

МСЭ-Т

СЕКТОР СТАНДАРТИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ МСЭ

G.987.3

(01/2014)

СЕРИЯ G: СИСТЕМЫ И СРЕДА ПЕРЕДАЧИ,
ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Цифровые участки и система цифровых линий –
Оптические линейные системы
для местных сетей и сетей доступа

**Пассивные волоконно-оптические сети
с поддержкой 10-гигабитных скоростей
передачи (XG-PON): спецификация уровня
конвергенции передачи**

Рекомендация МСЭ-Т G.987.3

РЕКОМЕНДАЦИИ МСЭ-Т СЕРИИ G
СИСТЕМЫ И СРЕДА ПЕРЕДАЧИ, ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ТЕЛЕФОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И ЦЕПИ	G.100–G.199
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОБЩИЕ ДЛЯ ВСЕХ АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ	G.200–G.299
ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖДУНАРОДНЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ ПО МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ	G.300–G.399
ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖДУНАРОДНЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ИЛИ СПУТНИКОВЫХ ЛИНИЙ И ИХ СОЕДИНЕНИЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРОВОДНЫМИ ЛИНИЯМИ	G.400–G.449
КООРДИНАЦИЯ РАДИОТЕЛЕФОНИИ И ПРОВОДНОЙ ТЕЛЕФОНИИ	G.450–G.499
ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ И ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	G.600–G.699
ЦИФРОВОЕ ОКОНЕЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	G.700–G.799
ЦИФРОВЫЕ СЕТИ	G.800–G.899
ЦИФРОВЫЕ УЧАСТКИ И СИСТЕМА ЦИФРОВЫХ ЛИНИЙ	G.900–G.999
Общие положения	G.900–G.909
Параметры волоконно-оптических кабельных систем	G.910–G.919
Цифровые участки с иерархической скоростью передачи, основанной на скорости передачи 2048 кбит/с	G.920–G.929
Цифровые линейные системы передачи по кабелю с неиерархической скоростью передачи	G.930–G.939
Цифровые линейные системы, обеспечиваемые службами передачи данных с ЧРК	G.940–G.949
Цифровые линейные системы	G.950–G.959
Цифровые участки и цифровые системы передачи для абонентского доступа к ЦСИС	G.960–G.969
Волоконно-оптические подводные кабельные системы	G.970–G.979
Оптические линейные системы для местных сетей и сетей доступа	G.980–G.989
Сети доступа на металлических кабелях	G.990–G.999
КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ СИСТЕМ – ОБЩИЕ И СВЯЗАННЫЕ С ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ АСПЕКТЫ	G.1000–G.1999
ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ	G.6000–G.6999
ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ПО ТРАНСПОРТНЫМ СЕТЯМ – ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	G.7000–G.7999
АСПЕКТЫ ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТОВ ПО ТРАНСПОРТНЫМ СЕТЯМ	G.8000–G.8999
СЕТИ ДОСТУПА	G.9000–G.9999

Для получения более подробной информации просьба обращаться к перечню Рекомендаций МСЭ-Т.

Рекомендация МСЭ-Т G.987.3

Пассивные волоконно-оптические сети с поддержкой 10-гигабитных скоростей передачи (XG-PON): спецификация уровня конвергенции передачи

Резюме

В Рекомендации МСЭ-Т G.987.3 приводится описание уровня конвергенции передачи для пассивных волоконно-оптических сетевых систем с пропускной способностью 10 Гбит/с – семейства сетевых систем с гибким доступом, которые работают через инфраструктуру оптического доступа по схеме "связь пункта со многими пунктами", с номинальной скоростью передачи данных порядка 10,0 Гбит/с по крайней мере в одном направлении, предоставляя конечным пользователям широкий спектр услуг широкополосной и узкополосной связи.

Хронологическая справка

Издание	Рекомендация	Утверждена	Исследовательская комиссия	Уникальный идентификатор*
1.0	МСЭ-Т G.987.3	07.10.2010 г.	15-я	11.1002/1000/10890
1.1	МСЭ-Т G.987.3 (2010 г.), Попр. 1	22.06.2012 г.	15-я	11.1002/1000/11535
2.0	МСЭ-Т G.987.3	13.01.2014 г.	15-я	11.1002/1000/12098

Ключевые слова

Оптическая сеть доступа, пассивная оптическая сеть, PON 10 Гбит/с, XGEM, XGTC.

* Для доступа к конкретной Рекомендации наберите URL-адрес <http://handle.itu.int/> в поле адреса вашего веб-браузера, за которым следует уникальный идентификатор этой Рекомендации. Например, <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11830-en>.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Международный союз электросвязи (МСЭ) является специализированным учреждением Организации Объединенных Наций в области электросвязи и информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). Сектор стандартизации электросвязи МСЭ (МСЭ-Т) – постоянный орган МСЭ. МСЭ-Т отвечает за изучение технических, эксплуатационных и тарифных вопросов и за выпуск Рекомендаций по ним в целях стандартизации электросвязи на всемирной основе.

На Всемирной ассамблее по стандартизации электросвязи (ВАСЭ), которая проводится каждые четыре года, определяются темы для изучения исследовательскими комиссиями МСЭ-Т, которые в свою очередь вырабатывают Рекомендации по этим темам.

Утверждение Рекомендаций МСЭ-Т осуществляется в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 ВАСЭ.

В некоторых областях информационных технологий, которые входят в компетенцию МСЭ-Т, необходимые стандарты разрабатываются на основе сотрудничества с ИСО и МЭК.

ПРИМЕЧАНИЕ

В настоящей Рекомендации термин "администрация" используется для краткости и обозначает как администрацию электросвязи, так и признанную эксплуатационную организацию.

Соблюдение положений данной Рекомендации осуществляется на добровольной основе. Однако данная Рекомендация может содержать некоторые обязательные положения (например, для обеспечения функциональной совместимости или возможности применения), и в таком случае соблюдение Рекомендации достигается при выполнении всех указанных положений. Для выражения требований используются слова "следует", "обязан" (shall) или некоторые другие обязывающие выражения, такие как "должен" (must), а также их отрицательные формы. Употребление таких слов не означает, что от какой-либо стороны требуется соблюдение положений данной Рекомендации.

ПРАВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

МСЭ обращает внимание на вероятность того, что практическое применение или выполнение настоящей Рекомендации может включать использование заявленного права интеллектуальной собственности. МСЭ не занимает какую бы то ни было позицию относительно подтверждения, действительности или применимости заявленных прав интеллектуальной собственности независимо от того, доказываются ли такие права членами МСЭ или другими сторонами, не относящимися к процессу разработки Рекомендации.

На момент утверждения настоящей Рекомендации МСЭ получил извещение об интеллектуальной собственности, защищенной патентами, которые могут потребоваться для выполнения настоящей Рекомендации. Однако те, кто будет применять Рекомендацию, должны иметь в виду, что вышесказанное может не отражать самую последнюю информацию, и поэтому им настоятельно рекомендуется обращаться к патентной базе данных БСЭ по адресу <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© ITU 2018

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.

Содержание

	Стр.
1 Сфера применения	1
2 Справочные документы	1
3 Определения	2
4 Сокращения и акронимы	2
5 Соглашения.....	2
6 Обзор уровня конвергенции передачи XG-PON	2
6.1 Структура уровня XGTC.....	2
6.2 Функции подуровня XGTC.....	4
6.3 Управление системой XG-PON	6
6.4 Архитектура мультиплексирования с временным разделением	7
6.5 Управление доступом к среде передачи.....	10
7 Распределение ресурсов и качество обслуживания	11
7.1 Принципы распределения ресурсов в нисходящем и восходящем направлениях.....	11
7.2 Обзор динамического распределения пропускной способности	13
7.3 Эталонная модель динамического распределения пропускной способности.....	14
7.4 Требования эффективности DBA.....	18
8 Формирование кадров уровня конвергенции передачи XG-PON.....	19
8.1 Формирование кадров XGTC нисходящего потока.....	19
8.2 Формирование кадров XGTC восходящего потока	24
9 Метод инкапсуляции XG-PON	26
9.1 Формирование кадров XGEM.....	26
9.2 Определение границ кадра XGEM.....	29
9.3 Фрагментация SDU	29
9.4 Преобразование услуг в кадры XGEM	30
10 Подуровень адаптации PNY.....	31
10.1 PNY-кадр нисходящего потока	31
10.2 PNY-кадры и PNY-пакеты восходящего потока.....	35
10.3 Упреждающая коррекция ошибок	36
10.4 Скремблирование.....	39
11 Канал обмена сообщениями PLOAM.....	40
11.1 Обзор.....	40
11.2 Формат PLOAM-сообщения	42
11.3 Определения PLOAM-сообщений.....	43
12 Активация ONU.....	55
12.1 Обзор.....	55
12.2 Механизм активации в ONU	56
12.3 Поддержка OLT процесса активации	63

13	Временные соотношения между OLT и ONU	63
13.1	Время передачи и задержка выравнивания ONU	63
13.2	Распределение времени суток по сети XG-PON	70
14	Контроль за рабочими характеристиками, наблюдение и дефекты	74
14.1	Контроль за рабочими характеристиками	74
14.2	Дефекты	78
15	Безопасность XG-PON	81
15.1	Модель угроз для XG-PON	81
15.2	Аутентификация	82
15.3	Формирование ключей	84
15.4	Система шифрования полезной нагрузки XGEM	86
15.5	Механизм обмена ключами шифрования данных и их активации	88
15.6	Защита целостности и проверка источника данных для PLOAM	94
15.7	Защита целостности и проверка источника данных для OMCI	95
15.8	Смена ключей проверки целостности и источника данных	96
15.9	Системы XG-PON с пониженной криптостойкостью шифрования данных	98
16	Управление энергопотреблением ONU	98
16.1	Конфигурация и сигнализация системы управления энергопотреблением	99
16.2	Определения параметров управления энергопотреблением	99
16.3	Спецификации конечного автомата управления энергопотреблением	101
16.4	Операции управления в режиме низкого энергопотребления	109
Приложение А.	Декодирование гибридного кода коррекции ошибок (HEC) и последовательность скремблера	111
A.1	Декодирование HEC	111
A.2	Последовательность скремблера	113
Приложение В.	Упреждающая коррекция ошибок с использованием укороченных кодов Рида–Соломона	115
B.1	Полиномиальное представление по полю Галуа	115
B.2	Структура кодового слова RS(248, 232)	115
B.3	Структура кодового слова RS(248, 216)	116
Приложение С.	Надежная взаимная аутентификация через OMCI	118
Приложение D.	Надежная взаимная аутентификация на основе стандарта IEEE 802.1X	119
D.1	Введение	119
D.2	Стековая модель для аутентификации XG-PON с использованием [IEEE 802.1X]	120
D.3	Поведение на входе в сеть	120
Приложение Е.	Обслуживание PON-ID	122
E.1	Введение	122
E.2	Структура PON-ID	122

	Стр.
Приложение F. Расширенные возможности ослабления воздействия вредоносных ONU...	124
F.1 Введение	124
F.2 Дополнительный код типа PLOAM-сообщений, связанных с операцией выключения	124
F.3 Дополнительный переход диаграммы переходов состояний в цикле активации ONU	125
Дополнение I. Формирование структуры данных нисходящей линии	127
I.1 Управление спектром с использованием незанятых кадров XGEM.....	127
I.2 Преднамеренное нарушение работы PON.....	129
Дополнение II. Вывод модели распределения времени суток и анализ погрешностей	131
Дополнение III. Профили пакетов.....	135
Дополнение IV. Золотые векторы	137
IV.1 Кодовое слово FEC нисходящего потока	137
IV.2 Кодовое слово FEC восходящего потока.....	137
IV.3 Сокращенное кодовое слово FEC восходящего потока	138
IV.4 Шифрование AES-128 нисходящего потока	138
IV.5 Шифрование AES-128 восходящего потока	139
IV.6 Шифрование выработки ключей	139
IV.7 Проверка целостности PLOAM-сообщения в нисходящем потоке	140
IV.8 Проверка целостности PLOAM-сообщения в восходящем потоке.....	140
IV.9 Передача ключей в восходящем потоке	140
IV.10 Проверка целостности сообщения OMCI в нисходящем потоке	140
Библиография	142

Пассивные волоконно-оптические сети с поддержкой 10-гигабитных скоростей передачи (XG-PON): спецификация уровня конвергенции передачи

1 Сфера применения

В настоящей Рекомендации приводится описание уровня конвергенции передачи для пассивных волоконно-оптических сетевых систем с пропускной способностью 10 Гбит/с (XG-PON) – семейства сетевых систем с гибким доступом, которые работают через инфраструктуру оптического доступа по схеме "связь пункта со многими пунктами" с номинальной скоростью передачи данных порядка 10,0 Гбит/с по крайней мере в нисходящем направлении, предоставляя конечным пользователям широкий спектр услуг широкополосной и узкополосной связи.

