

# Предисловие

Потребность в беспроводных мультимедийных услугах связи быстро растет. Общей чертой многих действующих стандартов беспроводной связи, касающихся высокоскоростной передачи мультимедийной информации, является выбор радиointерфейса со многими несущими, основанного либо на мультиплексировании с ортогональным частотным разделением (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing), либо на множественном доступе с ортогональным частотным разделением (OFDMA — Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access). Примерами этой тенденции являются семейства стандартов IEEE 802.11 и IEEE 802.16 для беспроводных локальных сетей (WLAN — Wireless Local Area Networks). Несмотря на то что основной принцип OFDM/OFDMA является общеизвестным среди специалистов в области связи, вопросы практической реализации этого принципа далеки от простых решений и требуют достаточно сложных технологий обработки сигналов, чтобы достичь необходимых характеристик систем связи.

Предлагаемая читателю книга является первым достаточно полным изложением на русском языке основ технологии OFDM. Авторы надеются, что это поможет широким массам отечественных студентов и инженеров освоить эту технологию, не прибегая без необходимости к англоязычной литературе.

Книга направлена на то, чтобы дать доступное введение в принципы построения основанных на OFDM-систем с точки зрения технологий обработки сигналов. Подбор материала в книгу проведен авторами с учетом опыта их участия в разработке современных систем связи, а также опыта преподавательской работы.

В начале книги дается краткая трактовка основных вопросов, связанных с описанием беспроводных каналов подвижной связи, их влиянием на сигналы и, в конечном счете, на характеристики соответствующих систем связи. В последующих главах предлагается достаточно подробный обзор разнообразных критических вопросов работы систем связи с OFDM, таких как:

- методы синхронизации;
- методы оценивания параметров каналов связи;
- множественный доступ;

- практические методы снижения отношения пиковой мощности передаваемого сигнала к его средней мощности.

В книге рассматриваются также вопросы совместного использования технологии OFDM с технологией ММО (много передающих антенн — много приемных антенн — Multiple-Input-Multiple-Output).

Подбор и изложение тем отличают эту книгу от других книг по цифровой связи. В большинстве книг, в которых затрагивается передача сигналов со многими несущими, некоторые вопросы просто не обсуждаются. Это касается, прежде всего, вопросов синхронизации и оценки параметров беспроводного канала связи. В результате у читателей может сложиться ошибочное впечатление, что эти вопросы достаточно просты и что реальные системы всегда могут работать близко к предельным случаям идеальной синхронизации и оценки канала. Однако для успешного решения этих задач могут потребоваться значительные усилия.

Большая часть приведенного в книге материала впервые была представлена в журнальных статьях, ссылки на которые приведены в конце каждой главы. Вместе с тем в силу ограниченного объема книги и ограниченного времени, необходимого для ее написания, не все важные темы рассмотрены достаточно подробно. Для ознакомления с последними достижениями, особенно в области технологий ММО-OFDM, OFDMA, придется обратиться к соответствующим зарубежным изданиям последних лет, однако данная книга может служить необходимым шагом к освоению самых современных технологий надежной высокоскоростной передачи информации.

Авторы полагают, что книга будет полезна специалистам в области разработки и эксплуатации современных систем связи, а также студентам высших учебных заведений, обучающимся по направлениям телекоммуникаций, систем и сетей связи.

Авторам хотелось бы поблагодарить тех, кто помогал в их работе над книгой. Крейнделин В.Б. выражает благодарность супруге Светлане и детям Анне, Борису и Михаилу, без поддержки которых его многолетняя работа над данной книгой никогда не была бы завершена.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект 14-19-01263).

## Введение

Интенсивное использование беспроводных технологий оказывает значительное влияние на стиль жизни и работы большого числа людей. Растет число пользователей Интернета, быстро растет число услуг мобильной связи, предлагаемых пользователям сотовыми операторами. Повсеместным становится беспроводной широкополосный доступ к сетям связи. Особо важную роль беспроводной широкополосный доступ играет в том числе в сельской местности, при отсутствии дорогой инфраструктуры и возможности использования кабельных сетей.

Новые поколения беспроводных систем, предоставляющих мультимедийные услуги, такие как передача речи, данных, аудио-, видеоинформации, сходятся к одной интегрированной платформе и позволяют обеспечивать предоставление услуг с помощью небольших портативных устройств.

Однако разработка беспроводных систем связи, которые могли бы надежно поддерживать появляющиеся мультимедийные приложения, сталкивается с рядом технологических вызовов, которые требуют серьезных исследовательских усилий. Один из таких вызовов обусловлен сложной природой беспроводных каналов подвижной связи. В беспроводных приложениях излученная электромагнитная волна приходит на приемную антенну после рассеяния, дифракции, отражений от окружающих объектов. В результате приемник наблюдает суперпозицию нескольких по-разному затухших и задержанных копий переданного сигнала. Конструктивное или деструктивное сложение этих копий приводит к большим флуктуациям принятого сигнала с соответствующим ухудшением качества связи. Кроме того, характеристики канала могут случайно меняться во времени из-за непредсказуемых изменений условий распространения или как следствие относительного движения передатчика и приемника. Второй вызов связан с ограниченным объемом доступного спектра частот, который является очень дефицитным и дорогим ресурсом. Достаточно сказать, что европейские телекоммуникационные компании в свое время потратили около 100 млрд долларов на получение лицензий для развертывания систем подвижной связи третьего поколения. Для того чтобы обеспечить возврат этих инвестиций, выделенные диапазоны частот должны быть использованы максимально эффективно.

