

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*

(1986-1990-1992-1994-2005)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что МСЭ-Т определил концепцию цифровой сети с интеграцией служб (ЦСИС);
- b) что спутникам, работающим в фиксированной спутниковой службе (ФСС), предстоит сыграть важную роль в распространении концепции ЦСИС на международные соединения;
- c) что удовлетворительные показатели качества по ошибкам являются основной характеристикой любой цифровой системы передачи;
- d) что показатели качества по ошибкам международного цифрового соединения, входящего в состав ЦСИС, уже определены МСЭ-Т в Рекомендации МСЭ-Т G.821 для скорости 64 кбит/с;
- e) что стоимость развертывания и эксплуатации цифровых спутниковых систем связи в огромной степени зависит от общих показателей качества по ошибкам;
- f) что при определении критериев показателей качества по ошибкам необходимо принимать во внимание все вероятные источники появления ошибок, в особенности, изменяющиеся во времени условия распространения радиоволн и помехи,

отмечая,

1 что в эксплуатации все еще находятся спутниковые гипотетические эталонные цифровые тракты (ГЭЦТ), разработанные с учетом параметров Рекомендации МСЭ-Т G.821, включая параметр минут пониженного качества, который был затем исключен в версии Рекомендации МСЭ-Т G.821 1996 года,

рекомендует,

1 что коэффициент ошибок по битам (КОБ) (см. Примечание 2) на выходе (то есть на любом конце двустороннего соединения) ГЭЦТ (как определено в Рекомендации МСЭ-R S.521), работающего в полосе частот ниже 15 ГГц и входящего в состав соединения ЦСИС на скорости 64 кбит/с, в течение времени готовности не должен превышать следующих значений:

- 1.1** 1×10^{-7} в течение более чем 10% любого месяца,
- 1.2** 1×10^{-6} в течение более чем 2% любого месяца,
- 1.3** 1×10^{-3} в течение более чем 0,03% любого месяца (см. Примечание 5);

* В настоящей версии Рекомендации дается ссылка на Рекомендацию МСЭ-Т G.821, разработанную до 1996 года, в котором был исключен параметр минут пониженного качества. Все будущие проекты спутниковых систем должны основываться на новейшей версии Рекомендации МСЭ-R S.1062.

2 что следующие Примечания следует рассматривать как часть настоящей Рекомендации.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Требования § 1 были определены с использованием метода, описанного в Приложении 1. Они основаны на требуемых показателях качества по ошибкам в ГЭЦТ фиксированной спутниковой службы, указанных в Рекомендации МСЭ-T G.821, и достаточны для их выполнения при всех рассматриваемых условиях работы. Требования, установленные МСЭ-T для ГЭЦТ ФСС, применимые ко времени готовности в течение периода порядка одного любого месяца могут быть сформулированы следующим образом:

- коэффициент ошибок хуже, чем 1×10^{-6} в течение менее 2% 1-минутных интервалов,
- коэффициент ошибок хуже, чем 1×10^{-3} в течение менее 0,03% 1-секундных интервалов,
- ошибки могут появляться в течение менее 1,6% 1-секундных интервалов.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Значения КОБ, указанные в § 1, должны быть измерены в течение достаточно большого промежутка времени для гарантии того, что они обеспечивают надежную оценку вероятности ошибок (см. Приложение 1).

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Значения КОБ, указанные в данной Рекомендации, основаны на предположении, что секунды, пораженные ошибками, могут состоять из двух различных видов ошибок: ошибок, распределенных случайно, и ошибок, появляющихся в пакетах. Большую часть времени ошибки носят случайный характер и ограничиваются величинами, указанными в § 1.1 и 1.2. Секунды, пораженные ошибками, исключены из измерений случайных ошибок, проведенных для проверки положений § 1.1 и 1.2, но они учтены в формулировке § 1.3 (см. Приложение 1).

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Значения КОБ, указанные в § 1, предусматривают запас на некоторые пакеты ошибок, которые могут возникать от источников, определенных в Приложении 1.

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – Значение для 0,03% любого месяца относится к КОБ, измеренному в течение времени готовности. Это требование могло бы удовлетворяться, например, при проектировании спутниковой системы для выполнения нормы на время неготовности 0,2% наихудшего месяца (полное время). При использовании 10%-го коэффициента готовности (отношение времени готовности к полному времени, когда КОБ хуже, чем 10^{-3}) это время соответствует 0,02% времени готовности любого месяца.

Далее, в допуске необходимо учесть вклад, вносимый теми секундами, пораженными ошибками, которые появляются при КОБ лучше, чем 10^{-3} . Взяв, для примера, этот допуск равным 0,01% от времени наихудшего месяца, получим суммарную норму 0,03% времени готовности наихудшего месяца (см. Приложение 1).

ПРИМЕЧАНИЕ 6. – ГЭЦТ, рассматриваемый в данной Рекомендации, определен в Рекомендации МСЭ-R S.521.

ПРИМЕЧАНИЕ 7. – Может потребоваться разработать специальные положения относительно качественных показателей линий связи спутник–спутник. Степень распространения этих положений является предметом дальнейшего изучения.

ПРИМЕЧАНИЕ 8. – Данная Рекомендация применима только тогда, когда система считается находящейся в состоянии готовности в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R S.579, и учитывает периоды с большим коэффициентом ошибок, превышающим 10^{-3} , которые сохраняются в течение промежутков времени продолжительностью менее 10 последовательных секунд. Короткие перерывы (менее 10 с) должны приравниваться к случаю, когда КОБ превышает 10^{-3} .

ПРИМЕЧАНИЕ 9. – Нормы на показатели качества по ошибкам, приведенные в этой Рекомендации, разработаны для обеспечения качественной работы соединения ЦСИС, соответствующего Рекомендации МСЭ-T G.821, между двумя пунктами коммутируемой цепи со скоростью передачи 64 кбит/с. Качественные показатели спутниковых систем, передающих телефонные сигналы с использованием ИКМ, работающих в соединениях, не входящих в ЦСИС, указаны в Рекомендации МСЭ-R S.522. Рекомендация МСЭ-R S.614 может применяться при разработке спутниковых систем, предназначенных для передачи цифровой информации в других формах, например для передачи данных в звуковой полосе (факсимильная передача) или передачи речи с низкоскоростным кодированием (НСК) (скорость ниже 64 кбит/с), до тех пор, пока не будут завершены более подробные исследования, результатом которых могут стать улучшенные показатели качества.

ПРИМЕЧАНИЕ 10. – Нормы на КОБ, указанные в § 1, не являются единственно возможными для удовлетворения требуемых требований качества, приведенных в Рекомендации МСЭ-Т G.821. Разработчики могут использовать другие подходящие маски для коэффициента ошибок, если они удовлетворяют положениям Рекомендации МСЭ-Т G.821. Примеры возможных масок приведены в Приложении 1.

ПРИМЕЧАНИЕ 11. – Желательно, чтобы системы планировались на основе данных о распространении радиоволн, полученных за период длительностью, по крайней мере, четыре года. Качественные показатели, рекомендованные для "любого месяца", должны быть основаны на данных о распространении радиоволн, соответствующих среднестатистическому "наихудшему месяцу года", взятому из месячной статистики за все годы, по которым имеются достоверные сведения.

ПРИМЕЧАНИЕ 12. – Коэффициенты ошибок, приведенные в § 1, были разработаны на основе применения ГЭЦТ на участке "высокого качества" гипотетического эталонного соединения (ГЭС) (см. Рекомендацию МСЭ-Т G.821). Возможны другие варианты применения ГЭЦТ в ГЭС с соответствующим изменением норм на показатели качества по ошибкам.

ПРИМЕЧАНИЕ 13. – Для того чтобы к системам, работающим на частотах выше 10 ГГц, можно было применять параметры, указанные в § 1, может быть выгодным использовать методы и способы противостояния помехам, основные принципы которых изложены в Рекомендации МСЭ-R S.1061.

ПРИМЕЧАНИЕ 14. – Метод измерения КОБ для заданных процентов времени приведена в Приложении 1.

Приложение 1

Характеристики гипотетического цифрового эталонного тракта фиксированной спутниковой службы, входящего в состав цифровой сети с интеграцией служб

1. Введение

В данном Приложении рассматриваются нормы на показатели качества, выполнение которых будет необходимым для ГЭЦТ ФСС, в тех случаях, когда он входит в состав гипотетического эталонного соединения (ГЭС) ЦСИС. ГЭС ЦСИС для коммутируемого соединения со скоростью 64 кбит/с определен в Рекомендации МСЭ-Т G.821 (МККТ Синяя книга, 1988, Том III.3), в которой для определения качественных показателей используется три класса сетей: местного, среднего и высокого класса. Считается, что международные спутниковые цепи входят в состав участка высокого класса качества.

Некоторые из общих норм на качественные показатели ГЭС ЦСИС для ФСС и их влияние на разработку систем ФСС рассматриваются в следующих параграфах.

2. Спутниковые каналы со скоростью 64 кбит/с, входящие в состав ГЭС ЦСИС

2.1 Качественные требования к ГЭЦТ ФСС

2.1.1 Показатели качества по ошибкам для спутниковой системы

Качество спутниковых систем, обычно, указывается в единицах вероятности ошибок в бите, тогда как Рекомендация МСЭ-Т G.821 указывает интервалы времени, в течение которых должен поддерживаться определенный коэффициент ошибок для заданных процентов времени. Эти проценты времени берутся для длительного периода, т. е. порядка одного месяца. В данном параграфе представлен метод, который был использован для преобразования нормативных параметров МСЭ-Т в форму показателей качества, используемых в спутниковых системах, и приводятся требования к качеству ГЭЦТ, полученные в ходе приложения этого метода к величинам, взятым из Рекомендации МСЭ-Т G.821.

В данном Приложении подробно объясняется различие между вероятностью ошибок в бите (ВОБ) и коэффициентом ошибок по битам (КОБ). Параметр ВОБ, который широко используется в последующих параграфах, представляет собой абстрактное число, применяемое для отражения теоретического качества оборудования передачи данных. КОБ является величиной, которую можно измерить (т. е. число битов с ошибками среди переданных битов). Выполнив значительное количество измерений, каждое из которых длилось достаточное время, можно оценить ВОБ с любой желаемой точностью.

Подход, принятый в данном Приложении, состоит в том, что предполагается, что (при скорости 64 кбит/с) качество линии связи спутниковой системы ограничивается механизмами, имеющими случайную природу, и его можно проанализировать с применением для вычислений вероятности появления данного количества ошибок в течение промежутка времени данной длительности с определенной вероятностью ошибки закона Пуассона или биномиального подхода. На практике, разработчикам систем также должно быть известно количество пакетов ошибок, которое невозможно определить с использованием указанного подхода (некоторые механизмы, способные вызвать увеличение числа таких пакетов, описываются в § 2.2), и предусмотреть достаточные величины запаса для противостояния их влиянию.

Пакеты ошибок, обусловленные методами коррекции ошибок, рассматриваются в § 5.

2.1.2 Требования Рекомендации МСЭ-T G.821

В таблице 1 приведены показатели качества для сквозного соединения, описанные в Рекомендации МСЭ-T G.821, а также нормы на спутниковый ГЭЦТ. Для каждого класса показателей качества указано общее требование для сквозного соединения, а также требование к спутниковому ГЭЦТ.

2.1.3 Модели ВОБ, необходимые для удовлетворения требований Рекомендации

В параграфе 3 описывается метод, при помощи которого можно проанализировать распределение данной ВОБ относительно процента времени в единицах параметров, указанных в таблице 1. Применяя эту процедуру, можно получить множество различных распределений, или моделей, основанных на обобщенных характеристиках спутниковых систем, в которых выполняются – или даже превосходятся – нормы, определенные в Рекомендации МСЭ-T G.821.

Опишем одну из моделей, приведенных в § 3. Эта модель находит компромисс между требованиями систем с ограниченными возможностями распространения сигнала, как правило, работающих на частотах выше 10 ГГц, и требованиями систем с ограниченными помехами, работающих, как правило, в полосах частот ниже 10 ГГц, и может удовлетворять требованиям разрабатываемых спутниковых систем с высокой пропускной способностью.

Требования к ВОБ в этой модели, как видно из точек перелома кривой, изображенной на рисунке 3, следующие:

- ВОБ = 1×10^{-7} для 90% наихудшего месяца,
- ВОБ = 1×10^{-6} для 98% наихудшего месяца.

В таблице 2 качественные показатели этой модели даны в единицах минут пониженного качества, секунд с ошибками и секунд, пораженных ошибками. Показатели перечислены как для общего времени, так и для времени готовности, с целью продемонстрировать взаимосвязь между вычислениями при разработке системы и нормам Рекомендации МСЭ-T G.821.

ТАБЛИЦА 1

Показатели качества по ошибкам спутникового ГЭЦТ и общие сквозные для международных линий связи ЦСИС

Параметры качества	Общие нормы на сквозную линию (Примечание 4)	Нормы для спутникового ГЭЦТ (Примечание 4)
(а) Минуты пониженного качества (Примечания 1, 2)	Коэффициент ошибок хуже, чем 1×10^{-6} в течение менее 10% 1-минутных интервалов (Примечание 3)	Коэффициент ошибок хуже, чем 1×10^{-6} в течение менее 2% 1-минутных интервалов (Примечание 4)
(б) Секунды, пораженные ошибками (Примечание 1)	Коэффициент ошибок хуже, чем 1×10^{-3} в течение менее 0,2% 1-секундных интервалов	Коэффициент ошибок хуже, чем 1×10^{-3} в течение менее 0,03% 1-секундных интервалов
(с) Секунды с ошибками (Примечание 1)	Ошибки могут появляться в течение менее 8% 1-секундных интервалов (соответствует 92% секунд без ошибок)	Ошибки могут появляться в течение менее 1,6% 1-секундных интервалов (соответствует 98,4% секунд без ошибок)

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Термины "минуты пониженного качества", "секунды, пораженные ошибками" и "секунды с ошибками" используются, как обычно, и представляют собой "идентификатор" показателя качества. Их использование не предназначено для определения доступности или, другими словами, уровня качества.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – 1-минутные интервалы, указанные выше, получены посредством исключения времени неготовности и секунд, пораженных ошибками, из общего времени и последующего группирования оставшихся секунд в блоки по 60.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Из практических соображений, при скорости 64 кбит/с, минута, содержащая 4 ошибки (что соответствует коэффициенту ошибок $1,04 \times 10^{-6}$), не считается минутой пониженного качества. Однако это не означает снижения нормы на коэффициент ошибок, равной 1×10^{-6} .

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Общие нормы качества для сквозного соединения и для спутникового ГЭЦТ выражаются в единицах времени готовности (см. § 2.1.5).

Для кратковременных ошибок (см. Примечание 1) (т. е. ВОБ 10^{-3}) в этих моделях использовалось значение 0,2% времени месяца (общее время) при коэффициенте готовности, определяемом параметрами распространения, равном 10% (§ 2.1.5 и § 3).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Понятие "кратковременный" относится к периоду времени, когда качество передачи на спутниковом участке соединения существенно ухудшено (т. е. коэффициент ошибок $> 1 \times 10^{-3}$). Слово "долговременный" относится к периоду времени, когда качество передачи на спутниковом участке соединения ухудшено незначительно (т. е. коэффициент ошибок $\leq 1,0 \times 10^{-6}$).

ТАБЛИЦА 2

Норма	Показатели	
	Общее время (%)	Время готовности (%)
Минуты пониженного качества	2,05	1,87
Секунды с ошибками	1,74	1,56
Секунды, пораженные ошибками	0,204	0,024

2.1.4 Рассмотрение спутниковой передачи

Качество работы спутниковой линии передачи зависит от различных факторов. Одним из наиболее значительных факторов является воздействие на сигнал возмущений в среде распространения радиоволн. С использованием методики, разработанный 3-й Исследовательской комиссией (экс. ИК5), можно предсказать воздействие возмущений в среде распространения радиоволн на передачу цифровых сигналов.

В части 4 приведены результаты вычислений, позволяющие сравнить качество трех различных международных цифровых спутниковых систем. Эти вычисления приведены для того, чтобы было понятно влияние условий распространения на зависимость значений кратковременных ВОБ от времени в практических системах. Пределы показателей качества, относящиеся к различным моделям, показаны на рисунке 4.

Следует отметить, что можно разработать качественные показатели канала передачи цифровых спутниковых систем, теоретически удовлетворяющие любым нормам на качество. Однако, использование кодирования с упреждающей коррекцией ошибок, регулирования мощности и пространственного разнесения, позволяющих существенно улучшить показатели качества, имеет обратную сторону в виде уменьшения пропускной способности и/или повышенной стоимости. Следовательно, для использования таких методов требуются серьезные причины.

4-я Исследовательская комиссия по радиосвязи понимает, что требуются дополнительные исследования влияния возмущений среды распространения на качественные показатели спутникового цифрового канала передачи и приветствует предоставление информации по этой проблеме.

2.1.5 Показатели готовности и секунды, пораженные ошибками

При разработке модели качественных показателей, отвечающих требованиям Рекомендации МСЭ-T G.821, описанных в § 4, необходимо рассмотреть пропорциональные соотношения времени, в течение которого линия считается находящейся в состоянии готовности. Определение времени неготовности, которое, обычно, используется, гласит:

Период неготовности начинается, когда КОБ в каждой секунде остается хуже, чем 1×10^{-3} в течение 10 последовательных секунд. Эти 10 секунд рассматриваются как время неготовности. Время неготовности заканчивается, когда КОБ в каждой секунде остается лучше, чем 1×10^{-3} в течение 10 последовательных секунд. Эти 10 секунд рассматриваются, как время готовности и могут входить в нормы для секунд, пораженные ошибками. Чрезмерно большой КОБ является только одним из факторов, вносящих вклад в определение времени неготовности. Определения, относящиеся к готовности, имеются в Рекомендации МСЭ-T G.106.

