

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук

(24 декабря 1997 г.)

24 декабря 1997 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии РАН. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Резников А.Е.** (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Москва). *Сверхширокополосные радиофизические системы, их специфика и применения.*

2. **Гапонов С.В., Салашенко Н.Н.** (Институт физики и микроструктур РАН, Н. Новгород). *Создание и применение многослойной рентгеновской оптики на основе нанометровых и субнанометровых периодических структур.*

3. **Виноградов А.В.** (Физический институт им П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Успехи рентгеновской микроскопии в мягком и жестком диапазонах длин волн.*

Краткое сообщение по первому докладу публикуется ниже.

PACS numbers: 03.67.-a, 89.70.+c

Сверхширокополосные системы связи, их особенности и применение

А.Е. Резников

В сообщении речь пойдет об одном из направлений развития радиофизики и радиотехники, особенно быстро развивающемся в последние годы. Всем нам предстоит жить в таком мире, где все виды связи, включая и беспроводные, к концу века станут, в основном, цифровыми. Вслед за этим последует переход к цифровому вещанию во всех диапазонах. Цифровые системы связи гарантируют высокое качество, эффективны в отношении использования частот и мощности, а также обеспечения множественного доступа к информационным ресурсам сетей.

В 1948 г. с появлением работы К. Шеннона интуитивное представление о том, что шум накладывает ограничение на точность передачи сообщений, было дезавуировано. Результат Шеннона, состоящий в том, что шум может определять пропускную способность канала, а не точность передачи информации, является одним из краеугольных камней в фундаменте здания радиофизической и радиотехнической науки, посвященной исследова-

нию природы и свойств широкополосных сигналов. В пределе можно получить сколь угодно высокую безошибочность передачи, применяя кодирование достаточно длинными блоками сигналов. При этом задача приемника будет состоять в сравнении принимаемой смеси сигналов и шума с эталонными образцами сигналов, которые хранятся в приемнике.

Пусть S — мощность сигнала, а помеха есть белый шум мощностью N в полосе частот W . В соответствии с теоремой Шеннона существует такая система кодирования, которая позволяет передавать двоичные знаки со скоростью

$$C = W \log \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

со сколь угодно малой вероятностью ошибок. Метода безошибочной передачи с большей скоростью не существует.

Теоретическая схема передачи, реализующая эту пропускную способность, такова. На передающей стороне выбирается длинная последовательность двоичных цифр, и каждая из них представляется своим сложным сигналом соответствующей длительности.

Приемник регистрирует эти сигналы на фоне помех (в виде ограниченного по полосе гауссова шума) и, проводя корреляцию с известными копиями сигналов, принимает решение о наиболее вероятном переданном сообщении. Далее оконечное устройство воспроизводит соответствующую двоичную последовательность. При приближении к пределу скорости возрастает задержка в принятии решения, поскольку малость ошибки должна обеспечиваться все более и более длинными блоками двоичной информации. В процессе доказательства теоремы выясняется форма желательных сигналов. Наилучший результат "как ни странно" (по выражению Шеннона) достигается, если в качестве сигналов использовать различные реализации ограниченного по полосе белого шума.

Конечно, описанная схема носит чисто теоретический характер, так как число сигналов в ансамбле растет как 2^M , где M — число двоичных цифр в выбранном блоке, и практически не реализуема при больших M .

Определим удельную энергию, приходящуюся на бит передаваемой информации, при постоянной спектральной плотности шума N_0 . Если записать выражение для

энергии на бит информации ($E = S/C$) в виде

$$\frac{E}{N_0} = \frac{S}{WN_0} \log^{-1} \left(1 + \frac{S}{WN_0} \right),$$

то получим, что затраты энергии на бит достигают минимальных значений N_0 при использовании всей полосы W , при этом отношение спектральной плотности сигнала S/W к спектральной плотности шума N_0 становится малым.