В данной Рекомендации рассматриваются:

- многоуровневая структура уровня конвергенции передачи XG-PON (XGTC);
- функциональные возможности подуровня адаптации услуг, включая метод инкапсуляции XG-PON (XGEM), определение границ кадра XGEM и фрагментацию блока служебных данных (SDU);
- функциональные возможности подуровня формирования кадра с указанием формата кадров XG-PON нисходящего потока и пакетов восходящего потока;
- функциональные возможности подуровня адаптации физического интерфейса (PHY), включая упреждающую коррекцию ошибок и скремблирование;
- функциональные возможности встроенного управления XG-PON, включая механизмы множественного доступа с временным разделением и динамического распределения пропускной способности в восходящем потоке;
- канал обмена сообщениями для эксплуатации, администрирования и управления (OAM) физического уровня XG-PON;
- способ активации блока оптической сети (ONU);
- временные аспекты работы по схеме "связь пункта со многими пунктами" и связь, зависящая от времени суток;
- криптографические механизмы аутентификации, проверки целостности, изоляции каналов и защиты данных наряду с соответствующими протоколами обмена ключами;
- механизмы и протоколы сигнализации для поддержки функций энергосбережения ONU.

Настоящая Рекомендация является неотъемлемой частью Рекомендаций МСЭ-Т серии МСЭ-Т G.987 [ITU-T G.987], [ITU-T G.987.1], [ITU-T G.987.2], которые вместе с [ITU-T G.988] образуют единую согласованную совокупность систем передачи доступа.

2 Справочные документы

Указанные ниже Рекомендации МСЭ-Т и другие источники содержат положения, которые путем ссылки на них в данном тексте составляют положения настоящей Рекомендации. На момент публикации указанные издания были действующими. Все Рекомендации и другие источники могут подвергаться пересмотру; поэтому всем пользователям данной Рекомендации предлагается рассмотреть возможность применения последнего издания Рекомендаций и других источников, перечисленных ниже. Перечень действующих на настоящий момент Рекомендаций МСЭ-Т публикуется регулярно. Ссылка на документ, приведенный в данной Рекомендации, не придает ему как отдельному документу статус Рекомендации.

[[ITU-T G.652] Recommendation ITU-T G.652 (2009), *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.*

- [ITU-T G.709] Recommendation ITU-T G.709/Y.1331 (2012), *Interfaces for the Optical Transport Network*.
- [ITU-T G.987] Recommendation ITU-T G.987 (2012), *10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms*.
- [ITU-T G.987.1] Recommendation ITU-T G.987.1 (2010), *10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements*.
- [ITU-T G.987.2] Recommendation ITU-T G.987.2 (2010), *10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification*.
- [ITU-T G.988] Recommendation ITU-T G.988 (2012), *ONU management and control interface (OMCI) specification*.
- [ITU-T I.432.1] Recommendation ITU-T I.432.1 (1999), *B-ISDN user-network interface – Physical layer specification: General characteristics*.
- [ATIS-0300220] ATIS-0300220.2011, *Representation Of The Communications Industry Manufacturers, Suppliers, and Related Service Companies for Information Exchange*.
- [IEEE 802.1X] IEEE Standard 802.1X-2010, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Port-Based Network Access Control*.
- [IETF RFC 3748] IETF RFC 3748 (2004), *Extensible Authentication Protocol (EAP)*.
- [IETF RFC 5216] IETF RFC 5216 (2008), *The EAP-TLS Authentication Protocol*.
- [IETF RFC 5247] IETF RFC 5247 (2008), *Extensible Authentication Protocol (EAP) Key Management Framework*.
- [IETF RFC 5433] IETF RFC 5433 (2009), *Extensible Authentication Protocol – Generalized Pre-Shared Key (EAP-GPSK) Method*.
- [NIST FIPS-197] NIST Federal Information Processing Standards Publication 197 (2001), *Advanced Encryption Standard (AES)*.
- [NIST SP800-38A] NIST Special Publication 800-38A (2001), *Recommendation for Block Cipher Modes of Operation – Methods and Techniques*.
- [NIST SP800-38B] NIST Special Publication 800-38B (2005), *Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The CMAC Mode for Authentication*.

3 Определения

См. раздел 3 [ITU-T G.987].

4 Сокращения и акронимы

См. раздел 4 [ITU-T G.987].

5 Соглашения

См. раздел 5 [ITU-T G.987].

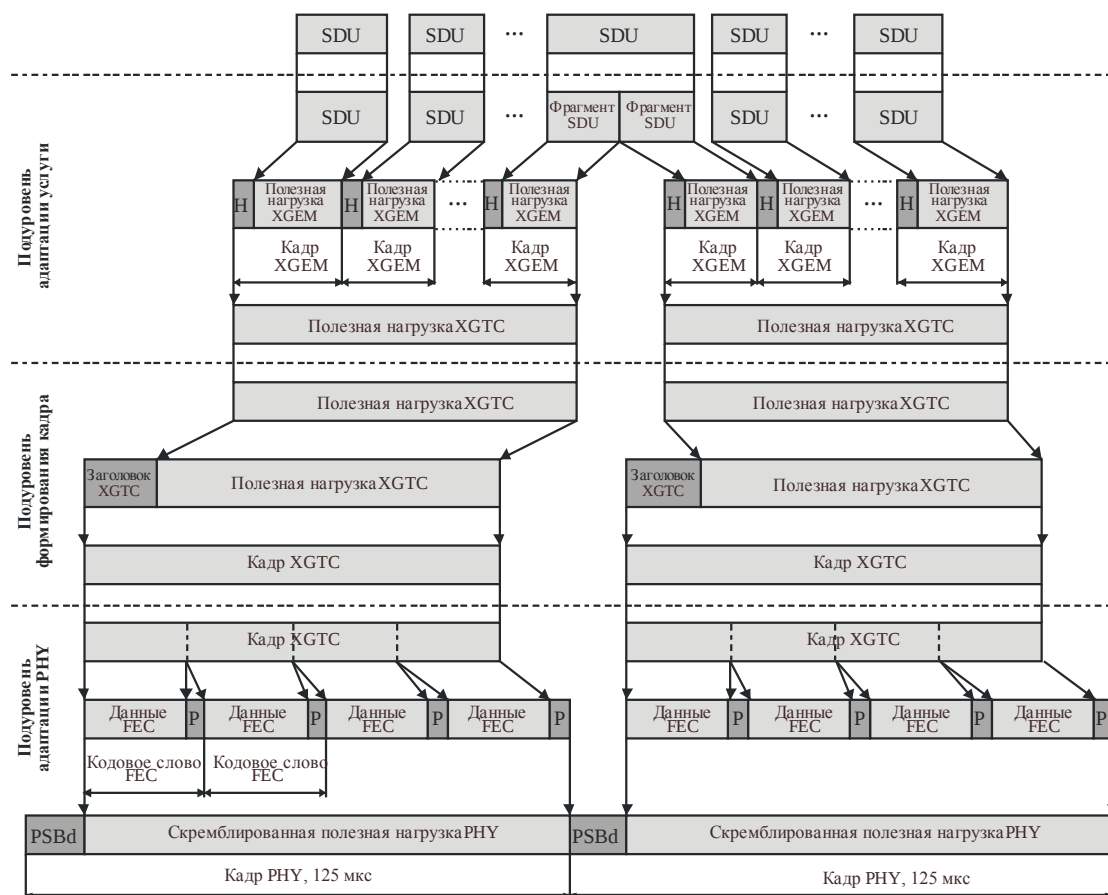
6 Обзор уровня конвергенции передачи XG-PON

6.1 Структура уровня XGTC

Уровень XGTC является частью стека протоколов XG-PON, который определяет форматы и процедуры преобразования между блоками служебных данных верхнего уровня (SDU), с одной стороны, и потоками битов, подходящими для модуляции оптической несущей, с другой стороны.

Уровень XGTC состоит из трех подуровней: подуровня адаптации услуги XGTC, подуровня формирования кадра XGTC и подуровня адаптации PHY XGTC. Уровень XGTC присутствует как на

стороне окончания оптической линии (OLT), так и на стороне ONU системы XG-PON. В нисходящем направлении интерфейс между уровнем XGTC и уровнем, зависящим от физического носителя (PMD), представлен непрерывным потоком битов с номинальной скоростью передачи в интерфейсе, причем этот поток разделен на кадры по 125 мкс. В восходящем направлении интерфейс между уровнями XGTC и PMD представлен последовательностью точно синхронизированных пакетов. На рисунках 6-1 и 6-2 показаны основные этапы преобразования между SDU верхнего уровня и потоком битов PHY соответственно в нисходящем и восходящем направлениях.

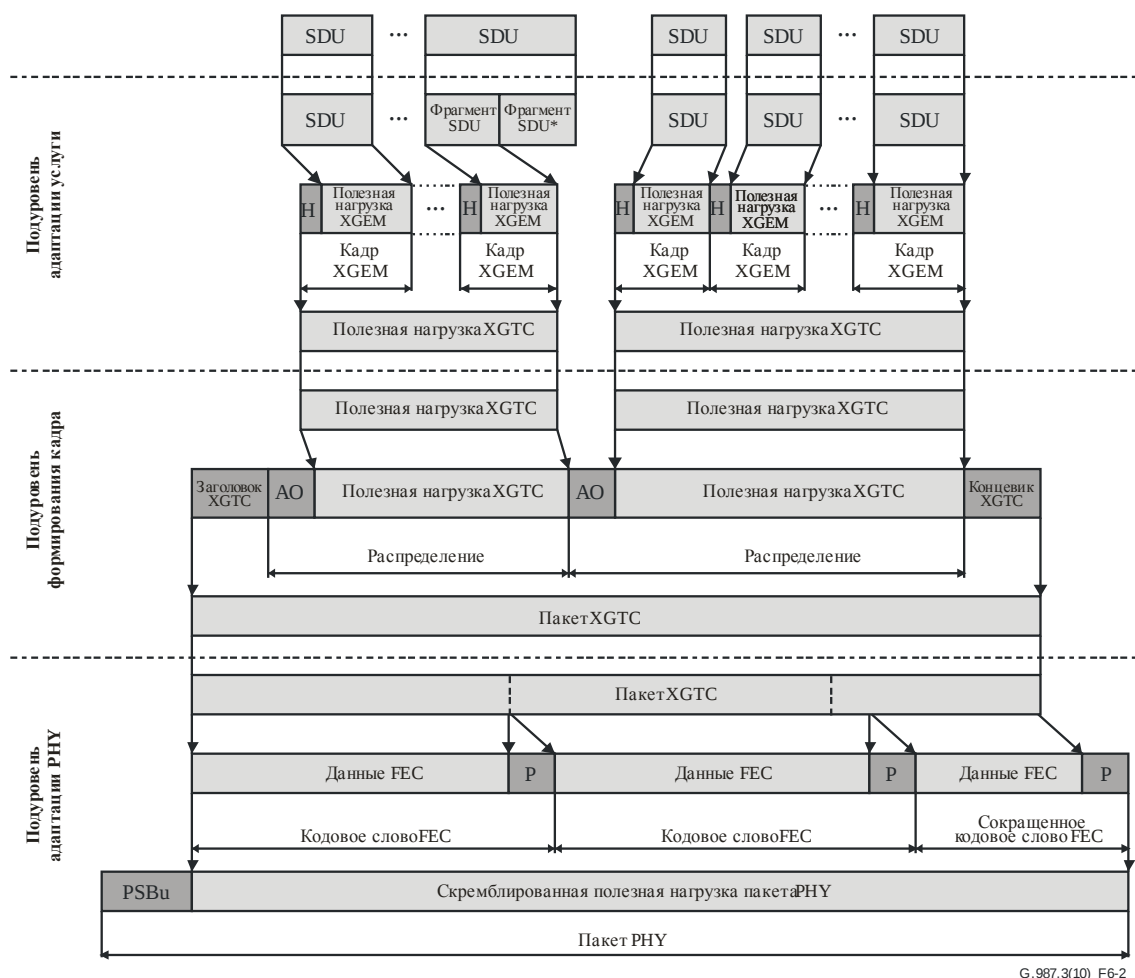


G.987.3(10)_F6-1

H – заголовок кадра XGEM

P – поле четности FEC

Рисунок 6-1 – Преобразование SDU нисходящего потока



- * – оставшийся фрагмент SDU передается в последующем распределении с тем же идентификатором Alloc-ID
 H – заголовок кадра XGEM
 АО – служебная нагрузка распределения
 P – поле четности FEC

Рисунок 6-2 – Преобразование SDU восходящего потока

Основные функциональные возможности трех подуровней в составе уровня TC XG-PON рассматриваются в пункте 6.2.

6.2 Функции подуровня XGTC

6.2.1 Подуровень адаптации услуги XGTC

Подуровень адаптации услуги XGTC отвечает за инкапсуляцию, мультиплексирование и определение границ SDU верхнего уровня в процессе передачи данных по сети PON.

На стороне передатчика подуровень адаптации услуги XGTC принимает блоки SDU верхнего уровня, представленные кадрами данных пользователя и трафиком интерфейса управления и контроля ONU (OMCI), при необходимости выполняет фрагментацию SDU, назначает Port-ID XGEM фрагменту SDU или SDU и применяет к нему метод инкапсуляции XG-PON для получения кадра XGEM. Полезная нагрузка кадра XGEM может быть дополнительно зашифрована. Последовательность кадров XGEM образует полезную нагрузку кадра XGTC в направлении нисходящего потока или пакет XGTC в направлении восходящего потока.

На стороне приемника подуровень адаптации услуги XGTC принимает полезную нагрузку кадров и пакетов XGTC, определяет границы кадров XGEM, фильтрует кадры XGEM по значениям Port-ID XGEM, дешифрует полезную нагрузку XGEM, если она была зашифрована передатчиком, заново собирает фрагментированные SDU и доставляет SDU соответствующим клиентам.

Подробное описание процессов формирования кадров XGEM, определения границ кадров XGEM и фрагментации SDU см. соответственно в пунктах 9.1, 9.2 и 9.3.