Готовность должна быть принята в расчет при разработке спутниковых линий передачи, для которых во время осадков вероятно появление периодов ослаблений, превышающих величину запаса в системе. Это, в частности, является верным для частот выше 10 ГГц, и результаты исследований распространения радиоволн иллюстрируют этот факт.

Результаты измерений распространения радиоволн, показывающие наличие затухания, не приводящего к определению времени неготовности, приведены в Рекомендации МСЭ-R S.579. Сделанный вывод показывает, что на практике общее время, когда уровни ослабления, вероятно, приведут к величине КОБ хуже, чем 10^{-3} , составляет только 10% от времени, определенного по критериям МСЭ-T как "время готовности". Остаток будет представлять собой время неготовности. Это предполагает, что "фактор готовности, обусловленный условиями распространения" равен 10%. Например, если для 0,2% общего времени $ВОВ = 1 \times 10^{-3}$ или хуже, то, из-за характеристик распространения, только 10% этого времени или 0,02% можно считать временем готовности. Это позволяет получить "кратковременный" критерий качества в виде $ВОВ = 1 \times 10^{-3}$ для 0,2% общего времени.

Нормы на неготовность спутникового ГЭЦТ, обусловленную характеристиками оборудования и условиями распространения, приведены в Рекомендации МСЭ-R S.579. В качестве показателя неготовности ГЭЦТ из-за неготовности оборудования предложено временно использовать значение 0,2% в год, тогда как для неготовности из-за условий распространения предложено временно использовать значение 0,2% наихудшего месяца.

В Рекомендации МСЭ-R S.579 содержатся данные измерений показателей готовности из-за влияния условий распространения, из которых видно, что для низких "коэффициентов готовности" и для различных мест расположения и климатических условий процент времени неготовности может превышать 0,2% времени месяца, для рассматриваемых уровней ослабления. В любом случае, допуск на общее время неготовности, из-за условий распространения, не должен быть меньше, чем кратковременные нормы, выполнение которых удовлетворяет требованиям Рекомендации МСЭ-T G.821, т. е. 0,2% месяца. Следовательно, рекомендуется, что для частот ниже 15 ГГц это значение должно быть установлено в Рекомендации МСЭ-R S.579.

Однако для подтверждения представительного процентного значения для различных полос частот, углов места и климатических зон требуются дальнейшие исследования распространения радиоволн.

Наконец, рассматривая готовность системы передачи (использующей такие методы, как МДВР), следует отметить, что готовность системы может отличаться от показателей готовности из-за условий распространения радиоволн, учитывающих потерю синхронизации, когда в течение нескольких секунд уровень сигнала падает ниже некоторого порога синхронизации (обычно, 10^{-2}). Хотя в системе МДВР для обнаружения потери синхронизации обычно требуется несколько проходов сигнала, синхронизация не всегда может быть моментально восстановлена при восстановлении уровня сигнала.

Следовательно, могут быть периоды, в течение которых сигнал будет превышать уровень, соответствующий КОБ, лучше, чем 10^{-3} , но, из-за задержки синхронизации в линии связи измеренное значение КОБ может быть хуже, чем 10^{-3} . Эти периоды могут вносить свой вклад в показатель времени неготовности, и уменьшая тем самым время готовности.

В ряде рабочих систем МДВР терминалы выполняли измерения КОБ в единственном слове каждого принимаемого пакета трафика в течение периода времени, не превышающего 1 с. Этот период продолжался 4 с (128 мультикадров) для системы МДВР ЕВТЕЛСАТ. Когда в течение одного периода измерений превышает пороговое значение КОБ 10^{-3} , между приемным и передающим МДВР терминалами передаются сигналы аварийной ситуации. Это влечет за собой передачу конкретных сигнальных последовательностей (биты "a" и "b" устанавливаются в 1 для всех линий связи, затрагиваемых сигналами аварийной ситуации (СИАС)) в направлении международного центра коммутации (МЦК) от каждого из двух терминалов. Эти последовательности могут быть интерпретированы как сообщения о прерывании соединения и могут повлечь за собой рассоединение в затронутых линиях. Для определения влияния аварийных сигналов о высоких значениях КОБ на готовность сети требуются дальнейшие исследования.

2.2 Другие механизмы появления ошибок

Хотя основными механизмами, вносящими вклад в появление ошибок в цифровых спутниковых системах, являются условия распространения и помехи, существуют также и иные механизмы появления ошибок. В данном параграфе дается некоторая информация, относительно частоты и продолжительности таких ошибок, в частности, предназначенная на идентификации ошибок для разработчика спутниковой системы. Действительно, в ходе разработки цифровой линии связи может быть выполнено процентное распределение общих показателей качества между этими механизмами. Однако предполагается, что эти ошибки не приведут спутниковую линию в состояние неготовности, т. е. они будут продолжаться не более 10 с. Более подробная информация о механизмах, вызывающих состояние неготовности, приводится в Рекомендации МСЭ-R S.579.

Указанные далее механизмы определены, как создающие пакеты ошибок:

- коммутация сигнального тракта, выполняемая в ПЧ или РЧ оборудовании земной станции,
- коммутация сигнального тракта, выполняемая в низкочастотном оборудовании земной станции,
- переключение источников питания земной станции,
- коммутация сигнального тракта, выполняемая на борту спутника.

Далее показаны оценки частоты и продолжительности пакетов ошибок, появление которых обусловлено вышеперечисленными механизмами, они сведены в таблицу 3.

ТАБЛИЦА 3

Типичные примеры механизмов создания пакетных ошибок

Влияние	Частота	Продолжительность
ПЧ/РЧ коммутация	1,0 в месяц	150 мс
Неожиданная коммутация	2,0 в месяц	150 мс
Низкочастотная коммутация	1,2 в месяц	2-128 бит

Из таблицы 3 можно сделать следующие выводы:

- Рассматривая линию передачи со скоростью 64 кбит/с в течение 1-минутного периода времени интеграции, можно сделать вывод, что все эффекты, перечисленные в таблице 3, могут привести к нарушению нормы 1×10^{-6} в минуту, что означает, что их воздействие может допускаться в течение некоторого времени, когда допускается превышение величины 10^{-6} .
- Общее количество событий, перечисленных в таблице 3, составляет 4,2 в месяц, следовательно, пониженное качество может быть допущено, в среднем, в течение 0,0097% каждой минуты.
- Каждое из событий, перечисленных в таблице 3, продолжается менее 1 с и, поэтому, в среднем, только 4,2 с в месяц, т. е. 0,0002% времени, будут содержать ошибки, возникающие в результате действия этих эффектов.

4.2 События в месяц составляет только 0,01% минут пониженного качества и 0,00016% секунд, пораженных ошибками, при этом в Рекомендации МСЭ-R S.614 указан запас на безопасность связи, составляющий 0,13% и 0,006% соответственно. Следовательно, не требуется изменения маски, представленной в настоящей Рекомендации, для того чтобы она учитывала возможное появление пакетов ошибок в конкретной спутниковой системе. Если дальнейшие исследования подтвердят существование других механизмов создания пакетов ошибок, может потребоваться изменение существующих сегодня требований к величине КОБ.

2.2.1 Коммутация на ПЧ и РЧ

Ошибки возникают в результате коммутации на ПЧ и РЧ в момент переключения на резервное оборудование, обусловленного отказами или требованиями технического обслуживания.

Для определения частоты таких переключений, необходимо рассмотреть среднее время между отказами (СВМО) для различных компонентов. Отсюда можно вывести количество переключений в месяц. Пример некоторых типичных значений СВМО приведен в таблице 4, где указано также результирующее значение усредненной частоты переключений.

ТАБЛИЦА 4

Типичное число отказов оборудования земной станции

Устройство	СВМО (ч)	Усредненная частота переключений (в месяц)
Усилитель большой мощности (УБМ)	2 000	0,36
Преобразователь вверх	4 000	0,18
Модем	> 4 000	< 0,18
Маломощный усилитель (МШУ)	8 000	0,09
Цепи после МШУ	50 000	0,01
Преобразователь вниз	4 000	0,18
Всего		1,0

Цифра "всего", указанная в таблице 4, относится к линии передачи в одном направлении, включающей в свой состав одну передающую и одну приемную земные станции. Это, конечно, не учитывает того факта, что некоторые месяцы статистически будут хуже, чем это среднее значение. Для того, чтобы учесть эти требования, возможно, необходимы дальнейшие исследования.

Продолжительность каждого переключения составляет, как правило, 150 мс, включая время реагирования цепи управления.

2.2.2 Низкочастотная коммутация

Поскольку в настоящее время использование цифрового низкочастотного оборудования достаточно ограничено, в распоряжении исследователей имеется очень мало экспериментальных данных, из которых можно получить параметры отказов. Единственная имеющаяся информация относится к оборудованию МДВР, которое, как ожидается, будет иметь общее СВМО порядка 3000 ч для центрального терминала и 2000 ч для модулей интерфейса. Соединив эти цифры, получим всего 0,6 отказа в месяц для полной линии. Эта цифра может быть достигнута при помощи использования современных методов проектирования.

Время переключения, в течение которого возникает отказ, является очень коротким, но его влияние на трафик может продолжаться несколько дольше. Результатом может быть некоторое значение – от 2–3 ошибок в битах до потери целого мультикадра, т. е. 128 битов в любом канале со скоростью 64 кбит/с.

2.2.3 Переключения источников питания

Влияние этих переключений очень трудно оценить количественно. Наилучшими доступными данными является то, что в ПЧ/РЧ оборудовании, в среднем, число переключений, которые являются результатом этого вредного влияния, вдвое больше, чем число реальных отказов оборудования. Следовательно, на основании данных о ПЧ/РЧ, указанных выше, можно добавить еще два переключения в месяц.

2.2.4 Коммутация тракта сигнала на борту спутника

Хотя в настоящее время нет никаких данных о влиянии этого события, считается маловероятным, что оно будет случаться также часто, как и коммутация тракта на земной станции. Однако все может измениться с повышением сложности вводимых в действие спутников, особенно таких, в которых используется коммутация и обработка на борту, и, следовательно, этот предмет требует дальнейших исследований.

2.2.5 Влияние переключений оборудования на параметры, определенные в Рекомендации МСЭ-T G.821

В ходе испытаний, проведенных на спутнике TELECOM-1, связывающем станции Берсенай-на-Оти и Тру-Бирон, наблюдалось, что переключение оборудования земной станции воздействует на параметры, определенные в Рекомендации МСЭ-T G.821, следующим образом:

	Секунды, пораженные ошибками	Секунды с ошибками	Минуты пониженного качества
Параметрический усилитель	2	2	0
Модем	2	2	0

По этому вопросу требуется дополнительная информация, особенно относительно влияния, оказываемого другим ПЧ/РЧ оборудованием.

3. Вычисление показателей качества по ошибкам и модели

3.1 Введение

В данной части описывается метод, при помощи которого показатели качества линии связи выраженные в единицах ВОБ относительно распределения процента времени, могут быть оценены в единицах параметров, содержащихся в таблице 1. Процедура определения показателей качества описывается в § 3.2, тогда как в § 3.3 показаны несколько моделей зависимостей ВОБ от процента времени, которые удовлетворяют требованиям Рекомендации МСЭ-T G.821, основанным на обобщенных характеристиках "реальных" систем.

3.2 Метод вычислений

Первым важным предположением является то, что качество спутниковой линии ограничивается механизмами, имеющими случайные характеристики. Это предположение дает возможность использовать для вычисления вероятности появления данного количества ошибок или пакетов ошибок в течение данного промежутка времени с данной вероятностью ошибки в бите или пакете ошибок подход на основе закона Пуассона или на основе биномиального распределения. Для диапазона цифровых значений интересующих нас параметров биномиальное распределение и закон Пуассона совпадают.

Полученные данные показали, что предположение о случайном возникновении ошибок или пакетов с ошибками является правильным. Пример, показанный в § 5, был представлен на собраниях МСЭ-R, он, как и остальные примеры подтверждают правильность этого предположения. Кроме того, в § 5 содержится информация об уходе распределения возникновения ошибок от случайного распределения в результате использования схемы упреждающей коррекции ошибок.

Для того, чтобы оценить качество линии относительно удовлетворения требований Рекомендации МСЭ-T G.821, необходимо создать модель качества линии связи, выраженную в единицах ВОБ относительно процента времени. После создания модели линии можно выполнить вычисления для определения того, удовлетворяет ли конкретная модель критериям секунд, пораженных ошибками, указанных в Рекомендации МСЭ-T G.821. Это выполняется при помощи подразделения оси процента времени на небольшие интервалы, на протяжении которых ВОБ остается неизменной для этих малых интервалов, вычисления вероятности появления различных промежутков времени с ошибками для этих ВОБ, умножения этого значения на продолжительность временного интервала, и сложения вероятностей для каждого интервала с ошибками, и, наконец, сравнения результирующей общей вероятности с величиной критериев.

Для иллюстрации методики вычислений, проценты секунд с ошибками (СО), секунд, пораженных ошибками (СПО), и минут пониженного качества (МПК) определяются следующим образом:

- a) разделить ось времени рассматриваемой модели на множество таких участков, где кривую можно аппроксимировать ступенчатой функцией. Каждому интервалу ступеньки соответствует постоянное значение ВОБ;
- b) для значения ВОБ на каждой ступеньке определить из рисунка 1 или 2 вероятность СО, СПО или МПК по обстановке;
- c) эта вероятность, умноженная на процент времени этого элементарного участка, дает в результате значения СО, СПО и МПК для данного интервала;
- d) сумма всех слагаемых дает в результате процент СО, СПО или МПК.

Шаги a) – d) можно математически выразить следующим образом:

$$\text{Всего для всех явлений} = \sum [(1 - P(E, N, \text{ВОБ})) \cdot \Delta T]$$

где:

ΔT : временной интервал ступеньки ступенчатой функции

$P(E, N, \text{ВОБ})$: вероятность конкретного параметра

E : порог ошибки

N : количество битов рассматриваемого показателя качества на временном интервале

ВОБ : вероятность ошибки в бите;

- e) для того, чтобы учесть вклад, вносимый периодами, в течение которых ВОБ превышает 10^{-3} , но которые все же относятся ко времени готовности (см. § 2.1.5), к общей величине для СПО необходимо прибавить дополнительное слагаемое;
- f) окончательные результаты можно выразить в процентах от времени готовности. При этом результаты получаются в виде показателей качества, указанных в Рекомендации МСЭ-T G.821, и могут быть сравнены с ними.

Зависимости на рисунках 1 и 2 были вычислены с использованием следующей формулы распределения Пуассона:

$$P(E \text{ или меньшего числа ошибок}) = \sum_{K=0}^E \frac{(N \cdot \text{ВОВ})^K \cdot (e^{-N \cdot \text{ВОВ}})}{K!},$$

где:

N : количество битов в течение желаемого времени интеграции, например, $64\,000 \times 60$ в течение 1-минутного интервала

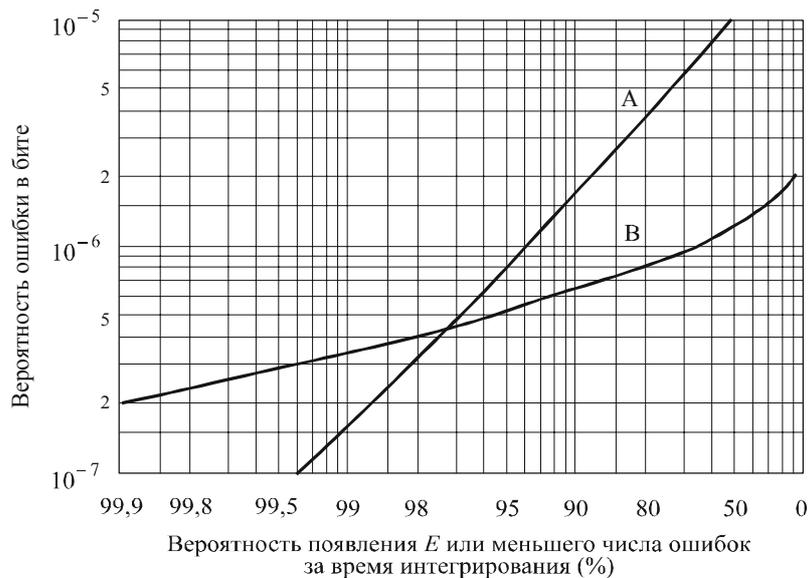
E : порог ошибки

ВОВ : вероятность ошибки в бите.

3.3 Качество моделей

При использовании описанного выше процесса преобразования можно определить количество различных моделей качественных показателей спутниковой системы, которые будут удовлетворять или превышать нормы, приведенные в Рекомендации МСЭ-T G.821. Четыре таких модели показаны на рисунке 3.

РИСУНОК 1



Кривая А: Вероятность безошибочных секунд, т. е.

