

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R S.2131-1
(01/2022)

Метод определения требуемых рабочих характеристик спутникового гипотетического эталонного цифрового тракта, в котором используется адаптивное кодирование и модуляция

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-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. 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-Т/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	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская 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 МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2022 г.

© ITU 2022

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.2131-1

Метод определения требуемых рабочих характеристик спутникового гипотетического эталонного цифрового тракта, в котором используется адаптивное кодирование и модуляция¹

(Вопросы МСЭ-R 275 и МСЭ-R 277-1/4)

(2019-2022)

Сфера применения

Использование адаптивного кодирования и модуляции (АСМ) позволяет поддерживать спутниковое соединение даже при ухудшении условий распространения, но за счет уменьшения пропускной способности. В настоящей Рекомендации представлен метод определения требуемых рабочих характеристик систем спутниковой связи с использованием АСМ.

Ключевые слова

Адаптивное кодирование и модуляция; требуемые рабочие характеристики; спутниковая связь

Сокращения/гlossарий

АСМ	Adaptive coding and modulation		Адаптивное кодирование и модуляция
ВВЕР	Background block error rate		Коэффициент ошибок по блокам с фоновыми ошибками
ВЕР	Bit error probability		Вероятность ошибок по битам
ВЕР	Bit error ratio		Коэффициент ошибок по битам
DVB	Digital video broadcasting		Цифровое телевизионное радиовещание
DVB-S2	Second generation digital video broadcasting via satellite		Спутниковое цифровое телевизионное радиовещание второго поколения
DVB-S2X	Extension of second generation digital video broadcasting via satellite		Расширение спутникового цифрового телевизионного радиовещания второго поколения
ЕВ	Errored block		Блок с ошибками
ЕС	Errored second		Секунда с ошибками
ETSI	European telecommunications standards institute	ETSI	Европейский институт стандартизации электросвязи
FER	Frame error rate		Коэффициент ошибок по кадрам
HRDP	Hypothetical reference digital path		Гипотетический эталонный цифровой тракт
HRX	Hypothetical reference connection		Гипотетическое эталонное соединение
MODCOD	Modulation and coding		Модуляция и кодирование

¹ Для определения эффективности дополнительных методик и рабочих характеристик требуется проведение их качественного и количественного анализа.

MPEG	Moving picture experts group	Группа экспертов по движущимся изображениям
PER	Packet error ratio	Коэффициент ошибок по пакетам
QEF	Quasi error free	Квазибезошибочный
SES	Severely errored second	Секунда со значительным количеством ошибок
TDM	Time division multiplex	Временное разделение каналов
TDMA	Time division multiple access	Многостанционный доступ с временным разделением
C/N	Carrier to noise ratio γ	Отношение несущей к шуму, γ
E_s/N_0	Symbol energy to noise spectral density ratio	Отношение энергии символа к спектральной плотности шума
η	Spectral efficiency in bit/s/Hz	Спектральная эффективность (бит/с/Гц)
ϕ_{total}	Percent degraded throughput	Ухудшение пропускной способности в процентах

Соответствующие Рекомендации и Отчеты МСЭ-R

Рекомендация МСЭ-R S.614-4	Допустимые показатели качества по ошибкам для спутникового гипотетического эталонного цифрового тракта фиксированной спутниковой службы, работающего на частотах ниже 15 ГГц и входящего в состав международного соединения цифровой сети с интеграцией служб
Рекомендация МСЭ-R S.1062-4	Допустимые показатели качества по ошибкам для спутникового гипотетического эталонного цифрового тракта, работающего в полосах частот ниже 15 ГГц
Рекомендация МСЭ-R S.1878-0	Методы передачи на основе многих несущих для спутниковых систем
Рекомендация МСЭ-R S.2099-0	Допустимые кратковременные показатели качества по ошибкам для спутникового гипотетического эталонного цифрового тракта
Report ITU-R S.2173-1	Multi-carrier based transmission techniques for satellite systems
Recommendation ITU-T G.826	End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections

Ассамблея радиосвязи МСЭ-R,

учитывая,

- a)* что применение АСМ и линеаризации усилителей мощности привело к повышению эффективности использования спутников и улучшению характеристик передачи;
- b)* что спутниковые системы, в которых используются методы АСМ, будут адаптироваться к ухудшенным условиям путем уменьшения общей пропускной способности и, следовательно, более не будут обеспечивать услуги с постоянной скоростью передачи;
- c)* что качество спутниковой линии должно быть достаточным для того, чтобы обеспечить соответствие общим сквозным требуемым рабочим характеристикам и требованиям конечного пользователя;
- d)* что при определении критериев качества по ошибкам необходимо принимать во внимание все предполагаемые механизмы возникновения ошибок, в частности меняющиеся во времени условия распространения и помехи,

отмечая,

- a)* что в Рекомендациях МСЭ-R S.614 и МСЭ-R S.1062 представлены долговременные требуемые показатели качества по ошибкам;
- b)* что в Рекомендации МСЭ-R S.2099 дано определение понятия "кратковременный" применительно к спутниковой связи и приведена информация о кратковременных требуемых показателях качества;
- c)* что в Рекомендации МСЭ-R S.1061, Рекомендации МСЭ-R S.1878 и Отчете МСЭ-R S.2173 представлена информация о методах адаптивной передачи и адаптивного управления мощностью сигнала, которые возможно использовать для борьбы с изменяющимися во времени затуханиями;
- d)* что ухудшение работы спутниковой линии возникает в результате ухудшения условий распространения, которое может быть описано с использованием моделей, приведенных в Рекомендациях МСЭ-R P.618-13 и МСЭ-R P.1623-1, и эти Рекомендации, касающиеся распространения, применимы вплоть до частоты 51,4 ГГц,

