

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R S.1521-1
(01/2010)

**Допустимые показатели качества по ошибкам
для гипотетического эталонного цифрового
тракта, основанного на синхронной
цифровой иерархии**

Серия S
Фиксированная спутниковая служба



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/publications/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, 2010 г.

© ITU 2010

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.1521-1

Допустимые показатели качества по ошибкам для гипотетического эталонного цифрового тракта, основанного на синхронной цифровой иерархии

(2001-2010)

Сфера применения

Фиксированная спутниковая служба (ФСС) играет важную роль в обеспечении надежной международной цифровой связи. Из-за ее интегрирования с наземными средствами связи спутниковая сеть должна быть разработана таким образом, чтобы соответствовать требованиям, которые совместимы с требованиями наземных систем. В Рекомендации МСЭ-T G.828 определены параметры и нормы качества для синхронных международных трактов, предназначенных для передачи трафика синхронной цифровой иерархии (СЦИ) и асинхронного режима передачи (АТМ). В настоящей Рекомендации приводятся составленные в связи с этими нормами руководящие указания по проектным маскам для вероятности ошибок по битам (ВОБ) или коэффициента ошибок по битам (КОБ), которые могут полностью соответствовать требованиям, содержащимся в Рекомендации МСЭ-T G.828.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что спутники, работающие в фиксированной спутниковой службе (ФСС), играют важную роль в обеспечении надежной международной цифровой связи;
- b) что показатели качества спутниковой линии должны быть достаточными для обеспечения соответствия с общими сквозными нормами качества и, в свою очередь, с нормами качества услуг, установленными конечными пользователями;
- c) что показатели качества спутниковой линии, как правило, не зависят от ее протяженности;
- d) что в Рекомендации МСЭ-R S.1062 определены нормы качества спутниковой линии, которые соответствуют нормам, указанным в Рекомендации МСЭ-T G.826;
- e) что показатели качества по ошибкам для международных синхронных цифровых трактов с постоянной скоростью передачи, предназначенные для передачи трафика АТМ, определенные в Рекомендации МСЭ-T I.356, указаны в Рекомендации МСЭ-T G.828;
- f) что в Рекомендации МСЭ-R S.1429 определены допустимые отклонения показателей качества по ошибкам из-за помех между различными спутниковыми системами;
- g) что в Рекомендации МСЭ-R S.1323 указано, как следует рассчитывать эксплуатационный запас на замирания и на меняющиеся во времени помехи;
- h) что при определении критериев показателей качества по ошибкам необходимо принимать во внимание все предвидимые механизмы возникновения ошибок, особенно меняющиеся во времени условия распространения и помехи;
- j) что спутниковые системы могут быть разработаны так, чтобы удовлетворялся широкий диапазон требований к показателям качества,

рекомендует,

1 что спутниковые линии в сетях связи общего пользования, предназначенные для передачи трафика СЦИ и АТМ, следует разрабатывать так, чтобы они, по крайней мере, удовлетворяли техническим характеристикам, указанным в данной Рекомендации, которые основаны на Рекомендации МСЭ-T G.828 (смотрите Приложение 1);

2 что для получения необходимых проектных масок вероятности ошибок по битам (ВОБ) должна использоваться методика, описанная в Приложении 2, (см. Примечание 2). Для полного соответствия Рекомендации МСЭ-T G.828, величина ВОБ, поделенная на среднее число ошибок в пакете (ВОБ/ α , см. п. 3 Дополнения 2) на выходе любого окончания двустороннего гипотетического эталонного цифрового тракта (HRDP) в течение всего времени, включая наихудший месяц, не должна превышать проектных масок, определенных в таблице 1, а также масок ВОБ, показанных на рисунке 3 Приложения 2;

ТАБЛИЦА 1

Скорость передачи (кбит/с)	Процент от общего времени (наихудшего месяца)	ВОБ/ α
1 664	0,2	1×10^{-9}
	2,0	1×10^{-9}
	10,0	1×10^{-9}
2 240	0,2	1×10^{-9}
	2,0	1×10^{-9}
	10,0	1×10^{-9}
6 848	0,2	1×10^{-9}
	2,0	7×10^{-10}
	10,0	6×10^{-10}
48 960	0,2	1×10^{-9}
	2,0	2×10^{-10}
	10,0	1×10^{-10}
150 336	0,2	1×10^{-9}
	2,0	2×10^{-10}
	10,0	9×10^{-11}
601 334	0,2	Требуется определить
	2,0	Требуется определить
	10,0	Требуется определить

3 что следующие Примечания являются неотъемлемой частью этой Рекомендации:

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – HRDP, о котором идет речь, определен в Рекомендации МСЭ-R S.521.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Значения ВОБ, приведенные в таблице 1, можно было бы оценить при помощи измерений КОБ в течение достаточно длительного периода времени. Метод измерения КОБ как функции от процента времени описан в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R S.1062.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Для облегчения применения настоящей Рекомендации нормативные значения, приведенные в таблице 1, показаны в единицах общего времени и представляют собой пределы показателей качества модели ВОБ, в которой используется метод, изложенный в Приложении 2. При определении цифр, показанных в таблице 1, ошибки, возникающие во время недоступности, были исключены из расчетов. Значения ВОБ, приведенные в таблице 1, не единственные нормы, удовлетворяющие требованиям Рекомендации МСЭ-T G.828. При необходимости могут использоваться другие маски ВОБ, при условии, что они удовлетворяют требованиям Рекомендации МСЭ-T G.828.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Настоящая Рекомендация применима, в основном, для спутниковых систем, работающих в полосах частот ниже 15 ГГц. Распространение этих данных на системы, работающие на более высоких частотах, является предметом дальнейшего изучения.

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – В качестве порога недоступности используется значение ВОБ = 1×10^{-8} .

ПРИМЕЧАНИЕ 6. – Приведенные в таблице 1 нормы указаны в процентах времени наихудшего месяца. Эти проценты времени месяца соответствуют следующим процентам времени года:

- 10% наихудшего месяца 4,0% года;
- 2% наихудшего месяца 0,6% года;
- 0,2% наихудшего месяца 0,04% года.

ПРИМЕЧАНИЕ 7. – Для того, чтобы обеспечить соответствие с таблицей 1 в полосах частот выше 10 ГГц (смотрите также Примечание 4), может быть предпочтительно применять меры борьбы с замираниями, в том числе адаптивное кодирование с прямым исправлением ошибок (FEC), регулирование мощности или пространственное разнесение. Информация о работе в режиме пространственного разнесения приводится в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R S.1061.

