

УДК 621.396

С.А. Кравчук¹, Д.А. Миночкин¹, О.Я. Сова²¹ *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев;*² *Военный институт телекоммуникаций и информатизации НТУ Украины «КПИ», Киев*

АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

В статье проведен анализ технологий передачи сигналов, использующихся в наземных беспроводных телекоммуникационных системах (например, сверхширокополосные сигналы, OFDM и MIMO), с целью их применения для увеличения скорости передачи в канале, пропускной способности системы и рационального использования спектра систем спутниковой связи. Рассмотрены проблемы, возникающие при применении этих технологий и возможные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: системы спутниковой связи, сверхширокополосные сигналы, пропускная способность.

Введение

В настоящее время спутниковый сегмент в телекоммуникациях занимает важное место и обеспечивает позиционирование системы связи глобального покрытия. Однако развитие спутниковых технологий, по сравнению с наземными беспроводными технологиями, происходит невысокими темпами. Например, новый стандарт спутникового телевидения DVB-S2 (Digital Video Broadcasting via Satellite) содержит небольшое число улучшений и доработок по отношению к предыдущему стандарту DVB-S [1]. Основным улучшением является внедрение кодов с малой плотностью проверок на четность LDPC (Low Density Parity Check) и введение возможности использования адаптивной модуляции и кодирования. В то же время, в области наземных беспроводных технологий происходят достаточно радикальные изменения. К важнейшим из них относятся развитие и внедрение технологии мультиплексирования с ортогональным разделением сигналов OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), систем MIMO (Multiple Input – Multiple Output) и сверхширокополосных сигналов UWB (Ultra Wideband).

Очевидно, что спутниковые и наземные системы связи имеют свои особенности и, соответственно, к ним предъявляются разные требования и ограничения. Поэтому, не все технологии, предназначенные для наземных беспроводных систем, могут быть применимы для спутниковых систем связи. Одной из основных причин разницы в интенсивности развития между спутниковыми и наземными беспроводными технологиями связи является разный уровень надежности, необходимый для развертывания и функционирования наземных и спутниковых систем. Высокая стоимость, невозможность модернизации и ремонта спутниковых систем приводят к тому, что для минимизации рисков в них используются только хорошо изученные и испытан-

ные технологии. Наличие жестких требований при стандартизации систем космической отрасли также ограничивает перечень возможных технологий. К тому же, ресурсы бортового оборудования спутника (память, степень интеграции и потребляемая мощность и др.) сильно ограничены. Однако следует отметить, что такие параметры оборудования, размещенного на спутнике, как количество вычислительных и энергетических ресурсов значительно выше, чем у наземного мобильного терминала. Таким образом, доступность большого количества ресурсов потенциально позволяет спутниковой системе использовать значительно более широкий спектр технологий.

Проблемы внедрения отдельных технологий наземной беспроводной связи в системы спутниковой связи рассмотрены в ряде публикаций [2 – 4]. При этом отсутствуют предложения системного подхода к применению этих технологий.

Целью данной работы является анализ возможности применения ряда эффективных технологий современных беспроводных систем, таких как OFDM, UWB и MIMO, в системах фиксированной спутниковой связи. Рассмотрим особенности их применения.

1. Технология MIMO

Пропускную способность и качество передачи информации в беспроводных системах можно значительно повысить за счет использования технологии MIMO.

В общем случае структура системы MIMO имеет в своем составе M_t передатчиков (передающих антенн) и M_r приемников (приемных антенн). Рассмотрим MIMO-систему $M_t \times M_r$, изображенную на рис. 1. Высокоскоростной поток данных разбивается на M_t независимых последовательностей со скоростью $1/M_t$, которые затем передаются одновременно с нескольких антенн, соответственно ис-

пользуя только $1/M_t$ их первичной полосы частот. Преобразователь потока данных на передающем конце линии связи превращает последовательный поток в параллельный, а на приемном – выполняет обратное преобразование.

Для реализации пространственно-временного разделения сигналов в системах ММО множество выходов (излучающих антенн) осуществляет передачу несколькими (в общем случае – множеством) путями (лучами), а принимается это множество сигналов как множество потоков на несколько приемных антенн (разнесенных в пространстве).

Средства радиосвязи мимо обеспечивают:

- расширение зоны покрытия радиосигналами и сглаживание в ней мертвых зон;
- использование нескольких независимых путей распространения сигнала, что повышает вероятность работы по трассам, на которых меньше влияние замираний;
- повышение пропускной способности линий связи за счет формирования физически разных каналов.