Поскольку подуровень адаптации услуги имеет дело с SDU двух типов, его можно логически разделить на механизм XGEM, отвечающий за мультиплексирование и фильтрацию значений Port-ID XGEM, и два адаптера услуги – адаптер пользовательских данных и адаптер OMCI. Адаптер пользовательских данных можно настроить для размещения различных транспортных интерфейсов верхнего уровня.

Наиболее распространенные случаи преобразований услуги в кадры XGEM приведены в пункте 9.4.

6.2.2 Подуровень формирования кадра XGTC

Подуровень формирования кадра XGTC отвечает за построение и анализ полей служебной нагрузки, поддерживающих необходимые функции управления PON. Форматы кадров таковы, что кадры и их элементы по возможности выравниваются по границам 4-байтовых слов.

На стороне передатчика подуровень формирования кадров XGTC принимает от подуровня адаптации услуги XGTC несколько серий кадров XGEM, образующих полезную нагрузку XGTC, и составляет кадр XGTC в нисходящем направлении или пакет XGTC в восходящем направлении, создавая поля служебной нагрузки встроенных каналов обмена сообщениями системы OAM и системы эксплуатации, администрирования и технического обслуживания физического уровня (PLOAM). Размер каждого кадра полезной нагрузки XGTC нисходящего потока определяется путем вычитания переменного размера служебной нагрузки управления полосой пропускания восходящего потока и нагрузки канала PLOAM из фиксированного размера кадра XGTC нисходящего потока. В восходящем направлении в пакете XGTC мультиплексируются полезные нагрузки XGTC, связанные с несколькими Alloc-ID, причем размер каждой полезной нагрузки определяется на основе поступающей информации управления полосой пропускания.

На стороне приемника подуровень формирования кадра XGTC принимает кадры XGTC или пакеты XGTC, анализирует служебные поля XGTC, извлекая входящие потоки встроенных сообщений управления и PLOAM, и передает полезную нагрузку XGTC подуровню адаптации услуги. Входящий поток канала сообщений PLOAM доставляется в устройство обработки PLOAM. Встроенная информация OAM в объеме, соответствующем сигнализации управления полосой пропускания восходящего потока (синтаксический анализ BWmap) и динамического распределения пропускной способности (DBA), обрабатывается в самом подуровне формирования кадра, обеспечивая частичный контроль над подуровнем адаптации РНУ (синхронизация и управление профилем РНУ-пакетов восходящего потока) и подуровнем адаптации услуги (индикация ключа шифрования). Остальная часть встроенной информации OAM передается средствам управления вне подуровня формирования кадра, таким как блоки управления электропитанием ONU и блоки контроля рабочих характеристик.

Подробная спецификация формата кадра XGTC нисходящего потока, включая синтаксический анализ BWmap, приведена в пункте 8.1, а формата пакетов XGTC восходящего потока, включая сигнализацию DBA, – в пункте 8.2.

6.2.3 Подуровень адаптации РНУ XGTC

Подуровень адаптации РНУ выполняет функции, изменяющие битовый поток, модулирующий оптический передатчик, в целях улучшения характеристик обнаружения, приема и разграничения сигнала, передаваемого по оптическому носителю.

На стороне передатчика подуровень адаптации РНУ принимает от подуровня формирования кадров XGTC кадры XGTC (в направлении нисходящего потока) или пакеты XGTC (в направлении восходящего потока), разбивает их на блоки данных FEC, вычисляет и добавляет к каждому блоку данных FEC поле четности FEC, выполняет скремблирование контента, защищенного посредством FEC, добавляет к началу физический блок синхронизации, подходящий для передачи в нисходящем (PSBd) или восходящем (PSBu) направлении, и обеспечивает выравнивание синхронизации результирующего потока битов.

На стороне приемника подуровень адаптации РНУ выполняет физическую синхронизацию и определяет границы входящего потока битов, дескремблирует контент РНУ-кадра или пакета, выполняет упреждающую коррекцию ошибок и извлекает символы четности упреждающей коррекции ошибок (FEC), доставляя результирующие кадры XGTC (в направлении нисходящего

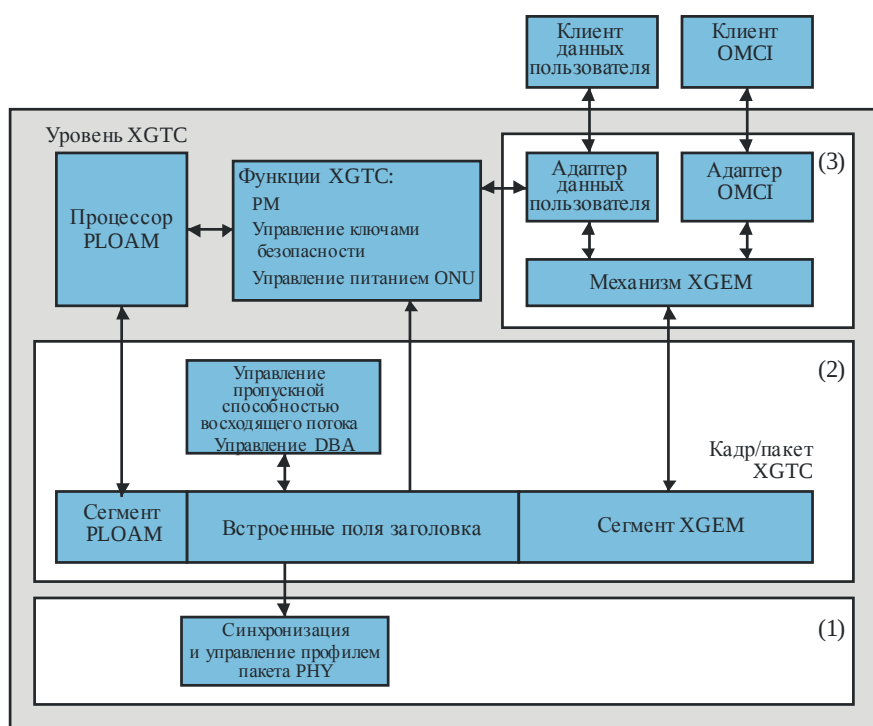
потока) или пакеты XGTC (в направлении восходящего потока) на подуровень формирования кадров XGTC.

Подробная информация о служебных полях PSBd и PSBu приведена в пунктах 10.1 и 10.2 соответственно.

Использование FEC улучшает рабочие характеристики чувствительности и защиты от перегрузки оптического приемника, добавляя избыточность в передаваемый поток битов и позволяя приемнику работать при повышенном коэффициенте ошибок по битам (BER). Подробное описание упреждающей коррекции ошибок приведено в пункте 10.3.

Скремблирование потока битов представляет собой рандомизацию передачи и помогает повысить устойчивость к последовательным идентичным цифрам (CID). Метод скремблирования XG-PON описывается в пункте 10.4.

Еще один вопрос, который можно формально отнести к области подуровня адаптации PHY, это линейное кодирование. Как указано в [ITU-T G.987.2], линейный код в нисходящем и восходящем направлениях, используемый в XG-PON 1, – это код без возврата к нулю (NRZ). Этот код имеет единичную скорость и в настоящей Рекомендации далее не рассматривается.



- (1) Подуровень адаптации PHY XGTC
 (2) Подуровень формирования кадра XGTC
 (3) Подуровень адаптации услуги XGTC

Рисунок 6-3 – Структура информационного потока XGTC

6.3 Управление системой XG-PON

Информация по контролю, эксплуатации и управлению в системе XG-PON передается по трем каналам – OAM, PLOAM и OMCI. Встроенные каналы OAM и PLOAM управляют функциями уровней PMD и XGTC. Канал OMCI обеспечивает однородную систему управления более высокими уровнями (определяемыми услугой).

6.3.1 Встроенный канал OAM

Встроенный канал OAM содержит четко определенные поля заголовка и встроенные структуры кадров XGTC нисходящего потока и пакетов XGTC восходящего потока. Этот канал обеспечивает трассу с малой задержкой для срочной информации управления, поскольку каждая порция

информации непосредственно преобразуется в соответствующее поле. В число функций, использующих этот канал, входят: синхронизация и управление профилем РНУ-пакетов восходящего потока, распределение пропускной способности, выбор ключа шифрования данных, сигнализация динамического распределения пропускной способности, принудительное включение и индикация сообщения "dying gasp" (о снижении мощности питания). Подробное описание полей заголовков и структур, связанных с поддержкой этих функций, представлено в разделе 8 в рамках спецификации подуровня формирования кадра XGTC.

6.3.2 Канал PLOAM

Канал PLOAM основан на сообщениях и переносится в выделенной области кадра XGTC нисходящего потока и пакета XGTC восходящего потока. Этот канал используется для всей информации управления PMD и XGTC, которая не передается по встроенному каналу OAM. Структура сообщений, типы сообщений и подробные спецификации формата PLOAM приведены в разделе 11.

6.3.3 Интерфейс управления и контроля ONU (OMCI)

Канал интерфейса управления и контроля ONU (OMCC) используется для управления уровнями, определяемыми услугой, которые располагаются выше XGTC и технически не входят в область применения настоящей Рекомендации. Однако уровень XGTC должен обеспечивать транспортный интерфейс на основе XGEM для этого трафика управления, включая конфигурирование соответствующих идентификаторов потока транспортного протокола (Port-ID XGEM). В настоящей Рекомендации определяются формат и механизм передачи для канала OMCI. Подробная спецификация OMCI приведена в [ITU-T G.988].

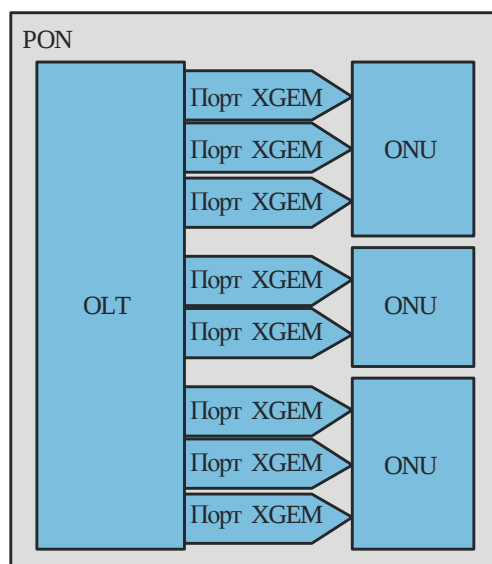
Адаптер OMCI в ONU отвечает за фильтрацию и деинкапсуляцию переносящих OMCI кадров XGEM в направлении нисходящего потока и инкапсуляцию SDU OMCI в направлении восходящего потока. Блоки SDU OMCI передаются логике, которая реализует функции OMCI.

Адаптер OMCI в OLT отвечает за фильтрацию и деинкапсуляцию переносящих OMCI кадров XGEM в направлении восходящего потока и инкапсуляцию SDU OMCI из управляющей логики OMCI в кадры XGEM для транспортировки в ONU.

6.4 Архитектура мультиплексирования с временным разделением

6.4.1 Обзор

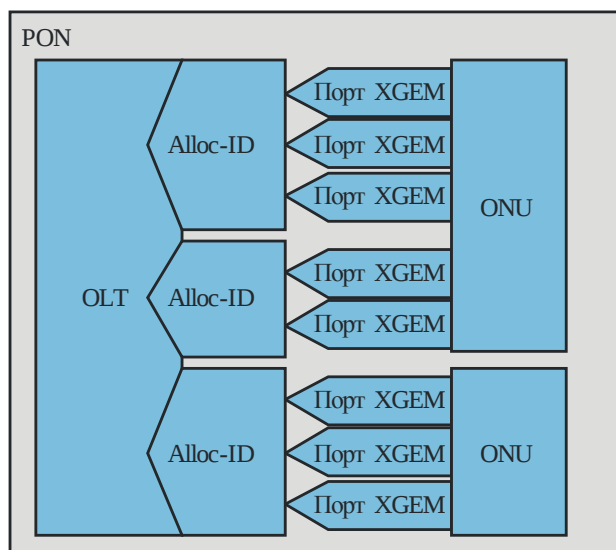
В нисходящем направлении функция мультиплексирования трафика централизована. OLT мультиплексирует кадры XGEM в среду передачи с использованием значения Port-ID XGEM в качестве ключа для идентификации кадров XGEM, которые относятся к различным логическим соединениям нисходящего потока. Каждый ONU фильтрует кадры XGEM нисходящего потока на основе их значений Port-ID XGEM и обрабатывает только кадры XGEM, относящиеся к этому ONU. Для передачи кадров XGEM в несколько ONU может использоваться порт многоадресной передачи XGEM.



G.987.3(10)_F6-4

Рисунок 6-4 – Мультиплексирование нисходящего потока в XG-PON

В восходящем направлении функция мультиплексирования трафика носит распределенный характер. OLT предоставляет возможности передачи в восходящем направлении или результаты распределения пропускной способности восходящего потока транспортным объектам в пределах противолежащих ONU. Объекты ONU по переносу трафика, получающие распределение пропускной способности исходящего потока, определяются по их идентификаторам распределения (Alloc-ID). Размеры пропускной способности, распределяемые разным идентификаторам Alloc-ID, мультиплексируются по времени, как указывается OLT в картах распределения пропускной способности, передаваемых в нисходящем направлении. В пределах каждого распределения пропускной способности блок ONU использует Port-ID XGEM в качестве ключа мультиплексирования для идентификации кадров XGEM, относящихся к различным логическим соединениям восходящего потока.