Еще одним источником искажений при беспроводной передаче сигналов является относительно высокий уровень интерференции, возникающей из-за переиспользования канала. Хотя существуют и широко используются современные методы обработки сигналов, основанные на многопользовательском детектировании и позволяющие существенно ослабить влияние интерференции, остается фактом, что мобильная беспроводная связь никогда не приблизится по степени стабильности, безопасности и надежности к проводной связи, обеспечиваемой кабельными системами. Тем не менее, абоненты готовы во многих случаях соглашаться на меньшую пропускную способность и худшее качество связи, чтобы избавиться от проводов.

Интерес производителей оборудования связи к беспроводным технологиям подтверждается большим числом различных стандартов и приложений, которые появились в последние годы. Тем временем исследователи во многих странах продолжают работать над развитием новых широкополосных беспроводных систем, которые должны будут обеспечить гораздо более высокие скорости данных и гораздо более содержательный набор услуг, чем современные системы. Возможность обеспечить абонентов широким набором приложений с разными возможностями по допустимой задержке, качеству обслуживания, пропускной способности требует от будущих систем высокой устойчивости к интерференции и искажениям в канале, а также большой гибкости в управлении радиоресурсами. Выбор подходящего радиointерфейса является ключевым для обеспечения этих свойств системы связи.

Технология передачи со многими несущими в форме мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM) широко признана как одна из перспективных схем доступа для использования в разрабатываемых системах беспроводной связи. Эта технология уже была использована во многих приложениях, включая наземное телевизионное вещание (terrestrial digital video broadcasting — DVB-T), системы связи поколения 4G и др. Основная идея OFDM состоит в том, чтобы разделить высокоскоростной поток данных на некоторое число подпотоков с меньшими скоростями. Эти подпотоки затем передаются параллельно по ортогональным подканалам, характеризваемым частичным перекрытием спектра. По сравнению с передачей с одной несущей этот подход обеспечивает системе повышенной устойчивостью к узкополосной интерференции и искажениям в канале. Более того, из этого вытекает высокий уровень гибкости системы, так как параметры модуляции, такие как размер созвездия, скорость кодирования, могут быть независимо выбраны для каждого подканала. OFDM может также быть использовано совместно с обычными методами множественного доступа для работы в многопользовательских системах. Наиболее известные схемы в

этой области представлены схемами множественного доступа с ортогональным частотным разделением (orthogonal frequency division multiple access — OFDMA).

Хотя концепция передачи со многими несущими проста по основному принципу, тем не менее, разработка практических систем OFDM и OFDMA не является простой задачей. Синхронизация, оценивание канала, управление радиоресурсами — это только некоторые примеры проблем, связанных с технологией передачи со многими несущими. В результате непрерывных усилий многих исследователей большинство проблем были изучены, и некоторые решения по ним доступны в открытой литературе. Решения эти, однако, рассыпаны в литературе в форме журнальных публикаций или докладов на конференциях. Как следствие, по ним достаточно трудно составить единое представление о методах решения рассматриваемых вопросов. Задача данной книги состоит в том, чтобы обеспечить читателя достаточно полным и подробным обзором результатов в быстро развивающейся области широкополосной беспроводной связи со многими несущими. Нашей основной целью является достаточно детальное рассмотрение некоторых проблем, связанных с разработками на физическом уровне систем OFDM и OFDMA. Особое внимание при этом обращается на возможности обмена между качественными характеристиками системы связи и ее сложностью.

Потребности в новых высокоскоростных услугах связи постоянно повышаются. При этом повышаются требования к скоростям передачи, качеству предоставляемых услуг. Это приводит к обострению противоречия между повышающимися требованиями и ограниченностью частотных ресурсов, что в свою очередь ставит задачу существенного повышения спектральной эффективности систем. Последние достижения теории информации показали, что значительное повышение пропускной способности и надежности связи может быть достигнуто при использовании систем со многими входами и многими выходами (multiple-input multiple-output — MIMO), в которых используется несколько антенн на передающей стороне и несколько антенн на приемной стороне. В сочетании с адаптивными схемами модуляции и кодирования, а также адаптивным распределением системных ресурсов эти методы могут дать возможности существенного повышения скоростей данных и надежности связи. Более того, как показали исследования, и MIMO технологии, и другие методы повышения спектральной эффективности могут быть использованы совместно с технологиями передачи со многими несущими в так называемых технологиях MIMO-OFDM и MIMO-OFDMA. Основы технологии MIMO-OFDM также рассматриваются в данной книге.