации ультракоротких импульсов в системах радиосвязи можно обеспечить превышение амплитуды принимаемых импульсов над уровнем шумов в месте приема, не выходя за ограничения на спектральную плотность сверхширокополосного сигнала. Это означает, что средняя мощность передатчиков будет оставаться небольшой благодаря большой средней скважности. Здесь уместно сравнение IR-UWB систем с системами импульсной радиолокации, в которых при средней мощности передатчика несколько десятков ватт пиковая мощность радиоимпульса может достигать десятков и сотен мегаватт. При использовании IR-UWB сигналов на основе ультракоротких импульсов этот эффект может быть еще более значительным.

В данной работе предложена схема приемника ультракоротких импульсных сигналов, основанная на неэнергетическом принципе приема. Реализация этого принципа обеспечивается схемой приемника, в которой осуществляется не накопление энергии принятых антенной импульсов сигнала, а определение их положения на оси времени. Если такая операция выполнена с достаточной степенью точности, то имеется возможность сгенерировать в приемнике импульсы заданной амплитуды и длительности и

далее использовать их для селекции сигнала по его временному коду согласованным фильтром. Для определения временного положения импульсов принимаемой последовательности необходима селекция принимаемых импульсов. Такая селекция осуществляется путем сравнения импульсов с усредненным значением импульсов, шумов и помех.

Энергия распознанных согласованным фильтром импульсов представляет собой энергию сигнала. Импульсы, не коррелирующие с импульсной характеристикой согласованного фильтра, отображают энергию шумов и помех. Поскольку энергия всех сформированных в приемнике импульсов одинакова, то эквивалентом отношения P_c / P_n является отношение количества распознанных согласованным фильтром импульсов M к общему числу всех остальных импульсов N . Это отношение может быть аргументом в формуле, определяющей вероятность ошибки при приеме.

Функциональная блок-схема приемника изображена на рис. 2. Все блоки представлены в аналоговой форме для упрощения понимания работы схемы. При практической реализации они могут выполняться на основе цифровых схем или программного обеспечения, если последнее не ограничивает требуемое быстродействие схемы.

На рис. 3 изображены идеализированные формы сигналов в различных точках схемы.

Сигнал от приемной антенны поступает на фильтр, согласованный с формой принимаемых импульсов, т. е. через полосовой фильтр, частотная характеристика которого соответствует основному лепестку спектра импульсов. Этот фильтр снижает шумы и помехи, лежащие вне используемого частотного диапазона, в частности помехи от мощных радиостанций, работающих на частотах ниже и выше полосы принимаемого импульсного сигнала.

Далее следует широкополосный усилитель, повышающий амплитуду смеси сигнала и шума до уровня, необходимого для работы следующего за ним каскада — выпрямителя. Функция выпрямителя состоит в превращении смеси сигнала и шума в однопольный видеосигнал.

Выпрямленный сигнал подается на противофазные входы дифференциального усилителя через дифференцирующую и интегрирующую цепи. Дифференцирование увеличивает крутизну переднего фронта импульсов. Производная от заднего фронта импульсов отрицательной полярности устраняется схемой восстановления постоянной составляющей (диодом). Продифференцированный сигнал представляет собой составляющие сигнала и шумов с высокой крутизной фронтов.

На выходе интегратора (например, емкости, нагруженной на разряжающее сопротивление) напряжение пропорционально среднеквадратическому напряжению шумов и помех. Импульсы сигнала оказывают малое влияние на величину этого напряжения благодаря большой скважности сигнала. Усредненное напряжение с выхода интегратора используется в качестве сигнала автоматической регулировки усиления дифференциального усилителя или в качестве регулятора порога закрытия канала для сигналов с малой амплитудой.

На выходе дифференциального усилителя включено пороговое устройство, ограничивающее сигналы по уровню как снизу, так и сверху. На выходе порогового устройства получают сформированные импульсы для повышения точности работы следующего блока приемника — одновибратора.

Одновибратор, в ответ на подаваемые на его вход запускающие импульсы, генерирует импульсы постоянного тока фиксированной длительности и амплитуды. Длительность этих импульсов выбирается меньшей длительности минимальных пауз между импульсами в коде сигнала. Время следования сгенерированных одновибратором импульсов соответствует последовательности импульсов в принимаемом сигнале. Возможность управления энергией этих импульсов, т. е. амплитудой и длительностью, позволяет снизить конструктивные требования к следующему узлу схемы — пассивному согласованному фильтру.