ПРИМЕЧАНИЕ 8. – Предпочтительным методом проверки качества цифровых спутниковых систем является метод, основанный на измерениях в процессе эксплуатации. В этих измерениях использовались бы схемы обнаружения ошибок в блоке, которые связаны с размером самого блока СЦИ и структурой системы передачи. FEC, скремблирование и дифференциальное кодирование воздействуют на толкование результатов измерений (смотрите Приложение 2, п. 3).

ПРИМЕЧАНИЕ 9. – Показатели качества по ошибкам, описанные в таблице 1, были разработаны на основе использования HRDP на международном участке линии связи, например, на участке от одной коммутируемой оконечной международной станции до другой. Возможны и другие варианты использования HRDP в пределах линии связи, например, от одной оконечной станции до другой, и нормы показателей качества по ошибкам можно соответствующим образом изменить.

ПРИМЕЧАНИЕ 10. – Методы, описанные в настоящей Рекомендации, могут использоваться при разработке спутниковых линий в частных сетях.

ПРИМЕЧАНИЕ 11. – Нормы по показателям качества должны выполняться для требуемой скорости передачи, и не обязательно для более высоких скоростей, обеспечивающих поддержку мультиплексирования или исправления ошибок. Например, если скорость передачи по спутниковой линии составляет 6 Мбит/с, а требуемая скорость передачи между оконечными пунктами составляет 2 Мбит/с, то следует применять нормы для скорости передачи 2 Мбит/с.

Приложение 1

1 Общие положения

В Рекомендации МСЭ-T G.828 определены параметры и нормы показателей качества по ошибкам для международных синхронных цифровых трактов, которые предназначены для передачи трафика СЦИ и АТМ. В этой Рекомендации утверждаются определенные в ней параметры и нормы. Содержащиеся в Рекомендации МСЭ-T G.828 нормы определены независимо от физической сети, поддерживающей тракт.

Измерение коэффициентов ошибок во время передачи на уровне СЦИ поддерживается кодами четности перемежаемых битов (ВР), передаваемых в заголовках контейнера СЦИ.

1.1 Определения

Для удобства здесь повторены определения, приведенные в Рекомендации МСЭ-T G.828.

Измерения показателей качества по ошибкам основаны на блоках, размеры которых соизмеримы со структурой кадра СЦИ и меняются в зависимости от скорости передачи, смотрите таблицу 2.

1.1.1 Блок

Блок – это набор последовательных битов, связанных с трактом; каждый бит принадлежит одному и только одному блоку. Последовательные биты могут не следовать непрерывно во времени.

1.1.2 События ошибки

- *Блок с ошибкой (EB)*: Блок, в котором один или несколько битов содержат ошибки.
- *Секунда с ошибкой (ES)*: Период времени длительностью в 1 секунду, в котором имеется один или несколько EB или, как минимум, один дефект. Дефекты и связанные с ними критерии качества перечислены в Приложении к Рекомендации МСЭ-T G.828.
- *Секунда, пораженная ошибками (SES)*: Период времени длительностью 1 секунду, который содержит $\geq 30\%$ EB или, по крайней мере, один дефект. SES – это подмножество ES. Для упрощения измерений для определения SES используется дефект, а не определение SES непосредственно в единицах значительных ошибок по битам. Однако, следует признать, что могут существовать шаблоны ошибок, которые не приводят к появлению дефекта. Полевые испытания определяют, имеются ли заметные проблемы при измерении ошибок.
- *Фоновая ошибка по битам (BBE)*: EB, возникающий за пределами SES.
- *Период, пораженный ошибками (SEP)*: Последовательность от 3 до 9 последовательных SES. Период завершается секундой, которая не является SES. Следовательно событие SEP – это тоже самое, что им событие последовательных SES (CSES), определенное в Рекомендации МСЭ-T G.784, с меньшим порогом, установленным в значение 3 с.

В таблице 2 приведены соотношения между размерами блоков, скоростями передачи, кодом обнаружения ошибок (EDC) и типами трактов.

ТАБЛИЦА 2

Размеры блоков в зависимости от скоростей передачи

Скорость передачи (кбит/с)	Тип тракта	Размер блока СЦИ, использованный в Рекомендации МСЭ-T G.828 (биты)	EDC
1 664	VC-11, TC-11	832	BIP-2
2 240	VC-12, TC-12	1 120	BIP-2
6 848	VC-2, TC-2	3 424	BIP-2
48 960	VC-3, TC-3	6 120	BIP-8
150 336	VC-4, TC-4	18 792	BIP-8
601 344	VC-4-4с, TC-4-4с	75 168	BIP-8
2 405 376	VC-4-16с, TC-4-16с	300 672	BIP-8
9 621 504	VC-4-64с, TC-4-64с	1 202 688	BIP-8

1.1.3 Параметры показателей качества по ошибкам

Показатели качества по ошибкам следует оценивать только тогда, когда тракт находится в состоянии доступности. Определение критериев входа/выхода в/из состояния недоступности дано в Приложении А к Рекомендации МСЭ-T G.828.

- *Коэффициент секунд с ошибками (ESR)*: Отношение числа ES к общему числу секунд во время доступности в течение фиксированного интервала измерений.
- *Коэффициент секунд, пораженных ошибками (SESR)*: Отношение числа SES к общему числу секунд во время доступности в течение фиксированного интервала измерений.

- *Коэффициент фоновых ошибок по блокам (BBER)*: Отношение числа EB к общему числу блоков в течение фиксированного интервала измерений, за исключением всех блоков во время SES и во время недоступности.
- *Интенсивность периода, пораженного ошибками (SEPI)*: Количество событий SEP во время доступности, поделенное на общее время доступности в секундах. Следовательно, параметр SEPI выражается в единицах 1/с.

1.1.4 Измерения на основе блоков

Каждый блок контролируется при помощи сигнала VIP EDC, передаваемого в заголовке СЦИ. Когда обнаруживается состояние ошибки, невозможно определить, имеется ли ошибка в блоке или в его контрольных битах EDC. Следовательно, если имеется расхождение между EDC и контрольным блоком, всегда следует предполагать, что в блоке ошибка.

2 Нормы показателей качества по ошибкам

2.1 Сквозные нормы

В таблице 3 определены сквозные нормы для гипотетического эталонного тракта (HRP) протяженностью 27 500 км. Нормы, применимые к реальным трактам, получены из таблицы 3 с использованием принципов распределения, подробно описанных в п. 6.2 Рекомендации МСЭ-T G.828. Каждое направление тракта должно независимо удовлетворять указанным требованиям для всех параметров. Нормы – это долгосрочные нормы, которые должны выполняться на протяжении периода оценки, равном обычно 30 последовательным суткам.

