

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R S.1878
(12/2010)

**Методы передачи на основе многих
несущих для спутниковых систем**

Серия S
Фиксированная спутниковая служба



Международный
союз
электросвязи

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции 1 МСЭ-R. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 МСЭ-R.

Электронная публикация
Женева, 2011 г.

© ITU 2011

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R S.1878

Методы передачи на основе многих несущих для спутниковых систем

(Вопросы МСЭ-R 46-3/4 и МСЭ-R 73-2/4)

(2010)

Сфера применения

Для обеспечения эффективного использования ресурсов частоты и услуг высокоскоростной передачи данных в качестве перспективных для будущих служб радиосвязи рассматриваются методы передачи на основе многих несущих. В настоящей Рекомендации представлены обзор методов передачи на основе многих несущих по линиям спутниковой связи и краткое руководство по использованию схем многочастотного многостанционного доступа с кодовым разделением с многими несущими (МС-CDMA) и схем мультиплексирования с ортогональным частотным разделением с интерферометрией несущих (CI-OFDM) для спутниковых систем радиосвязи.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что спутники фиксированной спутниковой службы (ФСС) и подвижной спутниковой службы (ПСС) одновременно используются многими земными станциями, находящимися в разных местоположениях;
- b) что для многих стандартов наземных и спутниковых систем для будущей реализации приняты или рассматриваются для принятия схемы многостанционного доступа на основе многих несущих, такие как ортогональное частотное разделение – многостанционный доступ с частотным разделением (OFDM-FDMA или OFDMA), МС-CDMA и многочастотный TDMA (MF-TDMA);
- c) что, несмотря на то что системы типа OFDM широко используются в наземных сетях в качестве средства, обеспечивающего хороший уровень спектральной и энергетической эффективности в частотно-селективных каналах, OFDM характеризуется высоким отношением пиковой к средней мощности (PAPR), что создает сложности для мощного усилителя (HPA) на спутнике;
- d) что существует необходимость в значительном уровне свободы, особенно для пакетированной (то есть не являющейся непрерывной и осуществляемой с переменной скоростью) и высокоскоростной передачи;
- e) что в целях эффективного использования спектра частот и орбиты может оказаться желательным определить оптимальные характеристики многостанционного доступа;
- f) что характеристики передачи систем с многостанционным доступом, особенно систем с многостанционным доступом на основе многих несущих, могут быть важным фактором при взаимодействии систем,

отмечая,

- a) что в Рекомендации МСЭ-R S.1709 технология MF-TDMA определена как формат доступа входящего трафика для глобальных широкополосных спутниковых систем;
- b) что в Рекомендации МСЭ-R ВО.1130 технология кодированного OFDM (COFDM) определена как один из методов передачи, используемых для служб спутникового цифрового звукового радиовещания на автомобильные, переносные и стационарные приемники в диапазоне частот 1400–2700 МГц;
- c) что в Отчете МСЭ-R S.2173 содержится базовый материал относительно передачи на основе многих несущих по спутниковым линиям связи, включая базовые эксплуатационные принципы, сценарии применения и характеристики передачи на основе многих несущих по спутниковым линиям связи, проанализированные с помощью компьютерного моделирования,

рекомендует,

- 1 что в качестве руководства при планировании использования схемы CI-OFDM для спутниковых систем радиосвязи со многими несущими следует использовать Приложение 1;
- 2 что в качестве руководства при планировании использования схемы MC-CDMA для спутниковых систем радиосвязи следует использовать Приложение 2;
- 3 что рассматриваемые методы могут использоваться даже в сочетании при условии отсутствия их исходной несовместимости.

Приложение 1

Передача CI-OFDM в спутниковых системах радиосвязи

1 Введение

В настоящем Приложении представлена спутниковая система радиосвязи, в которой используется передача CI-OFDM, и показатели этой системы в сравнении со спутниковыми системами радиосвязи, в которых используется передача с одной несущей и OFDM.

2 Модель системы

OFDM – это технология с применением нескольких несущих, которая используется для преодоления частотно-селективного характера среды наземной радиосвязи. Наряду с этим достоинством OFDM обладает рядом преимуществ, которые могут использоваться в спутниковых системах радиосвязи. Эти преимущества перечислены в п. 5.2 Отчета МСЭ-R S.2173. Вместе с тем, как отмечается в Отчете МСЭ-R S.2173, OFDM характеризуется высоким отношением пиковой к средней мощности (PAPR), что создает сложности для мощного усилителя (HPA) на спутнике.

CI-OFDM – это технология со скремблированием поднесущей, которая может быть реализована для системы OFDM с помощью дополнительного модуля быстрого преобразования Фурье (БПФ) на стороне передатчика и стороне приемника системы радиосвязи, с тем чтобы уменьшить PAPR сигналов OFDM. Подробные принципы эксплуатации CI-OFDM четко описаны в п. 6.3 Отчета МСЭ-R S.2173.

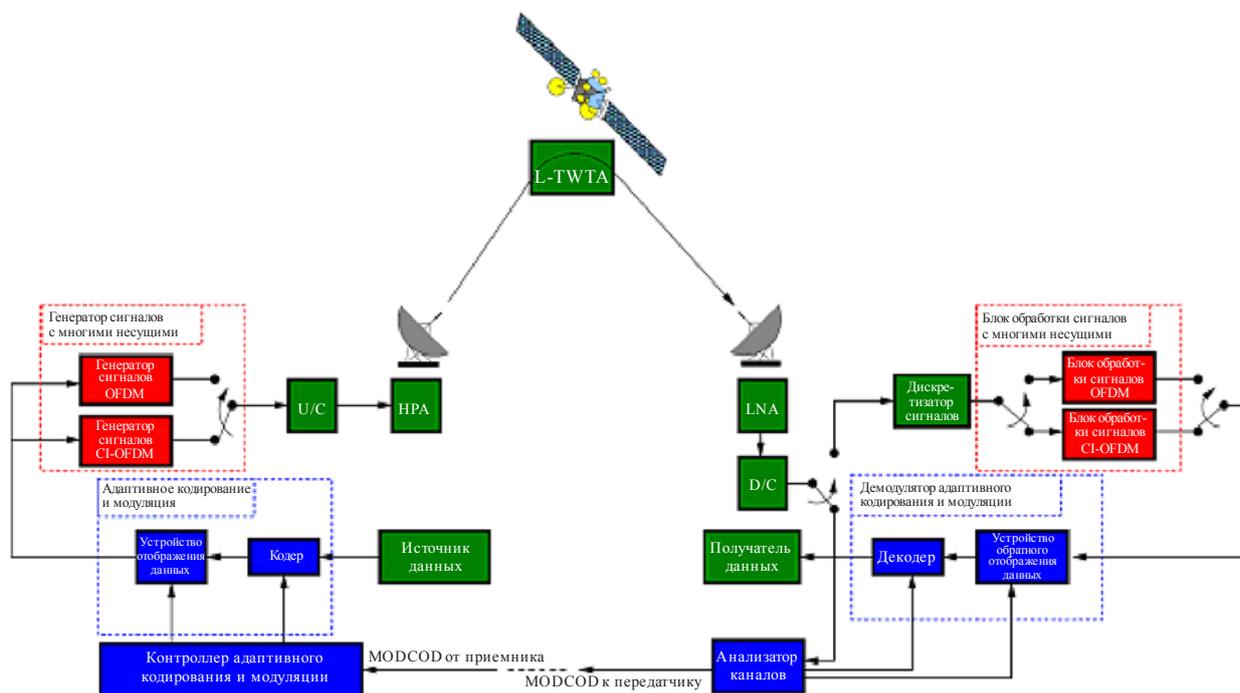
На рисунке 1 показана спутниковая система, осуществляющая передачи CI-OFDM. Источник данных передает векторные слова сообщения в кодер, скорость которого устанавливается контроллером адаптивного кодирования и модуляции (ACM). Далее кодированные данные поступают в устройство отображения символов и после него – в генератор сигналов с многими несущими (MSG). Для целей моделирования MSG состоит из двух блоков: генератора сигналов OFDM и генератора сигналов CI-OFDM. В процессе моделирования используется только один блок MSG. Каждый MSG генерирует символ с многими несущими из набора N символов, где N – число поднесущих, используемых для передачи. Выходной сигнал MSG поступает в HPA. Далее, после HPA, сигнал поступает на аналоговый повышающий преобразователь сигналов (U/C), который образует аналоговый сигнал из цифровых модулирующих символов на желательной несущей частоте и передает его по каналу на спутник. В случае спутника с прямой ретрансляцией осуществляется усиление принимаемого сигнала и его ретрансляция. В спутниковых ретрансляторах часто используется усилитель на лампе бегущей волны (TWTA), и для линейаризации выходных сигналов TWTA в спутниковой системе с многими несущими (MCSS) может использоваться предискажение символов. Следует заметить, что в настоящее время многие современные спутники в процессе производства оборудуются

линеаризованными TWTA (L-TWTA), а комбинация предварительного преобразователя символов и TWTA по сути и образует L-TWTA.