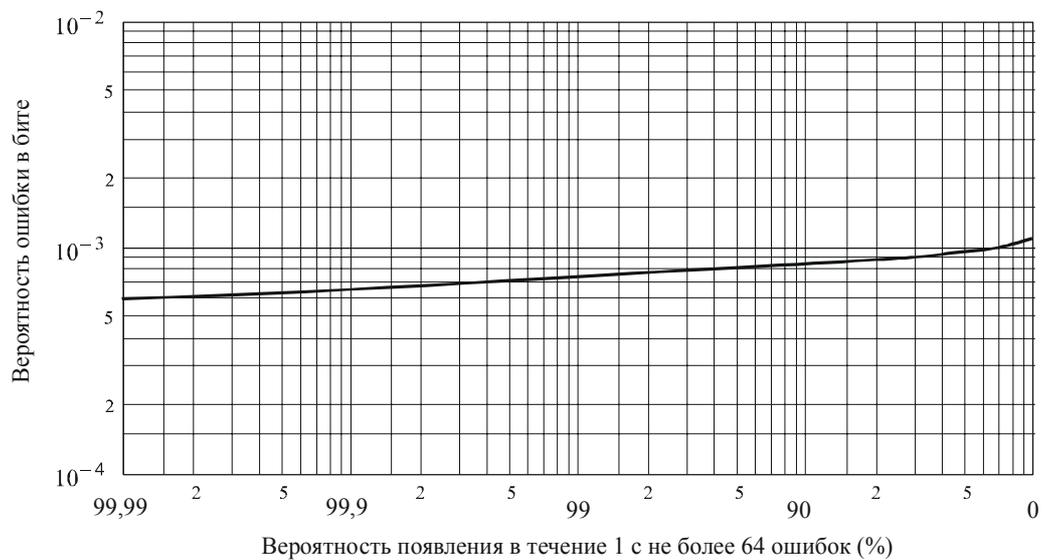
(1 — вероятность появления секунд с ошибками)

В: Вероятность того, что в течение минуты будет не более 4-х ошибок

(1 — вероятность минут пониженного качества)

РИСУНОК 2

Вероятность того, что количество ошибок в течение 1 с не превысит 64

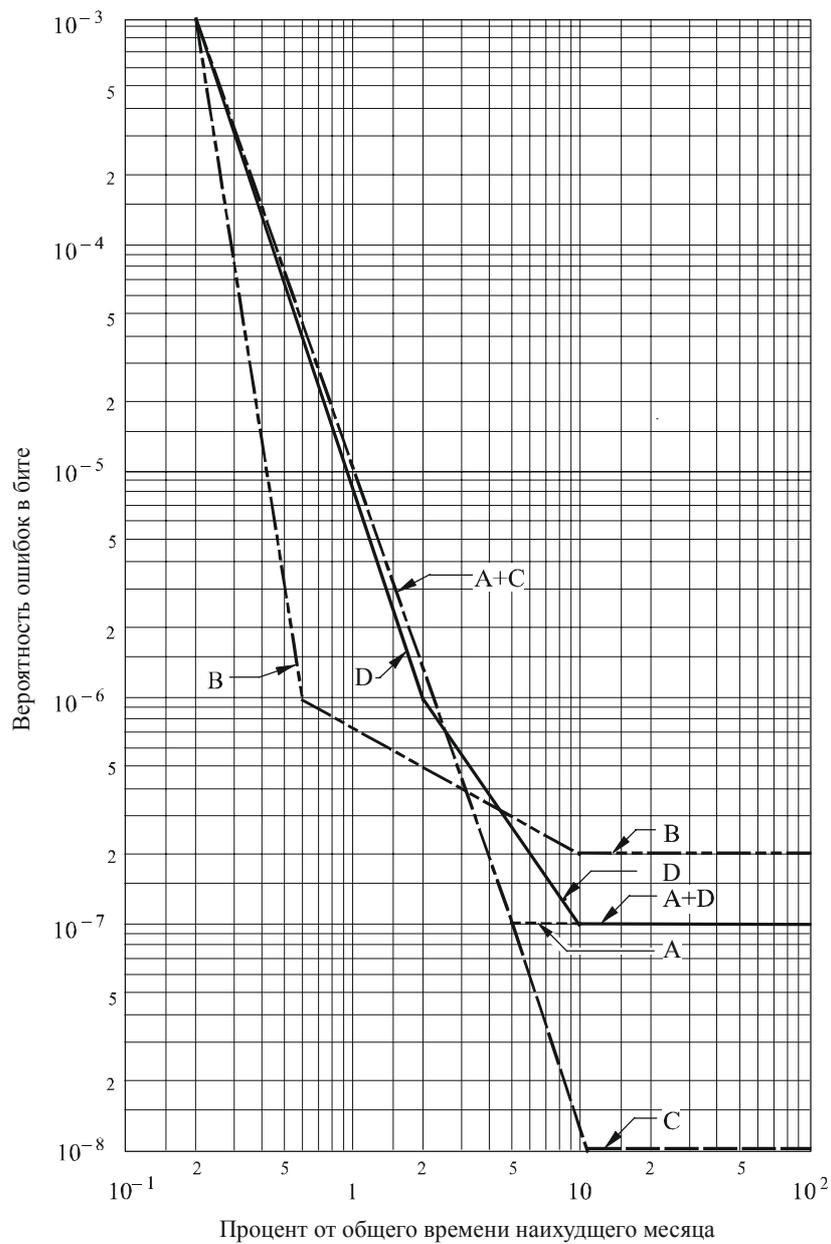


Примечание 1. — Вероятность появления в течение 1 с не более 64 ошибок эквивалентна (1 – вероятности секунд, пораженных ошибками)

0614-02

РИСУНОК 3

Модели показателей КОБ, соответствующих требованиям
Рекомендации МСЭ-T G.821



A: модель a)

B: модель b)

C: модель c)

D: модель d)

0614-03

Основными точками долговременных значений для этих моделей (выраженными в единицах общего времени наихудшего месяца) являются следующие:

- Модель а): $ВОВ = 1 \times 10^{-7}$ для 95% наихудшего месяца
- Модель b): $ВОВ = 2 \times 10^{-7}$ для 90% наихудшего месяца
 $ВОВ = 1 \times 10^{-6}$ для 99,4% наихудшего месяца
- Модель с): $ВОВ = 1 \times 10^{-8}$ для 89% наихудшего месяца
- Модель d): $ВОВ = 1 \times 10^{-7}$ для 90% наихудшего месяца
 $ВОВ = 1 \times 10^{-6}$ для 98% наихудшего месяца.

Целью создания модели с) на рисунке 3 было определение такой модели, в которой показатель ВОВ оставался на низком уровне (1×10^{-8}) для минимально возможного времени (89% наихудшего месяца). Такая модель была бы применимой для тех случаев, когда качество почти полностью ограничивается ослаблением в дожде (т. е. на частотах выше 10 ГГц). Большой запас на замирания, требуемый в такой ситуации, гарантирует, что для большей части времени достигаются хорошие значения ВОВ. Цель графика (модель а)) состояла в оценке воздействия положения точки перелома для долговременных значений на принятие величины $ВОВ = 1 \times 10^{-7}$. В этом случае было опять для точек перелома графиков принято две маски.

Модель b) предназначена для варианта, при котором допускается наибольшее из возможных долговременных значений ВОВ. В этом случае кривая содержит дополнительную точку перегиба при $ВОВ = 10^{-6}$ для 99,5% времени месяца для моделей системы, наиболее близких по качественным показателям к данным процентам времени. Такая модель, вероятно, будет приемлемой в ситуациях с небольшим ослаблением в дожде или когда в системе имеются ограничения на внутренние или внешние помехи.

В модели d) достигается компромисс между требованиями к системам с ограничениями по условиям распространения и аналогичными требованиями к системам с ограничениями по помехам. Считается возможным, что эта модель удовлетворяет требованиям по емкости разрабатываемых спутниковых систем без проигрыша в стоимости и пропускной способности.

Общей для всех четырех моделей является точка (0,2%, 1×10^{-3}), и важно определить, как эта точка позволяет моделям соответствовать нормам по СПО, указанным в § b) Рекомендации МСЭ-Т G.821. Эта норма составляет 10^{-3} для 99,97% времени готовности наихудшего месяца. В соответствии с определением, данным в Рекомендации МСЭ-Т G.821, период, продолжительностью десять и более последовательных секунд, пораженных ошибками (т. е. секунды, для которых КОБ хуже, чем 1×10^{-3}) считается временем неготовности. Промежутки, продолжительностью девять последовательных секунд и менее, включаются во время готовности. Определение процента времени неготовности можно вывести из Рекомендации МСЭ-R S.579.

Качественные показатели этих четырех моделей в параметрах, выбранных в Рекомендации МСЭ-Т G.821, сведены в таблицу 5. В этой таблице для каждого параметра, указан процент времени месяца, который является временем готовности. Для получения результатов, представленных в таблице, из общего времени было вычтено время неготовности. Поскольку Рекомендация МСЭ-Т G.821 касается процентов времени готовности, форма этой таблицы такова, что ее удобно использовать для проведения сравнения параметров качества с требованиями Рекомендации МСЭ-Т G.821.

Значения, показанные в таблице 5, были рассчитаны для основании точек перегиба кривых для кратковременных снижений качества (т. е. КОБ = 1×10^{-3}) в течение 0,2% от общего времени и для коэффициента готовности, определяемого условиями распространения = 10%.

Из таблицы 5 легко увидеть, что между моделью b) и другими моделями существуют значительные различия, что почти все параметры моделей а), с) и d) одинаково соответствуют нормам Рекомендации МСЭ-Т G.821, тогда как, качественные показатели модели b) почти полностью отвечают требованиям к количеству секунд, пораженных ошибками.

Очевидно, что любые нормы на проектирование спутниковых систем могут быть выражены в единицах общего времени (как это делалось в прошлом) или в единицах времени готовности. Принципиальной выгодой принятия последнего подхода является то, что здесь можно почти мгновенно определить, соответствуют ли параметры нормам Рекомендации МСЭ-Т G.821, поскольку при этом не требуется делать никаких предположений относительно времени неготовности. В том

случае, когда разработчику не требуется знание процентов от общего времени, он может использовать коэффициент преобразования, соответствующий рассматриваемым полосе частот и климатической зоне. Это во многих случаях может привести к нормам, которые не настолько жесткие, как нормы для "общего времени", хотя в их состав включается предположение о "проценте времени неготовности".

ТАБЛИЦА 5

Норма	Показатель качества (% от времени готовности)				
	Рек. МСЭ-Т G.821	Модель а)	Модель b)	Модель с)	Модель d)
Минуты пониженного качества	2,0	1,97	0,75	1,97	1,87
Секунды с ошибками	1,6	1,59	1,60	1,06	1,56
Секунды, пораженные ошибками	0,03	0,024 ⁽¹⁾	0,022 ⁽¹⁾	0,024 ⁽¹⁾	0,024 ⁽¹⁾

(1) Три знака после запятой использованы в этих значениях для обозначения вклада, вносимого в секунды, пораженные ошибками суммарным временем, когда КОБ $\leq 1 \times 10^{-3}$.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения в этой таблице приведены только для демонстрации совместимости с Рекомендацией МСЭ-Т G.821. конкретных изучаемых моделей. При использовании различных моделей были получены различные величины.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Следует отметить, что если разработчик спутниковой системы при вычислениях основывается непосредственно на одной из моделей показанного типа, показатели качества этой системы будут превышать значения, полученные в ходе вышеприведенных вычислений. Это происходит потому, что в большинстве мест характеристика зависимости ВОБ от % времени реальных систем может значительно превышать параметры модели.

3.4 Практические процедуры измерений

3.4.1 Введение

Испытание сети, как правило, направлено на проверку того, соответствуют ли сети параметрам качества, выраженным в единицах параметров из Рекомендации МСЭ-Т G.821 (СО, СПО и МПК). Следовательно, рекомендуется эти параметры везде, где возможно измерять непосредственно в соответствии с Рекомендацией МСЭ-Т G.821, а не определять значения КОБ в соответствии с данной Рекомендацией.

Однако может потребоваться также измерить значения КОБ спутниковой системы для того, чтобы сравнить их с величинами КОБ, указанными в § 1 раздела *рекомендует*.

Это также может позволить оценить взаимосвязь между измерениями КОБ и измерениями параметров Рекомендации МСЭ-Т G.821. Если это именно этот случай, рекомендуется работать в соответствии с процедурой измерения значений КОБ в зависимости от времени, поскольку период интеграции влияет на получаемые результаты. На рисунке 4 показано как этот принцип для вариантов времени интеграции 2 ч, 1 ч, 15 мин, 1 мин, 10 с, 2 с и 1 с применяется к одному и тому же множеству измеренных данных.

Приведенные далее алгоритмы предлагается использовать для того, чтобы гарантировать возможность сравнения результатов, полученных в ходе различных испытаний.

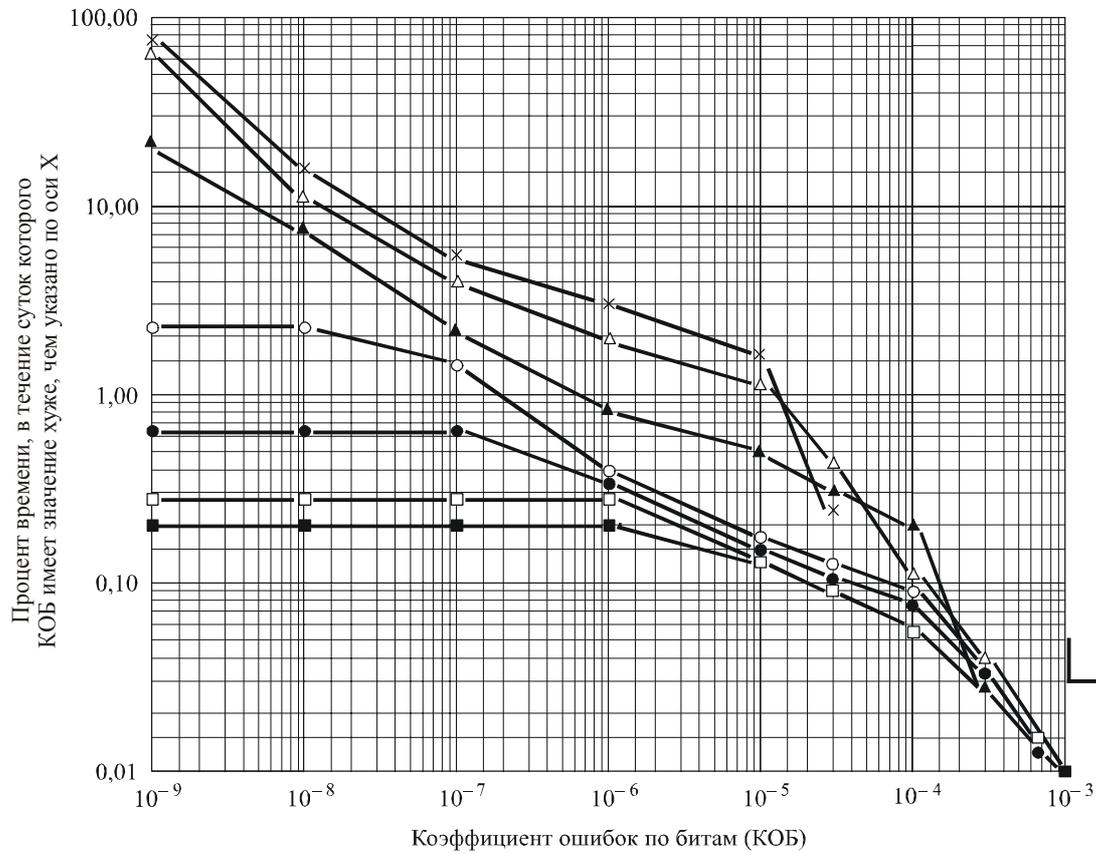
3.4.2 Алгоритм измерений

Для этой цели было разработано два алгоритма, а именно:

- a) Алгоритм сбора данных, который является общим алгоритмом, типичным для испытания собственно оборудования. Следовательно, этот алгоритм подобен тому, что используется для тестирования большинства современного оборудования.
- b) Алгоритм анализа данных.

РИСУНОК 4

Исследование взаимосвязи между измерениями КОБ и измерениями параметров по Рекомендации МСЭ-T G.821

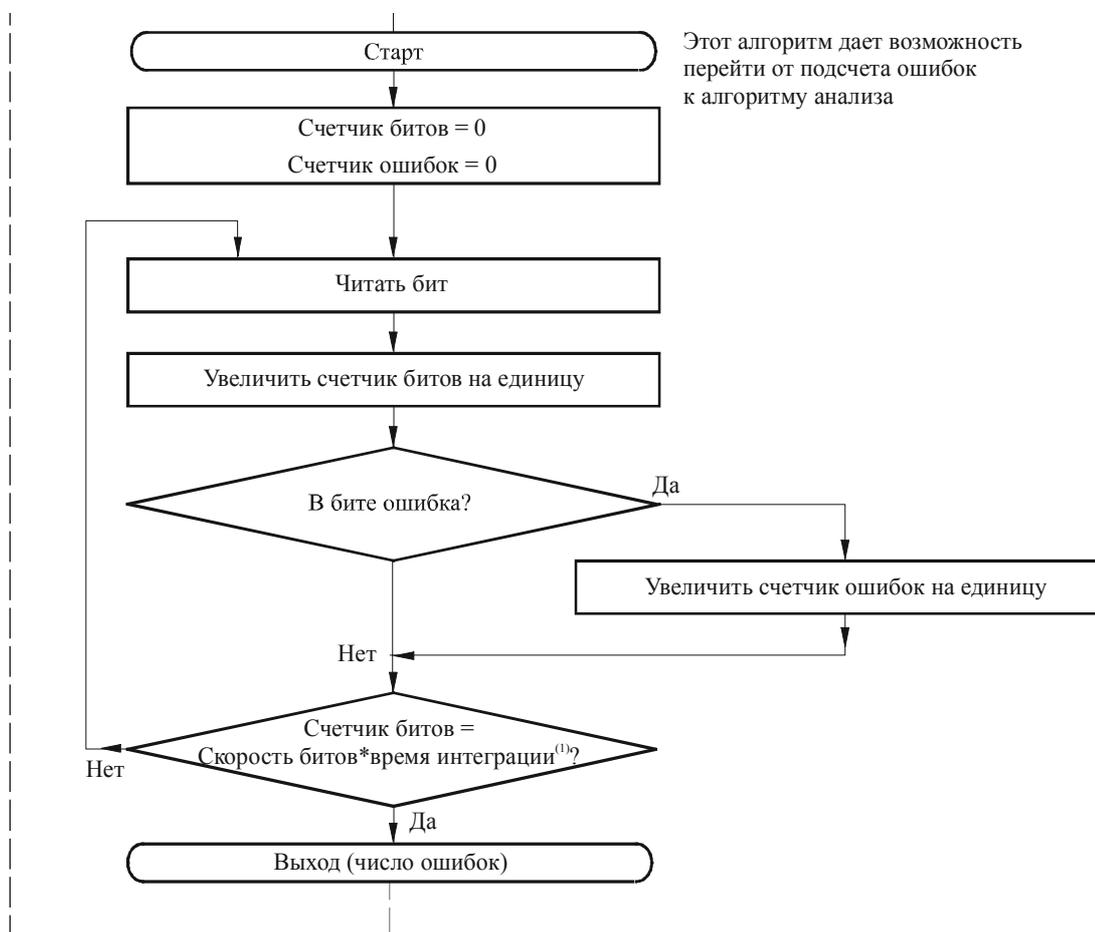


- 1 с
- 2 с
- 10 с
- 1 мин
- ▲ 15 мин
- △ 1 ч
- × 2 ч
- └ Значения, указанные в данной Рекомендации