ТАБЛИЦА 3

Нормы по сквозным показателям качества для международного цифрового HRP из Рекомендации МСЭ-T G.828

Скорость (кбит/с)	Тип тракта	Блок/с	ESR	SESR	BBER ⁽¹⁾	SEPI ⁽²⁾
1 664	VC-11, TC-11	2 000	0,01	0,002	5×10^{-5}	0,0002/с
2 240	VC-12, TC-12	2 000	0,01	0,002	5×10^{-5}	0,0002/с
6 848	VC-2, TC-2	2 000	0,01	0,002	5×10^{-5}	0,0002/с
48 960	VC-3, TC-3	8 000	0,02	0,002	5×10^{-5}	0,0002/с
150 336	VC-4, TC-4	8 000	0,04	0,002	1×10^{-4}	0,0002/с
601 344	VC-4-4с, TC-4-4с	8 000	⁽³⁾	0,002	1×10^{-4}	0,0002/с

⁽¹⁾ Эта норма BBER соответствует эквивалентному КОБ = $8,3 \times 10^{-10}$, улучшение относительно КОБ = $5,3 \times 10^{-9}$ для скорости VC-4. Эквивалентный КОБ важен как независимая от скорости оценка показателей качества по ошибкам, так как нормы BBER не могут оставаться постоянными при увеличении размера блока.

⁽²⁾ Предварительное значение. Требуется дальнейшее исследование.

⁽³⁾ Нормы ESR, как правило, теряют свое значение при высоких скоростях передачи и поэтому не указываются для трактов, действующих со скоростью более 160 Мбит/с. Однако значительное увеличение ESR говорит о деградации системы. Следовательно, для целей обслуживания следует ввести контроль ES.

Синхронные цифровые тракты, действующие при скоростях передачи, охватываемых настоящей Рекомендацией, могут передаваться системами передачи, действующими на более высоких скоростях передачи. Такие системы должны удовлетворять сквозным. Например, в СЦИ по участку STM-1 может передаваться тракт VC-4 и, следовательно, участок STM-1 должен быть разработан так, чтобы он соответствовал нормам для тракта VC-4.

Нормы распределяются между международными и национальными участками тракта. В приведенном выше примере, если участок STM-1 не образует завершенного национального или международного участка, соответствующее национальное/международное распределение должно быть поделено для определения приемлемого распределения для цифрового участка. Это выходит за рамки этой Рекомендации.

2.2 Распределение сквозных норм

Ожидаемые уровни качественных показателей делятся между международными и национальными участками HRP.

Дальнейшее деление этих норм выходит за рамки этой Рекомендации.

2.2.1 Распределение для национального участка

Каждому национальному участку распределяется фиксированная величина допуска 17,5% сквозной нормы плюс распределение, зависящее от его длины.

В том случае, когда национальный участок содержит спутниковый пролет, такому национальному участку распределяется 42% от сквозных норм, показанных в таблице 3. Это распределение величиной 42% полностью заменяет и распределение, зависящее от длины, и распределение для блока 17,5%.

2.2.2 Распределение для международного участка

Вне зависимости от охватываемого расстояния, любому спутниковому пролету на международном участке распределяется 35% от норм, указанных в таблице 3. Этот допуск 35% полностью заменяет и распределение, зависящее от длины, и распределение для блока, выделенное для участков международного участка, захватываемых спутниковым пролетом.

3 Нормы на показатели качества для спутникового HRDP

ТАБЛИЦА 4

Нормы на показатели качества для спутникового HRDP для международной линии СЦИ

Скорость (кбит/с)	1 664 (VC-11)	2 240 (VC-12)	6 848 (VC-2)	48 960 (VC-3)	150 336 (VC-4)	601 334 (VC-4-4c)
ESR	0,0035	0,0035	0,0035	0,007	0,014	⁽¹⁾
SESR	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
BBER	$1,75 \times 10^{-5}$	$1,75 \times 10^{-5}$	$1,75 \times 10^{-5}$	$1,75 \times 10^{-5}$	$0,35 \times 10^{-4}$	$0,35 \times 10^{-4}$

⁽¹⁾ Из-за отсутствия данных о качественных показателях трактов, работающих на скоростях выше 160 Мбит/с, на настоящий момент нет рекомендованных норм на ESR. Тем не менее, в любой системе, работающей с такими скоростями, обработка ESR должна быть реализована для целей обслуживания и контроля.

Приложение 2

Расчет маски ВОБ

1 Введение

Параметры и нормы, определенные в Рекомендации МСЭ-T G.828, не могут использоваться непосредственно для разработки спутниковой системы передачи. Их требуется преобразовать в зависимость ВОБ от распределения процентов времени, называемую также маской ВОБ, таким образом, чтобы любая цифровая передающая систем, разработанная с учетом соответствия этой маске, отвечала также нормам данной Рекомендации. Однако, это преобразование не приводит к получению единственной маски.

В этом Приложении объясняется методология создания маски ВОБ.

2 Вероятность основных событий

Хорошо известно, что ошибки передачи по спутниковым линиям происходят в пакетах, когда среднее количество ошибок на пакет зависит, среди других факторов, от скремблера и кода FEC. Следовательно, для успешного моделирования цифрового качества передачи по спутниковым линиям необходимо учитывать такой пакетный характер ошибок.

Одной из статистических моделей, которая позволяет адекватным образом представить случайное возникновение пакетов, является непрерывное распределение Неймана типа А, когда вероятность появления k ошибок в N битах, $P(k)$, равна:

$$P(k) = \frac{\alpha^k}{k!} e^{-\frac{BEP \cdot N}{\alpha}} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{j^k}{j!} \left(\frac{BEP \cdot N}{\alpha} \right)^j e^{-j\alpha}, \quad (1)$$

где:

- α : среднее количество битов с ошибками в пакете ошибок,
- BEP : вероятность ошибок по битам.

Если $N = N_B$ принимается равным количеству битов в блоке данных, то вероятность нуля ошибок в блоке равна:

$$P(0) = e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} \sum_{j=0}^{\infty} \left[\left(\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha} \right)^j / j! \right] e^{-j\alpha} \cong e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} \quad (2)$$

для всех практических значений α .