рекомендует

- 1** проектировать спутниковые системы, в которых используется АСМ, таким образом, чтобы они соответствовали требуемым рабочим характеристикам, определяемым либо коэффициентом ошибок по пакетам (PER), либо спектральной эффективностью (бит/с/Гц) как функции C/N ;
- 2** считать следующие Примечания частью настоящей Рекомендации.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В случае использования PER следует применять значения, приведенные в таблице 3 пункта 2.2 Приложения.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В случае использования требуемых рабочих характеристик, заданных как спектральная эффективность, предполагается, что спектральная эффективность, измеренная при рабочем значении γ в дБ, составляет не менее $\eta(\gamma - 1,0)$, где γ – отношение несущей к шуму (C/N) в дБ, а $\eta(\gamma)$ – спектральная эффективность (бит/с/Гц) как функция γ , согласно определению в пункте 2.3 Приложения.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Предполагалось, что при изменении состояния модуляции и кодирования (MODCOD) система способна выдерживать уменьшение отношения C/N на 1 дБ в течение интервала времени длительностью 1 с. Это соответствует снижению спектральной эффективности (пропускной способности или емкости) в нелинейной спутниковой линии примерно на 10%. Такое уменьшение отношения C/N может быть связано с любым источником внешнего шума и замиранием в дожде.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Следует отметить, что усреднение по времени пропускной способности за любой год не дает достаточной информации о рабочих характеристиках линии в течение определенной процентной доли времени этого года. Можно установить дополнительные требования к общим рабочим характеристикам в части пропускной способности/ спектральной эффективности для определенных процентных долей времени года. Такой потенциальный показатель необходимо учитывать при общей оценке рабочих характеристик линии с АСМ, и могут потребоваться дополнительные исследования в отношении вышеупомянутых процентных долей.

Приложение

Пример метода определения требуемых рабочих характеристик спутникового гипотетического эталонного цифрового тракта, в котором используется адаптивное кодирование и модуляция

1 Базовая информация

Существующие Рекомендации, касающиеся показателей качества по ошибкам и готовности, разработаны с учетом ухудшений работы спутниковой линии, возникающих в результате ухудшения условий распространения, которые возможно описать с использованием моделей, приведенных в Рекомендациях МСЭ-R P.618-13 и МСЭ-R P.1623-1. Исследования, проведенные 3-й Исследовательской комиссией, показали, что эти Рекомендации, касающиеся распространения, применимы вплоть до частоты 51,4 ГГц, но не существует Рекомендаций для наклонных трасс с использованием частот выше 52 ГГц. В свете этой информации существующие Рекомендации, касающиеся показателей качества по ошибкам и готовности, применимы в отношении гипотетических эталонных цифровых трактов (HRDP), работающих на частотах вплоть до 52 ГГц.

Разработка и внедрение производителями спутникового оборудования и операторами спутниковой связи методов адаптивного кодирования и модуляции (АСМ) и линеаризации усилителей мощности привели к повышению эффективности использования спутников и улучшению характеристик передачи. Применение АСМ обеспечивает поддержку спутникового HRDP даже при ухудшении условий распространения сигнала, но за счет снижения пропускной способности. Использование методов АСМ в спутниковых системах передачи рассматривается в Отчете МСЭ-R S.2173 и в пункте 2 Приложения 1 к Рекомендации МСЭ-R S.2099.

1.1 Требуемые рабочие характеристики HRDP, обеспечивающих постоянную скорость передачи

В Рекомендации МСЭ-R S.1062 приведены требуемые рабочие характеристики спутниковых HRDP, обеспечивающих услуги с постоянной скоростью передачи. Эти соединения служили в основном для передачи спутникового трафика в начале 1990-х годов, до распространения волоконно-оптических и подводных кабелей. В основе Рекомендации МСЭ-R S.1062 лежат требования, приведенные в Рекомендации МСЭ-T G.826. Эти требования описаны не в форме отдельных битов с ошибками, но в форме блоков с ошибками. В Рекомендации МСЭ-T G.826 определены требуемые рабочие характеристики в форме коэффициента ошибок по блокам с фоновыми ошибками (BBER) со значением от 2×10^{-4} до 1×10^{-4} в зависимости от скорости передачи услуги, до 3,5 Гбит/с, и это значение BBER измеряется только в течение времени готовности. В нижеследующей таблице 1 частично воспроизведена таблица 1 из Рекомендации МСЭ-T G.826 для справки.

ТАБЛИЦА 1

Сквозные требуемые показатели качества по ошибкам для международного цифрового HRX или HRDP протяженностью 27 500 км из Рекомендации МСЭ-T G.826

Скорость	64 кбит/с	1,5–5 Мбит/с	> 5–15 Мбит/с	> 15–55 Мбит/с	> 55–160 Мбит/с	> 160–3500 Мбит/с
Бит/блок		800–5 000	2000–8 000	4 000–20 000	6 000–20 000	15 000–30 000
ESR	0,04	0,04	0,05	0,075	0,16	
SESR	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
BBER		2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	10^{-4}

В транспортных системах связи, которые работают с любой битовой скоростью, предусмотренной в Рекомендации МСЭ-T G.826, на скорости либо выше либо ниже основной скорости, независимо от фактически охватываемого расстояния, на любой спутниковый пролет в международном участке тракта распределяется 35% всех сквозных требуемых показателей. Если спутниковая линия обеспечивает национальный участок, то на нее распределяется 42% всех сквозных требуемых показателей. Например, требуемый ВВЕР 2×10^{-4} для международного соединения изменяется на $2 \times 10^{-4} \times 0,35 = 0,7 \times 10^{-4}$, а для национального соединения – на $2 \times 10^{-4} \times 0,42 = 0,84 \times 10^{-4}$. Если спутник обеспечивает полный сквозной тракт или сквозное соединение, применяются требуемые показатели из таблицы 1.

Размер блока также определяется в зависимости от скорости передачи услуги. С учетом этого аспекта в Рекомендации МСЭ-R S.1062 определены требуемые рабочие характеристики в форме ВЕР/ α , где ВЕР – вероятность ошибок по битам, а α – количество ошибок в пакете. Ниже приведен пример требуемых рабочих характеристик для спутниковой системы, работающей с любой скоростью до 155 Мбит/с включительно.