Применение технологии ММО в наземных беспроводных системах связи делает ее наиболее

перспективной для построения новых высокоскоростных беспроводных систем.

Однако, ММО-технологии включают в себя целое семейство технологических направлений, таких как однопользовательское, многопользовательское и распределенное (виртуальное) ММО. Поэтому, возникает вопрос выбора вида ММО-технологий, которые могут быть наиболее рационально применены в спутниковых системах связи, отличающихся от наземных систем областью покрытия, топологией канала связи, величиной задержки распространения, уровнем помех в канале связи. Более того, спутниковые системы различают в зависимости от используемой полосы частот (наиболее широко используемые полосы частот приведены в табл. 1), численности группы конечных пользователей (индивидуальная передача, групповая передача, широкоэмитательная передача), схемы мультиплексирования (Time Division Multiplexing (TDM) с одной несущей, OFDM с несколькими несущими), типа приложений (терпимые к задержкам, не терпимые к задержкам), технологии уменьшения замираний (постоянные модуляция и кодирование, адаптивные модуляция и кодирование) и т.д.

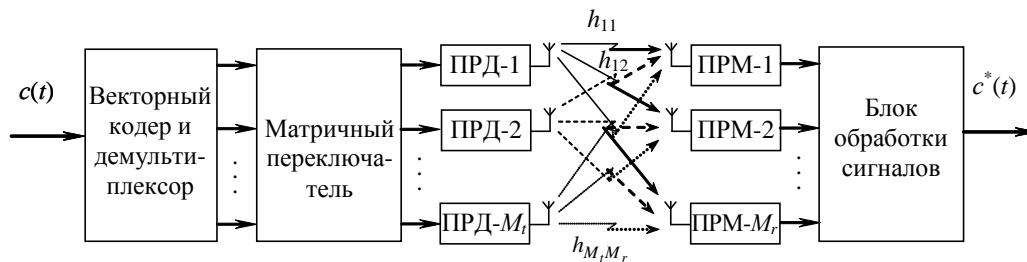


Рис. 1. Структурная схема ММО

Таблица 1
Диапазоны частот систем спутниковой связи

Обозначение диапазона	UHF	L	S	C	X	Ku	Ka
Полоса частот, ГГц	0,3 – 3	1 – 2	2 – 4	4 – 8	8 – 12	12 – 18	26 – 40

Исходя из особенностей спутниковой связи наиболее перспективными вариантами использования ММО-систем в системах спутниковой связи могут быть:

- однопользовательская схема передачи с использованием одного или двух спутников;
- многопользовательская схема передачи с использованием одного спутника.

Необходимым условием для полного использования преимуществ разнесения и мультиплексирования в однопользовательском случае является наличие среды с большим числом рассеивателей для большей независимости пространственных путей распространения сигналов между многоантенным приемником и передатчиком. В противном случае,

ранг матрицы канала уменьшается и производительность системы ММО падает до уровня соответствующей одноантенной SISO (Single Input – Single Output) системы. Это происходит в случае использования классической спутниковой системы фиксированной службы, которая работает на частоте выше 10 ГГц, где необходимость наличия прямой видимости между спутником и наземной станцией приводит к сильной пространственной корреляции передаваемых сигналов, а также из-за ограничения пространства на борту спутника. Сам спутник не может обеспечить необходимое пространственное разнесение антенн для эффективной работы системы ММО. Потому, в случае однопользовательской схемы передачи с одним спутником возможно создание несимметричного SIMO (Single Input – Multiple Output) канала, где множество антенн реализовано исключительно в наземном сегменте путем разнесения антенн наземных станций на необходимые расстояния.

Ограничением на пространство разнесения в системе с одним спутником можно пренебречь при

использовании в однопользовательских системах связи нескольких спутников, так называемого орбитального разнесения. Основными недостатками орбитального разнесения являются нерациональное использование пропускной способности спутников для передачи одного и того же сигнала, и необходимость синхронизации передачи от двух независимых спутников.

Применение однопользовательского MIMO для канала прямой видимости с тропосферными замираниями затруднено из-за ограничений размера спутника и невозможности разнесения антенн на необходимое расстояние, либо, при применении двух спутников, из-за отсутствия синхронизации и высокой стоимости системы. Однако, широкополосная интерактивная многолучевая спутниковая система обслуживает большое число терминалов с помощью нескольких лучей. Более того, существует прямая аналогия между прямым многолучевым спутниковым каналом и широкоэмиттерным каналом многопользовательской MIMO-системы. Данная аналогия позволяет избежать большинство недостатков однопользовательского спутникового MIMO-канала. Схемы многопользовательского MIMO предоставляют возможность использования многопользовательского мультиплексирования, менее восприимчивы к наличию прямой видимости или корреляции антенн, и позволяют получить выигрыш от пространственного мультиплексирования без необходимости оборудования наземных терминалов несколькими антеннами. Это важно с экономической точки зрения, поскольку нет необходимости модифицировать стандартные приемные терминалы.