Приемник принимает передаваемый аналоговый сигнал, искаженный в результате воздействия помех и других ухудшений, и передает его либо на дискретизатор сигналов, либо на анализатор каналов. Принятый сигнал поступает в анализатор каналов, если передаются пилот-сигналы. Анализатор каналов оценивает мгновенное отношение сигнал-шум (CNR) в канале и выбирает соответствующую комбинацию модуляции и кодирования (MODCOD). Выбор MODCOD далее передается обратно контроллеру ACM передатчика и используется для установки соответствующих модуляции и кодирования, которые должны применяться при демодуляции и декодировании принимаемых отсчетов. При приеме данных приемником сигналы поступают на дискретизатор сигналов, который формирует набор отсчетов с частотой Найквиста для блока обработки сигналов с многими несущими (MPU). Для целей моделирования MPU состоит из двух модулей: блока обработки сигналов OFDM и блока обработки сигналов CI-OFDM. Приемник использует тот модуль MPU, который соответствует модулю MSG, используемому передатчиком. Каждый MPU создает набор N отсчетов символов из отсчета символов с многими несущими. Выходной сигнал MPU поступает затем на устройство обратного отображения символов. В целях формирования жесткой или мягкой оценки для каждого переданного бита, которые поступают на декодер, устройство обратного отображения символов использует средние принятые совокупности каждой модуляции и соответствующие амплитуды их вектора ошибок. Декодер вырабатывает решение относительно переданных данных и передает их получателю данных.

РИСУНОК 1

Функциональная схема моделирования MCSS, в которой используются передачи CI-OFDM



3 Полученные показатели CI-OFDM в нелинейном спутниковом канале

Представленные в данном разделе результаты моделирования получены при использовании модели системы, описанной в п. 2 настоящего Приложения. В модели системы используется схема DVB-S2 ACM¹, число итераций декодирования алгоритма "распространения доверия" (belief propagation)² – 100. К модулирующим символам применяется дискретизация повышенной частоты с коэффициентом 4, с тем чтобы получить надлежащее представление модулированного сигнала, а для генерирования символов с многими несущими используются 64 поднесущие. L-TWTA – это усилитель, описанный в п. 10.3.1 Отчета МСЭ-R S.2173. Оценка канала и помех, а также обратная связь приемника с передатчиком предполагаются безошибочными.

Наиболее приемлемым способом оценки показателей метода уменьшения PAPR является измерение общего ухудшения (TD) значения коэффициента ошибок на пакет (PER) между системой с идеальным линейным усилителем³ – далее "линейный усилитель" – и исследуемой системой⁴, учитывая ухудшение, обусловливаемое снижением мощности на входе (IBO). Математически это представляется следующим образом:

$$TD \text{ (дБ)} = CNR_{\text{nonlinear}} \text{ (дБ)} - CNR_{\text{linear}} \text{ (дБ)} + IBO \text{ дБ}, \quad (1)$$

где CNR_{linear} и $CNR_{\text{nonlinear}}$ – отношения несущая-шум, требуемые для получения конкретного PER для линейного и нелинейного НРА, соответственно.

В таблице 1 показано TD, вызываемое прохождением другой модуляции DVB-S2 через L-TWTA, которое получено при PER, составляющем 10^{-3} . Следует заметить, что для надлежащего сравнения CNR линейного НРА с CNR системы с L-TWTA, эквивалентное CNR имеет вид:

$$CNR_{\text{eq}} \text{ (дБ)} = CNR \text{ (дБ)} + IBO_{\text{opt}} \text{ дБ}. \quad (2)$$

Это преобразование должно осуществляться для корректного сравнения показателей обеих систем, работающих при своих максимальных значениях мощности на выходе. Линейный НРА всегда работает при IBO, равном 0 дБ (насыщение НРА), в то время как L-TWTA необязательно работает в режиме насыщения. Результаты моделирования для SCSS с L-TWTA показывают, что оптимальное IBO⁵ (IBO_{opt}) для работы L-TWTA составляет 0 дБ⁶. При модуляции с постоянной огибающей, такой как M-позиционная PSK, ухудшение отсутствует; вместе с тем, ухудшение при 16-APSK пренебрежимо, но является значительным при 32-APSK. В таблице 1 показано, что спутниковая система с одной несущей (SCSS) может работать, используя DVB-S2, с весьма малыми потерями по сравнению с теоретической системой с линейным усилителем.

¹ Более подробную информацию о DVB-S2 см. в п. 9.2 Отчета МСЭ-R S.2173.

² Более подробную информацию об алгоритме распространения доверия (belief propagation) см. в п. 7.4.4 Отчета МСЭ-R S.2173.

³ Следует заметить, что идеальный линейный усилитель характеризуется наличием линейной передаточной функции и отсутствием точки насыщения. Это означает, что идеальный линейный усилитель не вносит помех, вызываемых срезанием импульсов.

⁴ Исследуемой системой может быть SCSS с нелинейным усилителем или MCSS, в которой используются или не используются методы снижения PAPR.

⁵ Более подробно об определении IBO_{opt} , см. п. 10.3.2 Отчета МСЭ-R S.2173.

⁶ Это подтверждает результаты, представленные в п. 10.3.2 Отчета МСЭ-R S.2173.

ТАБЛИЦА 1

Ухудшение, вносимое L-TWTA, в спутниковой системе при использовании различных комбинаций MODCOD с DVB-S2

MODCOD	Спектральная эффективность (бит/с/Гц)	Линейный усилитель CNR_{eq} (дБ) @ PER = 10^{-3}	L-TWTA	
			CNR_{eq} (дБ) @ PER = 10^{-3}	TD_{L-TWTA} (дБ)
QPSK 1/4	0,49	-2,96	-2,96	0
QPSK 2/5	0,79	-0,64	-0,64	0
QPSK 1/2	0,99	1,13	1,13	0
QPSK 5/6	1,65	5,05	5,05	0
8-PSK 3/5	1,78	5,61	5,61	0
8-PSK 3/4	2,23	7,84	7,84	0
8-PSK 5/6	2,48	9,31	9,31	0
8-PSK 9/10	2,68	10,84	10,84	0
16-APSK 3/4	2,96	10,14	10,21	0,07
16-APSK 4/5	3,16	10,92	11,00	0,08
16-APSK 5/6	3,30	11,53	11,63	0,10
16-APSK 8/9	3,52	12,76	12,88	0,12
16-APSK 9/10	3,56	12,99	13,13	0,14
32-APSK 3/4	3,70	12,80	13,48	0,68
32-APSK 4/5	3,95	13,61	14,45	0,84
32-APSK 5/6	4,12	14,26	15,20	0,94
32-APSK 8/9	4,39	15,50	16,70	1,20
32-APSK 9/10	4,45	15,75	16,98	1,23

В таблице 2 показаны потери показателя TD для MCSS, использующей передачи CI-OFDM, по сравнению с системой MCSS, использующей передачи OFDM. Изменение TD для систем MCSS более существенно при сравнении с системами SCSS. Это объясняется более высокими значениями PAPR сигналов с многими несущими. Можно заметить также, что MCSS с передачами CI-OFDM характеризуется выигрышем на 0,5–4,5 дБ по TD относительно MCSS с передачами OFDM, в зависимости от применяемого MODCOD.