ТАБЛИЦА 2

Требуемые рабочие характеристики, определенные в Рекомендации МСЭ-R S.1062

Процент полного времени (наихудший месяц)	ВЕР/ α	При $\alpha = 10$ (ВЕР)
0,2	1×10^{-7}	1×10^{-6}
2	1×10^{-9}	1×10^{-8}
10	1×10^{-10}	1×10^{-9}

Следует признать, что спутниковые соединения этого типа предназначались для постоянного высокоскоростного соединения, используемого для обеспечения межконтинентальной линии с высокой пропускной способностью, по которой передается в основном телефонный трафик или низкоскоростной трафик данных. Эти линии проходили чаще всего через крупные земные станции, которые работали в диапазонах 6/4 ГГц, где нарушение распространения чрезвычайно мало.

В настоящее время по двусторонним спутниковым соединениям передается главным образом интернет-трафик. Соединения, как правило, асимметричные и характеризуются наличием станции-концентратора, которая передает потоки с высокой скоростью и в которой возможно использовать методы временного разделения каналов (TDM) или многостанционного доступа с временным разделением (TDMA). Абонентские станции ведут передачу с гораздо меньшей скоростью, чем скорость станции-концентратора, и имеют очень низкий коэффициент заполнения. Эти станции относятся к тому типу систем, в которых будут использоваться линии на более высоких частотах и, чтобы обеспечить эффективность функционирования, будет применяться АСМ для достижения устойчивой пропускной способности с высокой спектральной эффективностью. На частотах выше 20 ГГц возникают гораздо более значительные нарушения распространения по сравнению с диапазонами 6/4 ГГц.

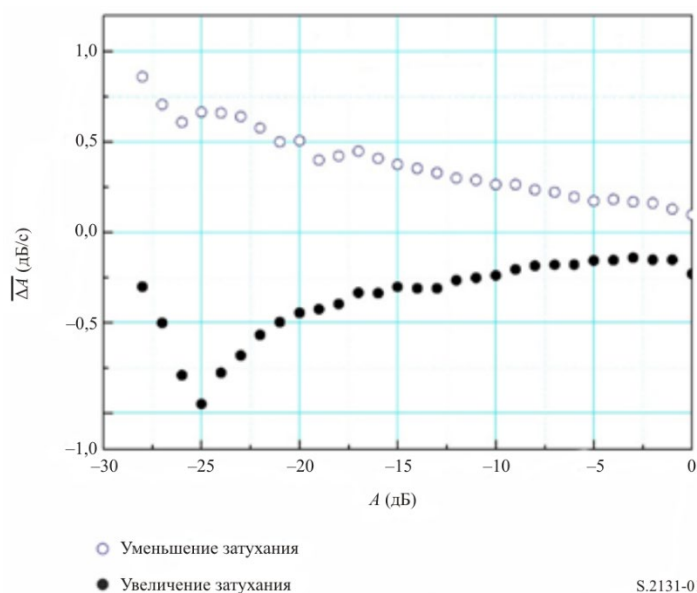
1.2 Результаты экспериментальных исследований динамических характеристик замирания в дожде

Согласно полученным данным, средний наклон кривой замирания, рассчитанный по спутниковой системе, работающей в диапазоне Ku, составил $0,24 \text{ дБ/с}^2$. На рисунке 1 показана статистика наклона кривой замирания, измеренная в системе спутниковой связи диапазона Ka в Республике Корея³. На рисунке 1 A – глубина замирания в дБ, ΔA – наклон кривой замирания в дБ/с, $\overline{\Delta A}$ – среднее значение ΔA . На рисунке видно, что средний наклон кривой замирания составляет менее 1 дБ во всех диапазонах замирания.

Экспериментальное исследование с использованием испытательного стенда DVB-S2 с ACM в спутниковой линии (пункт Е.3 документа DVB A171-1⁴) показало, что максимальный наклон кривой замирания, соответствующий периодам сильных дождей, в диапазоне Ka обычно не превышает $0,5 \text{ дБ/с}$, таким образом время обновления цикла ACM, равное 1 с, считается реалистичным. Здесь приведены результаты экспериментальных исследований для системы диапазона Ka. Кроме того, для ограничения числа изменений модуляции и кодирования (MODCOD) и с учетом типового размера шага между соседними уровнями MODCOD для DVB-S2 было добавлено номинальное смещение в $0,3 \text{ дБ}$ к верхнему пороговому значению по сравнению с нижним пороговым значением, результатом чего стал эффект гистерезиса.

РИСУНОК 1

Средний наклон кривой замирания в спутниковой системе диапазона Ka



-
- 2 Sooyoung Kim Shin, Kwangjae Lim, Kwonhue Choi, and Kunseok Kang, "Rain attenuation and Doppler shift compensation for satellite communications", *ETRI Journal*, Vol. 24, No. 1, Feb. 2002, pp. 31-42.
 - 3 Meixiang Zhang and Sooyoung Kim, "A Statistical Approach for Dynamic Rain Attenuation Model," 29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2011) 28 November – 1 December 2011, Nara, Japan.
 - 4 DVB Document A171-1. Digital Video Broadcasting (DVB), Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1 (DVB-S2), March 2015.

2 Применимые параметры рабочих характеристик

2.1 Потребность в определении новых требуемых рабочих характеристик для HRDP с переменной скоростью передачи

Существующие Рекомендации, касающиеся показателей качества по ошибкам (например, Рекомендация МСЭ-R S.1062-4), охватывают HRDP с постоянной скоростью передачи и, следовательно, неприменимы для систем, в которых используются методы АСМ. Важным аспектом АСМ является то, что характеристики BER в различных режимах MODCOD отражают быстрое снижение BER относительно C/N , где N – общий уровень шума в линии, включая тепловой шум и помехи. Разница между C/N при рабочем BER, к примеру 1×10^{-8} , и при существенно сниженном BER в 1×10^{-3} для данного состояния MODCOD составляет приблизительно 0,25 дБ.

Многие рабочие характеристики современных спутниковых систем определяются в контексте пакетных передач в форме коэффициента ошибок по пакетам (PER), а характеристики PER снижаются так же быстро, как и характеристики BER. Это означает, что рабочие характеристики спутника в форме PER как функции времени не релевантны для спутниковых систем, в которых используются методы АСМ, поскольку такие системы будут адаптироваться к ухудшению условий путем ухудшения общей пропускной способности и, следовательно, уже не являются системами с постоянной скоростью передачи. Концепция измерения рабочих характеристик спутниковых линий, в которых используются методы АСМ, с применением средней или ухудшенной пропускной способности уже исследовалась ранее⁵. В указанной статье рассматриваются применения АСМ, допускающие снижение скорости передачи информации. Концепцию ухудшения пропускной способности, представленную в настоящем Приложении, можно использовать для оценки снижения скорости передачи информации.