Кроме того, для разработки многопользовательского MIMO в многолучевых спутниковых системах имеется возможность использования двойной поляризации.

В перспективе, рациональным вариантом использования MIMO для спутниковых систем является применение схем предварительного кодирования многопользовательского MIMO. Использование этого кодирования позволит устранить недостатки однопользовательского MIMO с приемлемыми затратами (один спутник, терминал с одной антенной), основываясь на известной технологии спутников с многолучевыми антеннами.

Однако платой за эти преимущества служит необходимость наличия информации о состоянии канала на передатчике и, следовательно, требуется организация обратного канала. Более того, методы линейного и нелинейного предварительного кодирования позволяют получить выигрыш по пропускной способности лишь по отдельным лучам. Также, возможна некоторая несовместимость с существующим стандартом DVB-S2. Потому, перспективные исследования в данной области могут быть направ-

лены на улучшение существующих методов предварительного кодирования, улучшение качества канала обратной связи и планирования передачи, а также объединение технологий.

Линейное предварительное кодирование и лучеобразование изучается уже длительное время, но в последнее время вызывают особый интерес методы нелинейного предварительного кодирования для многолучевых спутниковых систем, такие как, например, предварительное кодирование Томлинсона-Харашимы [5].

Следует отметить, что внедрение любого метода предварительного кодирования в коммерческих системах основывается на ограничении необходимого времени и объема служебной информации для оценки канала связи.

В конечном итоге следует разработать и объединить все необходимые модификации, требуемые для внедрения предварительного кодирования в стандарт DVB-S2. Более того, еще одной причиной несовместимости многопользовательского MIMO с DVB-S2, влияющей на эффективность инкапсуляции, может быть то, что уровни отношения сигнал-помеха-шум (SINR) на одном луче должны иметь небольшую дисперсию для того, чтобы система адаптивного кодирования и модуляции использовала для них одинаковые параметры.

2. Сверхширокополосные системы для спутниковой связи

Сверхширокополосные сигналы в наземной связи используются для передачи информации в очень широком частотном диапазоне без получения лицензии и без создания помех узкополосным системам, и, обычно, рассматриваются как наземные системы связи малой дальности. Причиной использования сверхширокополосных сигналов только в системах связи малой дальности является ограничение на излучаемую мощность, с целью минимального влияния на другие системы связи.

Так Федеральная комиссия по коммуникациям (FCC) определила сверхширокополосные сигналы как сигналы с относительной шириной полосы частот равной 20% от центральной частоты или 500 МГц (для случая, когда центральная частота выше 6 ГГц). Сравнительная характеристика сигналов в сверхширокополосных и узкополосных системах представлена на рис. 2.

К основным преимуществам сверхширокополосной связи относятся: отсутствие необходимости лицензирования; низкая сложность оборудования и низкая стоимость; устойчивость к многолучевому распространению; низкая вероятность перехвата; низкое потребление мощности.

Чаще всего сверхширокополосные сигналы используются в высокоскоростных беспроводных пер-

сональних сетях WPAN (Wireless Personal Area Network) с небольшой зоной покрытия (радиусом менее 10 м). Другой важной областью применения являются распределенные сенсорные сети или низкоскоростные WPAN. Однако ключевые особенности сверхширокополосных систем могут быть использованы и в спутниковой связи. Для этого необходимо: изменить ограничение на излучаемую мощность для внедрения сверхширокополосной спутниковой связи, не требующей лицензии, или для переноса диапазона рабочих частот на частоты, находящиеся выше диапазона Ка, где широкая часть диапазона доступна для распределения при лицензионном использовании.