На рисунке 2 это показано путем графического отображения TD относительно спектральной эффективности (в битах в секунду на Герц (бит/с/Гц)) схемы ACM с DVB-S2. Следует заметить, что результаты представлены в значениях CNR_{eq} , рассчитанных по формуле (2), для каждой системы MCSS. Отметим также, что кривые построены с использованием максимальной спектральной эффективности, обеспечиваемой всеми MODCOD для каждого CNR_{eq} в конкретной системе. То есть если MODCOD x имеет более высокую спектральную эффективность по сравнению с MODCOD y , и MODCOD x имеет более низкое CNR_{eq} по сравнению с MODCOD y , то MODCOD y на рисунке 2 не учитывается. MODCOD, не включенные в рисунок 2, подчеркнуты в таблицах 1 и 2. Как видно, кривая, представляющая MCSS, в которой используются передачи OFDM, имеет значительно более крутой подъем по сравнению с кривой MCSS, использующей передачи CI-OFDM. Кроме того, до значения спектральной эффективности 3,6 бит/с/Гц система MCSS с передачами CI-OFDM характеризуется значением TD менее 3 дБ. Это значит, что MCSS с передачами CI-OFDM может использоваться, обеспечивая спектральную эффективность до 3,6 бит/с/Гц, при возрастании требуемой мощности передачи на более чем вдвое.

ТАБЛИЦА 2

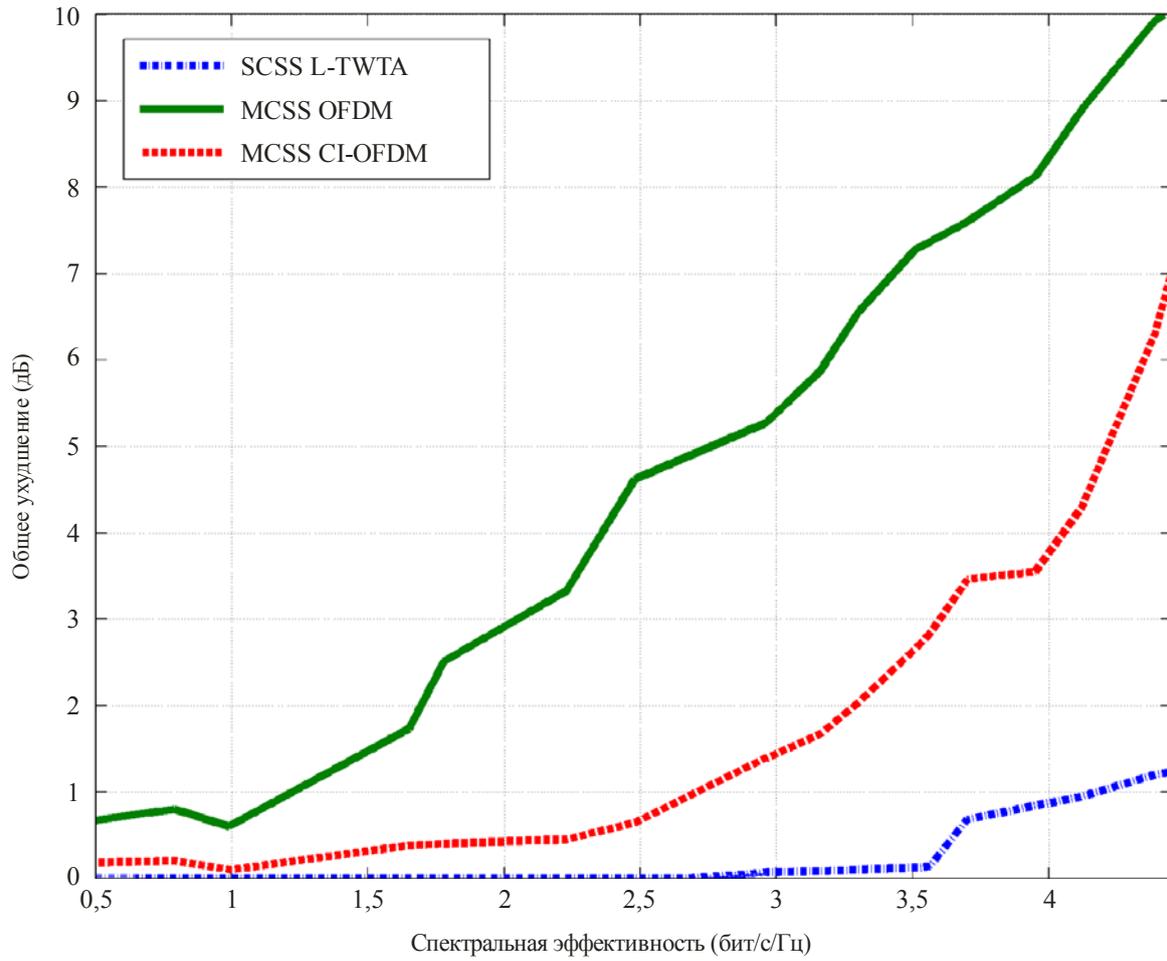
Сравнение показателя TD для MCSS с передачами OFDM и CI-OFDM при использовании различных комбинаций MODCOD с DVB-S2

MODCOD	Спектральная эффективность (бит/с/Гц)	OFDM			CI-OFDM		
		CNR_{eq} (дБ) @PER = 10^{-3}	IBO_{opt} (дБ)	TD (дБ)	CNR_{eq} (дБ) @PER = 10^{-3}	IBO_{opt} (дБ)	TD (дБ)
QPSK 1/4	0,49	-2,29	0	0,67	-2,78	0	0,18
QPSK 2/5	0,79	0,16	0	0,80	-0,44	0	0,20
QPSK 1/2	0,99	1,73	0	0,60	1,23	0	0,10
QPSK 5/6	1,65	6,78	0	1,73	5,43	0	0,38
8-PSK 3/5	1,78	8,12	0	2,51	6,01	0	0,40
8-PSK 3/4	2,23	11,17	0	3,33	8,29	0	0,45
8-PSK 5/6	2,48	13,93	1	4,62	9,95	0	0,64
8-PSK 9/10	2,68	16,69	3	5,85	11,72	0	0,88
16-APSK 3/4	2,96	15,41	2	5,27	11,53	0	1,39
16-APSK 4/5	3,16	16,79	3	5,87	12,59	0	1,67
16-APSK 5/6	3,30	18,08	3	6,55	13,56	0	2,03
16-APSK 8/9	3,51	20,04	5	7,28	15,42	1	2,66
16-APSK 9/10	3,56	20,76	5	7,77	15,81	1	2,82
32-APSK 3/4	3,70	20,40	5	7,60	16,26	2	3,46
32-APSK 4/5	3,95	22,05	6	8,13	17,47	2	3,55
32-APSK 5/6	4,12	23,16	6	8,9	18,55	2	4,29
32-APSK 8/9	4,39	25,43	8	9,93	21,81	2	6,31
32-APSK 9/10	4,45	25,81	8	10,06	22,75	2	7,00

На рисунке 3 представлена энергетическая эффективность SCSS с линейным HPA, SCSS с L-TWTA, MCSS с передачами OFDM и MCSS с передачами CI-OFDM в форме графика спектральной эффективности этих систем при PER, составляющем 10^{-3} , в зависимости от CNR_{eq} в соответствии с таблицами 1 и 2. Каждый шаг на графике представляет использование новой MODCOD, характеризующейся более высокой спектральной эффективностью. Следует заметить, что, как пояснялось в связи с рисунком 2, на рисунке 3 учтены только комбинации MODCOD, обеспечивающие максимальную спектральную эффективность. Результаты на рисунке 3 отражают результаты на рисунке 2, то есть SCSS имеют лучшую энергетическую эффективность по сравнению с MCSS, особенно для комбинаций MODCOD, характеризующихся более высокой спектральной эффективностью. В частности, MCSS, использующие MODCOD с модуляцией 32-APSK, обладают очень низкой энергетической эффективностью по сравнению с SCSS с L-TWTA. Вместе с тем очевидно, что CI-OFDM существенно улучшает энергетическую эффективность MCSS по сравнению с MCSS, использующей передачи OFDM. Спектральная эффективность, которая может быть достигнута для системы MCSS, использующей передачи OFDM, при ограничении возрастания мощности передачи значением 3 дБ или менее, составляет 2,05 бит/с/Гц. Это примерно на 1,55 бит/с/Гц меньше значения для MCSS с передачами CI-OFDM.