Однако при простой передаче, когда кодируется каждый бит информации отдельно, выигрыша в энергетической цене бита не происходит, поскольку в этом случае вероятность ошибки зависит только от полной энергии сигнала и не зависит от наличия его внутриимпульсной модуляции. Некоторое уменьшения энергии на бит можно достичь, используя блочное кодирование, например, когда каждые M бит передаются одним из 2^M шумоподобных сигналов (ШПС), ортогональных друг другу. При фиксированной скорости передачи для обеспечения заданной вероятности ошибки полоса, необходимая для M -значного алфавита, расширяется в M раз, а требуемая энергия (цена бита) уменьшается в $\log M$ раз.

Если мощности передатчиков равны и пропускная способность определяется лишь взаимными помехами, то максимальное число пользователей n можно найти из выражения

$$C = W \log \left(1 + \frac{1}{n-1} \right).$$

В ШПС в виде реализации ограниченного по полосе белого шума кроме случайной фазовой модуляции имеется амплитудная модуляция. Эти два типа модуляции и дают возможность организовать большую пропускную способность в заданной полосе частот. Отказавшись от амплитудной модуляции (как правило, из-за технических сложностей), мы теряем в заданной полосе в пропускной способности и удаляемся от теоретического предела. Действующие в настоящее время модели ШПС вполне удовлетворительно воспроизводят фазовую структуру ограниченного по полосе шума, но используют всего один уровень амплитуды сигнала.

В современной статистической теории связи сигналы рассматриваются как неслучайные функции ансамбля, образующего в совокупности стохастический процесс передачи информации, а помехи — как случайный процесс, и с точки зрения статистической теории связи помехи и сигналы не имеют принципиальных различий.

В работе В.А. Котельникова, заложившей основы теории оптимальных методов приема, впервые были поставлены и решены все основные задачи оптимального приема для помехи в виде белого шума и введено понятие идеального приемника, в котором реализуются решения, соответствующие минимальной ошибке различения, если говорить о дискретных сигналах, или осуществляется наилучшее соответствие принимаемого сигнала и передаваемого сообщения, если иметь в виду общий случай. Помехоустойчивость, определяемая идеальным приемником, называется потенциальной помехоустойчивостью.

Какая обработка поступающей смеси $x(t)$ будет оптимальной? В классической постановке максимизируется отношение мощности сигнала к мощности помех

на выходе. Для произвольного шума в рамках линейной обработки согласно $\int_0^T x(t)h(t)dt$ функция $h(t)$ находится из интегрального уравнения Фредгольма первого рода с ядром в виде корреляционной функции шума

$$\int_0^T R(t-u)h(u)dt = S(t),$$

где $S(t)$ — форма ожидаемого сигнала. Решения этого уравнения известны для немногих типов помех. Для некоррелированного белого шума функция $h(t)$ должна повторять форму сигнала.

Назначение оптимальной системы, которая чаще всего не может быть реализована, состоит в установлении предельной меры качества и в указании структуры реально осуществляемых устройств. Оптимальные параметры системы, вообще говоря, отличаются отсутствием однозначности: различные критерии оптимальности системы приводят к разным результатам, поэтому следует правильно выбирать критерии оптимизации, соответствующие основным задачам разрабатываемой системы.

Передача дискретной информации основана на управлении амплитудой, фазой или частотой высокочастотного колебания. Модулируемый параметр меняется дискретно, в этом случае модуляция определяется как манипуляция. Полоса частот, занимаемая излучаемым колебанием, пропорциональна скорости манипуляции. Для расширения спектра необходима дополнительная манипуляция с большой скоростью. Чаще всего для этой цели применяется манипуляция псевдослучайными последовательностями (ПСП). Дополнительная модуляция сводится к тому, что передаваемая двоичная информация накладывается на поток расширяющих битов ПСП, которые передаются с гораздо большей скоростью, при этом в группе битов расширения, соответствующей информационной посылке 1, происходит инверсия 0 и 1, а при передаче 0 знаки не меняются. Двоичная последовательность, которая накладывается на информацию, внешне выглядит как случайное чередование 0 и 1, хотя и генерируются они вполне регулярными цифровыми методами. Модуляция потока информации потоком расширяющих спектр битов и есть та дополнительная модуляция, которая лежит в основе метода ШПС. Число битов, приходящихся на один бит информации, есть мера расширения спектра, которая может достигать очень больших значений. Этот модулированный поток в двойном балансном смесителе манипулирует фазу несущей и излучается в эфир.