Пассивный согласованный фильтр выполнен на линии задержки с отводами и сумматоре или нескольких сумматорах. Согласованный фильтр вычисляет корреляционную функцию между сигналом и комплексно сопряженной с ним импульсной функцией линии задержки путем суммирования амплитуд импульсов на отводах во времени. При совпадении положения импульсов, соответствующих коду принимаемого сигнала, с точками отводов линии задержки на выходе сумматора появляется напряжение, соответствующее пику корреляционной функции, величина которого пропорциональна сумме напряжений всех принятых импульсов кодовой последовательности.

Требования к точности расположения отводов в таком фильтре существенно ниже, чем в случае селекции ультракоротких импульсов. Отклонения положений точек отводов линии задержки от номинальных значений могут лежать в пределах половины длительности сгенерированных импульсов, что существенно упрощает конструкцию согласованного фильтра.

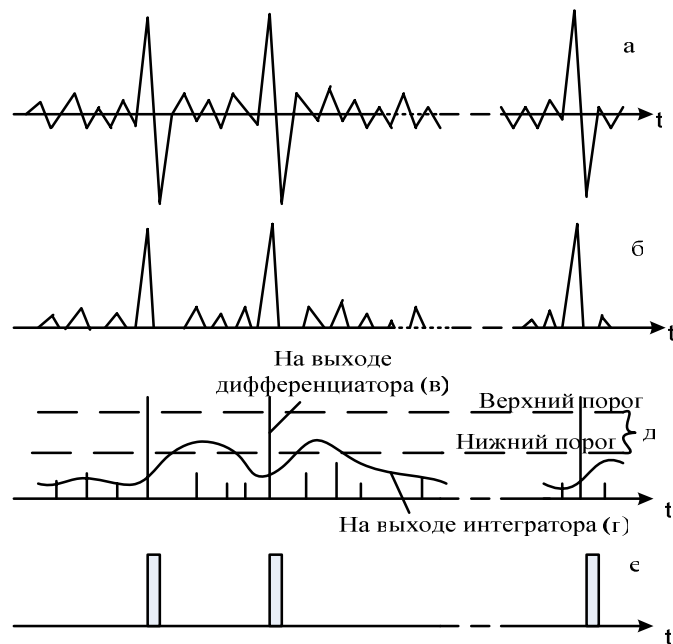


Рис. 3. Формы сигналов в различных точках схемы приемника: (а) на выходе усилителя; (б) на выходе выпрямителя; (в) на входе дифференциального усилителя; (г) на выходе одновибратора

К выходу сумматора подключено пороговое устройство. Величина порога выбирается из соображений компромисса между ложным срабатыванием при отсутствии сигнала и чувствительностью приемника при приеме не всех импульсов в сигнале. Наличие напряжения соответствует 1, его отсутствие — 0 (сигнал с пассивной паузой).

При использовании двоичных ортогональных сигналов выполняют два согласованных фильтра (на одной линии задержки) с отводами, соответствующими символам сигналов, и вместо ограничителей на выходах сумматоров применяют сравнивающее устройство — дифференциальный усилитель, полярность напряжения на выходе которого указывает на прием одного из символов — 1 или 0 (сигнал с активной паузой). Этот вариант показан на схеме штриховыми линиями.

Используя линию задержки со многими комбинациями отводов и сумматорами сигналов, можно реализовать прием многосимвольных сигналов.

Таким образом, в данной схеме сверхкороткие импульсы сигнала используются в качестве синхроимпульсов, указывающих на временное положение импульсов кода сигнала. Важна не их энергия, а амплитуда.

Обратим внимание на отсутствие необходимости синхронизации приемника с принимаемым сигналом. Такая важная особенность приемника является

результатом инвариантности во времени работы пассивного согласованного фильтра.