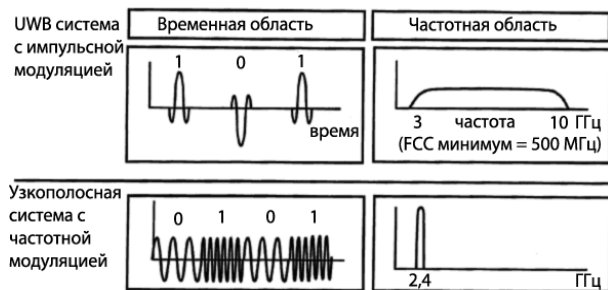


Рис. 2. Сравнительная характеристика сигналов в сверхширокополосных и узкополосных системах

Термин «нелицензированная полоса частот» обозначает полосу частот, для которой определены правила как на использование аппаратуры, так и методы развертывания радиосвязи таким образом, что помехи устраняются техническими нормами для данного диапазона, вместо того, чтобы ограничить диапазон для использования только одной организацией по лицензии. Ограничение, наложенное FCC, на излучаемую мощность сверхширокополосных систем не зависит от характеристик системы, и применяется к любой мобильной или фиксированной сверхширокополосной системе связи. Это является консервативным методом, так как не существует возможности контроля положения наземной системы (особенно мобильной) и, следовательно, не существует возможности контролировать расстояние между нелицензированной сверхширокополосной системой и лицензированной наземной системой связи. Однако, это не верно по отношению к спутниковым системам, в особенности геостационарным спутникам, позиция которых по отношению к любой наземной системе фиксирована и известна. Это свойство позволяет рассчитать минимальное расстояние между спутником и наземной системой связи для того, чтобы узнать максимальную мощность, которую получают наземные системы. Следовательно, к спутниковым сверхширокополосным системам возможно применить ограничения на излучаемую мощность, отличные от таковых для наземных систем.

В предполагаемой спутниковой системе, в которой используются сверхширокополосные техно-

логии, если мощность, передаваемая от спутника до земли, будет на том же уровне, что и для наземных сверхширокополосных устройств, принимаемый на земле уровень сигнала будет очень низок, что не позволит организовать надежную связь. Однако, если спектральная плотность мощности сигналов, передаваемых со сверхширокополосных спутников на земную поверхность, будет выше, чем у наземных сверхширокополосных передатчиков. Это дает возможность организовать высокоскоростную передачу данных.

Более того, для фиксированных спутниковых служб, уровень помех между различными спутниковыми системами зависит от относительного расстояния между спутниками, направленности антенн и, наконец, от базы сигнала используемой технологии передачи. Узконаправленные апертурные антенны позволяют нескольким передающим спутникам использовать один и тот же спектр в данной зоне покрытия. В таком случае, новые каналы связи могут быть добавлены без назначения новых частот к существующим без лицензирования.

Важное исследование производительности сверхширокополосных систем в спутниковых линиях связи с ограничениями, налагаемыми на наземные сверхширокополосные системы, было приведено в [6]. В данной работе была продемонстрирована возможность достижения скорости передачи 236 Мбит/с при ограниченной спектральной плотности мощности сигнала, принимаемого на земле, до уровня ниже, чем уровень, заданный для наземных сверхширокополосных устройств при использовании многодиапазонного сверхширокополосного метода передачи.

В отношении применения сверхширокополосной связи в спутниковых системах ключевой задачей является изучение влияния помех на наземные системы. При этом необходимо решить и другие важные задачи: выбор диапазона частот для сверхширокополосных спутниковых систем связи; определение влияния помех, которые создаются такой системой для других спутниковых систем.

Преимуществами лицензированных сверхширокополосных спутниковых систем являются более низкая сложность элементной базы и меньшая чувствительность к искажениям радиочастотного. В этом отношении, основной целью использования сверхширокополосной передачи является увеличение скорости передачи в канале и пропускной способности системы по отношению к стандартным методам передачи, которые требуют более сложную элементную базу и более чувствительны к искажениям радиосигнала.

Хотя телекоммуникационные технологии, используемые в существующих спутниках, достаточно стандартны, но элементная база, необходимая для их реализации, достаточно сложна.

Одной из основных особенностей спутниковой связи является передача сигнала с высокой мощностью для того, чтобы на земле мощность принятого сигнала была достаточной для правильного приема. Потому, один из наиболее важных элементов передающей радиочастотной цепи является усилитель мощности.

Несмотря на новейшие достижения в области твердотельных микроволновых усилителей мощности, ламповые усилители, такие как усилитель на лампе бегущей волны или клистроны, до сих пор позволяют получить наилучшее соотношение по выходной мощности, КПД и полосе частот. Усилители мощности можно разделить на две группы: усилители постоянного тока и импульсные усилители. Импульсные усилители дают на выходе радиочастотный сигнал высокой мощности за короткий промежуток времени с коэффициентом заполнения равным 10%.