Вероятность того, что PER спутниковой системы, в которой используется АСМ, снизится до непригодного уровня, остается чрезвычайно малой до тех пор, пока набор MODCOD АСМ не исчерпает все доступные кодовые варианты. Следовательно, более нет необходимости указывать критерий качества по ошибкам и значение готовности для определения рабочих характеристик спутникового HRDP. Кроме того, пригодные требуемые рабочие характеристики не зависят от скорости передачи в канале и их возможно применять к любой используемой "предложенной" скорости передачи.

2.2 Коэффициент ошибок по пакетам

Спецификация DVB-S2(X) определяет условие квазибезошибочности (QEF) как коэффициент ошибок по пакетам (PER), равный 10^{-7} , при длине пакета 188 байтов, что соответствует длине пакетов MPEG. Это также соответствует коэффициенту ошибок по кадрам (FER), равному 10^{-5} , при размере кадров 16 200 или 64 800 битов. Ввиду чрезвычайно крутых характеристик кривых PER или FER различия в C/N при PER, равном 10^{-7} , и PER, равном 10^{-5} , обычно не превышают 0,1 дБ независимо от состояний MODCOD⁶.

Модем DVB-S2 реализован аппаратно и продемонстрирован при использовании PER⁷, равного 10^{-4} , в качестве условия изменения состояния АСМ. С учетом значительного времени прохождения сигнала в обоих направлениях (RTT) модем DVB-S2 был разработан для изменения состояния MODCOD при условии QEF в опережение этих крутых характеристик PER.

⁵ Gerald Shewan, "Alternative Measure of Performance for Satellite Links Employing Adaptive Coding and Modulation", 30th AIAA International Communications Satellite System Conference (ICSSC-2012), 24-27 September, 2012, Ottawa, Canada.

⁶ Подробнее о спецификации DVB-S2X см.: DVB Document A171-2. Digital Video Broadcasting (DVB), Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2 – S2 Extensions (DVB-S2X), March 2015.

⁷ Joon-Gyu Ryu, Deock-Gil Oh, Hyun-Ho Kim, and Sung-Yong Hong, "Proposal of an Algorithm for an Efficient Forward Link Adaptive Coding and Modulation System for Satellite Communication", Journal of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 16, No. 2, Apr. 2016, pp. 80-86.

Если выполняется передача на основе кадров (или пакетов), тогда параметр ВВЕР, определенный в Рекомендации МСЭ-T G.826, можно сопоставить с FER или PER, поскольку размер блоков, определенный в таблице 1, может быть совместимым с размером пакетов или кадров.

Далее возможно определить требуемые рабочие характеристики спутниковой системы, в которой используются методы АСМ, путем изменения требуемых рабочих характеристик, приведенных в таблице 2, и использования PER, который показан в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3
Требуемые рабочие характеристики спутниковой системы,
в которой используется АСМ, в форме PER

Процентная доля общего времени	PER
0,04% года	$< 10^{-4}$
0,6% года	$< 10^{-5}$
4,0% года	$< 10^{-7(1)}$

(1) Предполагается, что PER, равный 10^{-7} , эквивалентен FER, равному 10^{-4} , а также ВВЕР, равному 10^{-4} , из таблицы 1.

2.3 Спектральная эффективность как функция C/N

Емкость канала, представленная границей Шеннона–Хартли, может отражать спектральную эффективность, выраженную в бит/с/Гц, и такая спектральная эффективность может быть представлена как функция C/N . Спектральная эффективность как функция C/N может быть представлена следующим образом в случае использования границы Шеннона–Хартли, что является максимальным достижимым значением:

$$\eta(\gamma) = \log_2(10^{\gamma/10} + 1), \quad (1)$$

где η – спектральная эффективность в бит/с/Гц, а γ – отношение C/N , которое в данном случае эквивалентно отношению энергии символа к спектральной плотности шума (E_s/N_0) в дБ.

Если в системе используется АСМ с несколькими режимами MODCOD, то можно вывести $\eta(\gamma)$ и установить требуемые рабочие характеристики, чтобы поддерживать $\eta(\gamma)$ с определенным запасом с учетом изменений состояния АСМ в течение интервала времени длительностью приблизительно в 1 с.