G.987.3(10)_F6-5

Рисунок 6-5 – Мультиплексирование восходящего потока в XG-PON

6.4.2 Идентификатор ONU

ONU-ID – это 10-битовый идентификатор, который OLT назначает для ONU во время активации ONU с использованием канала обмена сообщениями PLOAM.

ONU-ID уникален в пределах PON. Когда ONU входит в начальное состояние (O1) конечного автомата активации ONU (о причинах возможного перехода в состояние O1 см. в разделе 12), он

отбрасывает ранее присвоенный ONU-ID вместе со всеми зависимыми присвоения конфигурации XGTC.

Семантика значений ONU-ID представлена в таблице 6-1.

Таблица 6-1 – Значения ONU-ID

ONU-ID	Определение	Комментарий
0... 1022	Присваиваемый	Присваивается OLT при активации ONU; используется для идентификации отправителя пакета восходящего потока или сообщения PLOAMu и получателя сообщения PLOAMd
1023	Широковещательный/неприсваиваемый	Широковещательный адрес в PLOAMd; неприсваиваемый ONU в PLOAMu

6.4.3 Идентификатор распределения (Аллок-ID)

Идентификатор распределения (Аллок-ID) представляет собой 14-битовое число, которое OLT назначает для ONU, чтобы идентифицировать объект по переносу трафика, получающий распределения пропускной способности восходящего потока в пределах данного ONU. Такой транспортный объект может представлять собой либо контейнер передачи (T-CONT), либо OMCC восходящего потока.

Каждому ONU присваивается один или несколько идентификаторов Аллок-ID, включая как минимум Аллок-ID по умолчанию. Аллок-ID ONU по умолчанию численно равен его ONU-ID и назначается неявно в силу присвоения ONU-ID при активации ONU. Аллок-ID по умолчанию переносит трафик OMCC восходящего потока и может переносить трафик данных пользователя. Аллок-ID по умолчанию также используется исключительно для PLOAM-распределений конкретному ONU. Значение Аллок-ID по умолчанию не может перераспределяться или изменяться в течение всего цикла активации ONU (то есть до тех пор, пока ONU не будет переактивирован и не получит новый ONU-ID).

Дополнительные идентификаторы Аллок-ID присваиваются явным образом по усмотрению OLT с помощью сообщения PLOAM Assign_Alloc-ID, содержащего Аллок-ID типа 1 (определение сообщения PLOAM Assign_Alloc-ID см. в пункте 11.3.3.7). Дополнительные Аллок-ID используются для транспортировки трафика пользовательских данных. Их присвоение можно явным образом пересмотреть с помощью сообщения PLOAM Assign_Alloc-ID, содержащего Аллок-ID типа 255.

Аллок-ID уникален для данной PON и может быть присвоен только одному ONU. Когда ONU входит в начальное состояние (O1) конечного автомата активации ONU (о причинах возможных переходов в состояние O1 см. в разделе 12), он сбрасывает все присвоения Аллок-ID, включая присвоение Аллок-ID по умолчанию.

Семантика значений Аллок-ID приведена в таблице 6-2.

Таблица 6-2 – Значения Аллок-ID

Аллок-ID	Определение	Комментарий
0... 1022	По умолчанию	Аллок-ID по умолчанию, который присваивается неявным образом и равен ONU-ID
1023	Вещательный	Используется OLT в структуре распределения разрешений на выдачу серийных номеров для указания того, что любой ONU, выполняющий этап получения серийного номера в ходе процедуры активации, может использовать это распределение для передачи ответа на назначение серийного номера
1024... 16 383	Присваиваемый	Если ONU требуется несколько идентификаторов Аллок-ID, то OLT присваивает этому ONU дополнительные Аллок-ID, выбирая уникальный номер из этого диапазона и передавая его ONU с помощью сообщения PLOAM Assign_Alloc-ID

6.4.4 Идентификатор порта XGEM

Идентификатор порта XGEM или Port-ID XGEM – это 16-битовое число, которое OLT присваивает отдельному логическому соединению. Присвоение Port-ID XGEM логическому соединению OMCC осуществляется неявным образом в силу назначения ONU-ID данному ONU. Значение Port-ID OMCC численно равно значению соответствующего ONU-ID. Все остальные присвоения Port-ID XGEM для этого ONU выполняются посредством OMCC.

Когда ONU входит в начальное состояние (O1) конечного автомата активации ONU (о причинах возможных переходов в состояние O1 см. в разделе 12), он сбрасывает присвоение Port-ID XGEM по умолчанию, но сохраняет ранее присвоенные не по умолчанию значения Port-ID XGEM.

Семантика значений Port-ID XGEM приведена в таблице 6-3.

Таблица 6-3 – Значения Port-ID XGEM

Port-ID XGEM	Определение	Комментарий
0... 1022	По умолчанию	Port-ID XGEM по умолчанию, назначаемый неявно и равный ONU-ID; используется для транспортировки трафика OMCC
1023... 65 534	Присваиваемый	Если ONU требуется несколько идентификаторов Port-ID XGEM, то OLT присваивает данному ONU дополнительные значения Port-ID, выбирая уникальный номер из этого диапазона и передавая его ONU по каналу управления OMCI
65 535	Незанятый	Зарезервирован для незанятого Port-ID XGEM

6.5 Управление доступом к среде передачи

В системе XG-PON оптическое линейное окончание (OLT) обеспечивает управление доступом к среде передачи для восходящего трафика. Согласно базовой концепции, каждый PNHU-кадр нисходящего потока содержит карту распределения пропускной способности (BWmap), в которой указано местоположение для передачи восходящего потока различными ONU в соответствующем PNHU-кадре восходящего потока. Концепция управления доступом к среде передачи в системе XG-PON представлена на рисунке 6-6.

Каждые 125 мкс OLT передает PNHU-кадр нисходящего потока. Из-за разного расстояния по оптоволокну каждый данный PNHU-кадр достигает разных ONU, как правило, в различные моменты времени. С каждым принятым PNHU-кадром нисходящего потока ONU связывает соответствующий PNHU-кадр восходящего потока. Отдельные выравнивающие задержки, установленные в ходе определения дальности ONU (см. раздел 12), служат для согласования представлений ONU в начале каждого PNHU-кадра восходящего потока таким образом, чтобы передачи любых двух ONU в восходящем направлении, происходящие с фиксированным смещением относительно начала PNHU-кадра восходящего потока, достигали OLT в точности в один и тот же момент времени.

Для каждого PNHU-кадра OLT создает и передает в нисходящем направлении карту BWmap, задающую последовательность неперекрывающейся передачи разных ONU в восходящем направлении. BWmap содержит ряд структур распределения, причем каждая структура распределения адресована определенному Alloc-ID конкретного ONU. Последовательность из одной или нескольких структур распределения, адресованных Alloc-ID, принадлежащим к одному и тому же ONU, образует серию пакетов распределения. Каждая серия пакетов распределения содержит указатель начала пакета в PNHU-кадре восходящего потока и последовательность размеров разрешений, которые допускается передавать данному ONU. Указатели начала относятся к смещениям в PNHU-кадре восходящего потока (на подуровне адаптации PNHU), а размеры грантов – к полезной нагрузке кадра XGTC (на подуровне формирования кадров). Указатели начала и размеры разрешений выражаются в словах (одно слово равно 4 байтам). Распределение в одно слово на PNHU-кадр соответствует мгновенной скорости передачи данных 256 кбит/с. OLT может предоставлять более высокие или более низкие эффективные скорости передачи данных, регулируя размер и частоту выдачи разрешений, и может корректировать эффективную скорость передачи данных посредством динамического планирования.

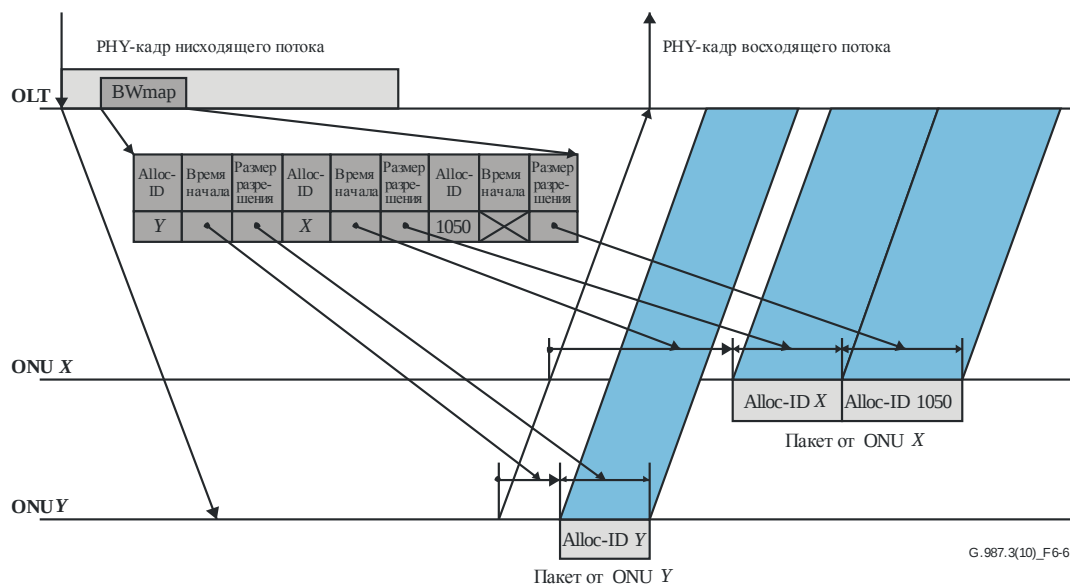


Рисунок 6-6 – Концепция управления доступом к среде передачи XGTC

Использование параметров BWmap подробно рассматривается в пункте 8.1.2. Временные соотношения в PON описаны в разделе 13.

7 Распределение ресурсов и качество обслуживания

Возможности предоставления качества обслуживания (QoS), связанные с конкретным доступом, являются неотъемлемой частью механизмов обеспечения сквозного QoS. Они необходимы, но недостаточны для гарантии достижения целей QoS применительно к сквозным потокам трафика. В оптических сетях доступа на основе XG-PON возможности обеспечения QoS поддерживаются сетевыми элементами OLT и ONU и связаны со способами и средствами распределения доступных ресурсов, включая возможности обработки, буферное пространство и пропускную способность цифровых каналов связи для отдельных потоков трафика и совокупностей потоков трафика.

7.1 Принципы распределения ресурсов в нисходящем и восходящем направлениях

Поток трафика обеспечивается определенным набором параметров обслуживания в нисходящем и восходящем направлениях. Эти параметры могут быть представлены дескриптором трафика. В самом общем виде дескриптор трафика имеет форму

$$D = \langle R_F, R_A, R_M, \chi_{AB}, P, \omega \rangle, \quad (7-1)$$

где:

R_F – фиксированная пропускная способность [бит/с];

R_A – обеспечиваемая пропускная способность [бит/с];

R_M – максимальная пропускная способность [бит/с];

χ_{AB} – троичный показатель приемлемости дополнительного распределения пропускной способности {отсутствует (none), не гарантировано (NA), по возможности (BE)};

P – приоритет при распределении пропускной способности по возможности;

ω – весовой коэффициент при распределении пропускной способности по возможности.

Фиксированная пропускная способность $R_F \geq 0$ представляет собой зарезервированную часть пропускной способности канала, которая выделяется для данного потока трафика, независимо от потребностей трафика в этом потоке и общих условий нагрузки трафика.

Обеспечиваемая пропускная способность $R_A \geq 0$ представляет собой пропускную способность канала, которая выделяется для данного потока трафика, если только этот поток не удовлетворяет потребности трафика, независимо от общих условий трафика.

Максимальная пропускная способность $R_M > 0$ представляет собой верхний предел общей пропускной способности, которая может быть присвоена потоку трафика при любых условиях трафика.

Правильно сформированный дескриптор трафика должен удовлетворять следующим трем инвариантным ограничениям:

$$\begin{aligned} R_M &\geq R_F + R_A; \\ \text{если } \chi_{AB} = \text{NA, то } R_M &> R_F + R_A > 0; \\ \text{если } \chi_{AB} = \text{BE, то } R_M &> R_F + R_A \geq 0. \end{aligned} \quad (7-2)$$

Кроме того, общая спецификация трафика должна удовлетворять основному условию стабильности:

$$\sum_i (R_F^i + R_A^i) \leq C, \quad (7-3)$$

где суммирование производится по множеству всех потоков трафика в восходящем или нисходящем направлении в PON, а C – это пропускная способность интерфейса в восходящем или нисходящем направлении соответственно.

Указанный общий вид дескриптора трафика позволяет поддерживать порядок обслуживания, основанный как на скорости, так и на приоритетах. Устанавливая определенные компоненты дескриптора в нулевое значение (параметры скорости) или в идентичные значения (параметры приоритета и веса), оператор системы может эффективно задавать требуемый порядок обслуживания. Потоки трафика в восходящем и нисходящем направлениях можно указывать с разными подмножествами компонентов дескриптора. В частности, параметр фиксированной пропускной способности важен в среде распределенного планирования, где он служит для уменьшения задержки связи между сетевыми элементами, содержащими соответственно очереди планировщика и трафика, и может не применяться в нисходящем направлении, где планирование централизовано.