Усилители постоянного тока и импульсные усилители могут быть использованы при работе со сверхширокополосными сигналами с постоянной несущей и импульсными сверхширокополосными сигналами, соответственно.

При использовании импульсных сверхширокополосных сигналов передаются импульсы очень малой длительности (обычно менее наносекунды). Из-за этого спектр сигнала занимает несколько ГГц в частотной области. Импульсные сверхширокополосные сигналы не имеют несущей и, следовательно, просты и дешевы в реализации, так как для их работы не требуются смесители и гетеродины. С другой стороны, для их формирования нужны высокоскоростные цифро-аналоговые и аналогово-цифровые преобразователи для цифровой обработки сигналов. При использовании импульсных сверхширокополосных сигналов для организации многостанционного доступа можно использовать скачкообразное переключение временных интервалов или CDMA.

Сверхширокополосная связь с использованием несущих осуществляется с помощью традиционных гетеродинов и может быть реализована как в одно- или много-диапазонном варианте. Такие системы связи имеют больший контроль спектра, чем импульсные. Примером сверхширокополосных систем с несущими может служить многодиапазонная OFDM (MB-OFDM) система, которая использует ФМ/КАМ OFDM модуляцию со скачкообразным изменением частоты. MB-OFDM несложная в построении технология передачи, которая реализуется с помощью быстрого преобразования Фурье. При использовании четырехпозиционной ФМ можно уменьшить разрядность цифроаналогового и аналогоцифрового преобразователей, а увеличивая расстояние между поднесущими уменьшить требования

по уровню фазового шума, присущие технологии OFDM, а также ошибку синхронизации.

В диапазонах выше Ка мощность передачи не будет ограничиваться описанными ранее лимитами на излучаемую мощность, так как эта область частот практически не используется. Фактически, спутниковая связь на диапазонах выше Ка ограничивается только возможностями современных технологий (в частности, генераторами мощности входных каскадов передатчиков). В случае использования импульсных сверхширокополосных сигналов, эта задача может быть решена используя современные космические технологии, связанные с W-диапазоном, например, спутниковый радар для изучения облаков CloudSat.

Технологии сверхширокополосной передачи меньше подвержены влиянию радиочастотных искажений, таких как: нелинейность усилителей мощности, фазовый шум, дисбаланс I/Q компонент.

Примером использования сверхширокополосных технологий в спутниковой связи может служить метод сверхширокополосной передачи с частотной модуляцией FM-UWB (Frequency Modulation Ultra WideBand). Данный метод сверхширокополосной передачи с постоянной огибающей использует частотную манипуляцию с низким индексом модуляции совместно с аналоговой частотной модуляцией с высоким индексом для расширения полосы. Преимуществом данного метода является простота реализации и низкая чувствительность к нелинейности усилителей мощности.

3. Перспектива объединения сверхширокополосных сигналов с технологией MIMO

Построение высокоскоростных систем спутниковой связи возможно на основе объединения технологий MIMO и сверхширокополосных сигналов. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка сверхширокополосных систем MIMO (UWB-MIMO) для достижения гигабитных скоростей не только в наземных, но и в спутниковых системах, продвигают все новые исследования в этом направлении.

Исследовательские работы, посвященные UWB-MIMO можно разделить на три группы: изменение и моделирование канала UWB-MIMO, оценка пропускной способности канала и пространственно-временное кодирование, формирование диаграммы направленности антенны.

Проблемы моделирования и измерения канала рассмотрены в [7], где представлено описание пространственной корреляции в сверхширокополосных каналах. Было показано, что на расстоянии в пределах 2,5 расстояния когерентности (примерно 4 см) корреляцию антенн можно описать функцией Бесселя пер-

вого рода нулевого порядку, в то время как на расстоянии, большем чем 2,5 расстояния когерентности, коэффициент корреляции постоянен (меньше 0,4).

Изменение угла расположения антенны и поляризации сигнала могут быть использованы для уменьшения корреляции пространственных каналов или для увеличения производительности системы.

Исследования пропускной способности каналов UWB-MIMO систем проведены [8]. Вероятность потери связи уменьшается с ростом числа передающих антенн при условии, что скорость передачи меньше, чем некоторое пороговое значение, и увеличивается если скорость передачи выше порога. Данное пороговое значение определяется уровнем замираний и отношением сигнал-шум на передающей стороне. Отсюда следует, что не стоит использовать несколько передающих антенн, если удельная скорость передачи выше чем пороговое значение (или доступная мощность передатчика слишком низкая). Число передающих антенн, число приемных антенн и число степеней свободы рассеивающей среды накладывают фундаментальные ограничения на пропускную способность системы. Число степеней свободы накладывает ограничение на ранг матрицы канала UWB-MIMO, и, соответственно, влияет на количество независимых каналов.