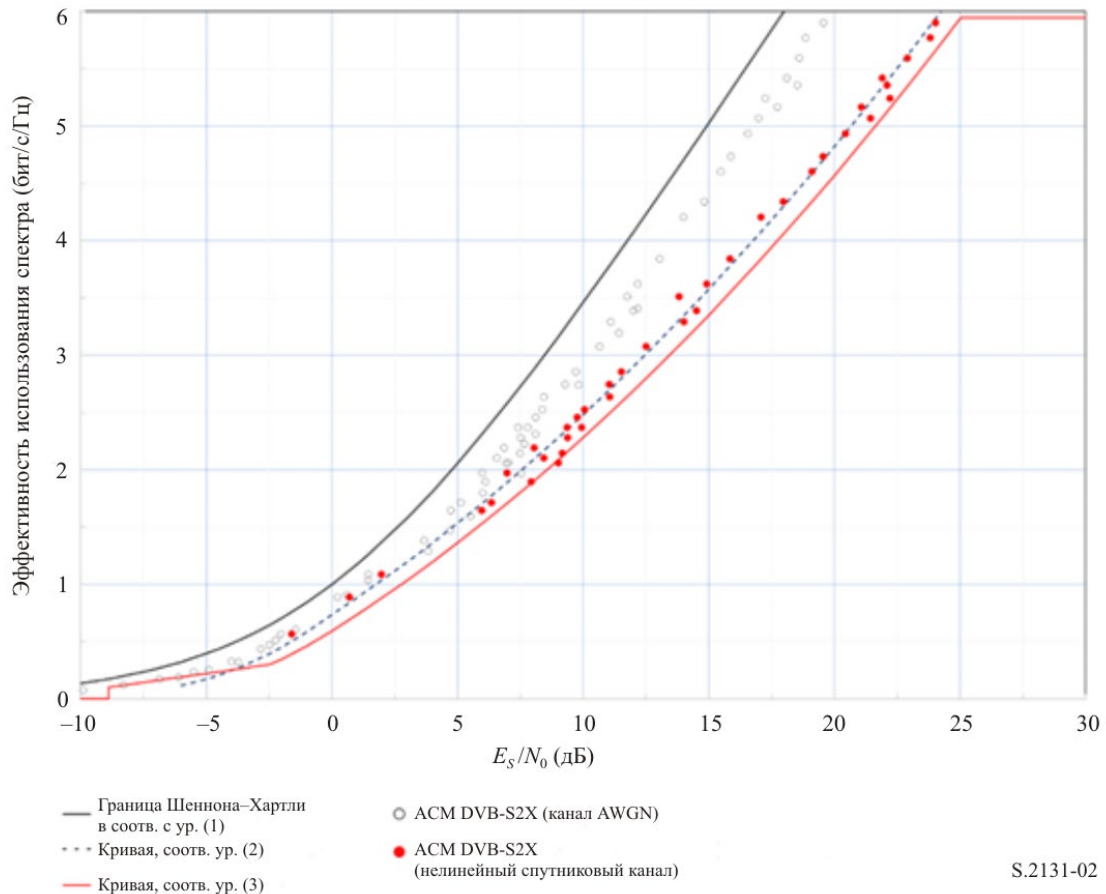
Следовательно, требуемая характеристика может быть основана на том, что спектральная эффективность системы поддерживается на уровне не ниже $\eta(\gamma - 1,0)$ для данного значения γ , выраженного в дБ.

Для того чтобы представить пример того, каким образом возможно применить спектральную эффективность в качестве требуемой рабочей характеристики, используются характеристики DVB-S2X⁸.

На рисунке 2 показано сравнение спектральной эффективности операций MODCOD АСМ для DVB-S2X и DVB-S2 с границей Шеннона–Хартли.

⁸ Использование характеристик DVB-S2X не следует понимать как предпочтение системы DVB-S2X альтернативным методам АСМ. Характеристики DVB-S2X являются общедоступными, и их использование не подпадает под ограничения, обусловленные правами интеллектуальной собственности.

РИСУНОК 2
Сравнение спектральной эффективности (емкости)



Подбирая спектральную эффективность при работе ACM DVB-S2X по нелинейному спутниковому каналу с использованием двух многочленов второго порядка для определения минимальной ошибки методом наименьших квадратов, можно вывести следующие уравнения⁹:

$$\eta(\gamma) = 0,8181 + 0,1607\gamma + 0,0096\gamma^2 \text{ при } -5 \leq \gamma < 0; \quad (2)$$

$$\eta(\gamma) = 0,7375 + 0,1433\gamma + 0,003\gamma^2 \text{ при } \gamma \geq 0.$$

Чтобы получить аппроксимирующую кривую, соответствующую нижней части кривой, постоянная 0,8181 на участке кривой ($-5 \leq \gamma < 0$ дБ) должна быть снижена на примерно 0,08–0,7375, так чтобы верхняя и нижняя части кривой выровнялись по одному и тому же значению γ при $E_s/N_0 = 0$. Также стоит отметить, что на рисунке 2 точки DVB-S2X (канал AWGN) в нижней левой части рисунка показывают, что разница в спектральной эффективности канала AWGN и нелинейного канала уменьшается, когда E_s/N_0 опускается ниже нуля. Уравнение (2) с постоянным членом, измененным на участке кривой ($-2,5 \leq \gamma < 0$ дБ), можно дополнительно изменить в соответствии с серией данных по минимальной спектральной эффективности. Для моделирования характеристик в самой нижней части кривой ($-8,9 \leq \gamma < -2,5$ дБ) можно использовать линейную функцию. Общий результат получается путем объединения верхней и нижней частей кривой по обе стороны от точки $\gamma = 0$ с добавлением самой нижней части кривой, описанной с использованием линейной функции. Минимальную спектральную эффективность DVB-S2X (нелинейный спутниковый канал) можно описать с помощью следующего набора функций:

⁹ DVB-S2X используется в качестве примера, так как этот стандарт широко используется и характеристики являются общедоступными. Аналогичный вывод можно провести для любого альтернативного метода АСМ.

$$\begin{aligned}
 \eta(\gamma) &= 0 \text{ при } \gamma < -8,9; \\
 \eta(\gamma) &= 0,030337\gamma + 0,376643 \text{ при } -8,9 \leq \gamma < -2,5; \\
 \eta(\gamma) &= 0,5933 + 0,1415\gamma + 0,0096\gamma^2 \text{ при } -2,5 \leq \gamma < 0; \\
 \eta(\gamma) &= 0,5933 + 0,1388\gamma + 0,003\gamma^2 \text{ при } 0 \leq \gamma < 25,02; \\
 \eta(\gamma) &= 5,944 \text{ при } \gamma \geq 25,02.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Для систем, в которых используется формат кадрирования DVB-S2X, оптимизированный для очень низкого уровня C/N^{10} , применим весь диапазон уравнения (3). Для систем, в которых формат кадрирования DVB-S2X, оптимизированный для очень низкого уровня C/N , не используется, уравнение (3) применяется для минимального значения γ , равного -3 дБ, ниже которого $n(\gamma) = 0$.

Для DVB-S2X наибольшая спектральная эффективность при самом высоком уровне MODCOD составляет 5,944 бит/с/Гц, что соответствует $\gamma = 25,02$ дБ. Следовательно, при рассмотрении спутниковых систем, использующих DVB-S2X, уравнение (3) дает постоянное значение 5,944 бит/с/Гц для $\gamma \geq 25,02$ дБ. Другие схемы MODCOD могут обеспечивать более высокую спектральную эффективность, когда $\gamma > 25,02$ дБ¹¹.

Требуемая рабочая характеристика обеспечивает увеличение на 1 дБ по сравнению с характеристикой DVB-S2X, что позволяет учитывать дополнительные ухудшения канала в типовой рабочей среде.