При необходимости два или несколько потоков трафика можно рассматривать как единый совокупный поток. Данная система составляет дескриптор трафика совокупного потока из отдельных дескрипторов трафика составляющих потоков. Предполагается, что параметры скорости дескриптора трафика совокупного потока (обозначены звездочкой) отвечают следующим условиям:

$$\begin{aligned} R_F^* + R_A^* &= \sum_j (R_F^j + R_A^j); \\ \max_j R_M^j &\leq R_M^* \leq \sum_j R_M^j, \end{aligned} \quad (7-4)$$

где верхний индекс j означает параметр j -й составляющей дескриптора трафика. Определение значений параметров дескриптора трафика совокупного потока по составляющим его дескрипторам трафика выходит за рамки настоящей Рекомендации.

В нисходящем направлении QoS-ориентированное управление трафиком (включая в соответствующих случаях управление буфером, планирование и формирование трафика) в потоках трафика Port-ID XGEM обеспечивает OLT, исходя из соответствующих дескрипторов трафика, наличия ресурсов памяти и пропускной способности и динамических условий трафика. Поскольку это внутренняя функция OLT, ее рассмотрение выходит за рамки настоящей Рекомендации.

В восходящем направлении дескриптор совокупного трафика создается для каждого контейнера передачи (T-CONT) на основе спецификаций обслуживания потоков Port-ID XGEM, мультиплексированных в этот T-CONT. OLT отвечает за управление трафиком с учетом QoS для совокупных потоков трафика, связанных с контейнерами T-CONT, с использованием соответствующих спецификаций совокупных услуг, доступной пропускной способности восходящего потока и, возможно, информации, полученной посредством мониторинга трафика восходящего потока и/или отчетов о состоянии ONU. Для каждого отдельного T-CONT тот ONU, к которому относится данный T-CONT, отвечает за управление трафиком с учетом QoS для составляющих

потоков трафика Port-ID XGEM с использованием соответствующих спецификаций услуг Port-ID XGEM, доступных ресурсов и динамических условий трафика.

Устройства управления трафиком ONU восходящего потока, поддерживающие распределение ресурсов и QoS, могут включать в себя средства контроля входящего трафика, формирования трафика и планирования потока Port-ID XGEM в пределах T-CONT. Спецификация этих функций выходит за рамки настоящей Рекомендации.

Остальная часть этого раздела посвящена управлению трафиком восходящего потока, и все ссылки на параметры обеспечиваемого трафика относятся к дескрипторам совокупного трафика, связанным с идентификаторами Alloc-ID.

7.2 Обзор динамического распределения пропускной способности

Динамическое распределение пропускной способности (DBA) в XG-PON – это процесс, с помощью которого OLT распределяет возможности передачи восходящего потока среди организаций – носителей трафика в ONU на основе динамической индикации их активности и настроенных для них контрактов по трафику. Индикация состояния активности может быть либо явной – через отчеты о состоянии буфера, либо неявной – путем передачи незанятых кадров XGEM при распределении возможностей передачи восходящего потока.

По сравнению со статическим распределением пропускной способности механизм DBA повышает степень использования пропускной способности XG-PON восходящего потока, приспосабливаясь к характеру трафика пакетов ONU. DBA дает два практических преимущества. Во-первых, благодаря более эффективному использованию полосы пропускания оператор сети может добавить в сеть доступа больше абонентов. Во-вторых, абоненты могут пользоваться расширенными услугами, такими как услуги, требующие переменной скорости с пиковыми значениями, превосходящими уровни, которые могут разумно распределяться в статическом режиме.

7.2.1 Абстрагирование DBA PON

В XG-PON объект – получатель распределения пропускной способности восходящего потока представлен идентификатором распределения (Alloc-ID). Независимо от количества идентификаторов Alloc-ID, присвоенных каждому ONU, количества портов XGEM, мультиплексируемых в каждый Alloc-ID, и фактической физической и логической структуры очередей, реализованной ONU, OLT моделирует совокупный трафик, связанный с каждым Alloc-ID, как единый логический буфер и рассматривает – для целей распределения пропускной способности – все Alloc-ID, указанные для данной PON, как независимые равноправные объекты на одном и том же уровне логической иерархии.

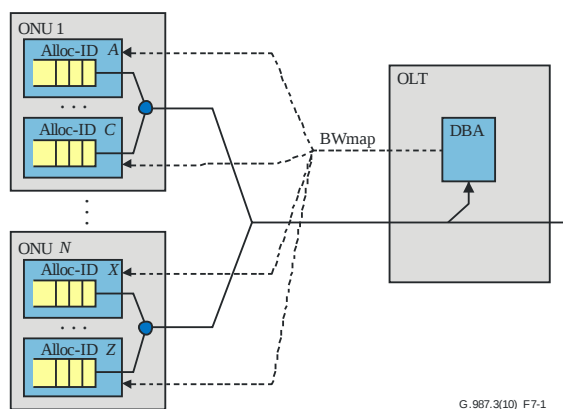


Рисунок 7-1 – Абстрагирование DBA PON

Для каждого логического буфера Alloc-ID функциональный модуль DBA в составе OLT делает заключение о его занятости или путем сбора внутримышечных отчетов о состоянии, или путем наблюдения за незанятыми кадрами, либо обоими способами. Затем функция DBA предоставляет входные данные для планировщика OLT восходящего потока, который отвечает за создание карт пропускной способности (BWmap). BWmap определяет размер и синхронизацию возможностей

передачи восходящего потока для каждого Alloc-ID и соответствующие данные передаются в ONU внутри полосы вместе с нисходящим трафиком.

7.2.2 Функциональные требования к DBA

Динамическое распределение пропускной способности в XG-PON охватывает следующие функции. Эти функции применяются на уровне отдельных Alloc-ID и параметров компонента их обеспечиваемой пропускной способности:

- 1) определение состояния занятости логического буфера передачи восходящего потока;
- 2) обновление мгновенно распределяемой пропускной способности в соответствии с установленным состоянием занятости буфера в рамках параметров компонента предоставленной пропускной способности;
- 3) выдача результатов распределения в соответствии с обновленным мгновенным значением пропускной способности;
- 4) управление работой DBA.

OLT XG-PON должен поддерживать DBA.

7.2.3 Методы DBA

В зависимости от механизма определения занятости буфера ONU можно выделить два метода DBA:

- формирование сообщений о состоянии (SR) DBA основывается на явных отчетах о занятости буфера, которые запрашивает OLT, и в ответ предоставляются устройствами ONU;
- контроль трафика (TM) DBA основывается на наблюдениях OLT за структурой незанятого кадра XGEM и сравнения ее с соответствующими картами пропускной способности.

OLT XG-PON должен поддерживать комбинацию обоих методов DBA TM и SR и эффективно и беспристрастно выполнять функции DBA, перечисленные в пункте 7.2.2. Конкретные критерии эффективности и беспристрастности могут быть основаны на общем использовании PON, характеристиках отдельных ONU, проверяемых на соответствие целям, и сравнительных характеристиках, проверяемых на нескольких ONU.

ONU XG-PON должен поддерживать формирование сообщений о состоянии DBA и передавать отчеты DBA в восходящем направлении в соответствии с указаниями OLT. Метод формирования сообщений о состоянии DBA включает внутрисполосную передачу сигналов между OLT и ONU, которая является неотъемлемой частью спецификации XGTC. Передача сигналов при формировании сообщений о состоянии DBA подробно обсуждается в пункте 8.2.2.

Алгоритмические сведения о том, как OLT применяет полученную из отчетов или анализа информацию о состоянии, полная спецификация метода контроля трафика DBA, а также сведения о планировщике OLT восходящего потока, который отвечает за составление BWmap, выходят за рамки области применения уровня XGTC, и за реализацию этих функций отвечает поставщик OLT.

7.3 Эталонная модель динамического распределения пропускной способности

7.3.1 Условные обозначения

В этом разделе используются следующие дополнительные условные обозначения:

- | | | |
|----------|---|---|
| A | – | объем трафика, поступающего в буфер [бит]; |
| B | – | заполнение логического буфера [бит]; |
| R | – | общий распределенный размер пропускной способности, динамический [бит/с]; |
| R_G | – | распределенный гарантированный размер пропускной способности, динамический [бит/с]; |
| R_L | – | предлагаемая нагрузка трафика, динамическая [бит/с]; |
| R_{NA} | – | распределенный негарантированный размер пропускной способности, динамический [бит/с]; |
| R_{BE} | – | распределенная пропускная способность по возможности, динамическая [бит/с]; |

- S_{NA} – избыточная пропускная способность при негарантированном распределении, динамическая [бит/с];
- S_{BE} – избыточная пропускная способность при распределении по возможности, динамическая [бит/с].

Надстрочный индекс, если он имеется, указывает на конкретный Alloc-ID.

7.3.2 Предлагаемая нагрузка трафика

Каждый Alloc-ID может динамически характеризоваться предлагаемой нагрузкой трафика $R_L(t)$, которая определяется как средняя скорость, с которой должен обслуживаться логический буфер Alloc-ID, для того чтобы освобождаться за определенное фиксированное время Δ , которое представляет собой системную константу (равную по меньшей мере времени одного кадра, но более реально – восьми кадров):

$$R_L(t) = \frac{B(t) + A(t, t + \Delta)}{\Delta}, \quad (7-5)$$

где $B(t)$ – заполнение логического буфера в момент времени t , а необязательный член $A(t, t + \Delta)$ представляет собой новые поступления в буфер в течение интервала времени $(t, t + \Delta)$. Следует отметить, что если требуется строго непредсказуемое эталонное значение, $A(t, t + \Delta)$ можно исключить из определения.

7.3.3 Компоненты распределенной пропускной способности

Пропускная способность $R^i(t) \geq 0$, динамически распределенная для Alloc-ID i в рамках настоящей эталонной модели, состоит из гарантированных и дополнительных компонентов (см. рисунок 7-2). Гарантированная пропускная способность $R_G^i(t)$ может иметь вид фиксированной или обеспечиваемой пропускной способности. Дополнительная пропускная способность может предоставляться либо в негарантированном виде R_{NA}^i либо в виде по возможности $R_{BE}^i(t)$:

$$R^i(t) = R_G^i(t) + R_{NA}^i(t) \quad (7-6a)$$

для Alloc-ID i при $\chi_{AB}^i = NA$;

$$R^i(t) = R_G^i(t) + R_{BE}^i(t) \quad (7-6b)$$

для Alloc-ID i при $\chi_{AB}^i = BE$;

$$R^i(t) = R_G^i(t) \quad (7-6c)$$

для Alloc-ID i при $\chi_{AB}^i = None$.

Для гарантированного распределения пропускной способности в эталонной модели используется критерий, основанный на обеспечиваемых параметрах скорости. Фиксированная часть гарантированной пропускной способности назначается статически. Обеспечиваемая часть гарантированной пропускной способности назначается динамически на основе предлагаемой нагрузки конкретного Alloc-ID. Для дополнительного распределения пропускной способности эталонная модель поддерживает как критерий пропорциональности скорости, так и критерий, основанный на обеспечиваемых приоритетах и весовых коэффициентах. Дополнительная пропускная способность распределяется динамически (в пределах заштрихованной области на рисунке 7-2) в зависимости от предлагаемой нагрузки конкретного Alloc-ID и общих условий трафика.

Эталонная модель эффективно вводит строгую иерархию приоритетов среди форм распределенной пропускной способности:

- 1) фиксированная пропускная способность (наивысший приоритет);
- 2) обеспечиваемая пропускная способность;
- 3) негарантированная пропускная способность;
- 4) пропускная способность по возможности (низший приоритет).

Сначала OLT распределяет фиксированную пропускную способность всем Alloc-ID в PON, независимо от их отдельных предлагаемых нагрузок и общих условий трафика. Затем OLT выполняет распределение гарантированного компонента пропускной способности, распределяя обеспечиваемую пропускную способность каждому Alloc-ID до тех пор, пока не будет достигнут соответствующий обеспечиваемый уровень R_A или удовлетворен спрос на трафик. После этого OLT распределяет негарантированные компоненты пропускной способности среди подходящих ненасыщенных Alloc-ID до тех пор, пока либо все Alloc-ID не достигнут своего уровня насыщения (то есть меньшего из значений соответствующей максимальной пропускной способности R_M и предлагаемой нагрузки $R_L(t)$), либо не будет исчерпана избыточная пропускная способность $S_{NA}(t)$. Наконец, OLT распределяет среди подходящих ненасыщенных Alloc-ID компоненты пропускной способности по возможности.

Эталонная модель требует, чтобы для каждого Alloc-ID i , если предлагаемая нагрузка трафика $R_L^i(t)$ превышает обеспечиваемый фиксированный уровень R_F^i , распределенная пропускная способность $R^i(t)$ всегда удовлетворяла условию сохранения:

$$R^i(t) \leq \min \{R_M^i; R_L^i(t)\}. \quad (7-7)$$

7.3.4 Распределение гарантированной пропускной способности

До тех пор пока выполняется основное условие устойчивости уравнения (7-3), гарантированный компонент динамически распределенной пропускной способности определяется следующим образом:

$$R_G^i(t) = \min \{R_F^i + R_A^i; \max \{R_F^i; R_L^i(t)\}\}. \quad (7-8)$$

$R_G^i(t)$ доступен для данного Alloc-ID независимо от условий общей нагрузки трафика. Таким образом R_F^i служит нижней границей распределенной гарантированной пропускной способности $R_G^i(t)$, а $R_A^i + R_F^i$ – ее верхней границей.