РИСУНОК 2

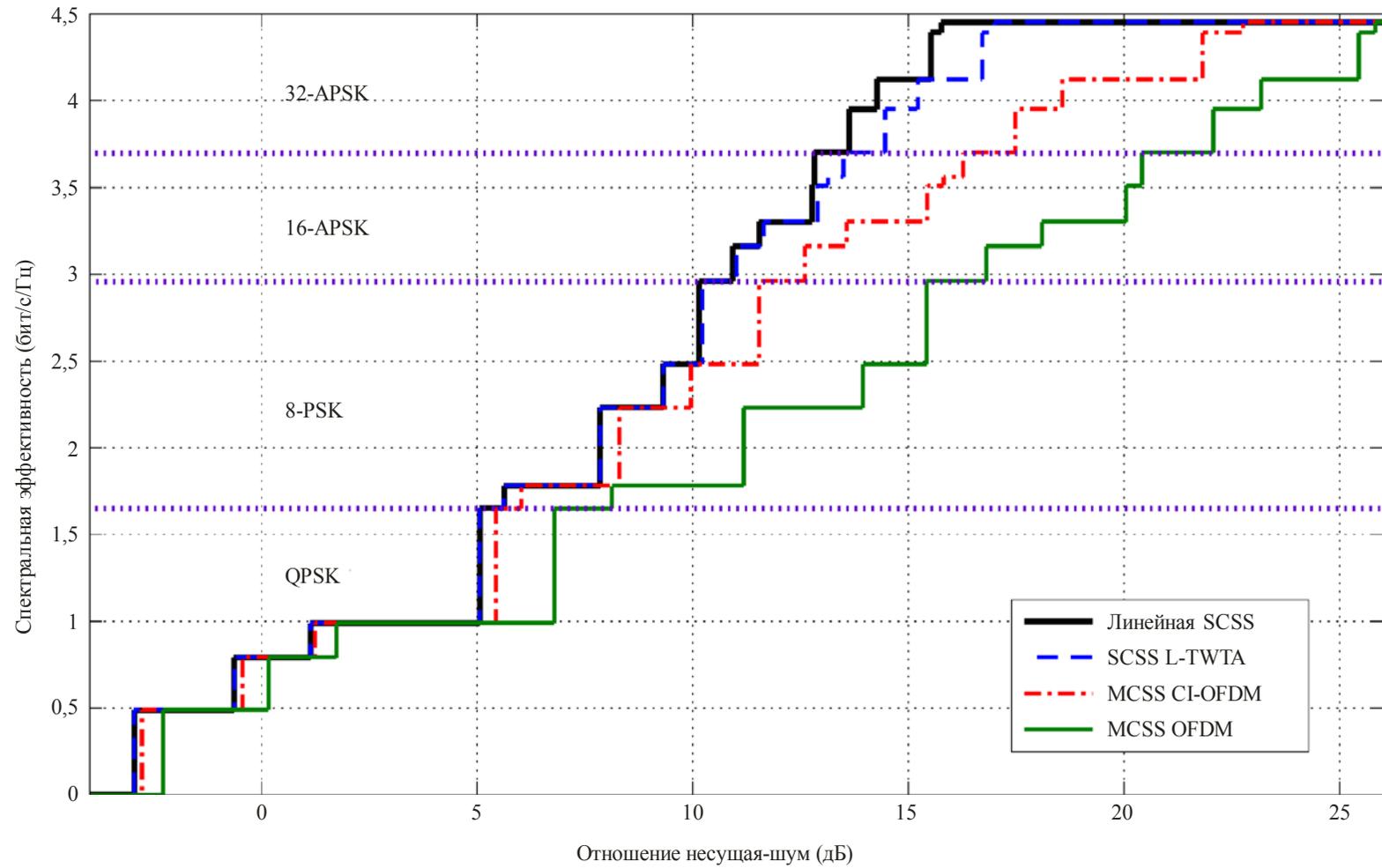
Общее ухудшение SCSS и MCSS в зависимости от спектральной эффективности



S.1878-02

РИСУНОК 3

Энергетическая эффективность SCSS и MCSS для различных комбинаций MODCOD с DVB-S2



4 Резюме

В данном Приложении демонстрируется возможность использования передач CI-OFDM для спутниковой системы радиосвязи и достижения спектральной эффективности до 3,6 бит/с/Гц при ограничении возрастания требуемой мощности передачи значением 3 дБ и менее. Не модифицированные передачи OFDM характеризуются высокими значениями PAPR и, вследствие этого, могут использоваться только для MCSS, обеспечивая спектральную эффективность до примерно 2,05 бит/с/Гц при ограничении возрастания требуемой мощности передачи значением 3 дБ и менее⁷. Это показывает, что CI-OFDM обеспечивает возможность работы MCSS со спектральной эффективностью, примерно на 1,55 бит/с/Гц превышающей спектральную эффективность MCSS с передачами OFDM.

Приложение 2

МС-CDMA в спутниковых системах радиосвязи

1 Введение

В Приложении 2 представлена спутниковая система радиосвязи с передачами МС-CDMA и ее соответствующие параметры, оцененные с помощью компьютерного моделирования.

2 Модель системы

На рисунке 4 представлена синхронная геостационарная спутниковая система с многими лучами, обеспечивающая пакетные услуги на базе IP с использованием адаптивной схемы МС-CDMA. Услуги, предназначенные для пользователей подвижной и фиксированной связи, связаны с наземной базовой IP сетью через фиксированную земную станцию (ФЗС) и спутник. ФЗС осуществляет адаптивное распределение ресурсов на линии вниз и является шлюзом, связывающим пользовательские услуги с наземной сетью. Если спутник оборудован средствами обработки, он может выполнять адаптивное распределение ресурсов.

В синхронной системе с многими лучами все сигналы от спутника в линии синхронизированы по времени и частоте. Радиокадр линии вниз состоит из нескольких частотных/временных интервалов, разделенных методом FDM/TDM. В каждом временном/частотном интервале ресурс радиосвязи подразделяется с помощью ортогональных кодов расширения спектра методом CDM. Блок радиоресурса (RRU) определяется конкретным кодом расширения спектра в конкретном частотном/временном интервале. Все лучи совместно используют ортогональные RRU для пакетной передачи. Благодаря синхронизированной передаче все RRU между собой являются ортогональными. Для каждого луча в предопределенной части кадра передается уникальная пилотная последовательность символов. Пилотная последовательность расширяется пилотным кодом, зависящим от луча.

В интервале сигнал трафика расширяется с помощью ортогональных кодов расширения спектра, но он не скремблируется пилотным кодом, зависящим от луча. Следовательно, благодаря синхронизированной передаче по всем лучам, сигналы передачи от разных лучей являются между собой ортогональными, если для лучей используются разные коды расширения спектра в том же интервале. В силу взаимной ортогональности RRU помехи между лучами сводятся к минимуму, что повышает емкость системы.

⁷ Следует заметить, что эти результаты характерны для систем с многими несущими с 64 поднесущими.

В среде подвижной связи ортогональность между разными кодами расширения спектра в том же частотном/временном интервале может не поддерживаться из-за замирания вследствие многолучевости (частотно-избирательного). В условиях высокой загрузки число доступных в луче RRU может быть ограничено, поскольку все лучи совместно используют RRU. Во избежание такого ограничения ресурсов возможно осуществлять повторное использование RRU, если расстояние между пользователями достаточно велико для того, чтобы не допускать чрезмерного уровня межлучевых помех, который создал бы трудности. Проблема ограничения кодов могла бы быть разрешена с помощью MODCOD с высокой спектральной эффективностью, такой как 16-QAM. Использование схем модуляций высокого порядка может сократить число RRU, требуемое для пакетной передачи.

Для адаптивной пакетной передачи каждый пользователь осуществляет измерение состояния канала, используя пилот-сигналы луча, и регулярно сообщает результаты измерений ФЗС по обратной линии связи. Отчет пользователя включает значения мощности принимаемых сигналов и отношения несущая-помеха пилотных сигналов на первичном и соседних лучах. Первичным лучом пользователя является луч, в настоящее время обеспечивающий пакетные услуги данному пользователю. На основании сообщенных условий в линии центр управления ресурсами ФЗС выполняет диспетчеризацию пакетов, выбирает лучшие ресурсы для передачи каждого пакета и назначает для них мощность передачи и комбинацию MODCOD.

Информационные IP-сигналы на прямой линии связи относительно обратной линии связи являются асимметричными по требованиям к ширине полосы. Сочетание неравномерной и высокоскоростной пакетной передачи с использованием MC-CDMA обеспечивает более высокую эффективность передатчиков по показателю спектральной эффективности.