В этом примере из рисунка 2 очевидно, что в линии, в которой используется АСМ системы DVB-S2X в нелинейном спутниковом канале, уменьшение значения C/N на 1 дБ приводит к снижению достижимой спектральной эффективности примерно на 10%. Такой вывод недействителен для линий, в которых используются MODCOD, отличные от DVB-S2X. Фактическое снижение эффективности зависит от номинального значения C/N до ухудшения.

Используемая в этом примере система смогла выдержать снижение C/N на 1 дБ в течение 1 с при изменении состояния АСМ. Такое ухудшение отношения C/N может быть связано с любым источником внешнего шума и замиранием в дожде.

Рисунок 2 и выводы, сделанные на его основе, относятся к системам, в которых реализованы АСМ DVB-S2X, но эту методику можно применять и к другим спутниковым линиям с АСМ других типов.

2.4 Ухудшение пропускной способности

Использование АСМ в спутниковой системе позволяет поддерживать спутниковое соединение даже при ухудшении условий распространения сигнала, но за счет уменьшения пропускной способности. Ухудшение пропускной способности на выходе спутникового HRDP, в котором применяется АСМ, можно связать со спектральной эффективностью, если сделать допустимое предположение о том, что пропускная способность изменяется в прямой зависимости от спектральной эффективности. При этом предположении пропускную способность можно вычислить как функцию C/N , которая изменяется в зависимости от условий распространения и помех.

Ниже приведен пример использования DVB-S2X для находящейся в южной части Флориды (США) спутниковой линии, на которую воздействует только замирание. Используя метод из Рекомендации МСЭ-R P.618, можно рассчитать значения превышения C/N в течение определенного периода времени среднего года. В качестве примера на рисунке 3 показаны эти значения для спутниковой линии, работающей на частоте 38,5 ГГц в климатической зоне, аналогичной южной части Флориды. Для предполагаемых частоты и местоположения, используемых для вычисления кривой на

¹⁰ См, например: Implementation guidelines for the second-generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X), C.2.6.2 Super-frame format 7, p. 160.

¹¹ DVB-S2X используется в качестве примера, так как этот стандарт широко используется и характеристики являются общедоступными. Аналогичный вывод можно провести для любого альтернативного метода АСМ.

рисунке 4, и с учетом запаса в 1 дБ для учета любых возможных помех, затухание приведет к неготовности системы в 0,3%, что соответствует показателю готовности 99,7%. Динамический диапазон вышеупомянутой линии составляет 33 дБ.

Процентная доля времени, в течение которого линия подвергается воздействию только замирания при распространении и спектральная эффективность в этой линии падает ниже наименьших значений, зависит от следующих факторов:

- 1) климатические характеристики местоположения приемной земной станции;
- 2) форма сигнала (например, DVB-S2X, DVB-S2 и т. д.) и, в особенности, наиболее эффективного кодирования (самые надежные MODCOD), доступного для сигнала этой формы;
- 3) динамический диапазона линии, зависящий от проектного решения системы. Динамический диапазон линии – это разность между максимальным уровнем C/N линии при оптимальных условиях распространения и уровнем C/N линии, когда условия распространения приводят к снижению уровня C/N до точки, при которой спектральная эффективность используемой формы сигнала падает до нуля¹². Если динамический диапазон линии недостаточен, она может не соответствовать полному теоретическому динамическому диапазону используемой формы сигнала.

Реализация конкретной формы сигнала ACM и способность модема на стороне приема демодулировать и декодировать трафик с очень низким уровнем C/N влияют на динамический диапазон, в котором может работать линия. Таким образом, может быть достигнута точка, в которой модем/кодек все еще поддерживает синхронизацию (захват несущей), но линия недоступна, потому что уровень C/N принимаемого сигнала меньше уровня C/N , при котором реализуются наиболее надежные MODCOD.

В то время как спутниковая линия, в которой используется ACM, может поддерживать соединение при уменьшенной пропускной способности, потери достижимой пропускной способности, выраженные как доля максимальной пропускной способности за определенную процентную долю времени, можно рассчитать следующим образом:

$$\varphi(T\%) = 1 - \frac{\eta(\gamma(T\%))}{\eta_{\max}}, \quad (4)$$

где η_{\max} – максимально достижимая спектральная эффективность, $T\%$ – процентная доля времени, $\gamma(T\%)$ – достижимое C/N за время $\geq T\%$ и $\varphi(T\%)$ – снижение достижимой пропускной способности.

Следовательно, среднее значение потерь пропускной способности (φ_{total}) может быть рассчитано путем численного интегрирования спектральной эффективности за период времени, в течение которого соединение доступно, следующим образом:

$$\varphi_{total} = \int \left(1 - \frac{\eta(\gamma(T\%))}{\eta_{\max}} \right) dT\% \approx \sum \varphi(T\%) \Delta T\%. \quad (5)$$

Спектральную эффективность η , соответствующую определенной процентной доле времени, можно определить, подставив C/N , то есть значение γ , в уравнение (3). В таблице 4 приведен пример вычисления характеристик линий, в которых используется ACM, как средней потери пропускной способности φ_{total} спутниковой системы, показанной на рисунке 4, на основе интегральной функции распределения достижимой пропускной способности $\varphi(T\%)$. В этом примере $\eta_{\max} = \eta(24)$ составляет около 5,653. На рисунке 4 показаны график спектральной эффективности $\eta(\gamma(T\%))$ и соответствующее ухудшение достижимой пропускной способности $\varphi(T\%)$. В этом примере среднее значение потери пропускной способности φ_{total} , рассчитанное с использованием уравнения (5), составляет около 4,774% при динамическом диапазоне около 33 дБ.

¹² В данном случае под спектральной эффективностью следует понимать скорость передачи полезной информации, исключая коды исправления ошибок, поддерживаемые линией связи.