Для систем UWB-MIMO важным вопросом является исследование поведения пропускной способности канала в условиях низкой мощности или при низком отношении сигнал-шум, что особенно важно для спутниковых систем связи. Для широкополосных систем очень широкая полоса частот негативно влияет на производительность, если в системе мощность распределяется равномерно по времени и частоте. Также, исследовалась работа сверхширокополосных передатчиков, использующих алгоритм равномерного распределения мощности и алгоритм оптимального распределения мощности. При оптимальном распределении использовался алгоритм „водонаполнения” для распределения мощности как в частотной области так и между передающими антеннами в соответствии с состоянием многомерного канала. Оптимальное распределение мощности намного эффективнее для случая, когда отношение сигнал-шум ниже чем 20 дБ. Однако, когда отношение сигнал-шум выше 10 дБ, равномерное распределение позволяет получить такую же пропускную способность в канале.

Общие принципы построения пространственно-временных кодов для сверхширокополосных систем рассматриваются в [9]. Предложена нульформирующая схема передачи для устранения помех между несколькими потоками данных в системе UWB-MIMO. Для UWB-MIMO с пространственно-временным кодированием был найден компромисс между доступным отношением сигнал-шум, интер-

валом кодирования и числом передающих антенн. Обнаружено, что только в том случае, если отношение сигнал-шум достаточно высоко (предполагая, что общая мощность на всех передающих антеннах и интервал кодирования фиксированы) можно получить выигрыш от кодирования распределяя излучаемую мощность на большее число антенн и используя более длинные коды. Другими словами, если доступное отношение сигнал-шум очень низкое, что лучше использовать меньшее число антенн и более короткие пространственно-временные коды.

Систематическое изучение вопросов формирования диаграммы направленности антенн проведено в [10]. Предложена схема адаптивного лучеобразования для сверхширокополосных систем и было показано, что ширина полосы сигнала практически не влияет на ширину излучаемого луча или на направление излучения. Сверхширокополосные лучеобразователи, в отличие от узкополосных, обладают некоторыми необычными свойствами. Например, использование в сверхширокополосных лучеобразователях неодинаковых взвешивающих фильтров для различных антенных ветвей увеличивает уровень боковых лепестков. Следовательно, оптимальным лучеобразователем является тот, у которого взвешивающие фильтры в каждой ветке идентичны.

В данном направлении исследований, наиболее вероятной областью применения многоантенной сверхширокополосной технологии является определение расстояния и зондирование. С помощью многоантенной технологии можно получить дополнительные пространственные параметры (например, направление прихода или направление отправки), что может привести к более высокой точности при определении расстояния.

Таким образом, актуальным является исследование возможностей UWB-MIMO систем, особенно в направлении их практического применения в системах спутниковой связи.

4. Технология OFDM

Мультиплексирование с ортогональным разделением сигналов (OFDM) широко используется в современных системах связи. Основными преимуществами данной технологии являются высокая устойчивость относительно частотно-селективных замираний в канале при меньшей вычислительной сложности по сравнению с системами с одной несущей, а также высокая спектральная эффективность.

OFDM применяется на физическом уровне большинства используемых беспроводных стандартов, таких как, например, IEEE 802.11, IEEE 802.16/WiMAX, а также в наземном цифровом видео вещании (DVB-T) [11]. До недавнего времени, данная технология передачи считалась непригодной для

использования в спутниковой связи, поскольку OFDM-сигнал характеризуется большим пикфактором. По этой причине OFDM сигналы чувствительны к нелинейным искажениям усилителей мощности передатчика, что является одним из важнейших показателей при работе со спутниковыми системами. Однако, в последнее время было доказано, что применение специальных алгоритмов кодирования OFDM-сигнала в сочетании с использованием метода компенсации нелинейных искажений может обеспечить удовлетворительную производительности даже при режиме работы усилителя, близком к насыщению. Использование OFDM в спутниковой связи вызывает интерес по следующим причинам:

- высокая спектральная эффективность в условиях многолучевого распространения;
- возможность уменьшения общей нагрузки на спутниковый приемник (рассматривается регенеративная архитектура);
- новая архитектура разбиения на каналы, использующая принципы OFDM;
- при использовании наземной и спутниковой гибридной системы связи, в наземном сегменте с OFDM, применение той же технологии для спутникового компонента может уменьшить сложность приемника.