0614-04

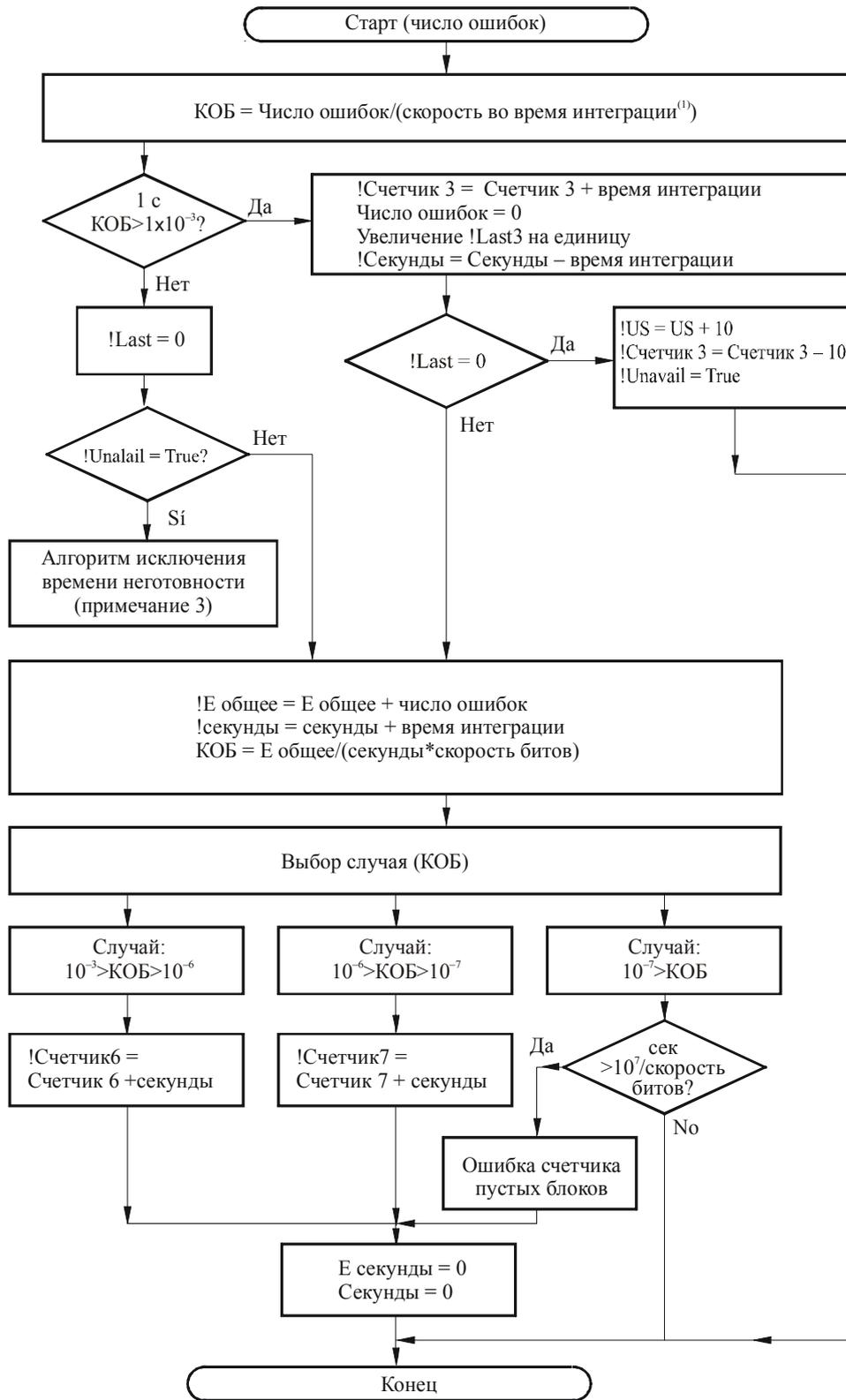
Важно, что в каждом алгоритме используется одно и то же время интеграции (и скорость цифрового потока). Далее приведены описания каждого алгоритма:

а) Алгоритм сбора данных



⁽¹⁾ Этот алгоритм был составлен в предположении, что используется время интеграции 1 с, что позволяет объединить данную Рекомендацию с принципами Рекомендации МСЭ-T G.821

b) Алгоритм анализа данных



⁽¹⁾ Этот алгоритм был составлен в предположении, что используется время интеграции 1 с, что позволяет объединить данную Рекомендацию с принципами Рекомендации МСЭ-T G.821

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Использование знака "!" перед названием переменной в вышеприведенном алгоритме указывает на то, что эта переменная должна рассматриваться как статичная, то есть, перед каждым вызовом этой процедуры в течение любого испытания это значение должно быть сохранено. Знак "!" для данной переменной, обычно, показывается только один раз, и эта переменная всякий раз, когда она появляется, должна обрабатываться одинаково.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Для того, чтобы можно было исключить периоды, в течение которых нет ошибок, требуется величина 10^7 /скорость цифрового потока.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 – Эта процедура требуется для исключения периодов неготовности из анализа КОБ до тех пор, пока снова не восстановится режим готовности. Более подробная информация приведена в Рекомендации МСЭ-T G.821. При возвращении в режим готовности, как он определен в Рекомендации МСЭ-T G.821, переменная !Unavail должна быть выставлена в значение "false".

ПРИМЕЧАНИЕ 4 – Эта процедура может использоваться при любой скорости передачи. Наилучшее из возможных сравнение между Рекомендацией МСЭ-T G.821 и Рекомендацией МСЭ-R S.614 получается при измерении линии со скоростью 64 кбит/с.

ПРИМЕЧАНИЕ 5 – Эти три показания счетчика (!Счетчик 3, !Счетчик 6 и !Счетчик 7) следует поделить на общую продолжительность измерений и затем умножить на 100 для того, чтобы получить величину процента времени для каждого значения КОБ (10^{-3} , 10^{-6} и 10^{-7}) для сравнения с нормативными параметрами, указанными в Рекомендации МСЭ-R S.614, например,

$$\% \text{ времени для каждого КОБ} > 1 \times 10^{-3} = \frac{!Счетчик 3}{\text{Продолжительность измерений}} \times 100$$

4. Примеры типичных показателей качества спутниковой линии

В данной части приводятся результаты вычислений предсказанного цифрового качества для трех различных цифровых спутниковых систем передачи:

- 6/4 ГГц ИНТЕЛСАТ-V 120 Мбит/с МДВР,
- 14/11 ГГц ЕВТЕЛСАТ 120 Мбит/с МДВР,
- 14/11 ГГц ИНТЕЛСАТ-V 120 Мбит/с МДВР (при регулировке мощности на линии вверх и пространственном разнесении).

Эти системы были выбраны потому, что они представляют собой существующие, или типичные спутниковые системы, работающие в полосах 6/4 ГГц и 14/11. При проектировании спутниковых сегментов будущих линий связи ЦСИС эти системы могут использоваться в качестве прототипа. В зависимости от различных факторов, таких как угол места, климатическая зона по дождям и помеховая ситуация, могут получаться различные характеристики качества. Разработчик системы при проектировании спутникового ГЭЦТ ЦСИС обязательно должен полностью учитывать факторы такого типа.

Результаты вычисления бюджета линии представляются в виде графиков зависимости вероятности ошибки в бите от процента общего времени наихудшего месяца. С использованием этих графиков, можно лучше понять роль показателей качества ЦСИС в разработке спутниковых систем.

В параграфе 4.3 приведены также результаты измерений, выполненных в канале передачи со скоростью 64 кбит/с на линии между станциями Берсенай-на-Оти (Франция) и Тру-Бирон (Французская Гайана). Измерения проводились более года, в среднем в месяц делалось 445 часовых записей.

4.1 Модель ослабления

Модель ослабления, использованная в этих работах для вычислений, проводимых в системе ИНТЕЛСАТ-V, создана с применением метода, описанного в Рекомендациях МСЭ-R серии PN. С использованием этого метода можно рассчитать процентные статистические данные о характеристиках ослабления в дожде на путях распространения сигнала в местах расположения земных станций. Эти статистические показатели могут быть получены с использованием нескольких параметров. Это:

- климатическая зона по дождям – особенно точка с количеством осадков для 0,01% от среднего года;
- высота земной станции над усредненным уровнем моря;
- угол места земной станции по направлению на спутник;
- широта земной станции.

С использованием этих параметров вычисляется ослабление в дожде, которое может быть превышено в течение 0,01% времени года. Значения ослабления для других процентов времени года определяется по следующей формуле:

$$A_p = b A_{0,01} P^{-a}$$

где:

- A_p : ослабление в течение данного процента времени года
- $A_{0,01}$: ослабление в течение 0.01% года
- P : желаемый процент времени года
- a и b : постоянные.

Эти цифры о ежегодных значениях ослабления можно связать с ослаблением в течение "наихудшего месяца" при помощи следующего выражения:

$$P_y = 0,29 P_w^{1,15}$$

где:

- P_y : годовой процент
- P_w : процент для наилучшего месяца.

Этот метод был использован для получения графиков зависимости показателей качества ИНТЕЛСАТ-V, показанных на рисунке 5. При получении параметров качества для ИНТЕЛСАТ-V 6/4 ГГц предполагалось, что передача ведется из США в Италию, причем обе станции располагались в климатической зоне по дождям "К", угол места земной станции в США составлял 25°, а угол места земной станции в Италии составлял 21°. В случае, когда ИНТЕЛСАТ работал в полосе 14/11 ГГц передающая земная станция располагалась в Соединенном Королевстве, и угол места составлял 29°, а приемная земная станция опять же располагалась в США с тем же углом места. Земная станция Соединенного Королевства располагалась в климатической зоне по дождям Т "G", а земная станция США опять же располагалась в климатической зоне по дождям "К".

Бюджеты линии ИНТЕЛСАТ-V на частотах 6/4 ГГц учитывали помехи, создаваемые источниками помех, находящихся в наземных и иных системах, а также в смежном и совмещенном каналах. Предполагается четырехкратное использование частот с развязкой по поляризации. Изменения выходной мощности транспондера, вызванные изменениями рабочей точки из-за замираний на линии вверх, были учтены за счет использования нелинейной характеристики передачи транспондера.

В данных исследованиях для системы ИНТЕЛСАТ, работающей в полосе 14/11 ГГц, предполагалось использование непрерывного регулирования мощности на линии вверх в пределах 10 дБ. Далее было сделано предположение о том, что на приемных станциях используется пространственное разнесение с 20-километровым расстоянием между станциями. Здесь также учитывались изменения выходной мощности транспондера, вызванные изменениям рабочей точки из-за замираний на линии вверх. Ни один из графиков для системы ИНТЕЛСАТ не предполагает использования какого-либо кодирования с коррекцией ошибок. Следует отметить, что терминалы МДВР системы ИНТЕЛСАТ имеют возможность применения необязательной системы упреждающей коррекции ошибок, использующей блочный код BCH с коэффициентом 7/8 (128:112), обеспечивающий коэффициент кодирования, равный, как минимум, 3 дБ, для КОБ на входе 1×10^{-4} .

Качественные показатели системы ЕВТЕЛСАТ получены как результат аналогичных вычислений. И использованные статистические данные ослабления соответствуют типичному континентальному климату Европы и основаны на результатах измерений, выполненных с OTS. Эти статистические данные подобны данным, полученным для климата типа "Н" и описанным в Рекомендациях МСЭ-R серии PN, но несколько более оптимистичные.

4.2 Рассмотрение условий распространения относительно норм кратковременных параметров

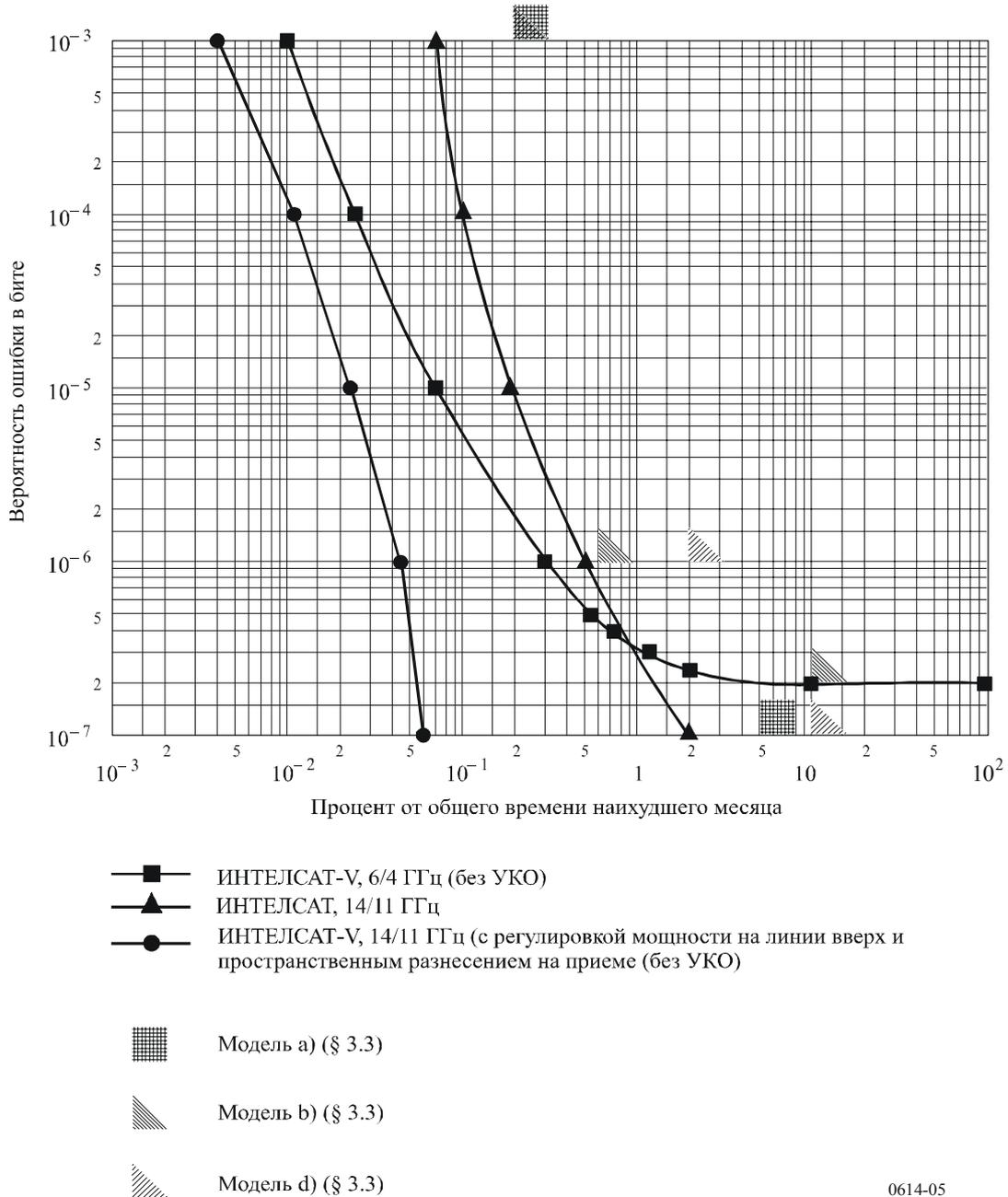
В Рекомендациях МСЭ-R по качественным показателям некоторые кратковременные нормы указаны в процентах от времени года. Долговременные нормы, наоборот, представлены в процентах времени наилучшего месяца. В Рекомендации МСЭ-T G.821 нормы также представлены в процентах от

периода времени порядка одного месяца. Эти факты приводят к тому выводу, что в любой будущей рекомендации по качественным показателям спутниковых участков ЦСИС может потребоваться использовать ежемесячную статистику.

Данные для выполнения такого преобразования содержатся в Рекомендациях МСЭ-R серии PN. Из этих данных можно видеть, что коэффициент преобразования изменяется в зависимости от климата и процента времени. В течение 0,01% времени года, взят коэффициент между 4,5 и 6,5, в зависимости от климата.

РИСУНОК 5

Вероятность ошибки в бите в зависимости от общего времени наихудшего месяца



0614-05

Что касается влияния затухания, ожидаемого на различных частотах, можно сделать некоторые общие наблюдения.

Это:

- для частот ниже 10 ГГц, долговременные значения ВОБ становятся регулирующим фактором в одном из рассмотренных случаев многократного использования частот в полосах 6/4 ГГц;
- для частот от 10–15 ГГц, кратковременное значение (10^{-3}) ВОБ является регулирующим фактором, если не используется разнесение. Были проанализированы оба случая – с разнесением и без разнесения;
- для частот > 15 ГГц, особенно на частотах 30/20 ГГц, кратковременное значение (10^{-3}) ВОБ, по всей вероятности, также является регулирующим фактором. Однако анализ проведен не был.