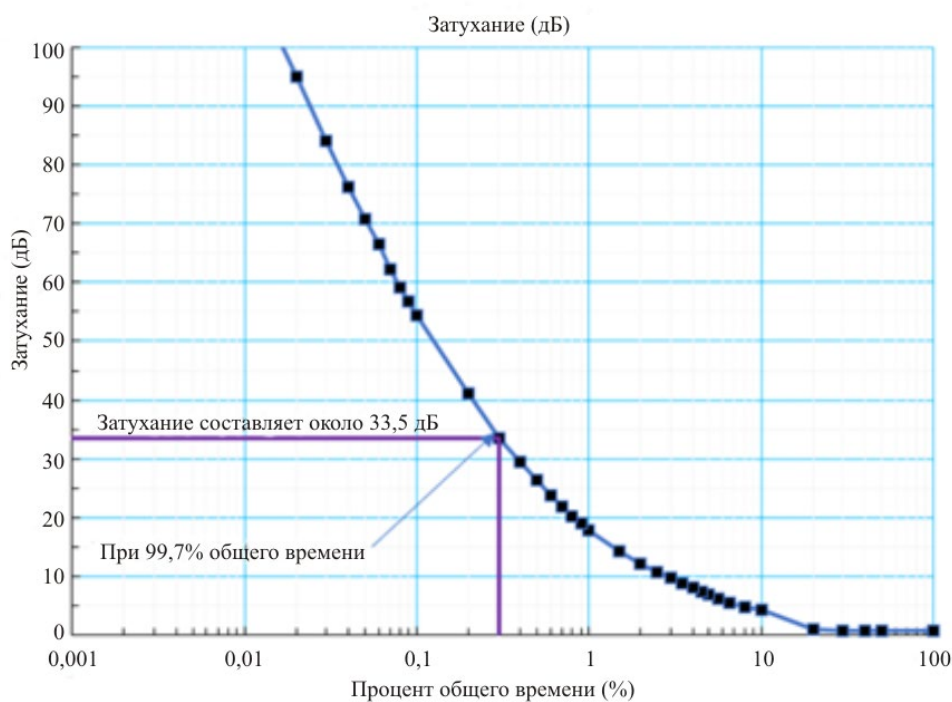
ТАБЛИЦА 4

Пример расчета ухудшения пропускной способности

$T\%$	Полное затухание (дБ)	$C/N, \gamma (T\%)$ (дБ)	$\eta(\gamma (T\%))$	$\varphi (T\%)$	$\Delta T\%$	$\varphi (T\%) \Delta T\%$
0,3	33,5	-8,77	0,111	$0,980 = 1 - (0,111/5,653)$	0,1	$0,098 = 0,980 \times 0,1$
0,4	29,413	-4,69	0,234	$0,959 = 1 - (0,234/5,653)$	0,1	$0,096 = 0,959 \times 0,1$
0,5	26,277	-1,550	0,397	0,930	0,1	$0,093 = 0,93 \times 0,1$
0,6	23,842	0,885	0,719	0,873	0,1	0,087
0,7	21,893	2,834	1,011	0,821	0,1	0,082
0,8	20,285	4,443	1,269	0,775	0,1	0,078
0,9	18,925	5,803	1,500	0,735	0,1	0,073
1	17,754	6,974	1,707	0,698	0,5	0,349
1,5	14,187	10,540	2,390	0,577	0,5	0,289
2	12,009	12,718	2,844	0,497	0,5	0,248
2,5	10,634	14,093	3,145	0,444	0,5	0,222
3	9,617	15,111	3,376	0,403	0,5	0,201
3,5	8,716	16,011	3,585	0,366	0,5	0,183
4	7,983	16,744	3,759	0,335	0,5	0,168
4,5	7,371	17,357	3,906	0,309	0,5	0,154
5	6,849	17,879	4,034	0,286	0,6	0,172
5,6	6,186	18,54	4,198	0,257	1	0,257
6,6	5,524	19,20	4,365	0,228	1,4	0,319
8	4,861	19,87	4,535	0,198	2	0,395
10	4,199	20,529	4,707	0,167	2,2	0,368
12,2	3,392	21,34	4,920	0,130	2,3	0,298
14,5	2,585	22,14	5,137	0,091	2,5	0,228
17	1,778	22,95	5,359	0,052	3	0,156
20	0,972	23,756	5,584	0,012	10	0,122
30	0,778	23,950	5,638	0,003	10	0,025
40	0,753	23,975	5,645	0,001	10	0,013
50	0,727	24,000	5,653	0,000	50	0,000
100	0,727	24,000	5,653	0,000	0	0,000
φ_{total}						4,774

РИСУНОК 3

Расчет затухания вследствие потерь при распространении на основе Рекомендации МСЭ-R P.618 в спутниковом соединении, в котором используется АСМ и которое работает в климатической зоне, аналогичной южной части Флориды (США)



S.2131-03

Предполагая, что затухание в спутниковом соединении является функцией общего времени, как показано на рисунке 4, получаем среднее значение ожидаемой потери пропускной способности, равное 4,774% от общей возможной пропускной способности:

$$\text{Пропускная способность} = \text{Скорость передачи в канале} \times \text{Время}; \quad (6)$$

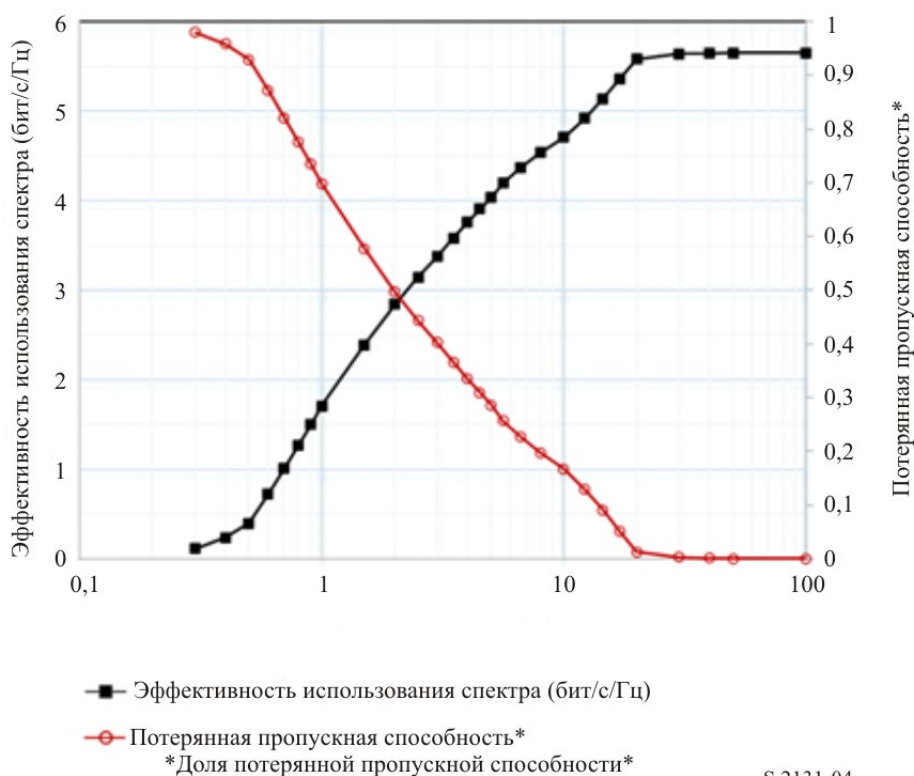
$$\text{Потерянная пропускная способность} = \text{Максимальная доступная пропускная способность} - \text{Фактическая пропускная способность}; \quad (7)$$