Последняя причина была основной для использования OFDM в стандарте DVB-SH, с необходимыми модификациями и улучшениями по сравнению с DVB-H. DVB-SH это стандарт вещания для предоставления мультимедиа сервисов по гибридной наземной/спутниковой сети для разнообразных небольших мобильных и стационарных терминалов с компактными антеннами и ограниченной направленностью (например, переносных устройств). Также, OFDM стали применять в военной связи. В частности, его используют в качестве физического уровня широкополосной сети интегрированной тактической системы радиосвязи. OFDM также рассматривался при исследовании оптимального интерфейса для сетей MILSATCOM.

Во всех случаях, единственной не решенной задачей остается высокое отношение пиковой мощности к средней, и, следовательно, низкая энергетическая эффективность. Методы уменьшения пикфактора для наземных систем широко изучены и могут быть применены в спутниковой связи. Однако, одним из новейших решений для спутникового сегмента является модификация OFDM с постоянной огибающей (CE-OFDM – Constant Envelope OFDM) [12]. В системе CE-OFDM, OFDM сигнал изменяется с помощью методов фазовой модуляции таким образом, что он становится пригодным для эффективного усиления по мощности. На приеме перед OFDM демодулятором используется обратное преобразование (фазовая демодуляция). С помощью

фазовой модуляции получается сигнал с постоянной огибающей, имеющий отношение пиковой мощности к средней равное 0 дБ. CE-OFDM-система имеет более высокую пропускную способность по сравнению с обычными OFDM системами в каналах с многолучевыми замираниями, если учитывается эффект нелинейного усиления мощности. Положительные качества систем связи с несколькими несущими можно реализовать с помощью систем с одной несущей с циклическим префиксом с выравниванием в частотной области (FDE – Frequency Domain Equalization).

Следует также отметить, что стандарт LTE (Long Term Evolution), который представляет эволюцию систем связи в сторону 4G, использует схему множественного доступа, основанную на OFDM, при передаче «вниз» и FDMA (Frequency Division Multiple Access) с перемежением, что является вариантом выравнивания в частотной области с одной несущей (SC-FDE), при передаче «вверх».

SC-FDE системы имеют схожую эффективность с системами, использующими несколько несущих, однако отличаются низким отношением пиковой мощности к средней, что делает пользовательские терминалы более энерго-эффективными. Следовательно, технология SC-FDE является более привлекательной для использования в системах спутниковой связи по сравнению с OFDM, при этом она остается совместимой с OFDM, так как использует циклический префикс и выравнивание происходит в частотной области.

В заключение, следует отметить, что перспективные широкополосные спутниковые системы будут работать на частотах выше 40 ГГц (диапазон Q/V, и в последствии W-диапазоне). В этом случае, преимущество также на стороне систем SC-FDE, а не OFDM, из-за их меньшей чувствительности к радиочастотным искажениям.

Выводы

Таким образом, проведенный анализ возможности использования технологий наземных систем связи MIMO, OFDM, сверхширокополосных сигналов и UWB-MIMO в фиксированных системах спутниковой связи с целью увеличения их пропускной способности и более рационального использования спектра позволяет сделать следующие выводы.

1. Внедрение рассмотренных вариантов применения технологии MIMO в спутниковых системах связи позволит повысить пропускную способность и эффективность этих систем. При этом, возникает необходимость проведения дополнительных исследований с целью адаптации данной технологии в системах спутниковой связи.

2. Сверхширокополосные сигналы могут быть использованы в нелицензированных спутниковых

системах при використанні розрешення на передачу в некотором діапазоні з обмеженнями по излученню, которые будут заложены в соответствующих нормативных актах. При этом необходимо исследовать влияние помех и ограничения по мощности на эффективность таких спутниковых систем.

3. Объединение сверхширокополосных сигналов с технологией MIMO (UWB-MIMO) может быть наиболее перспективным при использовании в высокоскоростных наземных и спутниковых системах связи.

4. Сверхширокополосные сигналы могут быть использованы в лицензированных спутниковых системах без ограничения по мощности. Это не приведет к оптимальному использованию спектра, но может уменьшить сложность аппаратной базы и чувствительность к радиочастотным искажениям, и, следовательно, увеличить пропускную способность канала.