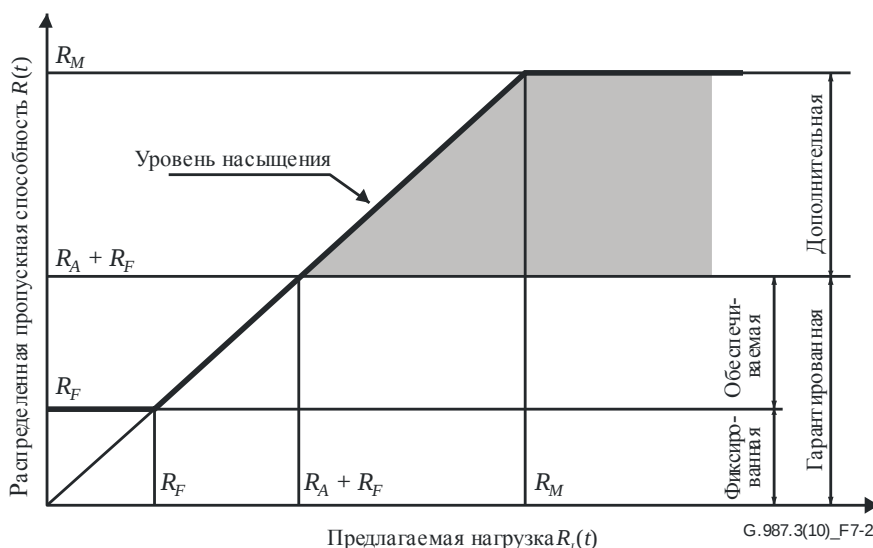


Рисунок 7-2 – Компоненты распределенной пропускной способности в зависимости от предлагаемой нагрузки

7.3.5 Распределение дополнительной пропускной способности пропорционально скорости

Для реализации распределения дополнительной пропускной способности пропорционально скорости каждому Alloc-ID назначаются соответствующие индивидуальные параметры R_F^i , R_A^i и R_M^i . Для всех Alloc-ID устанавливаются одинаковые значения приоритета и весового коэффициента. Показатель приемлемости дополнительной пропускной способности может принимать любое значение (NA, BE, попе).

Негарантированная пропускная способность R_{NA} – это вид дополнительной пропускной способности, которую OLT может динамически распределять подходящему Alloc-ID пропорционально сумме фиксированной и обеспечиваемой пропускной способности этого Alloc-ID.

Размер избыточной пропускной способности, который может участвовать в распределении негарантированной пропускной способности, равен той части пропускной способности восходящей линии связи, которая остается после того, как всем Alloc-ID динамически распределены гарантированные компоненты пропускной способности. Этот размер определяется следующим выражением:

$$S_{NA}(t) = C - \sum_i R_G^i(t), \quad (7-9)$$

где $R_G^i(t)$ определяется уравнением (7-8).

Избыточная пропускная способность $S_{NA}(t)$ распределяется между подходящими ($\chi_{AB} = NA$) Alloc-ID так, чтобы:

- 1) соблюдалось условие сохранения пропускной способности (7-7); и либо
- 2.1) для каждого Alloc-ID i распределенная пропускная способность удовлетворяла критерию насыщения:

$$R^i(t) = \min \{R_M^i; \max \{R_L^i(t); R_F^i\}\}, \quad (7-10)$$

либо

- 2.2) $S_{NA}(t)$ был исчерпан, и только один Alloc-ID оставался ненасыщенным; либо
- 2.3) $S_{NA}(t)$ был исчерпан, и для любых двух подходящих ненасыщенных Alloc-ID i и j распределенные негарантированные значения пропускной способности удовлетворяли условию равнодоступности:

$$\frac{R_{NA}^i(t)}{R_F^i + R_A^i} = \frac{R_{NA}^j(t)}{R_F^j + R_A^j}. \quad (7-11)$$

Пропускная способность по возможности – это вид дополнительной пропускной способности, которую OLT может динамически распределять подходящему Alloc-ID пропорционально негарантированной части максимальной пропускной способности, предоставленной этому Alloc-ID.

Alloc-ID, подходящий для распределения по возможности, может получить дополнительную пропускную способность только тогда, когда насыщены все Alloc-ID, подходящие для негарантированного распределения. Размер избыточной пропускной способности, который может участвовать в распределении по возможности, равен той части пропускной способности восходящей линии связи, которая остается после того, как насыщены все Alloc-ID, подходящие для распределения негарантированной пропускной способности, и всем остальным Alloc-ID присвоены соответствующие гарантированные компоненты пропускной способности. Этот размер определяется следующим выражением:

$$S_{BE}(t) = C - \sum_{i \in \{\chi_{AB}=NA\}} R^i(t) - \sum_{i \in \{\chi_{AB} \neq NA\}} R_G^i(t). \quad (7-12)$$

Здесь $R_G^i(t)$ определяется уравнением (7-8), а $R^i(t)$ – критерием насыщения (7-10).

Избыточная пропускная способность $S_{BE}(t)$ распределяется между подходящими ($\chi_{AB} = BE$) Alloc-ID так, чтобы:

- 1) соблюдалось условие сохранения пропускной способности (7-7); и либо
- 2.1) для каждого Alloc-ID i распределенная пропускная способность удовлетворяла критерию насыщения (7-10); либо
- 2.2) $S_{BE}(t)$ был исчерпан, и только один Alloc-ID оставался ненасыщенным; или

- 2.3) $S_{BE}(t)$ был исчерпан, и для любых двух подходящих ненасыщенных Alloc-ID i и j распределенные значения пропускной способности по возможности удовлетворяли условию равнодоступности:

$$\frac{R_{BE}^i(t)}{R_M^i - (R_F^i + R_A^i)} = \frac{R_{BE}^j(t)}{R_M^j - (R_F^j + R_A^j)}. \quad (7-13)$$

7.3.6 Распределение дополнительной пропускной способности на основе приоритета и весовых коэффициентов

Для реализации распределения дополнительной пропускной способности на основе приоритета и весовых коэффициентов идентификаторам, каждому Alloc-ID назначаются соответствующие индивидуальные параметры P_i и ω_i . Для параметров пропускной способности всех Alloc-ID в пределах каждого уровня P_i устанавливаются одинаковые значения. Приемлемость дополнительной пропускной способности может принимать значение BE или None.

Размер избыточной пропускной способности, который может участвовать в распределении по возможности, равен той части пропускной способности восходящей линии связи, которая остается после того, как всем Alloc-ID динамически распределены гарантированные компоненты пропускной способности. Этот размер определяется следующим выражением:

$$S_{BE}(t) = C - \sum_i R_G^i(t), \quad (7-14)$$

где $R_G^i(t)$ определяется уравнением (7-8).

Избыточная пропускная способность $S_{BE}(t)$ распределяется между подходящими ($\chi_{AB} = BE$) Alloc-ID так, чтобы:

- 1) соблюдалось условие сохранения пропускной способности (7-7); и либо
- 2.1) для каждого Alloc-ID i распределенная пропускная способность удовлетворяла критерию насыщения (7-10); либо
- 2.2) $S_{BE}(t)$ был исчерпан и были справедливы следующие два утверждения:
 - если по меньшей мере один подходящий Alloc-ID i с предоставленным уровнем приоритета P_i остается ненасыщенным, доля пропускной способности по возможности, распределенная любому Alloc-ID с логически более низким приоритетом, равна нулю;
 - если два подходящих Alloc-ID i и j с идентичными предоставленными уровнями приоритета $P_i = P_j$ остаются ненасыщенными, то распределенные им доли пропускной способности по возможности удовлетворяют условию равнодоступности:

$$\frac{R_{BE}^i(t)}{\omega_i} = \frac{R_{BE}^j(t)}{\omega_j}. \quad (7-15)$$

7.4 Требования эффективности DBA

На практике алгоритм DBA OLT не имеет полной информации о состоянии системы. В частности, вместо истинных предложенных нагрузок $R_L^i(t)$, он работает на основе оценок $\hat{R}_L^i(t)$, полученных из отчетов DBRu и результатов мониторинга трафика с применением методов, описание которых выходит за рамки настоящей Рекомендации. В этом разделе предлагается несколько критериев эффективности DBA, которые позволяют оценить практическую реализацию DBA по сравнению с эталонной моделью, описываемой в пункте 7.3.

7.4.1 Распределение постоянной пропускной способности

Определение

В системе, где состояние активности Alloc-ID и потребности в трафике остаются постоянными, пропускная способность, присвоенная Alloc-ID, измеряется как среднее значение по картам BWmap, передаваемым в любой последовательности из K кадров нисходящего потока, где значение K

выбирается достаточно большим для усреднения распределений, которые могут варьироваться от кадра к кадру.

Целевой показатель

Алгоритм DBA OLT должен гарантировать, что распределенная постоянная пропускная способность для каждого противолежащего ненасыщенного Alloc-ID равна по меньшей мере соответствующей фиксированной пропускной способности плюс обеспечиваемая пропускная способность и находится в установленных пределах (например, 10%) динамического значения, рассчитанного на основе эталонной модели, описываемой в пункте 7.3.

7.4.2 Время восстановления обеспечиваемой пропускной способности

Определение

Это интервал времени для наихудшего случая, наблюдаемого в ONU, с того момента, когда Alloc-ID, которому предоставлено право получить распределение обеспечиваемой пропускной способности, но который не получил его из-за недостаточной потребности в трафике, увеличил потребность в трафике по меньшей мере до своего фиксированного уровня плюс обеспечиваемый уровень и до момента, когда ему полностью предоставлена обеспечиваемая пропускная способность в дополнение к фиксированной пропускной способности. Конечный момент интервала точнее определяется как начало первого кадра последовательности из K кадров восходящего потока, достаточно большой для усреднения изменений от кадра к кадру, для которой средняя пропускная способность, распределенная Alloc-ID, отвечает указанному условию.

Целевой показатель

Ожидается равным нескольким миллисекундам (целевое значение 2 мс).

7.4.3 Время конвергенции DBA

Определение

Это интервал времени для наихудшего случая с момента единичного события изменения состояния активности или нагрузки трафика в любом ONU в ранее стационарной системе до момента, когда OLT откорректирует свои распределения пропускной способности для всех противолежащих ненасыщенных ONU до уровней, равных по меньшей мере соответствующей фиксированной пропускной способности плюс обеспечиваемая пропускная способность и находящихся в установленных пределах (например, 20%) соответствующих динамических значений, вычисленных на основе эталонной модели, описываемой в пункте 7.3. Конечный момент интервала точнее определяется как начало первого кадра последовательности из K кадров нисходящего потока, достаточно большой для усреднения изменений от кадра к кадру, для которой передаваемые карты BWmap содержат распределения пропускной способности, в среднем отвечающие указанному условию.

Целевой показатель

Ожидается равным 10 мс (целевое значение 6 мс).

8 Формирование кадров уровня конвергенции передачи XG-PON

В этом разделе описывается структура кадров XGTC нисходящего потока и пакетов XGTC восходящего потока, а также формат заголовка кадров XGTC нисходящего потока, заголовка пакетов XGTC восходящего потока и концевого пакетов XGTC восходящего потока.

8.1 Формирование кадров XGTC нисходящего потока

Кадр XGTC нисходящего потока имеет фиксированный размер 135 432 байта и состоит из заголовка XGTC и секции полезной нагрузки XGTC, как показано на рисунке 8-1. Полезная нагрузка XGTC формируется на стороне передачи и обрабатывается на стороне приема подуровнем адаптации услуги.

Заголовок кадра XGTC нисходящего потока состоит из структуры HLend фиксированного размера и двух сегментов переменного размера – сегмента карты пропускной способности (BWmap) и PLOAM нисходящего потока (PLOAMd).

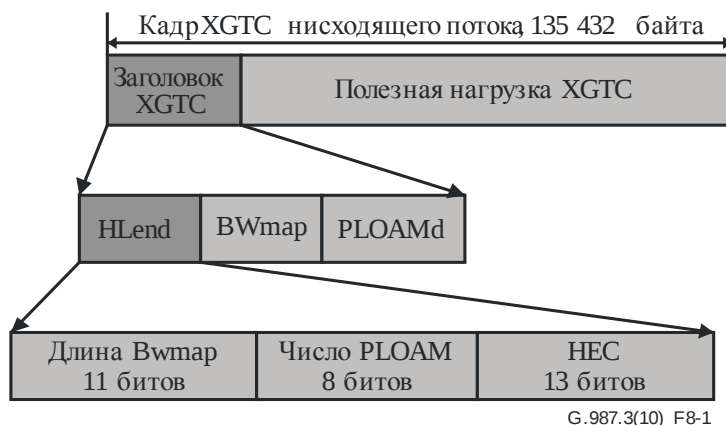


Рисунок 8-1 – Формат кадра и поля заголовка XGTC нисходящего потока

8.1.1 Структура HLend

HLend – это 4-байтовая структура, которая управляет размером сегментов переменной длины в составе заголовка XGTC. Она состоит из трех полей:

длина BWmap [11 битов] – содержит целое число без знака N , указывающее количество структур распределения в сегменте BWmap;

число PLOAM [8 битов] – содержит целое число без знака P , указывающее количество сообщений PLOAM в сегменте PLOAMd;

гибридная коррекция ошибок (HEC) [13 битов] – поле обнаружения и коррекции ошибок в структуре HLend, которое представляет собой комбинацию из усеченного кода BCH (63, 12, 2), работающего с 31 начальным битом структуры HLend, и одного бита четности. Подробная информация о составе и проверке HEC приведена в Приложении А.