Вероятность ошибки при приеме можно представить в виде отношения суммы энергий всех импульсов, распознанных согласованным фильтром, к энергии всех других импульсов, сгенерированных одновибратором в результате действия шумов и помех и не совпадающих по времени с сигнальными:

$$P_c/P_n = \sum_1^M E / \sum_0^N E = A\tau M / (A\tau N) = M / N,$$

где $E = A\tau$ — энергия импульса, генерируемого одновибратором; M — количество сгенерированных импульсов, соответствующих количеству импульсов, распознанных согласованным фильтром; $N = L - M$ — количество импульсов, вызванных шумами и помехами, не совпадающими с сигнальными; L — общее количество импульсов на выходе одновибратора за время длительности сигнала.

Данное отношение является аргументом функции вероятности ошибки при корреляционном некогерентном приеме ортогональных сигналов [6]:

$$\rho = 0,5 \exp(-0,5 h^2) = 0,5 \exp(-0,5 M/N).$$

Принципиальным является вопрос о соответствии сгенерированных импульсов, формы которых показаны на рис. 3в и рис. 3г, импульсам сигнала на входе приемника. Воспользуемся методикой определения вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги [5]. Под правильным обнаружением будем понимать получение M отсеleccionированных импульсов, под ложной тревогой — появление N импульсов, вызванных шумами. Рассмотрим решение на основе представления шума и смеси сигнала с шумом условными плотностями вероятностей W_n и W_{c+n} , показанными на рис. 4.

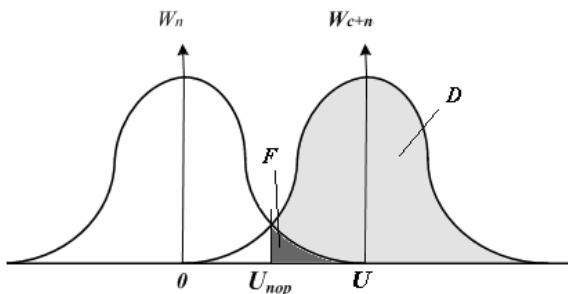


Рис. 4. Условные плотности вероятности шума и смеси сигнала и шума

Вероятность правильного приема отображена светло-серой областью D , появления ложных импульсов — темно-серой областью F перекрытия

обеих кривых правее порогового значения $U_{пор}$. В рассматриваемом случае пороговое напряжение есть не что иное, как среднеквадратическое значение напряжения сигнала и шума.

Если шум стационарен, то значение $U_{пор}$ неизменно. Если же дисперсия (мощность) шума σ_n^2 меняется, то соответственно меняется и значение порога. Согласно [5] вероятность правильного обнаружения — правильной селекции M импульсов сигнала

$$D = 1 - \Phi(U_{пор}/\sigma_n - \sqrt{P_i/\sigma_n^2}),$$

а вероятность ложной тревоги (селекции N импульсов, создаваемых шумами)

$$F = 1 - \Phi(U_{пор}/\sigma_n). \quad (1)$$

Здесь Φ — интеграл вероятности; P_i — мощность импульса (импульсная мощность).

Видно, что вероятность правильной селекции импульсов от ложной отличается значением вычитаемого $\sqrt{P_i/\sigma_n^2} = U_i/\sigma_n$ в аргументе интеграла вероятности. Это не что иное, как отношение пикового напряжения импульса к среднеквадратическому напряжению шума.

На рис. 5 показано семейство зависимостей вероятности правильной селекции импульсов D от указанного выше аргумента при разных значениях вероятности ошибочной селекции импульсов F .

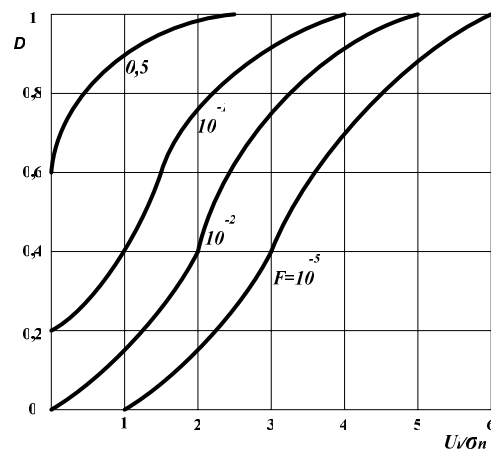


Рис. 5. Зависимость вероятности правильной селекции импульсов от отношения “амплитудное напряжение импульса — среднеквадратическое напряжение шумов” для разных вероятностей появления импульсов за счет шумов