MC-CDMA сочетает методы CDMA и OFDM таким образом, что используются преимущества обоих этих методов. Спутниковая система с MC-CDMA обеспечивает высокую степень свободы благодаря своей схеме передачи с многими несущими и, таким образом, может обеспечивать более эффективную адаптивную передачу.

РИСУНОК 4

Пример многолучевой спутниковой системы

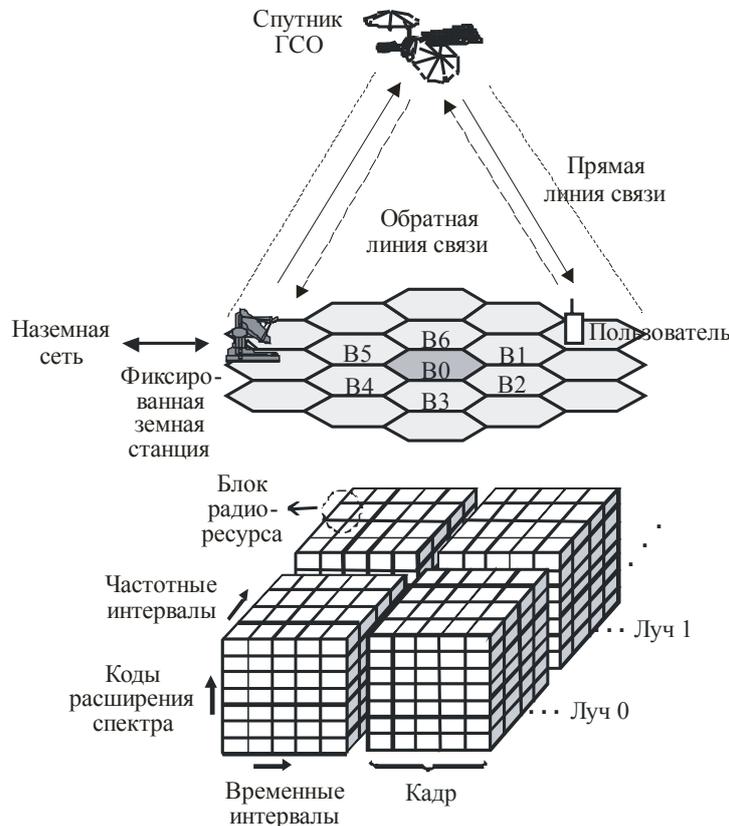
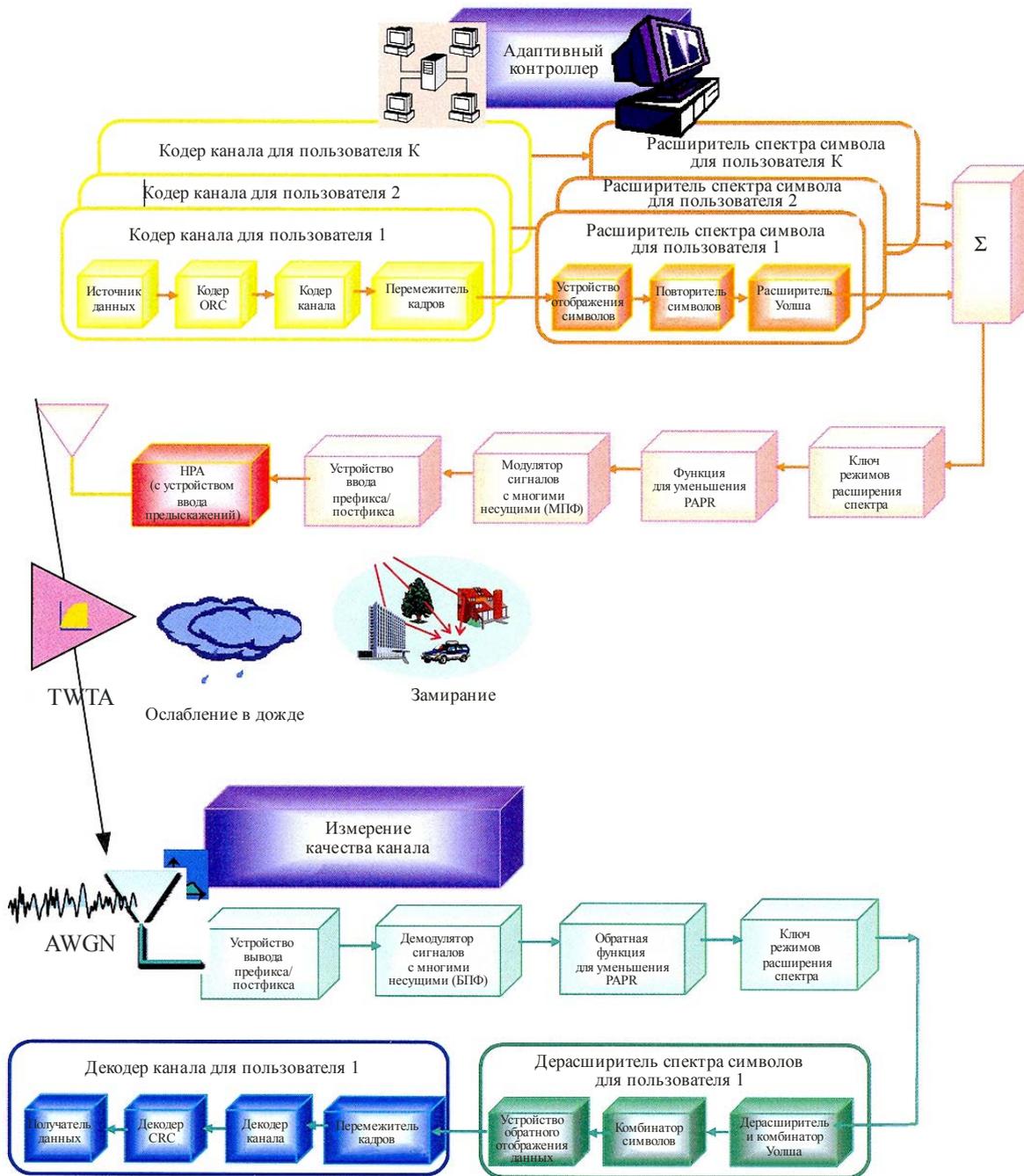


РИСУНОК 5

Функциональная-схема адаптивной спутниковой системы с MC-CDMA



На рисунке 5 представлена функциональная схема передатчика и приемника адаптивной спутниковой системы с MC-CDMA. Адаптивные системы с MC-CDMA могут использоваться в качестве меры противодействия замиранию в атмосфере. Адаптивный передатчик, показанный на рисунке 5, изменяет схемы кодирования, модуляции и расширения спектра с помощью команды управления, определенной в соответствии с условиями в спутниковом канале. Канальный кодер в адаптивном передатчике изменяет свои параметры кодирования, используя вышеупомянутую команду управления. Расширитель символов для каждого пользователя состоит из устройства отображения символов, повторителя символов и расширителя Уолша и он тоже меняет свои параметры, используя команду управления. Перемежитель чипов в передатчике предназначен для работающих в двух режимах схем MC-CDMA, которые, в частности, применяются для изменения используемой схемы расширения спектра в соответствии с условиями канала и трафика. В адаптивных системах с MC-CDMA могут также использоваться методы для снижения PAPR. Дополнительно используется устройство ввода предскажений для линеаризации НРА. Число методов снижения PAPR и схем ввода предскажений рассматриваются в п. 6.2 Отчета МСЭ-R S.2173.

В соответствии с адаптивным функционированием передатчика приемник, изображенный на рисунке 5, также меняет свои схемы декодирования, демодуляции и деразширения спектра, используя команду управления, синхронизованную с командой, которая используется в передатчике. Демодуляция с многими несущими выполняется путем простого БПФ, а все другие операции, выполняемые приемником, применяются в обратном порядке в отношении операций, выполняемых передатчиком.

Выбор схем модуляции и кодирования зависит от конкретной реализации системы. Подробно схемы кодирования канала и адаптация линии связи, осуществляемая с помощью ACM, рассматриваются в пп. 7 и 8 Отчета МСЭ-R S.2173, соответственно. Результаты моделирования, касающиеся этих вопросов, также представлены в п. 10 Отчета МСЭ-R S.2173.