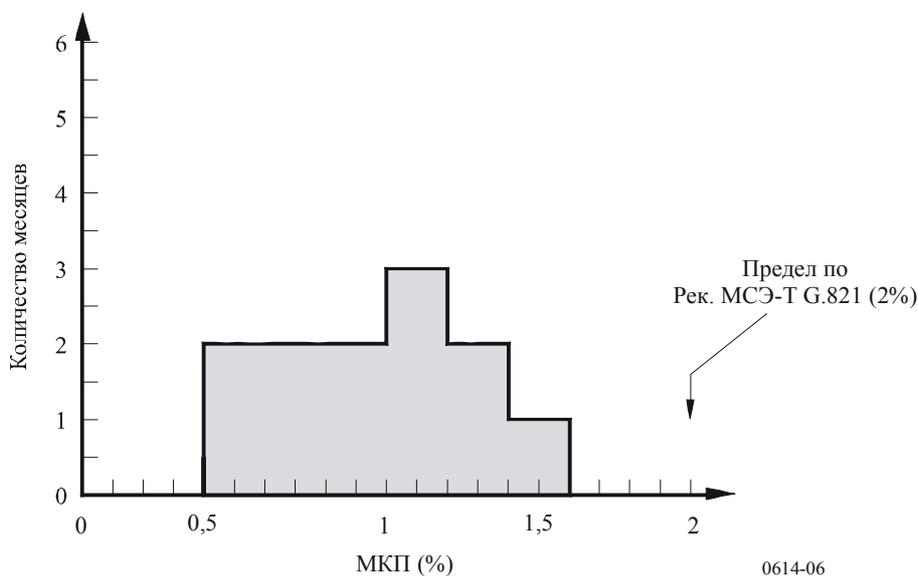
4.3 Результаты измерений на спутнике TELECOM-1

Характеристиками линии связи, подобной модели а) на рисунке 3, были следующие:

- бюджет линии, вычисленный таким образом, чтобы получить коэффициент ошибок лучше, чем 10^{-4} для 99,9% времени, т. е. коэффициент ошибок в условиях чистого неба порядка 10^{-7} ;
- $E_b/N_0 = 14,00$ дБ;
- скорости передачи = 8,768 Мбит/с без прямой коррекции ошибок;
- передача в полосе частот 6/4 ГГц.

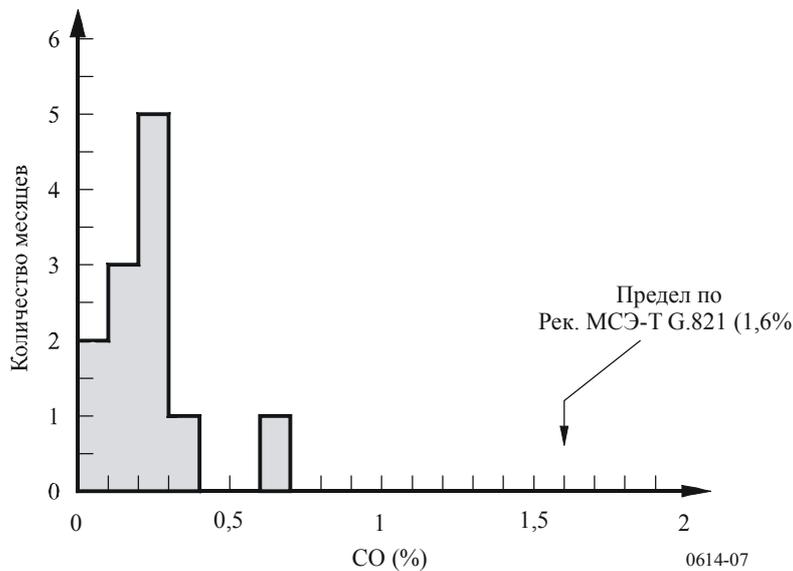
Результаты испытаний показаны на рисунках 6 и 7 для МПК и СО, соответственно. Записанные значения СПО лежали в пределах между 0,01% и 0,02%.

РИСУНОК 6
Распределение по месяцам минут пониженного качества (МПК)



0614-06

РИСУНОК 7
Распределение секунд с ошибками (СО) по месяцам



Эти результаты не охватывают неготовности из-за явления сцинтилляции, встречающегося в экваториальной зоне, где расположена станция Тру-Биран.

В процессе измерений было отмечено, что солнечные помехи вызывают увеличение времени неготовности и повышение числа СПО. (В Рекомендации МСЭ-R S.579 для любого явления, связанного с условиями распространения, указано значение времени неготовности, равное 0,2% времени любого месяца.)

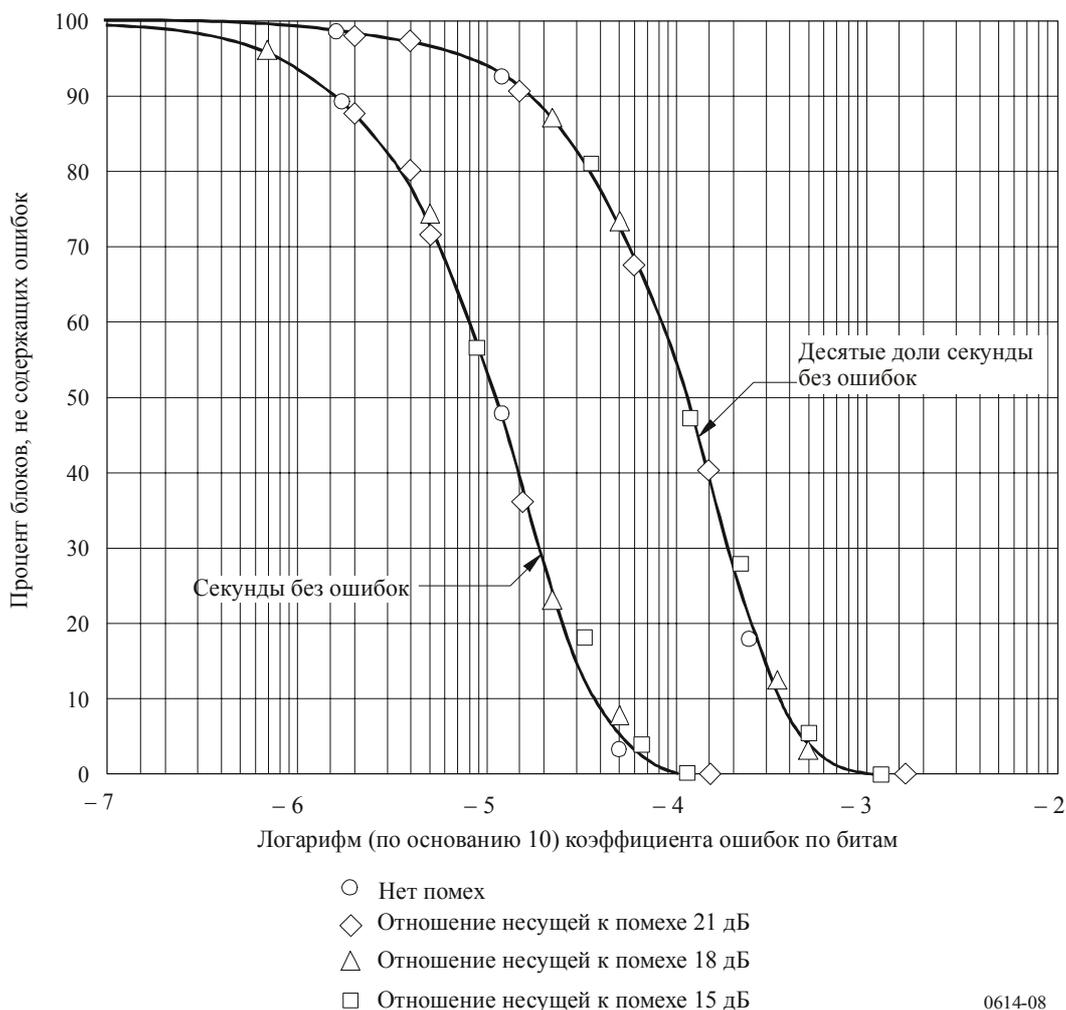
5. Распределение ошибок на спутниковой линии и влияние работы с кодированием и работы с использованием упреждающей коррекции ошибок

5.1 Введение

Метод, для определения того, является ли качество спутниковой линии достаточным для удовлетворения требований Рекомендации МСЭ-Т G.821, описанный в данной части, основывается на предположении о случайном характере ошибок, возникающих в спутниковой линии. Для линий, в которых не используется упреждающая коррекция ошибок (УКО), это предположение, как правило, считается верным. Пример достоверности этого предположения показан на рисунке 8.

РИСУНОК 8

Распределение блоков, свободных от ошибок: 64 кбит/с, кодирование без УКО



Для линий, в которых используется УКО, распределение отдельных ошибок в битах обязательно является "пакетным" или сгруппированным, что обусловлено работой декодера УКО. Ошибки на выходе декодера объединены в группы, разделенные относительно продолжительными интервалами без ошибок. Каждую группу или "событие ошибки" можно определить как промежуток времени, который начинается и кончается ошибкой в бите, и на протяжении которого имеется множество битовых ошибок. Эти "события ошибки" могут быть различной продолжительности, и величина КОБ в пределах этого интервала может достигать значения 0,5. В МСЭ-R представлены данные, из которых видно, что появление таких "событий ошибки" является случайным, а, следовательно, их можно смоделировать с использованием биномиального статистического закона или закона Пуассона.

Пример случайного распределения ошибок показан на рисунке 8. Показаны результаты полевых испытаний, которые сравнивают распределение безошибочных интервалов (БОИ), безошибочных секунд (БОС), безошибочных децисекунд с распределением ошибок в битах по закону Пуассона. Очевидно согласование между результатами измерений и теоретическим распределением. Эти данные демонстрируют также наличие согласования для систем, подверженных воздействию только теплового шума, а также теплового шума и помех. Эти измерения были проведены на спутниковой МДВР линии со скоростью передачи 120 Мбит/с, а также в суб-канале со скоростью 64 кбит/с. Эта система эксплуатировалась в различных условиях помех по смежному каналу, источником которых является аналогичный канал со скоростью передачи 120 Мбит/с.

Было показано, что наибольший вклад в ошибки цифровых спутниковых линий вносят условия распространения и помехи, которые можно описать распределением Пуассона. Однако, когда в цифровом канале используется УКО (применяемая во многих спутниковых системах для улучшения качества), ошибки, появляющиеся на выходе декодера часто объединяются в группы, а, следовательно, по всей видимости, их распределение будет отличаться от закона Пуассона. Этот эффект группирования иллюстрируется результатами измерений БОИ, приведенными на рисунке 9. Степень отклонения от закона Пуассона будет зависеть от конкретных используемых схем кодирования и мультиплексирования.

В данной части даны примеры типичных схем кодирования, показаны результаты измерений, демонстрирующих влияние конкретных схем УКО на цифровую спутниковую линию, и приведены предварительные математические модели, которые могут использоваться для описания пакетного характера ошибок.

5.2 Характеристики типичных схем кодирования с УКО

5.2.1 Кодирование ВСН с коэффициентом 7/8

В настоящее время в цифровых спутниковых системах, например в МДВР системах ИНТЕЛСАТ со скоростью 120 Мбит/с, используется кодирование Боса (Bose), Чаудхари (Chaudhuri) и Хокенгема (Hocquenghem) (ВСН) с коэффициентом 7/8 и УКО. Этот блочный код исправляет до двух ошибок в блоке из 127 битов и может обнаружить три ошибки в таком блоке, но в последнем случае декодер не производит никаких действий. Отсюда, наиболее вероятно, что в блоке ВСН, на выходе декодера будет содержаться три ошибки. В этой схеме, бинарный поток, состоящий из блоков, длиной по 128 битов, реструктурируется на блоки по 112 информационных битов, к которым присоединяется 15 избыточных битов кодирования и один пустой бит, таким образом длина блока остается равной 128 битов. Следовательно, в процессе кодирования 128 последовательных битов конкретного канала со скоростью 64 кбит/с, изначально собранные в группу, будут разделены одним из семи способов:

- | | | | |
|-----------|----------|-----------|----------|
| a) 112:16 | b) 96:32 | c) 80:48 | d) 64:64 |
| e) 48:80 | f) 32:96 | g) 16:112 | |

В итоге, в отдельных каналах может проявляться кластеризация четырех типов, среди которых тип a) и g) являются наиболее ярко выраженными пакетами, а d) – наименее ярко выраженным.

5.2.2 Конволюционное кодирование – декодирование Витерби

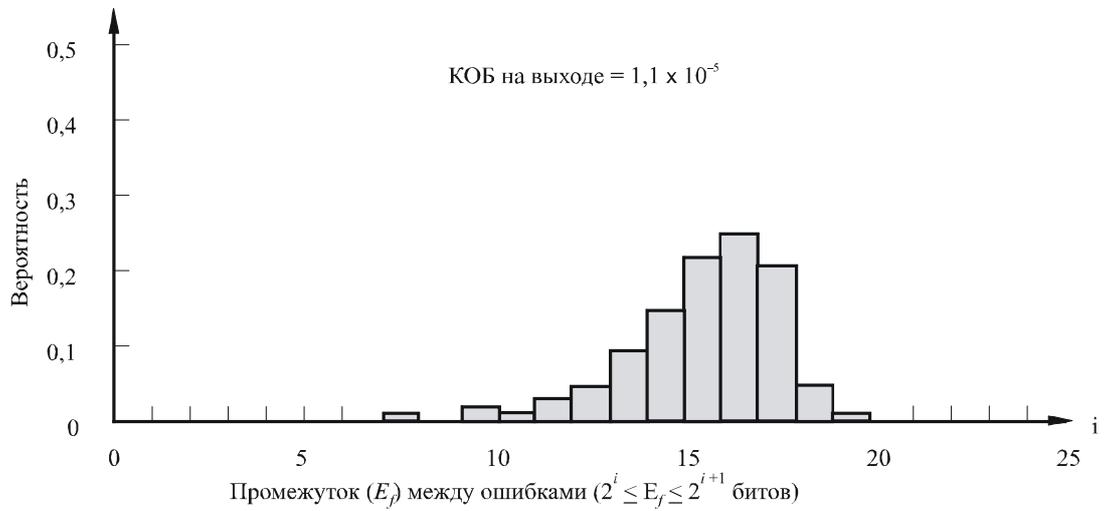
Комбинация методов конволюционного кодирования и декодирования Витерби также является типичной схемой УКО, которая реализована во множестве спутниковых систем.

Этот метод заключается в сохранении в памяти последовательностей цифр и в последующем сравнении этих последовательностей с принимаемым цифровым потоком для определения того, который из них наиболее правилен. Ошибки на выходе декодера возникают из-за выбора неправильной последовательности данных или пути распространения сигнала. Неправильный выбор вызывает появление ошибок на выходе декодера, но эти ошибки не обязательно появляются друг за другом. Продолжительность ошибки зависит от конфигурации кодека, в особенности от объема памяти, выделенной на путь сигнала. При использовании декодирования Витерби с коэффициентом 1/2, кода с 64 состояниями и ограниченной длиной 7, как правило, используется объем памяти на один путь сигнала порядка 37 битов. Этот объем памяти на путь превышает размер любой ошибки, которая может возникнуть с достаточно большой вероятностью.

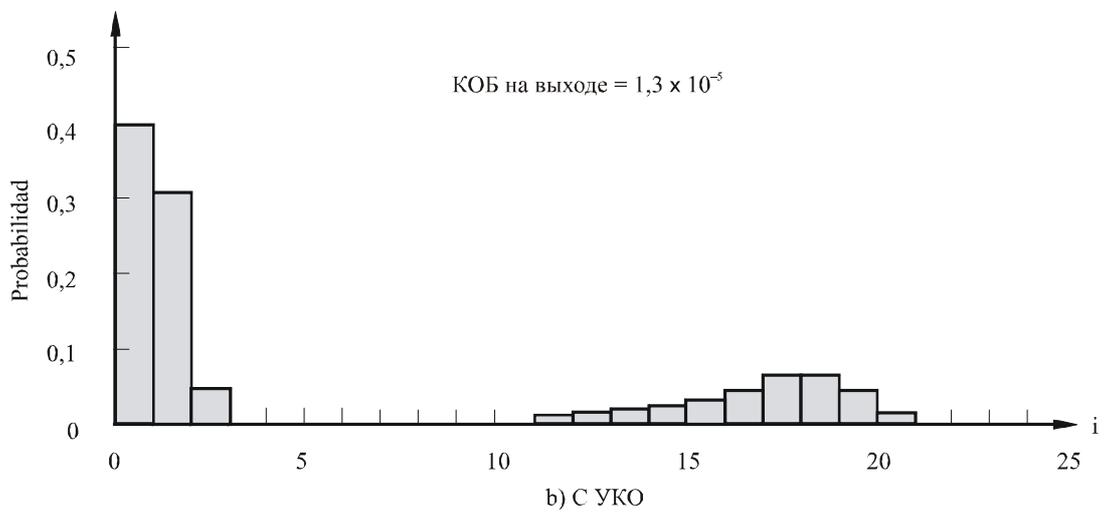
На рисунке 9 приведены типовые результаты экспериментов по исследованию распределения ошибок с использованием кодирования с УКО и без него, выраженные в единицах БОИ.