Тогда вероятность появления блока с ошибками P_{EB} вычисляется следующим образом:

$$P_{EB} = 1 - P(0) = 1 - e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} = 1 - e^{-N_B \cdot BEP_{CRC}(t)}, \quad (3)$$

где $BEP_{CRC}(t) = BEP/\alpha$, а BEP_{CRC} явно показана, как функция от времени. Тогда вероятность появления ES $P_{ES}(t)$ может быть выражена в виде:

$$P_{ES}(t) = 1 - e^{-n \cdot P_{EB}(t)}, \quad (4)$$

где n число блоков в секунду.

Отсюда вероятность появления k блоков с ошибками в общем числе n блоков $P_{n,k}$ вычисляется как:

$$P_{n,k}(t) = \frac{n!}{(n-k)! k!} (1 - P_{EB}(t))^{n-k} P_{EB}^k(t), \quad (5)$$

тогда вероятность SES P_{SES} равна:

$$P_{SES}(t) = \sum_{k=0.3n}^n P_{n,k}(t) = 1 - \sum_{k=0}^{0.3n-1} P_{n,k}(t) = 1 - \sum_{k=0}^{0.3n-1} \frac{n!}{(n-k)! k!} (1 - P_{EB}(t))^{n-k} P_{EB}^k(t). \quad (6)$$

2.1 Генерирование масок

Предполагая, что общая форма маски имеет вид, показанный на рисунке 1, и используя формулу для вероятности, величина ESR, определяемая как общее число ES, т. е. секунд с одним или несколькими блоками с ошибками, разделенное на общее число доступных секунд, T_a определяется следующим образом:

$$ESR = \frac{\int_{T_a} P_{ES}(t)}{T_a}. \quad (7)$$

Аналогично, SESR определяется следующим образом:

$$SESR = \frac{\int_{T_a} P_{SES}(t)}{T_a}. \quad (8)$$

Если предположить, что $P_{ES}(t)$ и $P_{SES}(t)$ являются кусочно-постоянными во времени, то ESR и SESR можно выразить в виде:

$$ESR = \sum_{i=1}^M P_{ES_i} \cdot \Delta t_i \quad (9)$$

и

$$SESR = \sum_{i=1}^M P_{SES_i} \cdot \Delta t_i, \quad (10)$$

где M – общее количество временных интервалов $P_{ES_i}(t)$, и $P_{SES_i}(t)$ – вероятность появления ES и SES, соответственно, в i -том временном интервале, поделенная на T_a .

ВВЕР определяется как отношение числа EB ко всем блокам, передаваемым во время доступных секунд, за исключением всех блоков, передаваемых во время SES. Следовательно:

$$BBER = \frac{\int_{T_a} \left(\sum_{k=1}^{0.3n} P_{n,k}(t) \cdot k \right) dt}{n \cdot \left(T_a - \int_{T_a} P_{SES}(t) \cdot dt \right)} = \frac{\sum_{k=1}^{0.3n} \left(\frac{1}{T_a} \int_{T_a} P_{n,k}(t) \cdot dt \right) \cdot k}{n \cdot (1 - SESR)}. \quad (11)$$

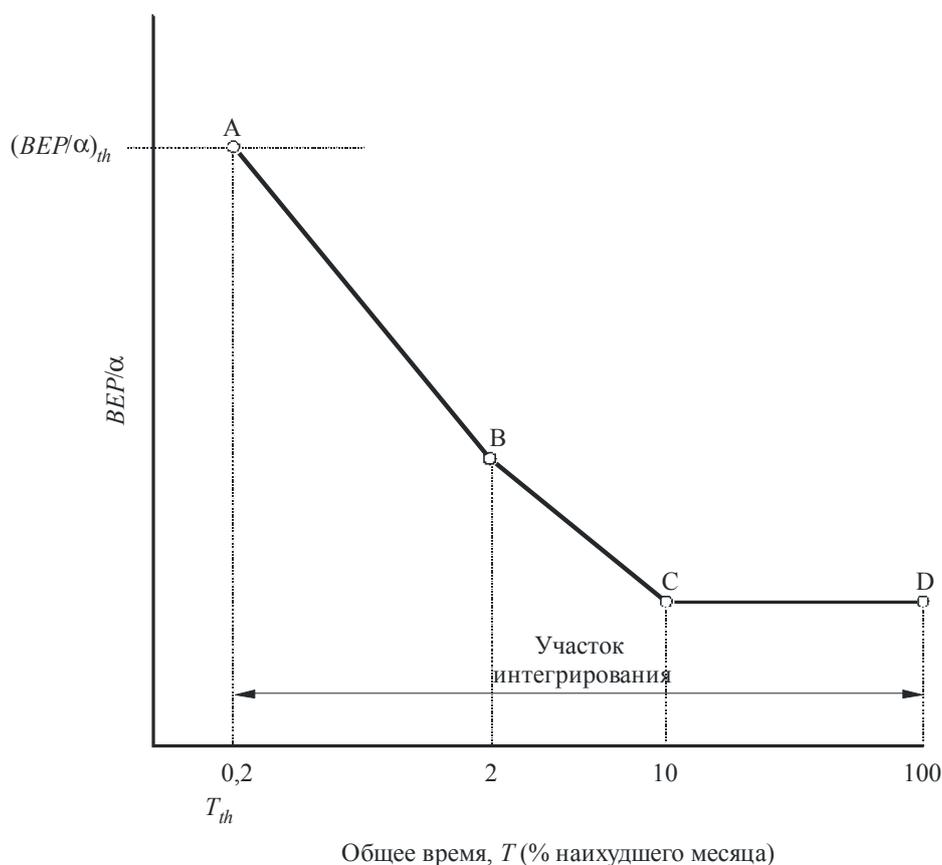
Если установлено, что $\overline{P_{n,k}} = \frac{\int_{T_a} P_{n,k} \cdot dt}{T_a}$, то ВВЕР можно выразить в виде:

$$BBER = \frac{\sum_{k=1}^{0.3n} \overline{P_{n,k}} \cdot k}{n \cdot (1 - SESR)}. \quad (12)$$

Однако, при выборе значения BER_{th}/α для генерирования масок, необходимо учитывать интерпретации возникновения некорректного указателя (PI), который критичен для корректной работы каналов СЦИ. Измерения показывают, что PI значительно увеличивается на значении ВОБ и за ее пределами, примерно 1×10^{-7} , что намного меньше, чем при потере синхронизации спутникового модема. В этой связи потребуются дальнейшие исследования для определения порога ВОБ для PI, который обозначается как BER_{PI} , при этом спутниковый канал СЦИ становится недоступным, так как эта величина является ограничивающим фактором. Для целей этой Рекомендации используется значение BER_{th}/α (равное BER_{PI}/α) = 1×10^{-9} .