3 Показатели спутниковой системы с MC-CDMA

Параметры системы, приведенные в таблице 4, используются для исследования ухудшения сигнала, возникающего в совокупности символов вследствие нелинейной передаточной функции TWTA в спутниковой системе с MC-CDMA. Для целей моделирования используется передаточная функция TWTA, описанная в п. 10.3.1 Отчета МСЭ-R S.2173. На рисунке 6 показаны случаи ухудшения сигнала для разного числа пользователей и разных значений ОВО. В качестве исходного условия принято, что в системе MC-CDMA используется 128 поднесущих и код Уолша-Адамара, длина которого составляет 16. В системе имеется до 16 активных пользователей, и 128 поднесущих поровну распределяются между всеми активными пользователями. На рисунке 6 небольшие красные окружности в пределах совокупности представляют сигнал без ухудшения; внешние синие точки представляют сигнал, когда число текущих пользователей $K = 16$; зеленые точки представляют сигнал, когда $K = 8$, и внутренние черные точки представляют сигнал, когда $K = 1$. Нелинейное ухудшение, создаваемое TWTA, возрастает по мере увеличения числа пользователей. Также очевидно, что ухудшение сигнала возрастает по мере уменьшения значения ОВО усилителя TWTA. Это ухудшение вызывает ухудшение показателя BER (коэффициент ошибок по битам) системы.

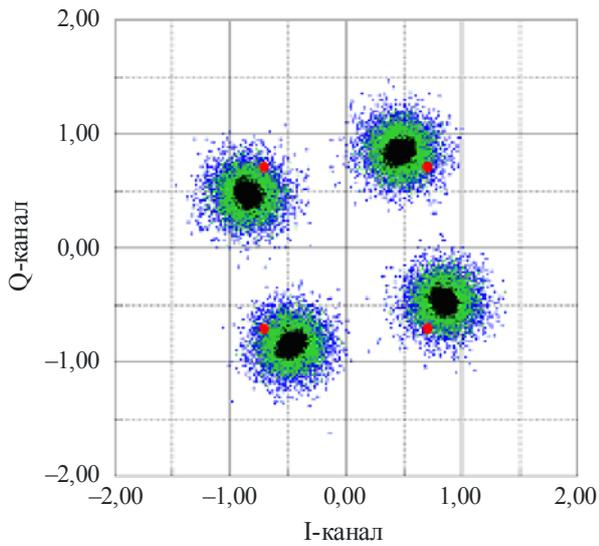
ТАБЛИЦА 4

Параметры для спутниковой системы с MC-CDMA

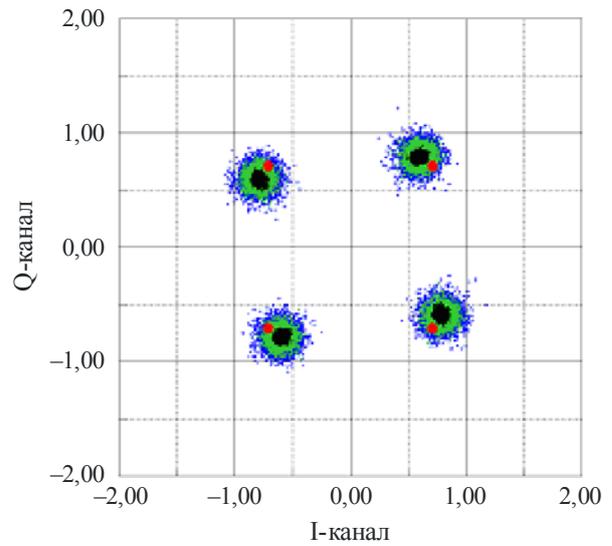
Совокупность сигналов	QPSK, 16-QAM
Последовательность расширения спектра	Последовательность Уолша-Адамара
Выигрыш в обработке	16
Число символов в кадре (M)	4, 8, 16
Число активных пользователей (K)	1–16
Число поднесущих (N)	64, 128, 256
Код скремблирования	Случайный код

РИСУНОК 6

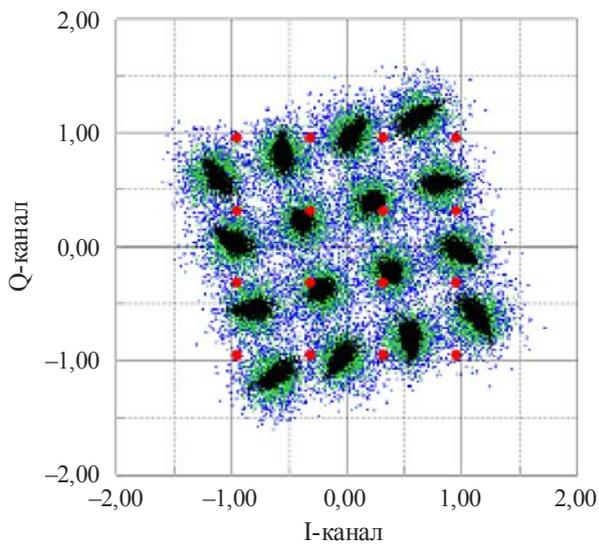
Совокупность сигналов с ухудшением, внесенным TWTA



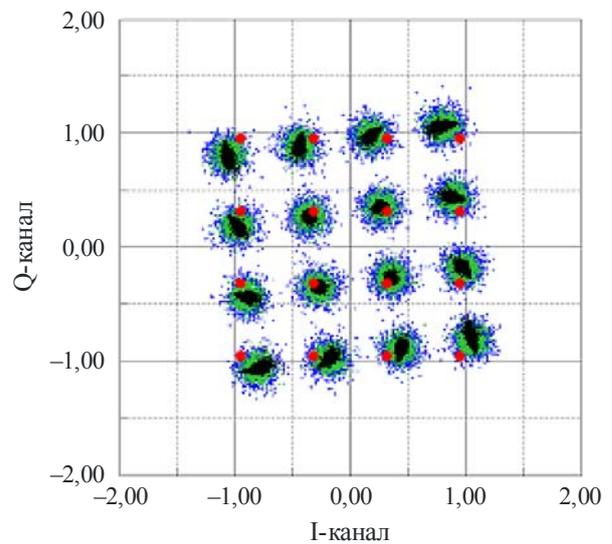
a) QPSK (OBO = 3 дБ)



b) QPSK (OBO = 6 дБ)



c) 16-QAM (OBO = 3 дБ)

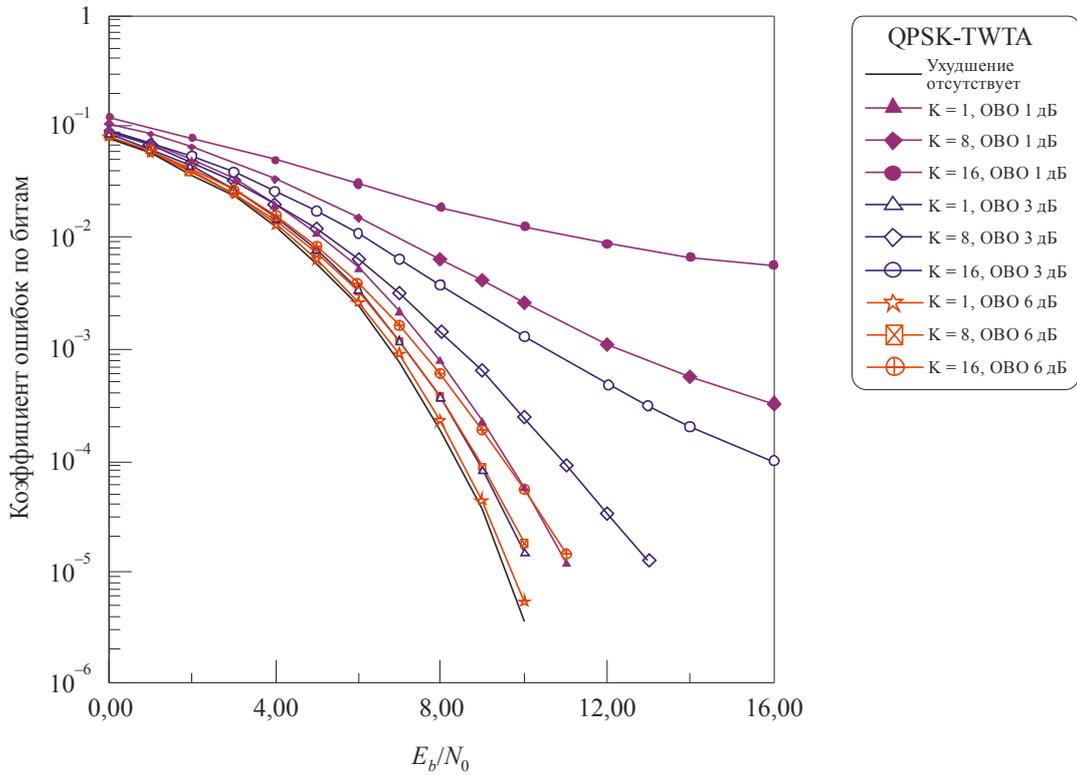


d) 16-QAM (OBO = 6 дБ)