$$\text{Ухудшение пропускной способности (\%)} = \left(\frac{\text{Потерянная пропускная способность}}{\text{Максимальная доступная пропускная способность}} \right) \times 100. \quad (8)$$

Пример расчета ухудшения пропускной способности в процентах приведен в Прилагаемом документе к Приложению.

РИСУНОК 4

Спектральная эффективность и потерянная пропускная способность* в спутниковом соединении, в котором используется АСМ и которое работает в климатической зоне, аналогичной южной части Флориды (США)



S.2131-04

Прилагаемый документ к Приложению

Пример расчета ухудшения пропускной способности в процентах

Допустим, что наилучшие доступные MODCOD – это 16APSK 77/90. Допустим далее, что скорость модуляции в канале составляет 34 мегабод в секунду. Объединяя эти допущения, получаем скорость передачи 116,36 Мбит/с. Допустим, что по соединению передаются пакеты длиной 188 байтов, причем каждый байт является октетом.

Рассчитываем максимальную доступную пропускную способность (MAT_{put}), фактическую пропускную способность (DT_{put}), потерянную пропускную способность (LT_{put}) и ухудшение пропускной способности в процентах ($\%DT_{put}$) следующим образом:

$$MAT_{put} = \text{Максимальная скорость передачи в канале (бит/с)} \times \text{Время (с)}; \quad (9)$$

$$DT_{put} = \sum \text{скоростей передачи в канале } (C/N)_i \text{ (бит/с)} \times \text{Время}_i \text{ (с)}; \quad (10)$$

$$LT_{put} = MAT_{put} - DT_{put}; \quad (11)$$

$$\%DT_{put} = (LT_{put}/MAT_{put}) \times 100. \quad (12)$$

Для значений, соответствующих допущениям:

$$MAT_{put} = 116,36 \text{ Мбит/с} \times 31\,557\,600 \text{ с/год} = 3,67 \times 10^{15} \text{ бит, или } 2,44 \times 10^{12} \text{ пакетов в год.}$$

Используя данные из таблицы 5 и полагая, что скорость передачи в канале изменяется так же, как спектральная эффективность, получаем $LT_{put} = 1,165 \times 10^{11}$ пакетов и $\%DT_{put} = 4,774\%$.

ТАБЛИЦА 5

**Ухудшение пропускной способности в процентах: 34 мегабод в секунду, 16APSK 77/90,
188 байтов в пакете, максимальная доступная пропускная способность
116,36 Мбит/с = $2,44 \times 10^{12}$ пакетов/год**

Время (%)	Общее затухание	$C/N, \gamma$ (Т%) (дБ)	$\eta(\gamma$ (Т%))	$\Delta T\%$	$\%DT_{put}, \Phi$ (Т%)	Потерянная пропускная способность
0,3	33,5	-8,77	0,111	0,1	$0,980 = 1 - (0,111/5,653)$	2 392 300 555,55
0,4	29,413	-4,69	0,234	0,1	0,959	2 338 777 860,07
0,5	26,277	-1,550	0,397	0,1	0,930	2 268 593 048,04
0,6	23,842	0,885	0,719	0,1	0,873	2 129 821 586,02
0,7	21,893	2,834	1,011	0,1	0,821	2 003 692 375,24
0,8	20,285	4,443	1,269	0,1	0,775	1 892 136 410,30
0,9	18,925	5,803	1,500	0,1	0,735	1 792 605 325,58
1	17,754	6,974	1,707	0,51	0,698	8 515 408 574,43
1,5	14,187	10,540	2,390	0,5	0,577	7 042 604 485,82
2	12,009	12,718	2,844	0,5	0,497	6 061 899 097,19
2,5	10,634	14,093	3,145	0,5	0,444	5 411 456 009,74
3	9,617	15,111	3,376	0,5	0,403	4 914 264 989,65
3,5	8,716	16,011	3,585	0,5	0,366	4 462 867 228,40
4	7,983	16,744	3,759	0,5	0,335	4 087 795 603,11
4,5	7,371	17,357	3,906	0,5	0,309	3 769 153 208,08
5	6,849	17,879	4,034	0,6	0,286	4 192 406 755,67
5,6	6,186	18,54	4,198	1	0,257	6 277 955 694,24
6,6	5,524	19,20	4,365	1,4	0,228	7 780 079 269,90
8	4,861	19,87	4,535	2	0,198	9 650 151 891,10
10	4,199	20,529	4,707	2,2	0,167	8 979 487 209,87
12,2	3,392	21,34	4,920	2,3	0,130	7 269 900 943,64
14,5	2,585	22,14	5,137	2,5	0,091	5 558 025 750,48
17	1,778	22,95	5,359	3	0,052	3 806 209 512,79
20	0,972	23,756	5,584	10	0,012	2 974 051 094,53
30	0,778	23,950	5,638	10	0,003	615 903 898,01
40	0,753	23,975	5,645	10	0,001	308 034 447,18
50	0,727	24,000	5,653	50	0,000	0,00
100	0,727	24	5,653	0	0,000	0,00
						116 495 582 824,63
			Φ_{total}			4,774