В схеме приема ШПС нужно провести дополнительную демодуляцию от расширяющегося кода для того, чтобы выделить передаваемую информацию. В смесителе принимаемый сигнал умножается на копию кода ПСП, который должен быть известен на приемной стороне. Настройка состоит, в основном, в согласовании параметров кода, расширяющего передаваемый сигнал, с копией кода в приемнике. В условиях полной синхронизации в идеальном случае расширение спектра полностью снимается и после коррелятора можно наблюдать обычную последовательность информационных посылок, какая была бы в любой узкополосной системе связи после синхронного детектора.

Такой метод приема определяет основные достоинства применения ШПС. При умножении на опорную

копию кода остальные сигналы, модулированные другим кодом, не совпадающим хотя бы по одному параметру (частоте следования битов, их взаимному расположению, сдвигу начала кодовой последовательности), превращаются в хаотическую последовательность коротких импульсов с широким спектром. В результате через узкополосный фильтр проходит лишь малая часть энергии несогласованных сигналов. Так реализуется механизм кодового разделения. Аналогично узкополосная помеха при этом методе приема также превращается в случайную последовательность коротких импульсов и ослабляется фильтром.

Так в одном узле обеспечивается кодовое разделение и запас помехоустойчивости по отношению к большому числу помех разного типа. Впрочем, отсюда и следует, что возникает новая проблема — синхронизация принимаемого сигнала и сигнала генератора кода в приемнике, а также ряд других проблем, связанных с обнаружением ШПС и вступлением в связь. Тем не менее эти проблемы решаются и обеспечивают реализацию всех преимуществ применения ШПС.

Согласно фундаментальным результатам о потенциальной помехоустойчивости вероятность ошибки различения сигналов для таких помех зависит только от энергии сигнала. С чем же связана стремительно набирающая популярность деятельность по внедрению систем, работающих на ШПС? Дело в том, что в системах с ШПС, как нигде полно реализованы идеи оптимального приема, в основном, потому, что все они разрабатываются как оптимальные по отношению к белому шуму.

Основные преимущества систем с ШПС сводятся к следующим.

1. Приемник становится помехоустойчивым к достаточно широкому кругу помех, хотя, может быть, в несколько меньшей степени, чем при специальном согласовании с данной помехой.

2. Возможность организовать асинхронное кодовое разделение. (Для синхронного разделения сигналов достаточно выбрать их ортогональными друг другу.) С помощью кодовой структуры ШПС можно достичь квазиортогональности сигналов при любых временных сдвигах, и это свойство выражается сильнее при достаточно большой длине кода.

3. Возможность использовать внутримпульсную модуляцию ШПС для измерения расстояния в навигационных системах.

4. Низкая спектральная плотность ШПС определяет их идеальную электромагнитную совместимость с любыми системами связи. Расширение спектра приводит к уменьшению уровня сигнала на входах приемников, это затрудняет обнаружение, распознавание и сопровождение, если не делает эти усилия бесполезными (рис. 1).

Область коммерческих применений систем с использованием ШПС охватывает беспроводные локальные компьютерные сети, сотовые системы мобильной связи вплоть до глобальных информационных сетей, а также персональные системы связи, обеспечивающие в информационном обществе в любом месте обмен речевыми сообщениями, передачу данных, услуги электронной почты и предоставление видеoinформации.

Наиболее важное свойство систем с ШПС, определяющее их преимущества в коммерческих приложениях,

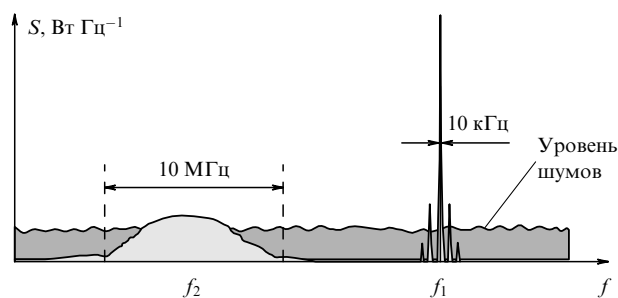


Рис. 1. Сравнительная спектральная плотность сигналов узкополосной и широкополосной систем связи при равной мощности.