РИСУНОК 1

Общая форма маски



1521-01

Этот метод приведет к получению бесконечного множества масок, соответствующих нормам по показателям качества, приведенным в Рекомендации МСЭ-T G.828. Следовательно, для уточнения маски и определения точек s В, С и D маски используется следующая процедура (см. рисунок 2):

Этап 1: Установить значение $BER_{th}/\alpha = 1 \times 10^{-9}$.

Этап 2: Установить значение порога времени недоступности T_{th} , ($T_{th} = 0,2\%$), так чтобы точка А соответствовала значению BER_{th}/α .

Этап 3: Установить значения маски для 2%, 10% и 100% времени (точки В, С и D).

Этап 4: Рассчитать ESR, SESR и BBER путем интегрирования по участку между T_{th} (0,2%) и 100%. При создании этих масок предполагается, что спутниковая линия недоступна при значениях ВОБ выше BER_{th}/α .

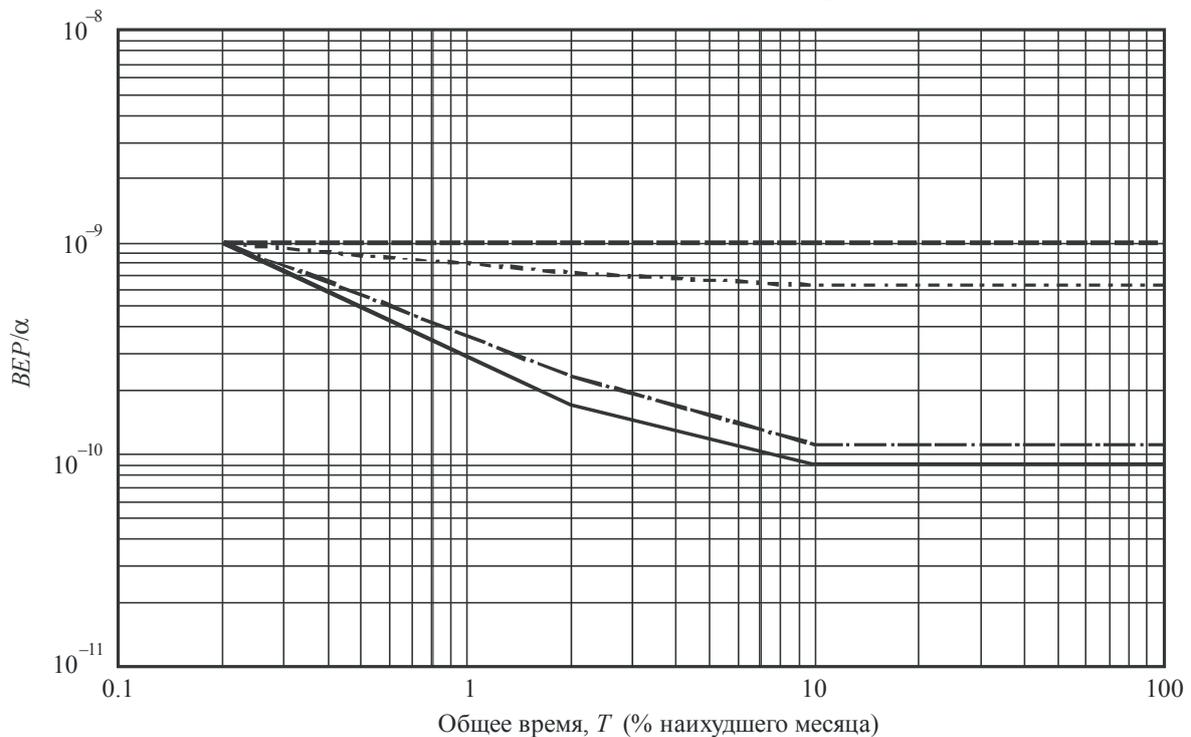
Этап 5: Повторять этапы 3 и 4 до тех пор, пока все параметры (ESR, SESR и BBER) не будут соответствовать нормам из таблицы 3.

Вышеописанный процесс гарантирует, что линия будет недоступной в течение 0,2% времени.

С использованием изложенной выше процедуры с дополнительными предположениями, что $ВОБ/\alpha$, соответствующие точкам Е и F, одинаковы, был разработан примерный набор масок для различных скоростей передачи, который приводится на рисунке 2.

РИСУНОК 2

Созданные маски для спутниковых пролетов



- - - - - 1,664 и 2,24 Мбит/с - · - · - 48,96 Мбит/с
 · · · · · 6,848 Мбит/с - - - - - 150,336 Мбит/с

$\alpha = 10$

Порог времени BER = 1×10^{-8}

Доступное время от 0,002 до 1

Все модели превосходят критериям BBER

Модель для 1,664 и 2,24 Мбит/с также превосходит критериям ESR

1521-02

3 Взаимосвязь между КОБ и коэффициентом событий с ошибками

Хорошо известно, что ошибки в спутниковых линиях, использующих FEC и схемы скремблирования, имеют тенденцию к группированию. Появление групп, которые можно также назвать событиями с

ошибками, является случайным, и они распределяются по закону Пуассона. Результирующий коэффициент ошибок по блокам будет таким же, как если бы он был получен за счет возникающих случайно (распределяемых по закону Пуассона) ошибок по битам с коэффициентом ошибок по битам $K_{ОБ}$, где α , использованное в п. 2.1 для расчета степени пакетирования ошибок, – это среднее количество битов с ошибками в пределах одной группы, а также представляет собой соотношение между КОБ и коэффициентом событий с ошибками. Например, в случайном канале с двоичной ошибкой при отсутствии FEC и скремблирования считается, что α равно единице. Однако при схемах модуляции более высокого порядка α может быть больше единицы.

В конкретной схеме FEC теоретические значения α могут оцениваться с использованием распределения весовых коэффициентов, применяемого в данной схеме FEC. В пункте 3.1 объясняется, как выводится теоретическая величина. Статистические свойства групп ошибок зависят от используемой схемы FEC/скремблера. Для определения коэффициента α использовались компьютерное моделирование и измерения для различных схем FEC (без скремблера или дифференциального кодирования). При моделировании исходят из наличия аддитивного белого Гауссова канала. Полученные результаты приводятся в пунктах 3.2–3.6.

3.1 Расчет среднего количества битов с ошибками в группе

Если дан последовательный (n,k) блочный код C , то его широко известной весовой функцией для подсчета (WEF) является:

$$B^C(H) \triangleq \sum_{i=0}^n B_i H^i, \quad (13)$$

где:

B_i : (целое) число кодовых слов с весовым коэффициентом Хемминга (количество единиц) i ,

H : фиктивная переменная.