РИСУНОК 9

Распределение ошибок с использованием и без использования УКО



а) Без УКО (Случайные ошибки)



б) С УКО

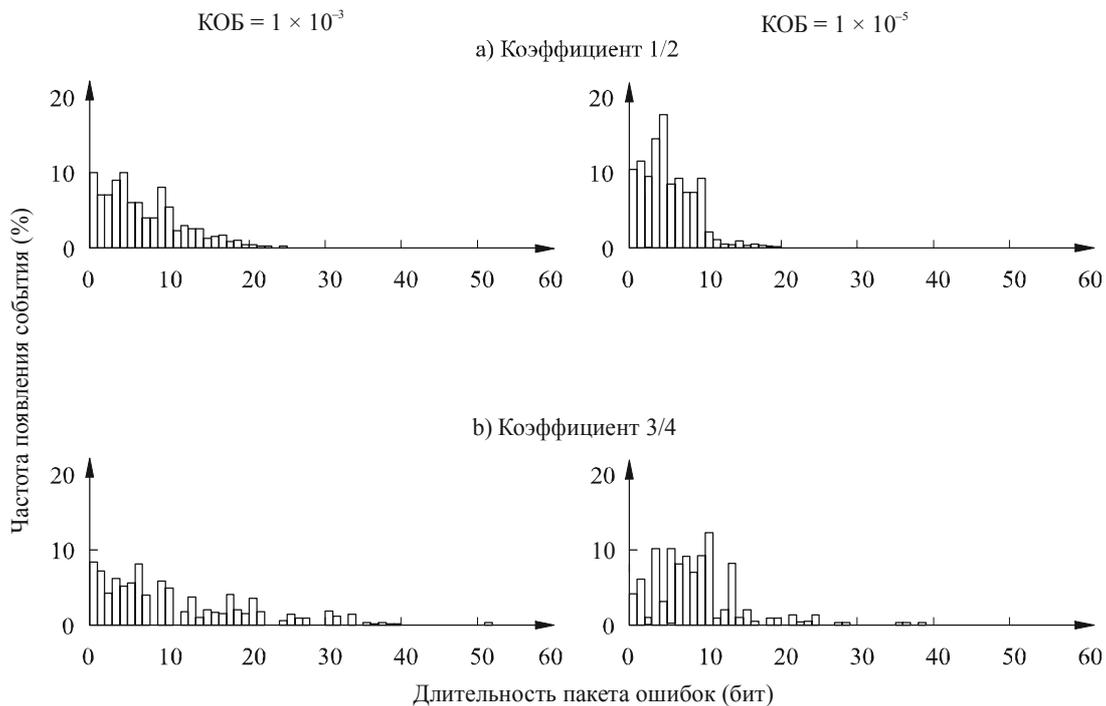
(Конволюционное кодирование с коэффициентом $1/2$ ($K=7$) и декодированием Витерби)

Между ними имеется существенное различие; в первом случае имеется максимум, типичный для случайного распределения, тогда как во втором случае наблюдается два максимума. Первый пик (с правой стороны) показывает распределение интервалов между пакетами ошибок и подтверждает их случайное распределение. Второй пик (слева) показывает распределение ошибок в бите в рамках пакета ошибок.

На рисунке 10 представлены результаты экспериментов по изучению распределения продолжительности пакетов ошибок для кодирования с коэффициентами $1/2$ и $3/4$ при двух значениях КОБ. Продолжительность пакета ошибок определяется как количество битов между первой ошибкой, возникшей в пакете, и последней ошибкой, возникшей в пакете. На рисунке 11 показана взаимосвязь между усредненной продолжительностью пакета ошибок и КОБ после декодирования.

РИСУНОК 10

Распределение значений длины пакета ошибок



(Конволюционное кодирование и декодирование Витерби)

0614-10

Из этих рисунков можно видеть, что с увеличением коэффициента кодирования и КОБ возрастает продолжительность пакетов ошибок. В сущности говоря, усредненная продолжительность пакетов ошибок составляет порядка пяти и десяти битов при коэффициентах $1/2$ и $3/4$ соответственно. Только для небольшого количества пакетов ошибок продолжительность превышает 20 битов. Важно отметить, что не все биты в пакете ошибок являются ошибочными. Можно считать, что процент ошибок в пакете ошибок составляет примерно $1/2$, то есть, в среднем в состав пакета ошибок входит две или три ошибки для кодирования с коэффициентом $1/2$ и около пяти ошибок для кодирования с коэффициентом $3/4$. Указанные выше эксперименты проводились на стандартной земной станции E1 сети ИНТЕЛСАТ в режиме кольцевой спутниковой передачи сигнала IBS со скоростью 64 кбит/с.

На основании вышеприведенных рассуждений, величина КОБ после декодирования составит:

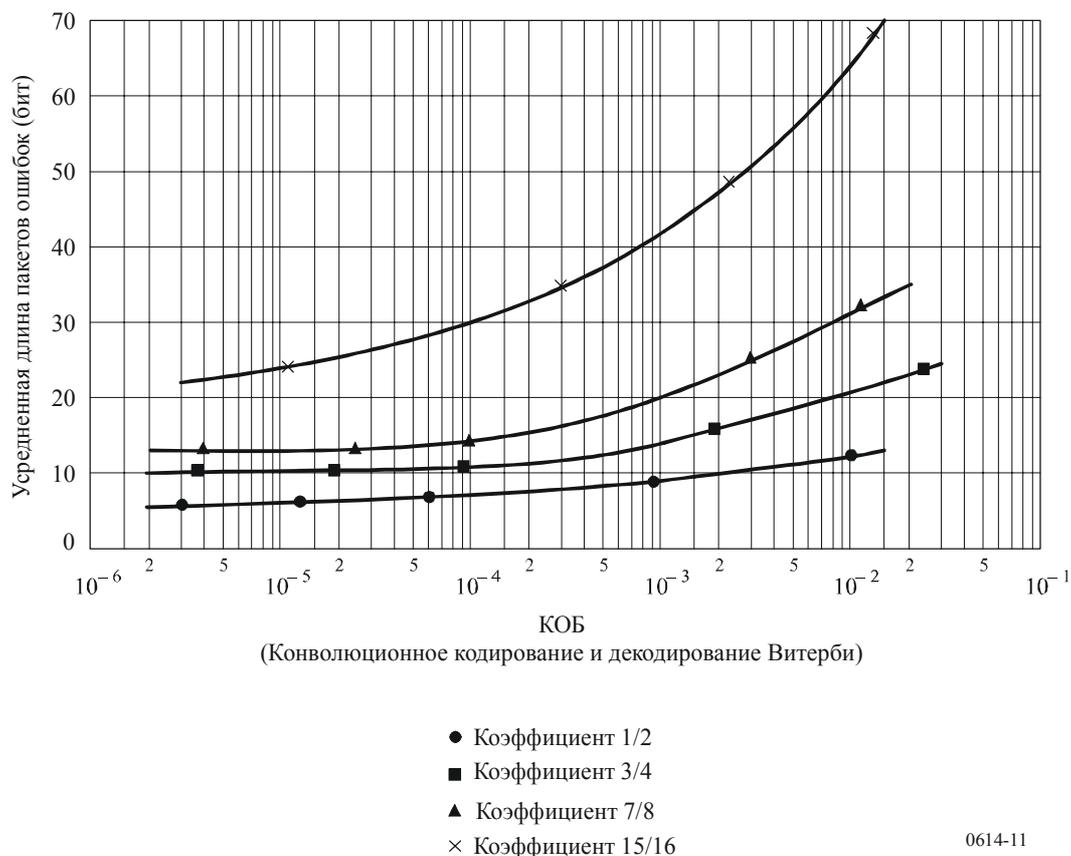
$$P_e(\text{ККО после декодирования}) = \frac{L_b/2}{L_b + E_{fb}},$$

где усредненный интервал между пакетами ошибок E_{fb} можно рассчитать как:

$$E_{fb} = \left(\frac{1}{2P_e} - 1 \right) L_b = L_b / 2P_e,$$

а L_b равна средней продолжительности пакета ошибок.

РИСУНОК 11
Соотношение усредненной длины пакетов ошибок и КОБ



Другой эффект, который необходимо рассмотреть, это зависимость структуры пакета ошибок от мультиплексирования каналов со скоростью 64 кбит/с для создания потоков с первичной (2048 кбит/с) и более высокими скоростями. Это показано на рисунках 12а и 12б для КОБ = 10^{-6} . На рисунке 12а показана гистограмма количества ошибок в пакете для композитного сигнала со скоростью 1920 кбит/с (30 временных слотов) в 2048-битовом потоке, мультиплексированном в соответствии с Рекомендацией МСЭ-T G.704. Однако в отдельном канале со скоростью 64 кбит/с число ошибок в пакете уменьшается, как показано на рисунке 12б.

5.2.3 Конволюционное кодирование - последовательное декодирование

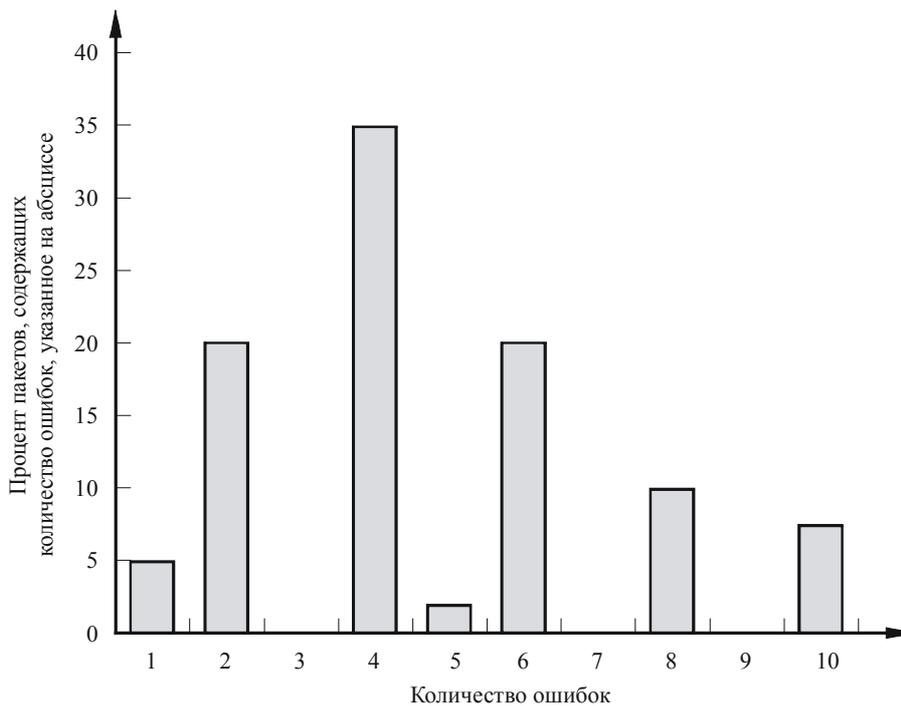
При последовательном декодировании используется вероятностный алгоритм декодирования, в котором вычисление длины пути сигнала выполняются только для пути, который уже исследован. И решение о том на какой путь их распространить, основываются только на длине уже исследованных путей.

По контрасту с декодированием Витерби, в котором сложность вычислений возрастает в экспоненциальной зависимости от ограничения длины кода, последовательное декодирование дает возможность использовать коды с большей ограниченной длиной, в которых можно значительно повысить значение КОБ. Это становится возможным благодаря тому, что в конволюционном кодировании, КОБ убывает в экспоненциальной зависимости от предела длины кода.

Среди различных типов алгоритмов последовательного декодирования, наиболее широко используются алгоритм Фано и алгоритм стека. В данном параграфе рассматривает второй из этих алгоритмов. Ошибки на выходе декодера, в основном, возникают из-за переполнения буферных каскадов стека и/или из-за превышения времени декодирования.

На рисунке 13 показан пример распределения ошибок при КОБ после кодирования порядка 3×10^{-4} для последовательного декодера с коэффициентом $1/2$ и алгоритмом стека, работающего со скоростью передачи информации 64 кбит/с. Ясно, что на выходе декодера имеется множество пакетов ошибок, длительность каждого из которых намного превышает 65 битов. И небольшое число случайных ошибок, расположенных между продолжительными пакетами ошибок.

РИСУНОК 12а
Гистограмма числа ошибок в пакете



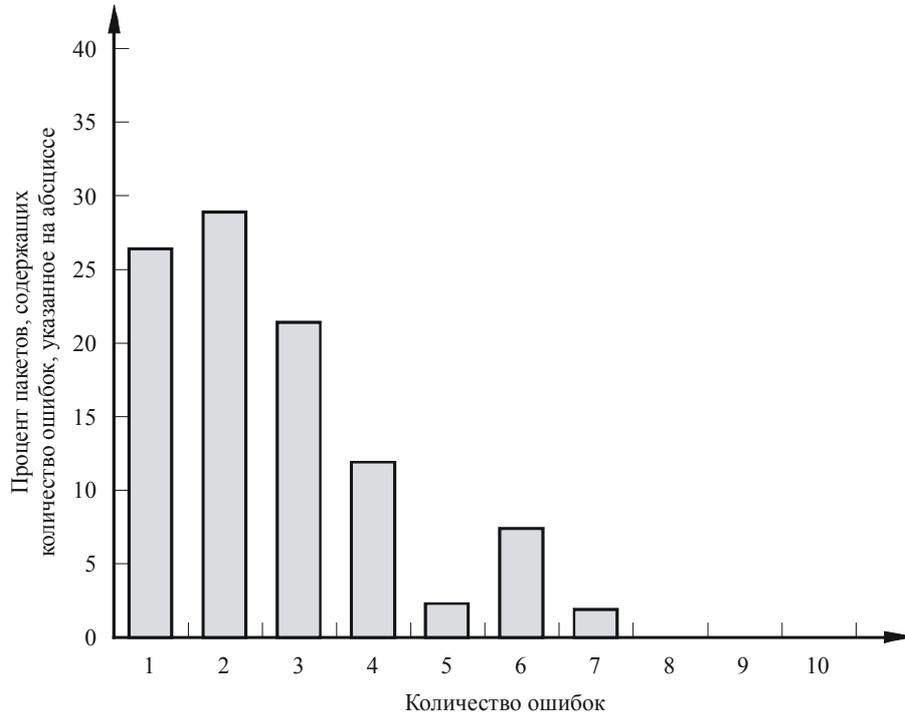
КОБ = 10^{-6}

УКО (коэффициент $1/2$) при скорости передачи цифрового потока 2048 кбит/с

0614-12a

РИСУНОК 126

Гистограмма числа ошибок в пакете в одном канале 64 кбит/с, входящем в состав мультиплексированного сигнала с первичной скоростью 2048 кбит/с (Рекомендация МСЭ-T G.704)



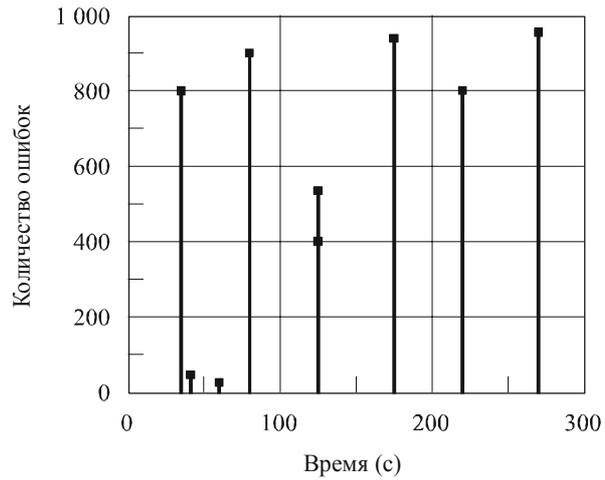
КОБ = 10^{-6}

УКО (коэффициент 1/2) при первичной скорости 2048 кбит/с

0614-12b

РИСУНОК 13

Распределение ошибок на выходе последовательного декодера



0614-13

5.3 Влияние минут пониженного качества, секунд, пораженных ошибками и секунд с ошибками

5.3.1 Качественное рассмотрение

Влияние пакетов ошибок, создаваемых конволюционным кодированием с УКО, заключается в следующем:

Минуты пониженного качества (МПК)

В одной МПК содержится пять и более ошибок. При использовании декодирования Витерби с коэффициентом $3/4$, которое часто служит источником пакетов ошибок, содержащих пять и более ошибок, вероятность МПК может возрасти по сравнению со случайными ошибками, даже при том же коэффициенте ошибок. При использовании декодирования Витерби с коэффициентом $1/2$ это увеличение может быть несколько меньшим.

Секунды, пораженные ошибками (СПО)

В одной СПО содержится 65 и более ошибок. Поскольку количество ошибок в одном пакете ошибок, создаваемом УКО, намного меньше, чем 65, одна СПО будет включать в себя несколько десятков пакетов ошибок. Это может привести к отсутствию заметной разницы между значениями вероятности СПО для пакетов ошибок и для случайных ошибок.

Секунды с ошибками (СО)

При группировании ошибок, как для случая канала с УКО, вероятность СО будет уменьшаться по сравнению со случайными ошибками при том же коэффициенте ошибок.

Влияние пакетов ошибок будет меньше, благодаря тому факту, что в большинстве спутниковых линий мультиплексируется много каналов и ошибки их этих пакетов распределяются между мультиплексированными каналами.

5.3.2 Измерения

5.3.2.1 Кодирование ВСН

Измерения были проведены на терминале ЕВТЕЛСАТ, работающем со скоростью 120 Мбит/с, передающем сигнал МДВР в пакетном режиме и при возникновении шумов переключаемом на ПЧ. Псевдослучайная последовательность 64 кбит/с создается анализатором КОБ, и измерение процентного соотношения СО, МПК и СПО выполнялось в соответствии с Рекомендацией МСЭ-T G.821.