Этот график называется характеристикой обнаружения. По нему можно определить требуемое отношение U_i/σ_n , которое обеспечивает вероятность D правильной селекции импульсов сигнала при различной вероятности F генерации импульсов шумом. Кроме того, при известной величине среднеквадратического напряжения шума σ_n можно определить минимальное значение требуемой амплитуды импульса сигнала. Для этого по таблицам интеграла вероятности находим значение аргумента $U_{\text{пор}}/\sigma_n$ из формулы (1) и по известному σ_n определяем минимальное пиковое напряжение импульсов сигнала:

$$U_{i\text{min}} = U_{\text{пор}} \sigma_n.$$

Задаваясь вероятностью правильного приема импульсов D при заданном значении среднеквадратического напряжения шумов σ_n и вероятностью ложной генерации импульсов шумами (кривые F), находим требуемое отношение U_i/σ_n , из которого определяем минимальное напряжение сигнала $U_{i\text{min}}$ на входе приемника.

Предложенный способ приема и функциональная схема приемника были промоделированы с помощью программы MatLab/Simulink. Данные моделирования подтвердили физическую реализуемость предложенного способа приема и соответствие приведенных зависимостей результатам теоретического анализа.

Заключение

Предложен способ приема ультракоротких импульсных сигналов и реализующий его приемник, в котором прием осуществляется не накоплением энергии импульсов сигнала, а селекцией импульсов, амплитуда которых превышает среднеквадратическое напряжение шумов и помех. Такой подход обусловлен малой энергией ультракоротких импульсов и сложностью их корреляционной обработки из-за высоких требований к точности и стабильности систем синхронизации в приемниках с активными корреляторами и к точности реализации отводов линии задержки в приемниках с пассивными согласованными фильтрами, в результате чего прием сигналов с ультракороткими импульсами проблематичен.

Вместо накопления энергии импульсов приемником определяется временное положение импульсов сигнала, которое представляет собой временной код сигнала. На основе фиксации временного положения импульсов, в приемнике генерируются более

длительные импульсы одинаковой амплитуды, поток которых отображает принимаемый сигнал. В результате действия шумов и помех в приемнике также могут генерироваться импульсы, вызванные импульсами достаточно высокой крутизны в спектре шумов и помехами от других импульсных источников.

Поток сгенерированных импульсов подвергается корреляционной обработке с помощью пассивного согласованного фильтра на основе линии задержки. Решение о приеме того или иного символа принимается на основе сравнения корреляционного напряжения с пороговым напряжением при передаче односимвольных сигналов (сигналов с пассивной паузой) или сравнения уровней корреляционных напряжений на выходах согласованных фильтров при многосимвольной передаче.

Достоверность принимаемой информации определяется отношением количества импульсов, представляющих сигнал, к количеству всех остальных импульсов, сгенерированных в приемнике. Это эквивалентно отношению энергий или мощностей сигнала и помех.

Для приема сигнала не требуется синхронизация. Это объясняется инвариантностью ко времени работы согласованного фильтра.

Данный способ позволяет снизить требования к точности выполнения узлов приемника и упростить его конструкцию.

Литература

1. Arslan H., Chen Z. N., Benedetto M. G. Ultra wide-band wireless communications. — N. Y.: Wiley & Sons Inc. Hoboken, 2006. — 478 p.
2. Federal Communications Commission (FCC) “First Report and Order in The Matter of Revision of Part 15 of the Commission’s Rules Regarding Ultrawideband Transmission Systems” ET-Docket 98-153, FCC 02-48, released April 22, 2002.
3. Kissick W. A. The temporal and spectral characteristics of ultrawideband signals // NTIA Report 01-383. — U. S. Department of Commerce for Communications and Information. — January 2001.
4. Miller L. E. Why UWB? A review of ultrawideband technology // Report to NETEX Project Office, DARPA by Wireless Communication Technologies Group National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, Maryland. — April 2003.
5. Чердынцев В. А. Радиотехнические системы. — Мн.: Выш. Шк., 1988. — 369 с.
6. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985. — 384 с.