WEF кода может использоваться для расчета точного выражения для вероятности необнаруженных ошибок и верхней границы вероятности ошибок на слово.

Вводимая дополнительная весовая функция вычисления (IRWEF) кода может определяться как:

$$A^C(W,Z) \triangleq \sum_{w,j} A_{w,j} W^w Z^j, \quad (14)$$

где $A_{w,j}$ означает (целое) число кодовых слов, образованных вводимым информационным словом весового коэффициента Хемминга w , контрольный разряд четности которого имеет весовой коэффициент Хемминга j , так что общий весовой коэффициент Хемминга составляет $w+j$. IRWEF показывает отдельные вклады информации и контрольного разряда четности в общий весовой коэффициент Хемминга для кодовых слов и, таким образом, обеспечивает дополнительную информацию о профиле весового коэффициента (Хемминга) данного кода.

Используя приведенное выше выражение, можно установить верхние границы ВОБ, P_b , с помощью уравнения:

$$P_b \leq \sum_{m=d_{min}}^{\infty} D_m P(R_m'' | C_0), \quad (15)$$

где d_{min} – минимальная длина кода, $P(R_m'' | C_0)$ – вероятность выбора декодером кодового слова с весовым коэффициентом m , при условии что переданное кодовое слово содержит только нули, и:

$$D_m = \sum_{j+w=m} \frac{w}{k} A_{w,j}. \quad (16)$$

Таким образом, среднее число битов в группе α будет средним значением w , что дает:

$$\bar{w} = \sum_{m=d_{\min}}^{\infty} \sum_{m=w+j} A_{w,j} P_m, \quad (17)$$

где P_m – вероятность событий с ошибками, содержащих m ошибок во всех событиях с ошибками. Поскольку P_m быстро уменьшается с уменьшением m , особенно при невысоких значениях ВОБ, \bar{w} можно приближенно выразить уравнением:

$$\bar{w} \approx \sum_{d_{\min}=w+j} A_{w,j} P_{d_{\min}}. \quad (18)$$

3.2 Факторы для двоичных кодов БЧХ

Используя уравнение (19), можно оценить значения α для систематических кодов Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ). В таблице 8 показано распределение весовых коэффициентов кода (7,4) БЧХ, и минимальная длина кода (7,4) равна 3. Следовательно, α для кода можно подсчитать следующим образом:

$$\bar{w}_{(7,4)} = \alpha_{(7,4)} \approx 1 \times \frac{3}{7} + 2 \times \frac{3}{7} + 3 \times \frac{1}{7} \cong 1,7. \quad (19)$$

ТАБЛИЦА 5

Распределение весовых коэффициентов кода (7,4) БЧХ

w	j	$A_{w,j}$
0	0	1
1	2	3
1	3	1
2	1	3
2	2	3
3	0	1
3	1	3
4	3	1

В таблице 6 показаны вычисленные значения α для различных систематических кодов БЧХ, а в таблице 10 сравниваются результаты моделирования для кода (15,11) БЧХ с вычисленными результатами. По мере уменьшения КОБ вычисленное значение аппроксимируется до моделированного значения.

Для несистематических кодов, когда декодирование не удается, ошибки будет содержать приблизительно половина информационных слов. В таком случае α может аппроксимироваться до $k/2$.

ТАБЛИЦА 6

Теоретические значения α , вычисленные для различных кодов БЧХ

(n,k) код БЧХ	α	(n,k) расширенный код	α	(n,k) суженный код	α
(15,11)	2,20	(16,11)	2,75	(15,10)	2,67
(31,26)	2,52	(32,26)	3,25	(31,25)	3,23
(31,21)	3,73	(32,21)	4,56	(31,20)	4,53
(63,57)	2,06	(64,57)	2,96	(63,56)	2,96
(63,51)	4,07	(64,51)	4,50		

ТАБЛИЦА 7

Сравнение теоретических и моделированных значений α для (15,11) кода БЧХ

КОБ	Моделированное значение α	Теоретическое значение α
$2,88 \times 10^{-2}$	2,60	2,2
$4,69 \times 10^{-3}$	2,37	
$5,57 \times 10^{-4}$	2,36	
$2,36 \times 10^{-5}$	2,33	

3.3 Коэффициенты для сверточных кодов

Аналогичный подход может применяться к сверточным кодам. Для известных сверточных кодов в ходе различных исследований были определены распределение их весовых коэффициентов в переводе на a_d , число кодовых слов длиной d , и c_d – сумма ошибок по битам (весовой коэффициент информационной ошибки) для кодовых слов длиной d . При такой же аппроксимации до двоичных кодов БЧХ \bar{w} ($= \alpha$) для сверточных кодов может быть аппроксимирована до $(c_{d_f})/(a_{d_f})$, где d_f – свободное значение длины кода.

В таблице 8 показано распределение весовых коэффициентов широко известных сверточных кодов, а в таблице 9 сравниваются теоретические расчетные величины α и моделированные величины. Как было подтверждено в случае двоичных кодов БЧХ, в низких диапазонах значений КОБ расчетные значения α примерно равны моделированным значениям.

ТАБЛИЦА 8

Распределение весовых коэффициентов сверточных кодов

Кодовая скорость R	Длина кодового ограничения K	Генератор (в восьмеричной системе)	d_f	$(a_d, d = d_f, d = d_f + 1, d = d_f + 2, \dots)$ $(c_d, d = d_f, d = d_f + 1, d = d_f + 2, \dots)$
1/2	7	133, 171	10	(11, 0, 38, 0, 193, 0, 1 331, 0, 7 275, ...) (36, 0, 211, 0, 1 404, 0, 11 633, ...)
	9	561, 753	12	(11, 0, 50, 0, 286, 0, 1 630, 0, 9 639, ...) (33, 0, 281, 0, 2 179, 0, 15 035, ...)
2/3 ⁽¹⁾	7	133, 171	6	(1, 16, 48, 158, 642, 2 435, 9 174 ...) (3, 70, 285, 1 276, 6 160, 27 128, ...)
7/8 ⁽¹⁾	7	133, 171	3	(2, 42, 468, 4 939, 52 821 ...) (14, 389, 6 792, 97 243, 1 317 944 ...)

⁽¹⁾ Показанные точками коды взяты из кода R 1/2 с $K = 7$.