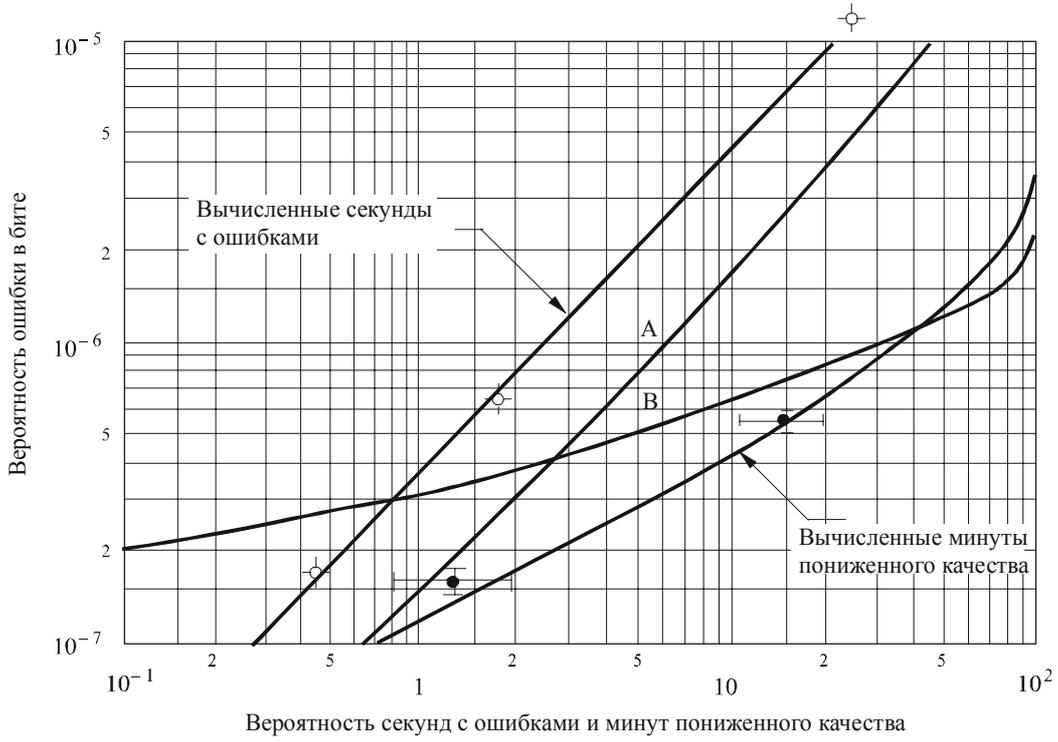
Измерения проводились для двух слотов времени, относящихся к случаям а) и d), указанным в § 5.2.1, и было обнаружено, что статистические характеристики СО и МПК заметно отличаются от закона Пуассона (рисунок 14).

При использовании УКО можно наблюдать сдвиг величины запаса на распространение для СПО в течение небольшого процента времени (рисунок 15). Тем не менее, этот сдвиг достаточно мал и не имеет существенного значения при рассмотрении целостности распределения, даже если вычисленные доверительные интервалы доказывают наличие реального сдвига.

Эти измерения, как видно, согласуются с теоретическими предсказаниями, объясняемыми в § 5.4.2.

РИСУНОК 14

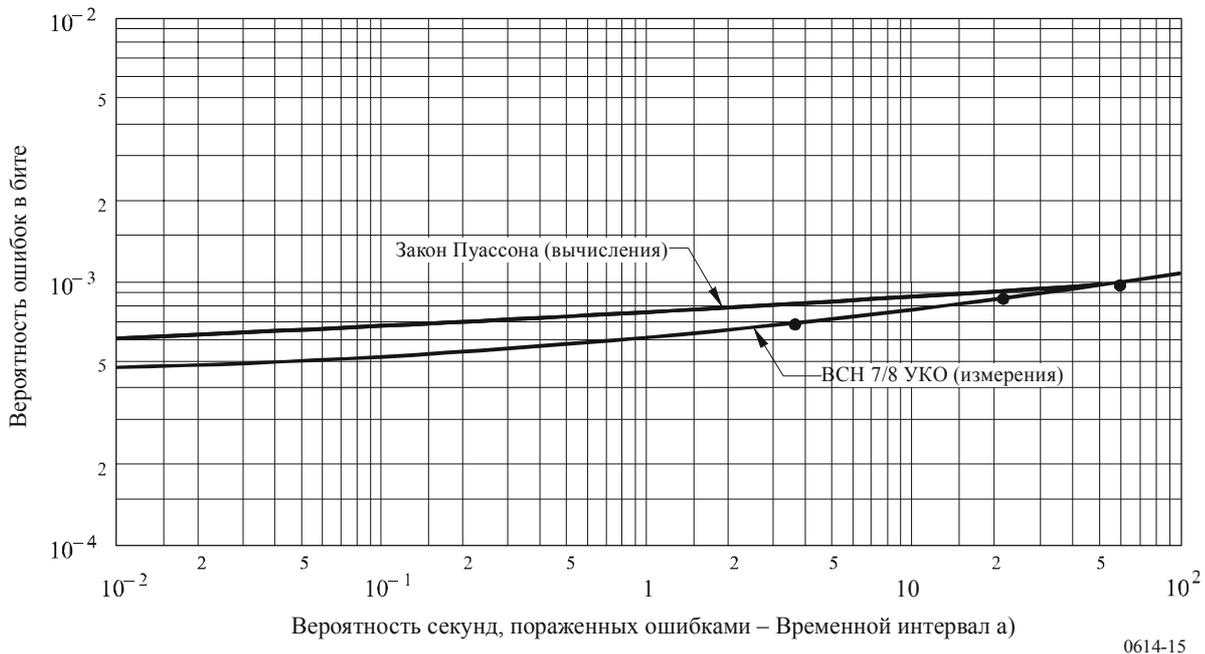
Статистика секунд с ошибками и минут пониженного качества для 64 кбит/с



- Измеренные секунды с ошибками (ВСН с коэффициентом 7/8) и доверительные интервалы
 - Вычислительные минуты пониженного качества (ВСН с коэффициентом 7/8) и доверительные интервалы
- } Временной интервал a)

Кривые А: Секунды с ошибками, закон Пуассона
 В: минуты пониженного качества, закон Пуассона

РИСУНОК 15
Вероятность секунд, пораженных ошибками



5.3.2.2 Конволюционное кодирование – декодирование Витерби

Подобные измерения были выполнены при конволюционном кодировании – декодировании Витерби, они демонстрируются на рисунках 16 - 19. Как видно, результаты получены для двух коэффициентов кодирования 1/2 и 3/4 на скорости 64 кбит/с и для коэффициента 3/4 для одного канала со скоростью 64 кбит/с в составе композитного потока со скоростью 2 048 кбит/с.

5.3.2.3 Конволюционное кодирование – последовательное декодирование

Квадратики на рисунке 18 указывают СО и МПК для последовательного декодера в канале с аддитивным белым Гауссовским шумом (АБГШ). Видно, что качественные показатели по СО для последовательного декодера лучше, чем для системы без кодирования, и график их зависимости параллелен графику зависимости для результатов, полученных в системе без кодирования. Однако качественные показатели по МПК значительно отличаются от показателей для системы без кодирования, но похожи на показатели для системы с декодированием Витерби.

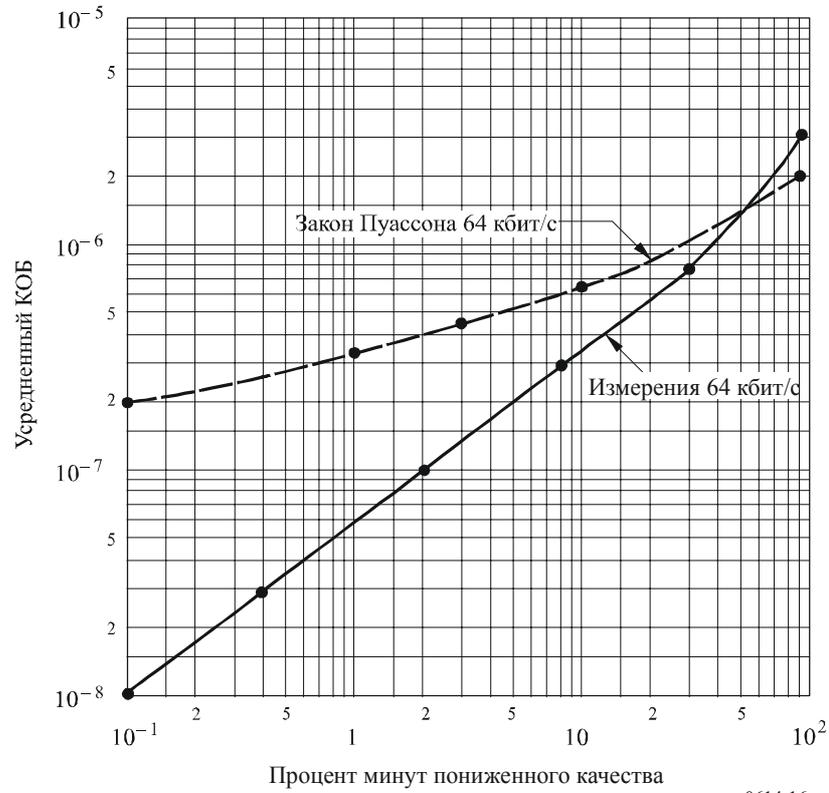
Качественные показатели последовательного декодера по СО и МПК для последовательного декодера лучше, чем аналогичные характеристики декодера Витерби. Это, как описано в § 2.3, благодаря тому, что при одном и том же среднем значении КОБ, последовательный декодер вводит более длительные пакеты ошибок, чем декодер Витерби, продолжительность этих ошибок может превышать сотни битов, а также короткие группы случайных ошибок между пакетами ошибок.

Следовательно, показатель по СО у последовательного декодера лучше, чем у декодера Витерби, поскольку последний вводит множество случайных ошибок, а также короткие пакеты ошибок. Более того, поскольку определение МПК исключает наличие СПО, показатель качества по МПК у последовательного декодера значительно превосходит аналогичный показатель декодера Витерби.

Квадратики на рисунке 19 отображают показатели качества по СПО для последовательного декодера. Для значений КОБ от умеренных до низких процент СПО для последовательного декодера постепенно уменьшается и он оказывается ниже аналогичных показателей декодера Витерби. Это происходит благодаря тому, что последовательный декодер, как правило, создает множество пакетов ошибок длиной более 65 битов.

РИСУНОК 16

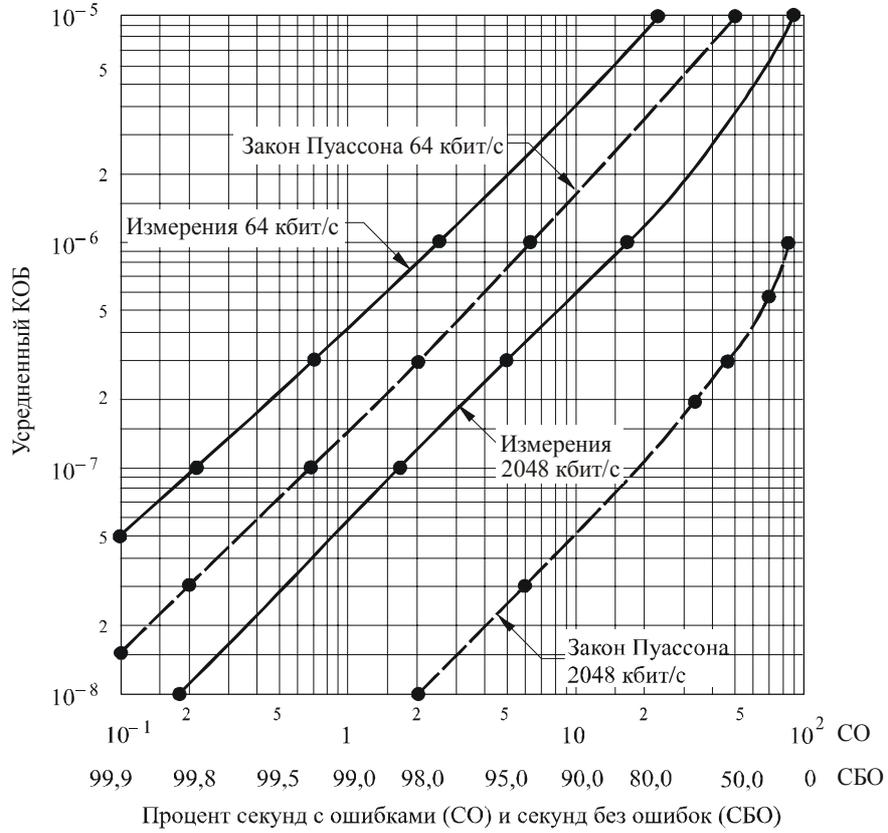
Процент минут пониженного качества для мультимплексированного канала со скоростью 64 кбит/с (Рек. МСЭ-E G.704) в бинарном потоке (УКО с коэффициентом 7/8, полусинхронизирующий скремблер, в соответствии со спецификацией ИНТЕЛСАТ IDR)



0614-16

РИСУНОК 17

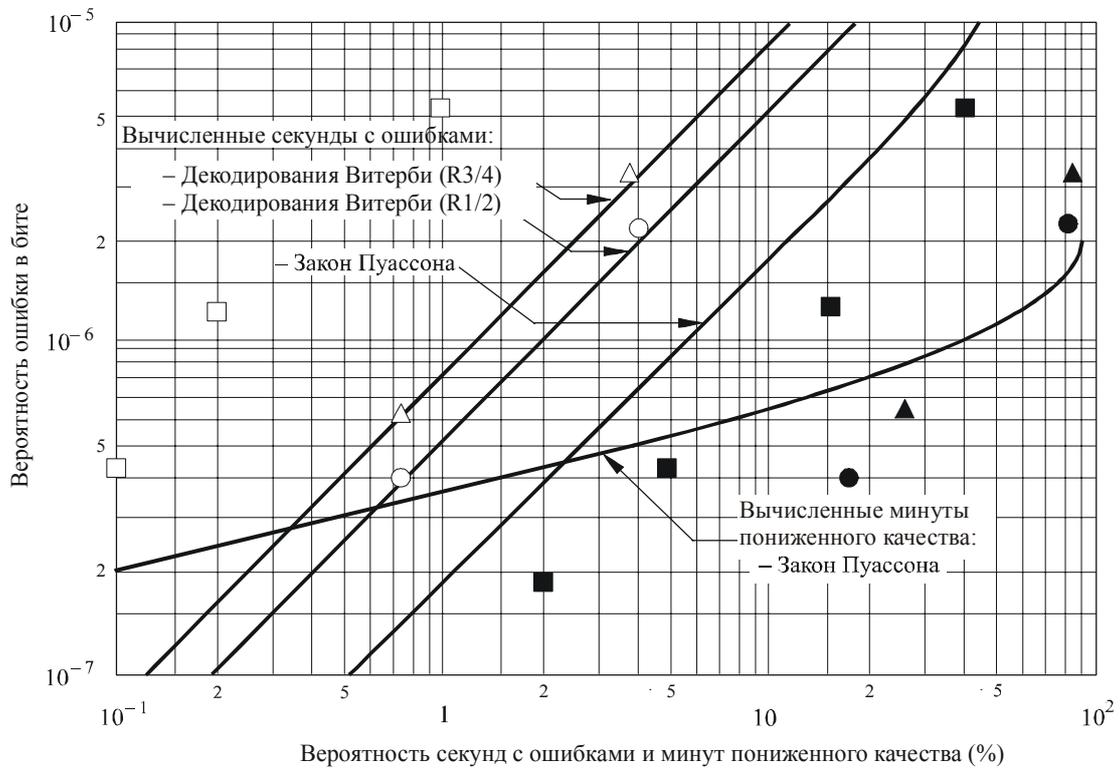
Процент секунд с ошибками и без ошибок для мультиплексированного канала со скоростью 64 кбит/с (Рек. МСЭ-T G.704) в бинарном потоке и для композитного потока 2048 бит/с (УКО с коэффициентом 3/4, полусинхронизирующий скремблер, в соответствии со спецификацией ИНТЕЛСАТ IDR)



0614-17

РИСУНОК 18

Статистика секунд с ошибками и минут пониженного качества для бинарного потока со скоростью 64 кбит/с (без скремблирования данных или дифференциального кодирования)



Измеренные данные (секунды с ошибками):

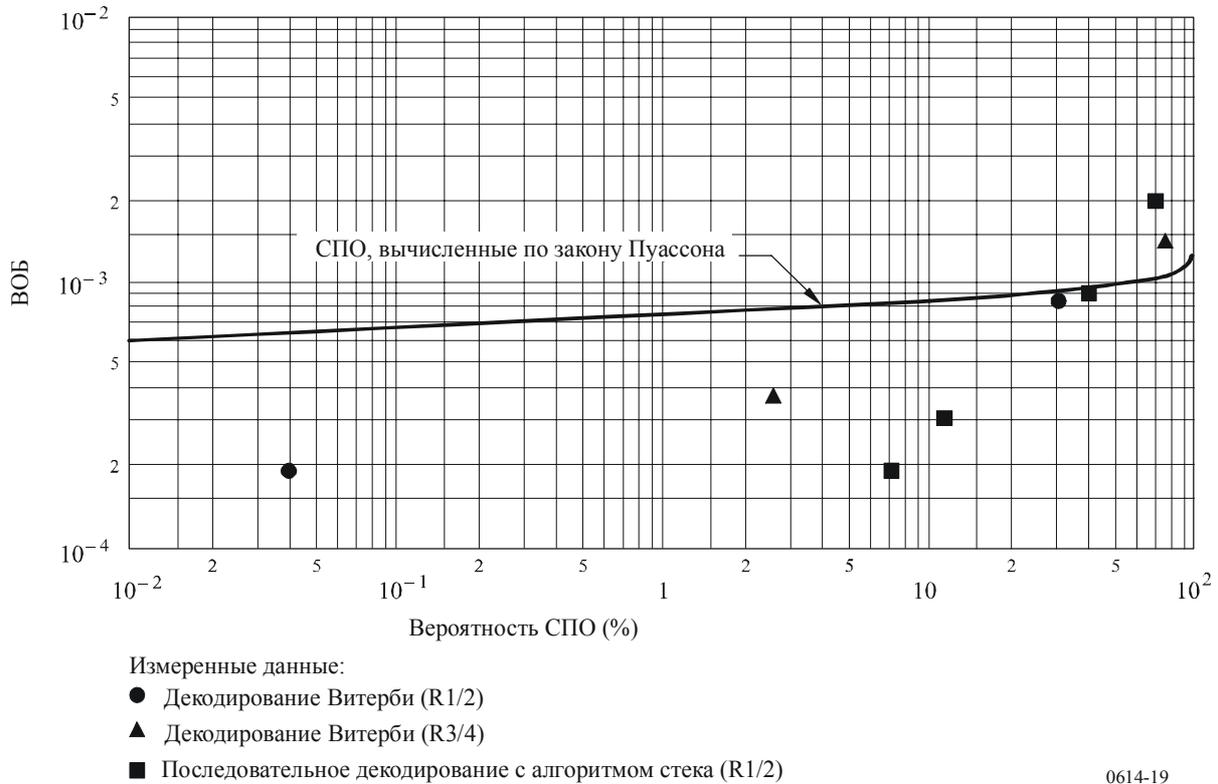
- Декодирование Витерби (R1/2)
- △ Декодирование Витерби (R3/4)
- Последовательное декодирование с алгоритмом стека (R1/2)