5. Использование технологии OFDM в системах спутниковой связи может быть эффективным по трем основным причинам: увеличение спектральной эффективности фиксированных спутниковых систем связи, уменьшение общей сложности спутникового приемника, уменьшения сложности интеграции спутниковых и наземных мобильных систем связи. Однако, системы SC-FDE могут предоставить такие же преимущества, как и системы с несколькими несущими, при этом, не имея их недостатков при использовании на спутниках. Следовательно, внедрение технологии SC-FDE в системы спутниковой связи является перспективным направлением для дальнейших исследований.

Список литературы

1. *Digital Video Broadcasting (DVB), Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications, ETSI EN 302 307, v1.1.2, 2006.*

2. R.T. Schwarz, A. Knopp, B. Lankl, "The channel capacity of MIMO satellite links in a fading environment: A probabilistic analysis," in *nt.Work. Satell. Space Commun., IWSSC 2009*, pp. 78–82, Tuscany, Italy, Sept. 2009.

3. *Применение сверхширокополосных импульсных радиосигналов в спутниковых системах связи и системах дальней радиосвязи / С.Г. Бунін, Д.О. Долженко, М.В. Вулицький, К.О. Плотник // Научные вестни НТУУ «КПИ». – Вып. 6, – 2010.*

4. Wang L., Jezek B., "OFDM modulation schemes for military satellite communications", *Proc. of IEEE Military Comm. Conf.*, 2008, SAC 8–5.

5. R. F. H. Fischer, C. Windpassinger, A. Lampe, and J. B. Huber, "Spacetime transmission using Tomlinson-Harashima precoding," in *Proc. 4 ITG Conf. Source and Channel Coding*, Jan. 2002, pp. 139–147.

6. Yoshio Kunisawa, Hiroyasu Ishikawa, Hisato Iwai, Hideyuki Shinonaga, "Satellite Communications using Ultra Wideband (UWB) Signals", *Proceedings of the International Symposium on Advanced Radio Technologies (ISART 2004)*, March 2–4, 2004.

7. W. Q. Malik. *Spatial correlation in ultrawideband channels. IEEE Trans. Wireless Commun.*, 7: 604–610, 2008.

8. F. Zheng and T. Kaiser. *On the evaluation of channel capacity of multi-antenna UWB indoor wireless systems. In Proc. 2004 IEEE Int. Symp. on Spread Spectrum Techniques and Applications*, pp. 525–529, Sydney, Australia, 30 Aug.–2 Sept. 2004.

9. C. Abou-Rjeily, N. Daniele, and J.-C. Belfiore. *Space-time coding for multiuser ultra-wideband communications. IEEE Trans. Commun.*, 54: 1960–1972, 2006.

10. M. G. M. Hussain. *Principles of space-time array processing for ultrawide-band impulse radar and radio communications. IEEE Trans. Veh. Technol.*, 51: 393–403, 2002.

11. X. D. Yang, et al., "Performance Analysis of the OFDM Scheme in DVB-T", *The 6th IEEE Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies*, Vol. 2, No. 31, pp. 489–492, 2004.

12. S. C. Thompson, A. U. Ahmed, J. G. Proakis, J. R. Zeidler, M. J. Geile, "Constellation Envelope OFDM", *IEEE Trans. On Commun.* Vol. 56, no. 8. August 2008, pp. 1300–1312.

Поступила в редколлегию 1.04.2013

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.В. Кувшинов, Военный институт телекоммуникаций и информатизации НТУ Украины «КПИ», Киев.

АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУЧАСНИХ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

С.О. Кравчук, Д.А. Міночкін, О.Я. Сова

У статті проведено аналіз технологій передачі сигналів, що використовуються в наземних безпроводових телекомунікаційних системах (наприклад, надширокополосні сигнали, OFDM і MIMO), з метою їх застосування для збільшення швидкості передачі в каналі, пропускної здатності системи та раціонального використання спектра систем спутникового зв'язку. Розглянуто проблеми, що виникають при застосуванні цих технологій та можливі напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: системи спутникового зв'язку, надширокополосні сигнали, пропускна спроможність.

ANALYSIS OF DIRECTIONS OF MODERN SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS EFFICIENCY INCREASE

S.O. Kravchuk, D.A. Minochkin, O.Y. Sova

The analysis of the signaling technology used in wireless terrestrial communications systems (e.g., ultra-wideband signals, OFDM, and MIMO), is presented in the article. These technologies are proposed for the channel transmission rate increasing, system capacity and efficient use of the spectrum satellite communication systems. Also the problems associated with application of these technologies and the possible directions of further research are arising in the article.

Keywords: satellite communication networks, сверхширокополосные сигналы, carrying capacity.