— это обеспечение мультиплексирования на основе кодового разделения. Передовая идеология уплотнения каналов позволяет увеличить емкость сетей, степень покрытия, качество передачи информации.

До настоящего времени системы связи отделялись полосой частот, временным интервалом или обоими методами вместе. Современные аналоговые системы развивались на основе частотного разделения (FDMA). Следующим шагом, позволившим увеличить емкость и качество сети, было применение гибридной схемы (GSM) на основе частотного и временного разделения (TDMA). Каждому пользователю присваивается его собственный частотно-временной слот на несущей, который не может быть использован никем другим до окончания связи. Эффективность такой системы разделения существенно зависит от организации и взаимных помех схемы повторного использования частоты в соседних ячейках сети. В настоящее время большинство абонентов таких сетей подвижны, и эта тенденция будет сохраняться.

Интенсивное развитие систем связи привело к полной перегрузке диапазонов электромагнитным излучением. В настоящее время реальная пропускная способность и вероятность ошибки полностью определяются лишь взаимными помехами.

Главное отличие узкополосных сигналов от ШПС с точки зрения взаимных помех состоит в том, что хотя при данной загрузке диапазона средняя спектральная плотность одинакова для тех и других сигналов, но в случае ШПС она распределена более равномерно. Для узкополосных систем спектральная плотность варьируется в очень широких пределах (порядка отношения сигнал/шум), тогда как для ШПС неравномерность существенно меньше.

Следовательно, возможна большая загрузка диапазона с гарантированной вероятностью удовлетворительного качества связи. Можно сказать по-другому: ШПС обеспечивает требуемое качество связи в среднем с небольшими колебаниями вероятности ошибки. В узкополосных системах это же среднее удовлетворительное качество обеспечивается за счет того, что в одних условиях качество будет просто превосходным, а в других связи вообще не будет.

При полном переходе на системы связи с ШПС распределение взаимных помех будет приближаться к некоррелированному нормальному. Так что оптимальные методы обработки помех сведутся к тем, которые основаны на нормальном белом шуме. При этом типе помех внутримпульсная модуляция не влияет на достоверность приема, которая определяется лишь полной

энергией сигнала. Зачем же тогда расширение спектра? А только затем, чтобы сделать это возможным и перейти к белому шуму.

Можно сказать, что при полном переходе на ШПС возвращаемся к потенциальной помехоустойчивости, определяемой белым шумом. При этом не нужно оптимизировать приемники к взаимным помехам разного типа и структуры, а только к белому шуму.

Радиофизические проблемы использования ШПС в системах связи определяются основным отличием ШПС от обычных квазимонохроматических сигналов — большой относительной полосой частот. Хотя ШПС и могут использоваться практически в любом диапазоне радиочастот, каждый из диапазонов имеет свои специфические проблемы. Общими для всех диапазонов являются:

1) проблема передающих и приемных антенн, которые должны обеспечивать неискаженную передачу и прием сигналов в широкой полосе частот. В ряде случаев возникает необходимость создания специальных типов антенн (например, резистивнонагруженных диполей, в которых резонансные свойства уменьшаются за счет введения поглощения);

2) проблема многолучевости. В отличие от узкополосных систем, где многолучевость проявляется как интерференционное усиление или ослабление сигнала, в системах с ШПС в большинстве случаев после корреляционной обработки лучи разделяются по времени. Это позволяет не только избежать интерференционных искажений, но и использовать энергию побочных лучей для обеспечения более надежной связи. Самые большие проблемы с многолучевостью возникают в подвижных системах связи. Для их успешного решения необходимо создание радиофизических моделей распространения волн в условиях многократных переотражений и алгоритмов обработки сигналов.

Для частот УКВ и ниже основная проблема заключается в дисперсионных искажениях сигнала при взаимодействии волны со средой. Дисперсия ограничивает полосу сигнала, что ведет к уменьшению пропускной способности канала. Влияние дисперсии можно уменьшить, если ввести компенсацию амплитудно-фазовых искажений в среде распространения. Для этого требуется создание моделей распространения широкополосных сигналов в диспергирующих средах.