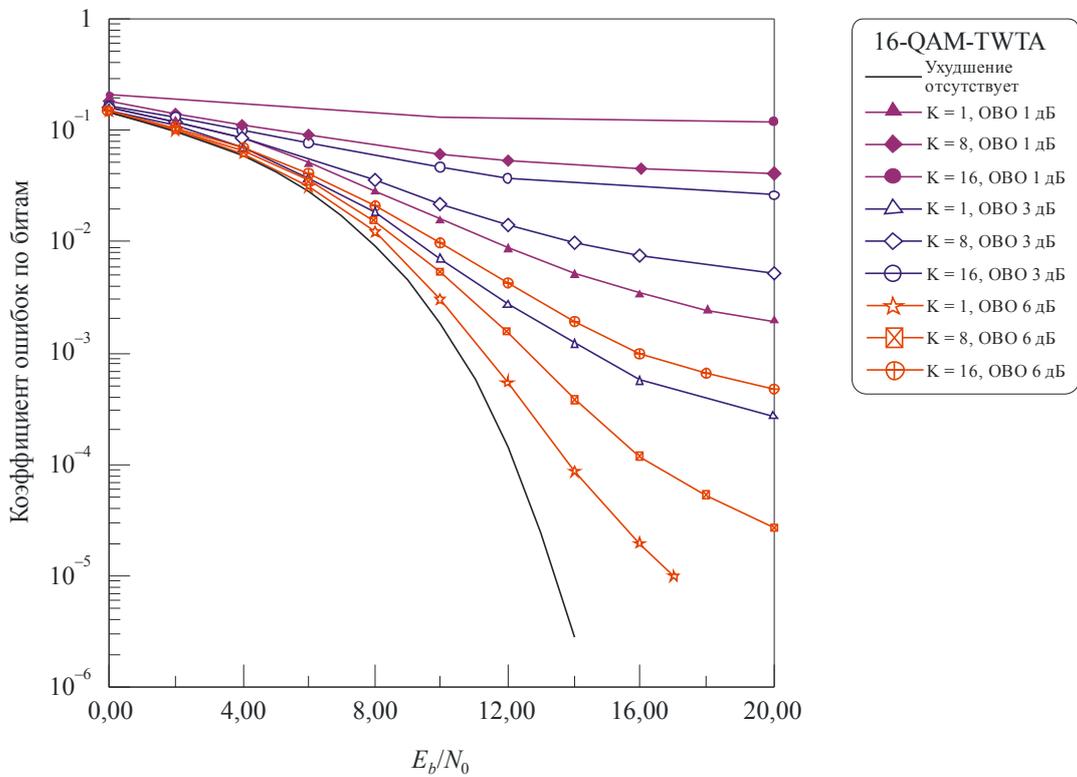
S.1878-06

Рисунок 7 является иллюстрацией анализа показателя BER без кодирования спутниковой системы с MC-CDMA при разном числе пользователей и разных значениях OBO. Результаты моделирования на рисунке 7 показывают, что нелинейное ухудшение оказывает большее воздействие на совокупность 16-QAM, чем на совокупность QPSK. Также можно заметить, что воздействие нелинейного ухудшения на показатель BER спутниковой системы с MC-CDMA возрастает с возрастанием числа пользователей и уменьшением значения OBO усилителя TWTA, как предполагалось на основании рисунка 6.

РИСУНОК 7
Показатель BER спутниковой системы с MC-CDMA
а) QPSK



б) 16-QAM



Использование предсказания символов может уменьшить ухудшение показателей, вызываемых нелинейным ухудшением TWTA. На рисунке 8 представлен показатель BER без кодирования, соответствующий спутниковой системе с MC-CDMA в сочетании с L-TWTA, который является комбинацией TWTA и устройства ввода идеальных предсказаний, далее – L-TWTA. Представленные результаты показывают значительное улучшение показателя BER спутниковой системы с MC-CDMA при вводе идеального предсказания, особенно для случая более высоких значений ОВО. Более значительное улучшение показателя BER достигается при совокупности 16-QAM, поскольку 16-QAM характеризуется более значительным нелинейным ухудшением по сравнению с QPSK. Улучшение показателя является результатом компенсации фазового искажения и эффекта линеаризации, обеспечиваемого устройством ввода предсказаний, в областях, близких к насыщению НРА. Несмотря на представление результатов моделирования с использованием устройства ввода идеальных предсказаний, проблемы высоких пиковых значений MC-CDMA не могут быть полностью разрешены. Это объясняется тем, что устройство ввода идеальных предсказаний обеспечивает линеаризацию сигналов только в областях до области насыщения, а область насыщения определяется значением ОВО. Следовательно, весьма важно уменьшать PAPR, используя эффективный метод уменьшения PAPR. Это может снизить значение ОВО и способствовать эффективному использованию энергии, как показано в Приложении 1 для передач CI-OFDM.

Адаптивная спутниковая система с MC-CDMA исследуется, когда она реализована в модели канала подвижной спутниковой связи для полосы 30/20 ГГц для пригородных районов⁸. Для адаптивной передачи используются различные комбинации MODCOD и блочных турбокодов (BTC)⁹. Подробно показатели MODCOD с BTC представлены в п. 10.1 Отчета МСЭ-R S.2173. E_s/N_0 фиксируется на уровне 20,5 дБ, что соответствует требуемому значению E_s/N_0 , равному 18,5 дБ для MODCOD с BTC 64-QAM $(63,56)^2$ (индекс "x" показывает x-мерный BTC), для создания BER величиной 10^{-6} , плюс дополнительные 2 дБ запаса по мощности. В таблице 5 сравниваются показатели адаптивной спутниковой системы с MC-CDMA с показателями традиционной неадаптивной спутниковой системы с MC-CDMA. В обеих имитационных системах используется идеальный L-TWTA с ИВО величиной 3 дБ.

Очевидно, что показатели адаптивной спутниковой системы с MC-CDMA превосходят показатели неадаптивной системы с MC-CDMA. Например, спектральная эффективность¹⁰ адаптивной системы может достигать значения 1,97 бит/с/Гц, что соответствует примерно той же спектральной эффективности, которую обеспечивает 8-PSK $(31,25)^2$ MODCOD, но со значительно лучшим показателем BER при том же значении E_s/N_0 .

ТАБЛИЦА 5

Показатели адаптивной MC-CDMA в канале подвижной спутниковой связи

	Адаптивная	8-PSK $(31,25)^2$	8-PSK $(15,10)^3$	BPSK $(15,10)^3$
BER	$8,91 \times 10^{-6}$	$1,15 \times 10^{-1}$	$8,78 \times 10^{-2}$	$2,09 \times 10^{-2}$
PER	$3,10 \times 10^{-4}$	$4,59 \times 10^{-1}$	$2,81 \times 10^{-1}$	$8,31 \times 10^{-2}$
Спектральная эффективность (бит/с/Гц)	1,97	1,95	0,89	0,30

⁸ Дополнительную информацию о канале подвижной спутниковой связи для полосы 30/20 ГГц для пригородных районов см. в справочном документе [Fontán *et al.*, 2001] в п. 10.4.3 Отчета МСЭ-R S.2173.