8.1.2 Сегмент BWmap

BWmap представляет собой последовательность 8-байтовых структур распределения. Количество структур распределения в BWmap указано в поле длины BWmap структуры HLend. Фактическая длина сегмента BWmap составляет $8 \times N$ байтов.

Каждая структура распределения определяет распределение пропускной способности для конкретного Alloc-ID. Последовательность из одной или нескольких структур распределения, связанных с Alloc-ID, принадлежащими одному и тому же ONU, и предназначенных для непрерывной передачи в восходящем направлении, образуют серию распределения пакетов. Форматы сегмента BWmap и структуры распределения показаны на рисунке 8-2. Поля структуры распределения подробно рассматриваются в следующих разделах.

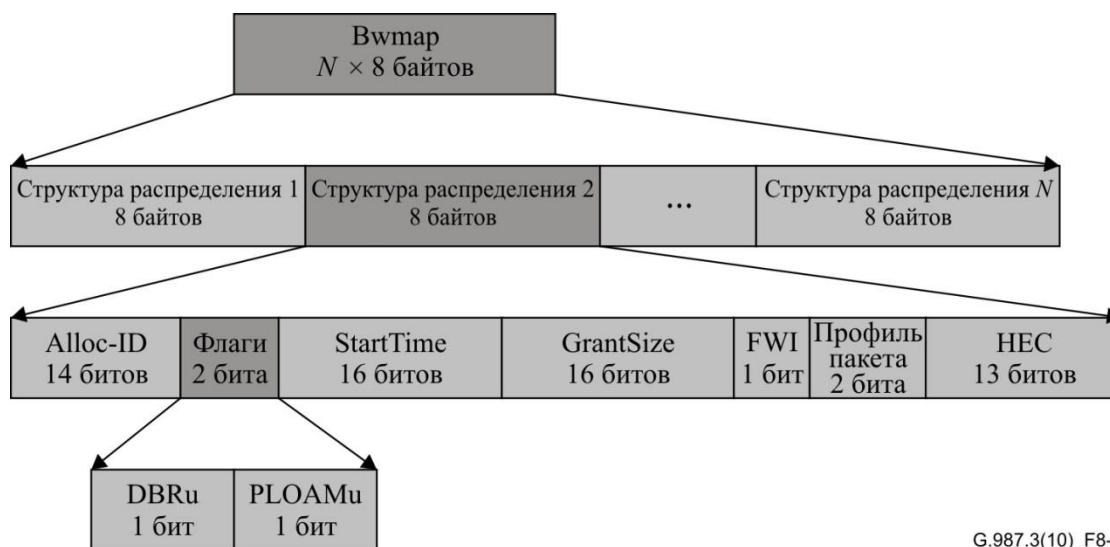


Рисунок 8-2 – Сегмент BWmap и формат структуры распределения

8.1.2.1 Поле Alloc-ID

Поле идентификатора распределения содержит 14-битовое число, указывающее получателя распределения пропускной способности, то есть конкретный T-CONT или OMCC восходящего потока внутри ONU. Значения Alloc-ID и условные обозначения приведены в пункте 6.4.3.

8.1.2.2 Поле флагов

2-битовое поле флагов содержит два отдельных индикатора:

- DBRu – если этот бит установлен, то ONU должен отправить отчет DBRu для данного Alloc-ID. Если бит не установлен, отчет DBRu не передается;
- PLOAMu – если этот бит установлен в первой структуре распределения серии распределения пакетов (как указано в поле StartTime – см. пункт 8.1.2.3), то размер заголовка пакета XGTC восходящего потока должен составлять 52 байта, а ONU должен передать сообщение PLOAM в составе заголовка пакета XGTC. Если в первой структуре распределения пакетов восходящего потока бит PLOAMu не установлен, то размер заголовка пакета XGTC восходящего потока должен составлять 4 байта и сообщение PLOAM не передается. Во всех последующих структурах распределения того же пакета флаг PLOAMu устанавливается в 0 передатчиком и игнорируется приемником. Подробная информация о заголовке пакета XGTC восходящего потока содержится в пункте 8.2.1.

8.1.2.3 Поле StartTime

Поле StartTime содержит 16-битовое число, которое указывает местоположение первого байта пакета XGTC в составе PHY-кадра восходящего потока. Время StartTime измеряется от начала PHY-кадра восходящего потока с шагом разбиения до 1 слова (4 байта). Значение StartTime = 0 соответствует первому слову PHY-кадра восходящего потока; значение StartTime = 9719 соответствует последнему слову PHY-кадра восходящего потока.

В каждой серии распределения пакетов только первое распределение содержит конкретное значение StartTime. Все остальные структуры распределения серии распределения пакетов содержат значение StartTime, равное 0xFFFF.

Интерпретация параметров StartTime и GrantSize представлена на рисунке 8-3.

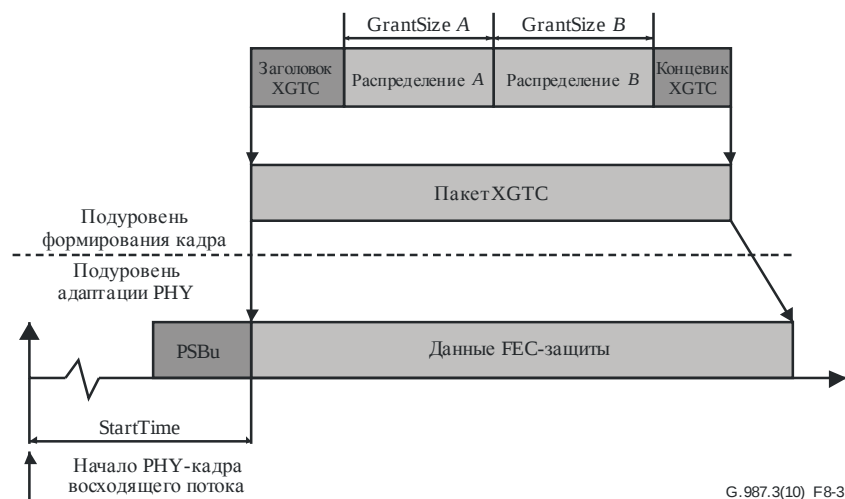


Рисунок 8-3 – Интерпретация параметров StartTime и GrantSize

Следует отметить, что начало РНУ-кадра восходящего потока – это просто точка отсчета, не связанная с каким-либо наблюдаемым внешним событием (в отличие от начала РНУ-кадра нисходящего потока, которое связано с передачей или приемом первого бита последовательности PSync). Следует также отметить, что OLT и каждый ONU в общем случае связывают начало РНУ-кадра восходящего потока с разными моментами времени. Временные соотношения в PON подробно описываются в разделе 13.

8.1.2.4 Поле GrantSize

Поле GrantSize содержит 16-битовое число, которое указывает общую длину данных полезной нагрузки XGTC и служебных данных DBRu, переданных в рамках данного распределения. (В частности, GrantSize не включает заголовок XGTC, концевик XGTC или служебные данные FEC.) Шаг разбиения GrantSize составляет 1 слово (4 байта). Для разрешений, касающихся только PLOAM-сообщений, включая разрешения на серийные номера и разрешения на определение дальности, используемые в процессе активации ONU, значение GrantSize равно нулю. Минимально возможное ненулевое значение GrantSize равно 1, что соответствует распределению из одного слова (4 байта) для передачи только DBRu-данных. Минимальное распределение для собственно полезной нагрузки XGTC (флаг DBRu не установлен) составляет 4 слова (16 байтов), и в этом случае GrantSize = 4.

8.1.2.5 Бит индикации принудительного включения (FWI)

При обращении к ONU, поддерживающему управление электропитанием на основе протокола, OLT устанавливает бит FWI для ускорения принудительного включения ONU, пребывающего в режиме энергосбережения. Подробная информация об управлении электропитанием ONU содержится в разделе 16. По требованию конечного автомата управления электропитанием OLT в первой структуре распределения каждой серии распределения пакетов для данного ONU устанавливается бит FWI. Значение бита FWI в последующих структурах распределений серии распределения пакетов не контролируется, и ONU игнорирует это значение.

8.1.2.6 Поле BurstProfile

Поле BurstProfile представляет собой 2-битовое поле, содержащее индекс профиля пакета, который подуровень адаптации РНУ блока ONU использует для формирования РНУ-пакета. Этот индекс относится к набору пригодных профилей пакета, который передается в ONU посредством вещательной или одноадресной передачи по каналу обмена сообщениями PLOAM. Для каждого заданного профиля индекс явно определяется в сообщении PLOAM-профиля (см. пункт 11.3.3.1).

8.1.2.7 Поле HECS

Поле обнаружения и коррекции ошибок для структуры распределения представляет собой комбинацию кода BCH (63, 12, 2), работающего с 63 начальными битами структуры распределения, и одного бита четности. Подробная информация о составе и проверке HECS приведена в Приложении А.

8.1.3 Конструктивные ограничения и правила синтаксического анализа BWmap

8.1.3.1 Конструктивные ограничения BWmap

OLT использует сегмент BWmap для распределения ресурсов передачи в восходящем направлении для ONU и отдельных Alloc-ID в составе каждого ONU. Частота и размер распределений для каждого ONU и каждого Alloc-ID зависят от соответствующих параметров обслуживания и текущего режима управления электропитанием каждого данного ONU. Конструктивно каждый сегмент BWmap может содержать не более 2047 структур распределения. Однако существуют дополнительные ограничения, которые OLT должен учитывать при построении BWmap в каждом PHY-кадре.

- 1) Требуется, чтобы OLT указывал ряд отдельных серий распределений пакетов в BWmap в порядке возрастания их значений StartTime.
- 2) Расстояние между соседними пакетами в BWmap и между последовательными BWmap должно удовлетворять требованиям пункта 10.2.
- 3) Минимальное значение StartTime равно нулю. Это требование подразумевает, что часть PSBu PHY-пакета восходящего потока технически может относиться к предыдущему PHY-кадру.
- 4) Максимальное значение StartTime равно 9719. Это требование подразумевает, что пакет ONU может пересекать границу PHY-кадра.
- 5) Максимальное количество структур распределения для BWmap равно 512.
- 6) Максимальное количество структур распределения для серии распределения пакетов равно 16.
- 7) Максимальное количество структур распределения для заданного ONU в составе BWmap равно 64.
- 8) Максимальное количество структур распределения пакетов для заданного ONU в составе BWmap равно 4.
- 9) Максимальный размер распределения составляет 9718 слов.
- 10) Максимальный размер пакета XGTC составляет 9720 слов.

Максимальный размер пакета XGTC не должен превышать размер PHY-кадра (38 880 байтов или 9720 слов). Принимая во внимание размер фиксированной служебной нагрузки XGTC (4-байтовый заголовок XGTC без поля PLOAMu и 4-байтовый концевик XGTC), наибольшее теоретически возможное значение GrantSize составляет 9718. Если присутствует поле PLOAMu, то значение GrantSize может быть не более 9706.

В распределении последовательных или близко расположенных PHY-пакетов одному и тому же ONU нет необходимости и такое распределение не рекомендуется. В качестве руководящего указания OLT может поддерживать интервал между пакетами, распределенными одному и тому же ONU, равным по меньшей мере интервалу, который потребовался бы для двух пакетов, распределенных разным ONU, плюс дополнительный запас на обработку в 512 байтов. За обеспечение того, чтобы ONU мог обрабатывать распределение близко расположенных пакетов, отвечает OLT.

Следует отметить, что максимальное количество серий распределения пакетов для BWmap не является значимым параметром конструкции и поэтому здесь не устанавливается.

8.1.3.2 Исключения при синтаксическом анализе BWmap

В общем случае ONU должен обрабатывать любые некорректируемые, ошибочные или сомнительные записи BWmap таким образом, чтобы минимизировать вероятностные конфликтные ситуации в восходящем потоке, при необходимости прекращая передачу. Возможны следующие особые случаи:

- если ONU обнаруживает некорректируемую битовую ошибку в структуре распределения, он должен прекратить передачу оставшейся части пакета;
- если ONU обнаруживает нарушение правила 4 пункта 8.1.3.1, он не должен передавать пакет;
- если ONU обнаруживает нарушение правил 5–10 пункта 8.1.3.1, он должен прервать передачу как при выполнении соответствующих правил построения BWmap;

- если ONU обнаруживает, что ему распределено два или более последовательных или близко расположенных пакетов, которые ONU не может надлежащим образом обработать, он не должен передавать следующий пакет или пакеты;
- если ONU обнаруживает неизвестный Alloc-ID в своей серии распределения пакетов, он должен прекратить передачу оставшейся части пакета;
- если ONU обнаруживает свой собственный Alloc-ID в серии пакетов другого ONU, он должен игнорировать это обстоятельство и не пытаться вести передачу.

8.1.4 Сегмент PLOAMd

Сегмент PLOAMd содержит ноль, одно или несколько сообщений PLOAM. Длина каждого сообщения PLOAM составляет 48 байтов. Количество сообщений PLOAM в сегменте PLOAMd задается полем счета PLOAM структуры HLen. Фактическая длина сегмента PLOAMd составляет $48 \times P$ байтов.

Формат сообщения PLOAM и ограничения для канала обмена сообщениями PLOAM указаны в разделе 11.

На рисунке 8-4 показан сегмент PLOAM нисходящего потока.