3.4 Коэффициенты для каскадных кодов

Для каскадного кода с внешним кодом Рида-Соломона (РС) и сверточным внутренним кодом значение α непосредственно зависит от распределения весовых коэффициентов в коде РС, поскольку он является внешним кодом. Значение α для кодов РС можно определить с использованием того же правила, которое применялось в двоичном коде БЧХ, если используется декодирование по методу

максимального правдоподобия. В таком случае следует найти распределение двоичных весовых коэффициентов кодов РС.

ТАБЛИЦА 9

Сравнение теоретических и моделированных значений α для сверточных кодов

Кодовая скорость R	Ограничение длины кода K	Генератор (в восьмеричной системе)	d_f	α (расчетная величина)	КОБ	α (моделированная величина)
1/2	7	133, 171	10	3,27	$1,74 \times 10^{-2}$	7,21
					$1,91 \times 10^{-3}$	5,68
					$1,05 \times 10^{-4}$	3,74
					$5,05 \times 10^{-6}$	3,48
					$1,07 \times 10^{-7}$	3,00
	9	561, 753	12	3,00	$1,22 \times 10^{-2}$	13,00
					$1,77 \times 10^{-3}$	11,56
					$2,10 \times 10^{-5}$	4,38
					$4,20 \times 10^{-7}$	3,96
	2/3	7	133, 171	6	3,00	$3,61 \times 10^{-2}$
$7,86 \times 10^{-4}$						7,14
$2,96 \times 10^{-6}$						5,32
$2,14 \times 10^{-7}$						5,67
7/8	7	133, 171	3	7,00	$6,24 \times 10^{-2}$	9,08
					$2,68 \times 10^{-2}$	8,85
					$9,82 \times 10^{-3}$	7,77
					$1,77 \times 10^{-5}$	7,57
					$1,49 \times 10^{-6}$	7,29

В таблице 10 показаны моделированные значения для кодов РС в схеме каскадного кодирования, приведенные в Рекомендациях МСЭ-R ВО.1724 и МСЭ-R S.1709. Используется код РС (204,188), длина которого меньше, чем у исходного кода РС (255,239). Кроме того, для других размеров пакетов используется код (71,55).

ТАБЛИЦА 10

Моделированные величины α для кодов РС в схеме каскадного кодирования

Код РС (n,k)	КОБ	α	Код РС (n,k)	КОБ	α
(204,188)	$7,74 \times 10^{-3}$	12,80	(71,55)	$6,17 \times 10^{-3}$	8,47
	$5,19 \times 10^{-4}$	9,14		$2,03 \times 10^{-4}$	7,74
	$1,02 \times 10^{-6}$	8,58		$2,02 \times 10^{-7}$	7,32

3.5 Коэффициенты для турбокодов

Для турбокодов может использоваться подход, аналогичный подходу для сверточных кодов, поскольку они основаны на сверточных кодах. В таблице 11 показано распределение весовых коэффициентов турбокодов, приведенных в Рекомендациях МСЭ-R ВО.1724 и МСЭ-R S.1709, а в таблице 12 приведены соответствующие расчетные значения α . В таблице 16 показаны

моделированные значения α для пакета размером 53 байта. Поскольку в турбокоде используется итерационный алгоритм декодирования, значения α и КОБ зависят от алгоритма декодирования и количества итераций. При моделировании использовался алгоритм декодирования max-log MAP, а значения α рассчитывались при итерациях 6 и 15. Поскольку расчетные теоретические значения, приведенные в таблице 14, можно рассматривать как нижнюю границу, их размер меньше, чем у моделированных величин, приведенных в таблице 15.

ТАБЛИЦА 11

Распределение весовых коэффициентов турбокодов ($d_f/a_d/c_d$)

Размер пакета (байты)	$R = 1/3$	$R = 1/2$	$R = 2/3$	$R = 3/4$	$R = 6/7$
53	31/106/954	18/159/954	11/159/901	7/10/50	4/9/27
	32/265/1643	19/159/1431	12/265/1325	8/85/375	5/194/719
	33/106/901	20/530/3551	13/1802/11342	9/486/2335	6/1228/5371
188	33/3476/3384	19/376/3384	12/188/1316	9/27/171	6/199/826
	35/376/3760	20/376/3008	14/752/5264	10/148/1025	7/1578/7269
	36/752/6392	22/752/6768	15/1504/12220	11/1462/9674	8/9144/49558

ТАБЛИЦА 12

Теоретические аппроксимированные величины α для турбокодов

Размер пакета (байты)	$R = 1/3$	$R = 1/2$	$R = 2/3$	$R = 3/4$	$R = 6/7$
53	9,00	6,00	5,67	5,00	3,00
	6,20	9,00	5,00	4,41	3,70
	8,50	6,70	6,29	4,80	4,37
752	9,00	9,00	7,00	6,33	4,15
	10,00	8,00	7,00	6,93	4,60
	8,50	9,00	8,13	6,62	5,42

ТАБЛИЦА 13

Моделированные значения α для турбокодов

Номер итерации	$R = 1/3$ КОБ/ α	$R = 2/5$ КОБ/ α	$R = 1/2$ КОБ/ α	$R = 3/4$ КОБ/ α	$R = 6/7$ КОБ/ α
6	$5,58 \times 10^{-5}/16,8$	$3,79 \times 10^{-5}/16,6$	$1,39 \times 10^{-4}/21,5$	$9,53 \times 10^{-4}/15,9$	$3,44 \times 10^{-5}/6,8$
	$9,28 \times 10^{-6}/14,0$	$5,56 \times 10^{-6}/12,8$	$2,24 \times 10^{-5}/17,1$	$3,47 \times 10^{-5}/11,3$	$2,34 \times 10^{-6}/5,2$
	$1,42 \times 10^{-6}/10,6$	$9,68 \times 10^{-7}/10,6$	$5,69 \times 10^{-7}/9,0$	$9,89 \times 10^{-7}/7,8$	$2,53 \times 10^{-7}/4,1$
15	$2,25 \times 10^{-5}/23,7$	$1,57 \times 10^{-5}/20,8$	$6,36 \times 10^{-5}/26,6$	$6,46 \times 10^{-4}/18,3$	$2,67 \times 10^{-5}/7,0$
	$3,28 \times 10^{-6}/16,5$	$2,41 \times 10^{-6}/14,5$	$9,30 \times 10^{-6}/18,9$	$1,89 \times 10^{-5}/12,2$	$1,74 \times 10^{-6}/4,8$
	$5,62 \times 10^{-7}/11,6$	$4,25 \times 10^{-7}/10,8$	$3,02 \times 10^{-7}/8,9$	$6,02 \times 10^{-7}/7,9$	$1,78 \times 10^{-7}/4,3$

3.6 Коэффициенты для блочных турбокодов

Блочные турбокоды (ВТС) – это произведение кодов, которые декодируются итерационно. Минимальная длина произведения кодов представляет собой произведение минимальных длин составляющих его кодов. Например, минимальная длина m -мерного произведения кодов с одним и тем же составляющим кодом с минимальной длиной d_{min} будет $(d_{min})^m$. Используя этот же принцип, значение α для ВТС $\alpha_{ВТС}$ можно представить следующим образом:

$$\alpha_{ВТС} = \alpha_{c_1} \cdot \alpha_{c_2} \cdots \alpha_{c_m}, \quad (20)$$

где α_{c_i} – значение α для i -го составляющего кода. Двухзначные систематические коды, приведенные в пункте 3.2, обычно используются как составляющие коды.