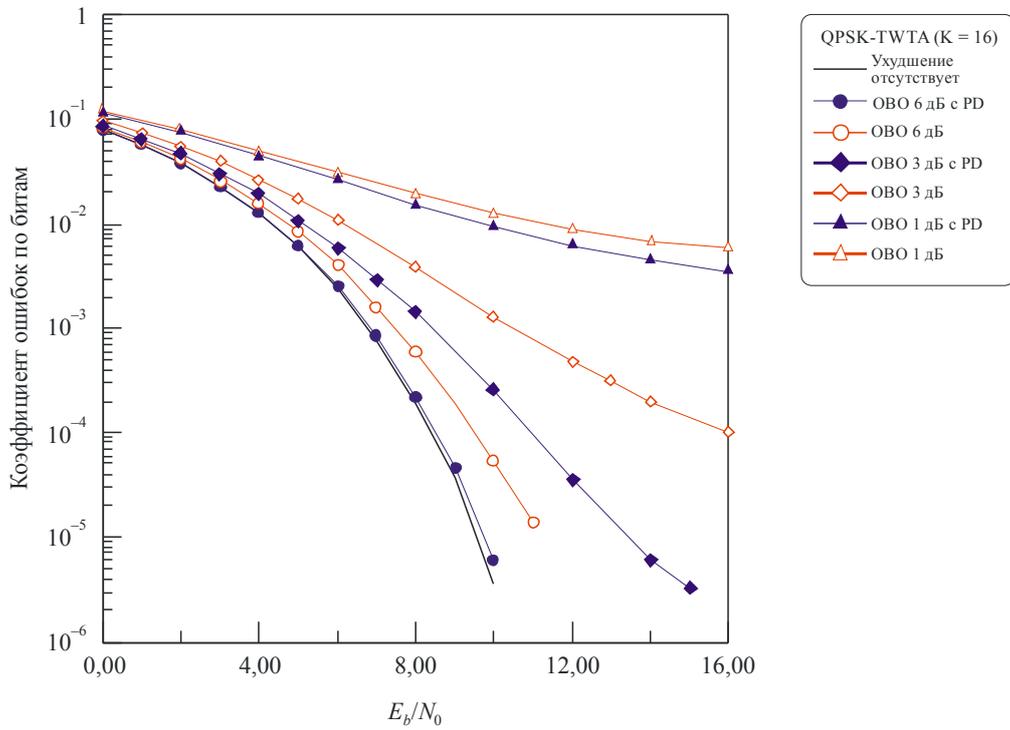
⁹ Более подробно о BTC см. п. 7.3.3 Отчета МСЭ-R S.2173.

¹⁰ Определение спектральной эффективности в данном контексте следующее: средняя спектральная эффективность, полученная путем усреднения результатов из таблицы 5 по всем мгновенным реализациям канала, которые выполнены с использованием модели канала, представленной в справочном документе [Fontán *et al.*, 2001] в п. 10.4.3 Отчета МСЭ-R S.2173.

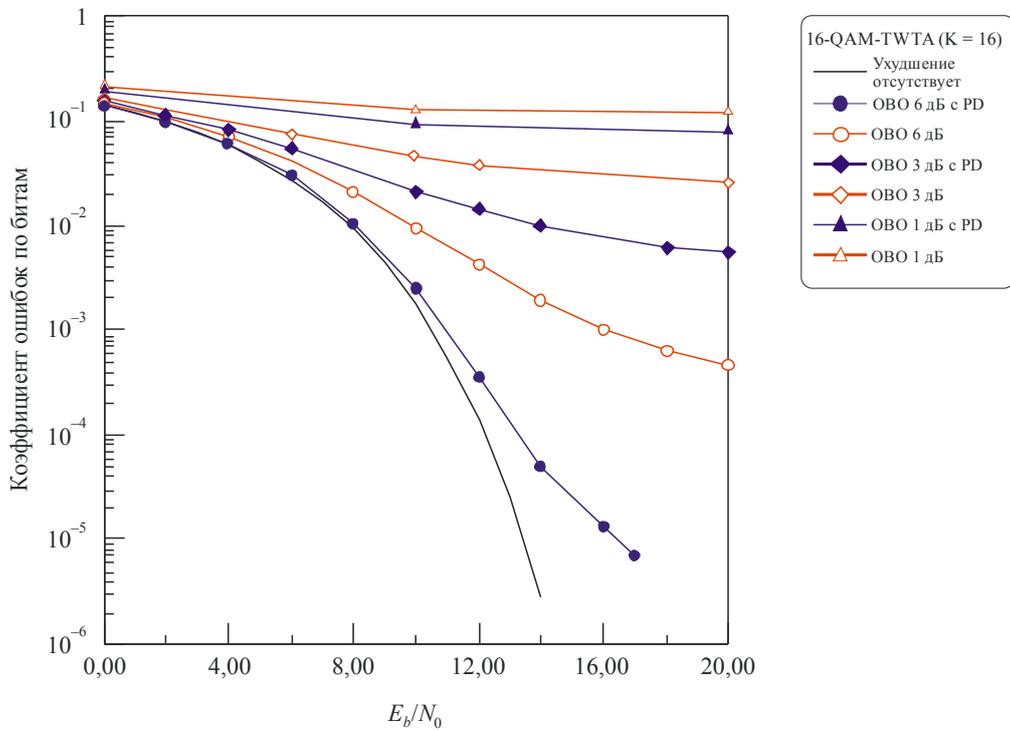
РИСУНОК 8

Показатель BER MC-CDMA с усилителем L-TWTA с идеальным устройством ввода предсказаний

а) QPSK (K = 16)



б) 16-QAM (K = 16)



4 Резюме

В Приложении 2 показано, что MC-CDMA может обеспечивать в системе ПСС более высокую спектральную эффективность и лучший показатель BER. Для обеспечения пакетных IP услуг с помощью синхронизированной спутниковой системы с многими лучами может использоваться адаптивная схема MC-CDMA.

Список сокращений

ACM	Adaptive coding and modulation		Адаптивное кодирование и модуляция
APSK	Amplitude and phase shift keying		Амплитудно-фазовая манипуляция
CI-OFDM	Carrier interferometry orthogonal frequency-division multiplexing		Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением с интерферометрией несущих
CNR	Carrier-to-noise ratio		Отношение несущая-шум
COFDM	Coded orthogonal frequency-division multiplexing		Кодовое ортогональное частотное разделение
FES	Fixed earth station	ФЗС	Фиксированная земная станция
FFT	Fast Fourier transform	БПФ	Быстрое преобразование Фурье
FSS	Fixed-satellite service	ФСС	Фиксированная спутниковая служба
HPA	High-power amplifiers		Мощный усилитель
IBO	Input back-off		Снижение мощности на входе
IFFT	Inverse fast Fourier transform	ОБПФ	Обратное быстрое преобразования Фурье
L-TWTA	Linearized TWTAs		Линеаризованный усилитель на лампе бегущей волны
MC-CDMA	Multi-carrier code-division multiple access		Многочастотный многостанционный доступ с кодовым разделением каналов с многими несущими
MCSS	Multi-carrier satellite system		Спутниковая система с многими несущими
MF-TDMA	Multifrequency TDMA		Многочастотный TDMA
MODCOD	Modulation and coding combination		Комбинация модуляции и кодирования
MPU	Multi-carrier processing unit		Блок обработки сигналов с многими несущими
MSG	Multi-carrier signal generator		Генератор сигналов с многими несущими
MSS	Mobile satellite service	ПСС	Подвижная спутниковая служба
OBO	Output back-off		Снижение мощности на выходе
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing		Ортогональное частотное разделение
OFDMA	Orthogonal frequency-division multiplexing – frequency-division multiple access		Ортогональное частотное разделение – многостанционный доступ с частотным разделением
PAPR	Peak to average power ratio		Отношение пиковой к средней мощности

PER	Packet error rate		Коэффициент ошибок на пакет
PSK	Phase shift keying		Фазовая манипуляция
QAM	Quadrature amplitude modulation		Квадратурная амплитудная модуляция
QPSK	Quadrature phase shift keying		Квадратурная фазовая манипуляция
RF	Radio-frequency	РЧ	Радиочастота
SCSS	Single-carrier satellite system		Спутниковая система с одной несущей
TD	Total degradation		Общее ухудшение
TWTA	Travelling wave tube amplifier		Усилитель на лампе бегущей волны
U/C	Up-converter		Повышающий преобразователь
UW	Unique word		Специальное слово
VSA	Vector signal analyser		Векторный анализатор сигналов
VSG	Vector signal generator		Векторный генератор сигналов