Измеренные данные (минуты пониженного качества):

- Декодирование Витерби (R1/2)
- ▲ Декодирование Витерби (R3/4)
- Последовательное декодирование с алгоритмом стека (R1/2)

РИСУНОК 19

Вероятность секунд, пораженных ошибками (СПО), для потока со скоростью 64 кбит/с



5.3.3 Количественный анализ

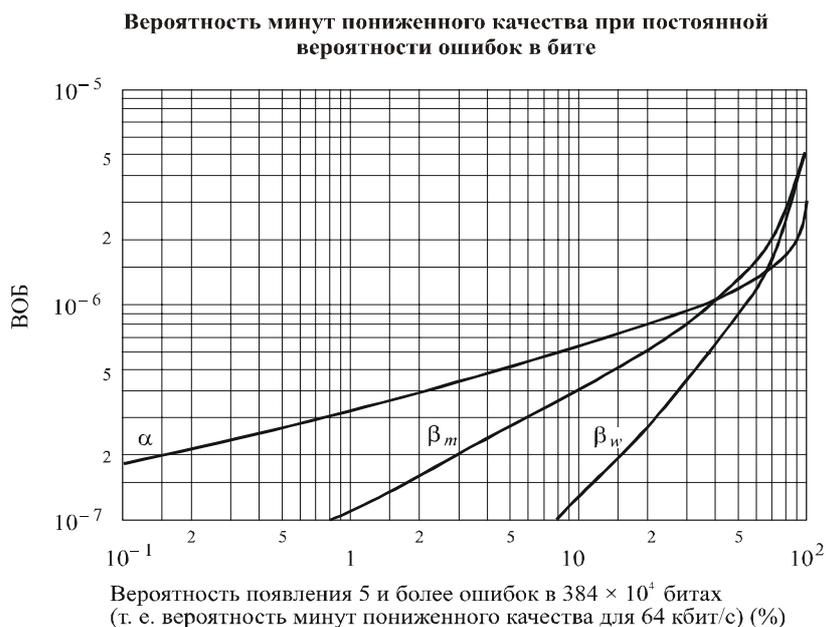
На рисунке 20 показана вероятность МПК в зависимости от ВОБ для трех различных случаев распределения ошибок, названных α , β_m и β_w . Случай α относится к случайным ошибкам, он рассматривается в данном Приложении. В случаях β_m и β_w предполагается, что ошибки группируются, но сами по себе группы ошибок (пакеты) возникают случайно. Случай β_m (m означает «умеренный» (moderate)) предполагает, что ошибки распределения равномерно – по 3 ошибки в каждом пакете. В случае β_w (w означает "наихудший" (worst)) предполагается, что ошибки распределения равномерно – по 5 ошибок в каждом пакете. Формула, используемая для вычисления этих зависимостей, приведена на рисунке. Фактически, к распределению пакетов применима формула Пуассона.

Число МПК увеличивается с увеличением числа пакетов при небольших значениях ВОБ. Более того, если пакеты включают в себя более 5 ошибок каждый, то любая минута, в течение которой принимается такой пакет считается точно такой же минутой пониженного качества, как если бы наблюдалось только пять ошибок. Но, если наблюдается большее количество ошибок на пакет, то тогда пакеты в дальнейшем разделяются, и большее количество минут становится свободными от пакетов ошибок. Таким образом, β_w представляет собой наихудшее распределение для этого параметра.

Если распределения ошибок на рисунках 10а и 10б (при КОБ = 10^{-5}) являются почти одинаковыми, и моменты появления пакетов ошибок считаются независимыми, то можно вычислить показатели по минутам пониженного качества и БОС.

Результаты вычислений сведены в таблицу 6. В таблицу также включен случай сдвоенных ошибок, типичный для систем с дифференциальным кодированием. Вычисления выполнены в предположении, что с точки зрения КОБ, показатели качества линии соответствуют модели d) на рисунке 3. Из значений, указанных в таблице 6, видно, что пакеты ошибок сильно влияют на качественные показатели цифровой сети, сформулированные на основании требований, изложенных в Рекомендации МСЭ-T G.821. Однако в ходе этого анализа влияние структуры мультиплексированного сигнала не рассматривалось. В этой области необходимы дальнейшие исследования. До получения результатов таких исследований следует очень осторожно подходить к проектированию систем, использующих УКО для удовлетворения нормативных требований по МПК.

РИСУНОК 20



Случай α : Канал со случайными ошибками

$$P(DM) = 1 - \left[1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} \right] e^{-x} \quad x = 384 \cdot 10^4 P$$

Случай β_m : Канал с умеренными ошибками (3 ошибки на импульс)

$$P(DM) = 1 - (1 + x) e^{-x} \quad x = 384 \cdot 10^4 P/3$$

Случай β_w : Канал наихудших ошибок (5 ошибок на импульс)

$$P(DM) = 1 - e^{-x} \quad x = 384 \cdot 10^4 P/5,$$

где:

P : вероятность ошибок в бите

$P(DM)$: вероятность минут пониженного качества

0614-20

ТАБЛИЦА 6

Норма	Качественные показатели (процент времени готовности)				
	Рекомендация МСЭ-T G.821	Одиночные ошибки	Двойные ошибки	Пакеты ошибок (кодирование с коэффициентом 1/2)	Пакеты ошибок (кодирование с коэффициентом 3/4)
Минуты пониженного качества	2,0	1,87	2,67	6,2	6,7
Секунды с ошибками	1,6	1,56	1,4	1,2	1,16

5.4 Математическое моделирование

Для демонстрации того, что конкретная система удовлетворяет требованиям Рекомендации МСЭ-T G.821, необходимо знать:

- статистические показатели ВОБ с указанием процента времени;
- математическую модель, с помощью которой вычисляются СО, МПК и СПО, для того чтобы описать распределение ошибок на уровне 64 кбит/с, с учетом типа применяемого УКО и используемого метода мультиплексирования.

Были исследованы две следующие модели.

5.4.1 Непрерывное распределение Неймана типа А

Одной из статистических моделей, которая может использоваться для описания сгруппированных вероятностных событий, является непрерывное распределение Неймана типа А. Это распределение, в частности, может описать пакетный характер появления ошибок, вызванных помехами в цифровых спутниковых системах. Использование этой модели гарантирует, что пакеты ошибок являются независимыми, т. е. возникают в случайном порядке и имеют случайную продолжительность (хотя в некоторых схемах УКО ошибки на выходе декодера, как правило, группируются по три или четыре, реальное усредненное количество ошибок в данном демультиплексированном канале следует оценивать на основании данных о рассматриваемой системе).

Модель непрерывного распределения Неймана типа А имеет вид:

$$P(n) = \frac{(BOO/A)^n}{n!} e^{-NA} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{k^n}{k!} (NA)^k e^{-kBO/A},$$

где:

$P(n)$: вероятность того, в N переданных битах возникает n ошибок

NA : усредненное количество пакетов

BOB/A : среднее количество ошибок в пакете.

Тогда вероятность БОС и МПК можно определить соответственно как:

$$P(o) = e^{-N/A} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(NA)^k}{k!} e^{-kBO/A} \quad \text{при } N = 64 \text{ кбит/с}$$

$$P(\text{МПК}) = 1 - \sum_{n=0}^4 P(n) \quad \text{при } N = 3.84 \text{ Мбит/с.}$$

5.4.2 Аналитическое представление кода ВСН

Когда система передачи известна (тип используемого УКО, схема мультиплексирования и т. д.), то для предсказания статистических характеристик СО, МПК и СПО при определенных значениях ВОБ вместо измерений можно использовать аналитическую формулу.

Можно вывести аналитические выражения и выполнить предсказания для кодирования ВСН 7/8 с УКО, используемого в системах ИНТЕЛСАТ и ЕВТЕЛСАТ для передачи МДВР сигналов со скоростью 120 Мбит/с (см. таблицу 7).

ТАБЛИЦА 7

Обзор формул для вычисления процентов СО, МПК и СПО

ВСН 7/8

Процент СО	$P = 100 \times \{ (1 - e^{-L}) \} \times u$ $L = \text{ВОб} \times 42\,333,3$ $u = 0,667 \quad \text{Для случая а)}$ $u = 0,881 \quad \text{Для случая d)}$
Процент МПК	$P = 100 \times \{ 1 - (1 + L + L^2/2! \times (1 - u_2) + L^3/3! \times (1 - u_3) + L^4/4! \times (1 - u_4)) \times e^{-L} \}$ $L = \text{ВОб} \times 2,54 \times 10^6$ $u_2 = 0,227 \quad u_3 = 0,506 \quad u_4 = 0,702 \quad \text{Для случая а)}$ $u_2 = 0,111 \quad u_3 = 0,510 \quad u_4 = 0,713 \quad \text{Для случая d)}$
Процент СПО	$P = 100 \times \{ 1 - (1 + L + L^2/2! + \dots + L^{38}/38!) \times e^{-L} \}$ $L = \text{ВОб} \times 42\,333,3$

5.5 Влияние на проектирование систем в полосе 14/11 ГГц

Для систем, предназначенных для работы в полосе 14/11 ГГц, эксплуатируемых в европейских климатических зонах, ограничивающим критерием маски, определенной Рекомендацией МСЭ-R S.614, при некодированном использовании спутниковой линии является "долговременная" ВОБ. Это потому, что разница C/N , требуемая на выходе демодулятора земной станции для получения значений ВОБ 10^{-7} и 10^{-3} , больше, чем соответствующая ожидаемая разница уровней замираний для процентов (общего) времени наихудшего месяца между 10% и 0,2%.

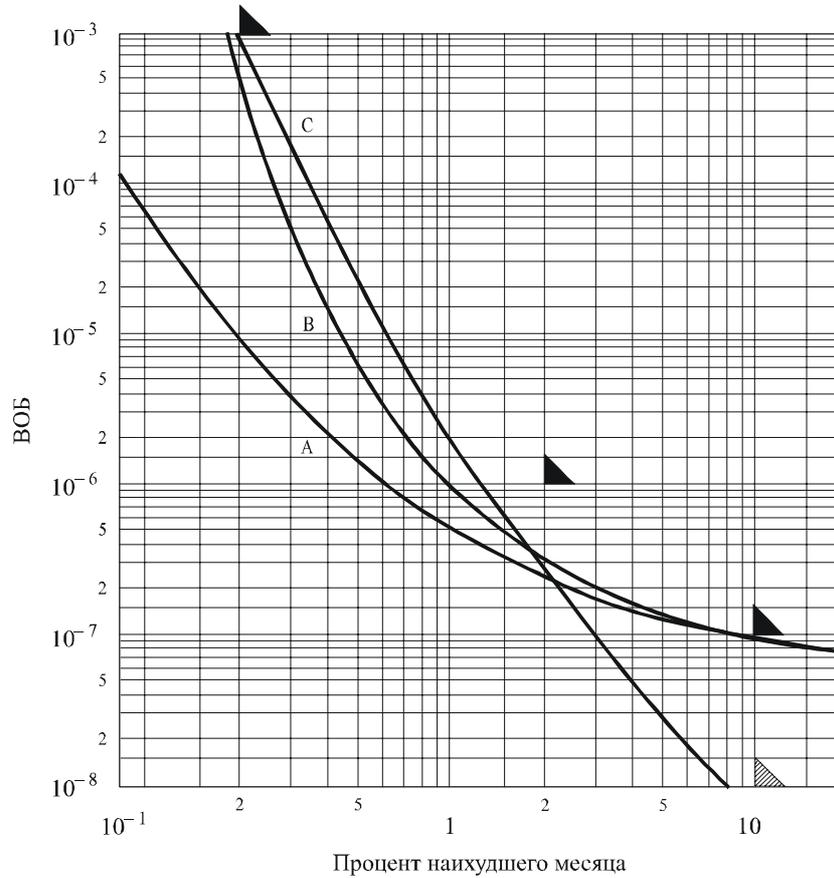
В качестве иллюстрации, на рисунке 21 (кривые А и В) показаны параметры качества системы, работающей в полосе 14/11 ГГц, характеристики которой таковы, что в точности удовлетворяется долговременный критерий 10^{-7} . Графики А и В описывают качественные показатели в процентах времени, когда система подвергается воздействию условий распространения, статистика которых типична для европейского континентального климата (кривая А) и альпийского/средиземноморского климата (кривая В).

В тех случаях, когда применяется УКО, ситуация требует более детального анализа. С одной стороны, требуемая на входе демодулятора разница между значениями $(C/N + I)$ для двух уровней КОБ меньше, чем для случая без использования кодирования, благодаря коэффициенту кодирования, и это влечет за собой ограничения при проектировании требований к кратковременным показателям; с другой стороны, для 10% времени наихудшего месяца требуется лучшее качество, чем с КОБ = 10^{-7} , для того, чтобы компенсировать пакетную природу возникновения ошибок, и это устанавливает требования высокого качества в условиях чистого неба

Это иллюстрируется на рисунках 21 и 22: на рисунке 21 (кривая С) показаны качественные характеристики спутниковой линии с блочным кодированием ВСН с коэффициентом 7/8, а на рисунке 22 (кривые А и В) – качественные характеристики линии с конволюционным кодированием с УКО с коэффициентами 1/2 и 3/4, соответственно, при условии, что размеры системы в точности соответствуют кратковременному критерию для статистики распространения радиоволн в альпийском/средиземноморском климате, являющимся наихудшим случаем для Европы.

РИСУНОК 21

Показатели качества системы, работающей в полосе 14/11 ГГц,
предназначенной для удовлетворения требованиям данной Рекомендации



▲ Значения, рекомендованные в данной Рекомендации

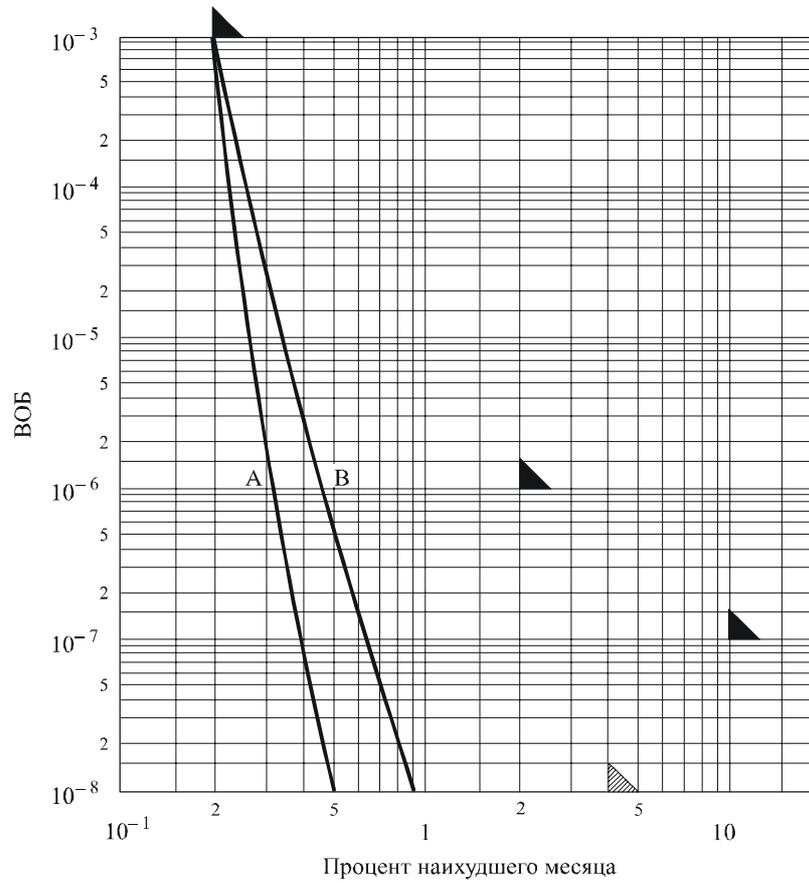
▨ ВСН кодирование

Кривые А: нет УКО
В: нет УКО
С: ВСН 7/8 УКО

Европейский континентальный климат
Альпийский/средиземноморский климат
Альпийский/средиземноморский климат

РИСУНОК 22

Показатели качества системы, работающей в полосе 14/11 ГГц,
предназначенной для удовлетворения требованиям данной Рекомендации



▲ Значения, рекомендованный в данной Рекомендации

▨ ВСН кодирования

Кривые А: 1/2 конволюционное УКО альпийский/средиземноморский климат
В: 3/4 конволюционное УКО альпийский/средиземноморский климат

5.6 Выводы

В данном параграфе рассматриваются характеристики распределения ошибок в спутниковых системах связи, использующих несколько типов УКО, а также проанализировано их влияние на МПК, СПО и СО, определенные в Рекомендации МСЭ-T G.821.

- Схемы УКО, как для блочного, так и для конволюционного кодирования, создают ошибки, распределение которых имеет пакетный характер.
 - Вероятность МПК в системе с УКО может быть больше, чем в системе без УКО при условии одинаковой величины усредненного КОБ.
 - При одинаковом КОБ не будет наблюдаться значительного различия между вероятностями СПО при использовании УКО и без его применения.
 - При одинаковом КОБ в системе с УКО вероятность СО будет меньше, чем в системе без УКО.
 - Воздействие пакетов ошибок может быть меньше, когда в спутниковой линии мультиплексируется множество каналов.
 - Распределение ошибок можно математически смоделировать за счет раскрытия формулы распределения Пуассона. Эта проблема требует дальнейшего исследования.
-