В таблице 14 приведены теоретические значения $\alpha_{ВТС}$, рассчитанные с использованием уравнения (20), в котором полагается, что ВТС включает те же составляющие коды, что и использовались ранее. Следовательно, значения α_c в таблице 14 – это те же значения, что и приведенные в таблице 6. В таблицах 15 и 16 сравниваются теоретические расчетные значения и моделированные значения для двумерных ВТС. Согласно утверждению, приведенному в пунктах 3.2 и 3.3, в нижних диапазонах значений КОБ расчетные значения приблизительно равны моделированным значениям.

ТАБЛИЦА 14

Теоретические аппроксимированные значения для блочных турбокодов

Расширенный код (n, k)	d_{min}	α_c	Двумерный $\alpha_{ВТС}$	Трехмерный $\alpha_{ВТС}$
(16,11)	4	2,75	7,56	20,80
(32,26)	4	3,25	10,56	34,33
(32,21)	6	4,56	20,79	94,82
(64,57)	4	2,96	8,76	25,93
(64,51)	6	4,50	20,25	91,13

ТАБЛИЦА 15

Сравнение теоретических и моделированных значений α для ВТС (16,11) × (16,11)

E_b/N_0 (дБ)	КОБ	$\alpha_{ВТС}$	Составляющий код	
			КОБ	α_c
1,0	$4,41 \times 10^{-2}$	14,50	$1,25 \times 10^{-1}$	2,82
2,0	$3,43 \times 10^{-3}$	10,35	$7,82 \times 10^{-2}$	2,88
2,5	$4,24 \times 10^{-4}$	7,46	$5,97 \times 10^{-2}$	2,52
3,0	$8,30 \times 10^{-5}$	7,25	$4,31 \times 10^{-2}$	2,82
3,5	$8,51 \times 10^{-6}$	7,31	$2,97 \times 10^{-2}$	2,99

ТАБЛИЦА 16

Сравнение теоретических и моделированных значений α для ВТС (32,26) \times (32,26)

E_b/N_0 (дБ)	КОБ	$\alpha_{ВТС}$	Составляющий код	
			КОБ	α_c
2,0	$4,19 \times 10^{-3}$	31,57	$5,96 \times 10^{-2}$	3,88
3,0	$7,80 \times 10^{-6}$	11,21	$3,10 \times 10^{-2}$	3,33
3,3	$2,10 \times 10^{-6}$	9,76	$2,35 \times 10^{-2}$	3,15

3.7 Результаты других измерений и их краткое изложение

В ходе лабораторных измерений цифровой передачи типа ИНТЕЛСАТ IDR (FEC $R = 3/4$ плюс скремблер) получено значение $\alpha = 10$ в диапазоне КОБ от 1×10^{-4} до 1×10^{-11} . В ходе аналогичных измерений цифровой передачи типа ИНТЕЛСАТ IBS было получено значение $\alpha = 5$ (FEC $R = 1/2$ плюс скремблер).

Из результатов измерений следует, что α – это функция от распределения весовых коэффициентов схемы FEC и ВОБ. Воздействие параметра α на модель нормы качества можно было бы оценить следующим образом.

Маски, представленные на рисунке 2, были получены с использованием значения $\alpha = 10$. Если бы, например, FEC/скремблеры не использовались ($\alpha = 1$), то модели были бы сдвинуты на десяток и требования в отношении КОБ были бы более строгими на десяток.

4 Выводы

Результаты исследований показали, что маски, необходимые для удовлетворения требований Рекомендации МСЭ-T G.828, зависят от скорости передачи.

Проектные маски зависят также от распределения ошибок, на которые, в свою очередь, воздействует применяемая схема FEC/скремблирования.

При разработке проектных масок допустимых ошибок необходимо также учитывать требования, предъявляемые к услугам.

5 Список сокращений и аббревиатур

АТМ	Asynchronous transfer mode	АТМ	Асинхронный режим передачи
ВВЕ	Background block error	ВВЕ	Фоновая ошибка по блокам
ВВЕР	Background block error ratio	ВВЕР	Коэффициент фоновых ошибок по блокам
ВОБ	Bit error probability	ВОБ	Вероятность ошибок по битам
КОБ	Bit error ratio	КОБ	Коэффициент ошибок по битам
ВИР	Bit interleaved parity	ВИР	Четность перемежения битов
ВТС	Block turbo code	ВТС	Блочный турбокод
СЭС	Consecutive severely errored second	СЭС	Последовательная секунда, пораженная ошибками
ЕВ	Errored block	ЕВ	Блок с ошибками
ЕДС	Error detection code	ЕДС	Код обнаружения ошибок
ЕС	Errored second	ЕС	Секунда с ошибкой

ESR	Errored second ratio	ESR	Коэффициент секунд с ошибками
FEC	Forward error-correction	FEC	Упреждающая коррекция ошибок
ФСС	Fixed-satellite service	ФСС	Фиксированная спутниковая служба
HRDP	Hypothetical reference digital path	HRDP	Гипотетический эталонный цифровой тракт
HRP	Hypothetical reference path	HRP	Гипотетический эталонный тракт
IPI	Incorrect pointer interpretations	IPI	Некорректные интерпретации указателя
СЦИ	Synchronous digital hierarchy	СЦИ	Синхронная цифровая иерархия
SEP	Severely errored period	SEP	Период, пораженный ошибками
SEPI	Severely errored period intensity	SEPI	Интенсивность периодов, пораженных ошибками
SES	Severely errored second	SES	Секунда, пораженная ошибками
SESR	Severely errored seconds ratio	SESR	Коэффициент секунд, пораженных ошибками
STM	Synchronous transfer module	STM	Синхронный модуль передачи
TC	Tandem connection	TC	Тандемное соединение
VC	Virtual container	VC	Виртуальный контейнер