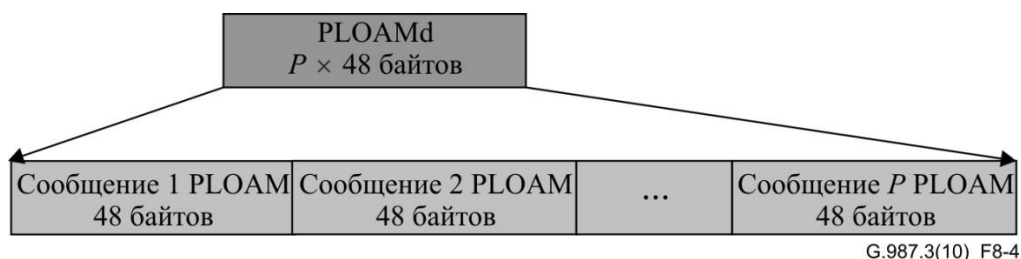


Рисунок 8-4 – Сегмент PLOAM нисходящего потока

8.2 Формирование кадров XGTC восходящего потока

В восходящем направлении интерфейс между подуровнями формирования кадров XGTC и адаптации PHY XGTC представлен пакетом XGTC восходящего потока. Пакет XGTC восходящего потока, переданный данным ONU, имеет динамически определяемый размер и состоит из заголовка пакета XGTC восходящего потока, одного или нескольких интервалов распределения пропускной способности, каждый из которых связан с конкретным Alloc-ID, и концевика XGTC, как показано на рисунке 8-5. Размер каждого интервала распределения определяется конкретной структурой распределения BWmap.

Каждый интервал распределения пропускной способности содержит раздел полезной нагрузки XGTC и может содержать служебные данные распределения, которые предшествуют полезной нагрузке XGTC. Полезная нагрузка XGTC формируется на стороне передачи и обрабатывается на стороне приема соответствующим объектом подуровня адаптации услуги (рассмотрение полезной нагрузки XGTC приводится в пункте 9.1.1).

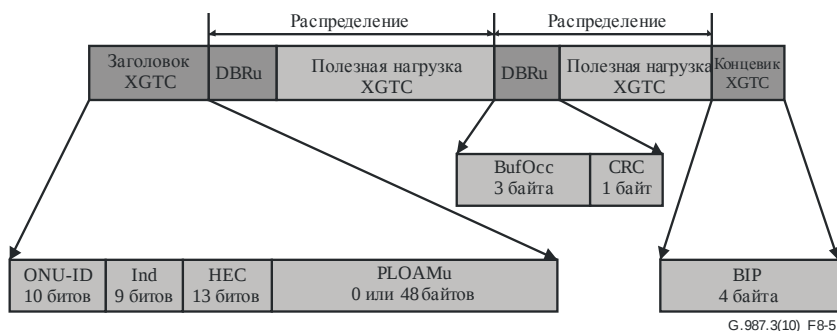


Рисунок 8-5 – Формат и поля служебной нагрузки пакета XGTC восходящего потока

8.2.1 Заголовок пакета XGTC восходящего потока

Заголовок XGTC включает 4-байтовый раздел фиксированной длины и раздел переменной длины. Фиксированный раздел состоит из полей ONU-ID, Ind и HEC. Раздел переменной длины либо имеет нулевую длину, либо содержит 48-байтовое сообщение PLOAM в зависимости от значения флага PLOAMu соответствующей структуры распределения BWmap.

8.2.1.1 Поле ONU-ID

Поле ONU-ID представляет собой 10-битовое поле, которое содержит уникальный ONU-ID того ONU, который передал данный пакет. ONU-ID присваивается блоку ONU в процессе активации. OLT может проверить это поле по действующей карте BWmap, чтобы подтвердить, что передает нужный ONU.

Если на запрос распределения от узла вещательной услуги (SN) отвечает ONU, которому не назначен ONU-ID, чтобы сообщить о своем присутствии в PON, он вместо ONU-ID в заголовке пакета XGTC использует значение 0x03FF.

8.2.1.2 Поле Ind

Поле Ind имеет длину 9 битов, которые обеспечивают быструю незапрашиваемую сигнализацию состояния ONU и распределены следующим образом.

- Бит 8 (MSB) – **состояние очереди PLOAM**. Когда этот бит установлен, он указывает на то, что после передачи текущего пакета очередь ожидающих сообщений PLOAM восходящего потока к ONU осталась непустой. То, что этот бит не установлен, означает, что сообщений PLOAMу восходящего потока, ожидающих передачи, больше нет.
- Биты 7–1 – зарезервированы.
- Бит 0 (LSB) – сообщение "dying gasp" (о снижении мощности питания) (DG). Когда этот бит установлен, он указывает, что ONU обнаружил локальное обстоятельство, которое может помешать ONU отвечать на распределения пропускной способности восходящего потока. Это указание может помочь OLT отличить проблемы волоконного кабеля от проблем в помещениях абонента. Передача указания DG не обязательно означает обязательство или намерение ONU отключить передатчик. Если обстоятельство, которое привело к указанию DG, не сохраняется, ONU отменяет его и продолжает обычную работу. OLT не должен интерпретировать указание DG само по себе как основание для отмены распределений пропускной способности для данного ONU.

8.2.1.3 Поле HEC

Поле обнаружения и коррекции ошибок заголовка XGTC восходящего потока представляет собой комбинацию усеченного кода BCH (63, 12, 2), работающего с 31 начальным битом заголовка, и одного бита четности. Подробная информация о составе и проверке HEC приведена в Приложении А.

8.2.1.4 Поле PLOAM восходящего потока (PLOAMu)

Если поле PLOAMu присутствует, оно содержит ровно одно сообщение PLOAM. Наличием сообщения PLOAM управляет OLT с помощью флага PLOAMu первой структуры распределения в серии пакетов распределения. Длина сообщения PLOAM составляет 48 байтов. Формат сообщения PLOAM приведен в разделе 11.

8.2.2 Служебная нагрузка распределения

Служебная нагрузка распределения, если она присутствует, состоит из структуры DBRu. Наличием DBRu управляет OLT с помощью флага DBRu соответствующей структуры распределения в BWmap. 4-байтовая структура DBRu содержит отчет о состоянии буфера, который связан с конкретным Alloc-ID.

8.2.2.1 Поле BufOcc

Поле заполнения буфера (BufOcc) имеет длину 3 байта и содержит общий объем трафика SDU, выраженный в единицах 4-байтовых слов, охватывающий все буферы, связанные с тем Alloc-ID, которому было предоставлено данное распределение. Если отдельный SDU имеет длину L байтов, то его вклад W в сообщаемое заполнение буфера вычисляется следующим образом:

$$W = \begin{cases} \left\lceil \frac{L}{4} \right\rceil, & \text{если } L > 8; \\ 2, & \text{если } 0 < L \leq 8. \end{cases} \quad (8-1)$$

Сообщаемое значение должно представлять собой наилучшую возможную оценку, соответствующую моменту передачи отчета, то есть началу интервала распределения восходящего потока. Сообщаемое значение должно учитывать любой трафик, который мог быть запланирован для передачи в восходящем потоке в пределах этого интервала распределения.

Хотя длина L отдельного SDU является натуральным числом, в поле BufОсс должны кодироваться два особых значения: 0x000000 означает пустой буфер, а 0xFFFFFFFF – неверное измерение.

8.2.2.2 Поле CRC

Структура DBRu защищена процедурой CRC-8 с использованием полинома, указанного в [ITU-T I.432.1] ($(x) = x^8 + x^2 + x + 1$). Однако, в отличие от [ITU-T I.432.1], CRC не подвергается операции "исключающее ИЛИ" со значением 0x55. Приемник поля DBRu осуществляет функции CRC-8 по обнаружению и исправлению ошибок. Если CRC-8 указывает, что произошла некорректируемая ошибка, то информация DBRu отбрасывается.

8.2.3 Концевик пакета XGTC восходящего потока

Концевик пакета XGTC восходящего потока содержит поле проверки четности с чередованием битов (BIP) шириной 4 байта, вычисляемое по всему пакету XGTC. Приемник OLT проверяет BIP для оценки BER в восходящей оптической линии. Следует отметить, что оценка BER на основе BIP применима только тогда, когда функция FEC выключена. Когда FEC восходящего потока в подуровне адаптации PNY включена, вместо этого получается приближенная оценка BER на основе результатов коррекции FEC.

9 Метод инкапсуляции XG-PON

В системе XG-PON те SDU, которые содержат кадры пользовательских данных и высокоуровневые кадры управления PON (OMCI), передаются в секциях полезной нагрузки XGTC кадров XGTC нисходящего потока и пакетов XGTC восходящего потока с использованием метода инкапсуляции XG-PON (XGEM). XGEM поддерживает фрагментацию, инкапсуляцию и определение границ SDU и применим как в восходящем, так и в нисходящем направлениях. В этом разделе описываются структура секции полезной нагрузки XGTC, формат заголовка и полезной нагрузки кадра XGEM, принципы определения границ кадров XGEM, а также преобразование услуг разного типа в кадры XGEM.

9.1 Формирование кадров XGEM

9.1.1 Структура полезной нагрузки XGTC

Секция полезной нагрузки XGTC переносится в кадрах XGTC нисходящего потока и пакетах XGTC восходящего потока, как показано на рисунках 9-1 и 9-2. Размер полезной нагрузки XGTC в данном кадре XGTC нисходящего потока равен размеру кадра XGTC (который фиксирован и равен 135 432 байта) за вычетом размера заголовка этого кадра XGTC. Размер каждой секции полезной нагрузки XGTC в данном пакете восходящего потока равен размеру соответствующего распределения за вычетом служебной нагрузки распределения. Полезная нагрузка XGTC содержит один или несколько кадров XGEM (см. рисунок 9-1).



Рисунок 9-1 – Структура полезной нагрузки XGTC

Каждый кадр XGEM содержит заголовок XGEM фиксированного размера и поле полезной нагрузки XGEM переменного размера.

9.1.2 Заголовок кадра XGEM

Размер заголовка XGEM составляет 8 байтов. Формат заголовка XGEM показан на рисунке 9-2.

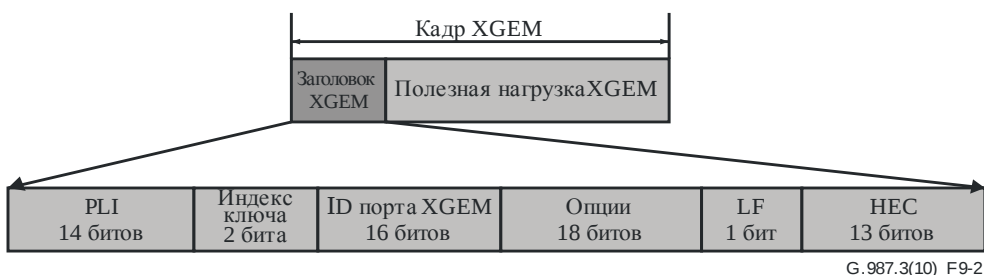


Рисунок 9-2 – Формат заголовка XGEM

Заголовок XGEM содержит следующие поля.

Индикатор длины полезной нагрузки (PLI) [14 битов] – длина L (в байтах) SDU или фрагмента SDU в составе полезной нагрузки XGEM, следующей после заголовка XGEM. 14-битовое поле позволяет представить целые числа от 0 до 16 383 и, следовательно, достаточно для кодирования длины расширенного кадра Ethernet (до 2000 байтов), а также крупных кадров Ethernet (до 9000 байтов). Значение PLI имеет точность до 1 байта и не обязательно равно размеру полезной нагрузки XGEM, которая выровнена по границам 4-байтовых слов.

Индекс ключа [2 бита] – индекс ключа, используемого для шифрования данных полезной нагрузки XGEM. В зависимости от идентификатора порта XGEM индекс ключа указывает на ключ одноадресного или вещательного типа. Если в любой момент времени действительны до двух ключей каждого типа, то значение индекса ключа 01 относится к первому ключу, а значение 10 – ко второму. Значение 00 указывает на то, что полезная нагрузка передается без шифрования; значение 11 зарезервировано для использования в будущем. Если индекс ключа кадра XGEM содержит зарезервированное значение или указывает на недопустимый ключ (см. пункт 15.5), то полезная нагрузка кадра XGEM отбрасывается.

Идентификатор порта XGEM [16 битов] – идентификатор порта XGEM (port-ID XGEM), к которому относится данный кадр.

Опции [18 битов] – вопрос использования этого поля подлежит дальнейшему изучению. Передатчик устанавливает значение этого поля в 0x00000, а приемник игнорирует его.

Последний фрагмент (LF) [1 бит] – индикатор последнего фрагмента. Если фрагмент, заключенный в кадр XGEM, представляет собой последний фрагмент SDU или весь SDU, то бит LF устанавливается в 1; в противном случае бит LF равен 0.

Гибридная коррекция ошибок (HEC) [13 битов] – поле обнаружения и коррекции ошибок заголовка XGEM, которое представляет собой комбинацию кода BCH (63, 12, 2), работающего с 63

начальными битами заголовка, и одного бита четности. Подробная информация о составе и проверке НЕС приведена в Приложении А.

9.1.3 Формат полезной нагрузки XGEM

Полезная нагрузка XGEM представляет собой поле переменной длины, регулируемое полем PLI заголовка XGEM. Для занятого кадра XGEM длина P полезной нагрузки XGEM в байтах связана со значением L , передаваемым в поле PLI, следующим образом:

$$P = \begin{cases} 4 * \left\lceil \frac{L}{4} \right\rceil, & \text{если } L \geq 8; \\ 8, & \text{если } 0 < L < 8; \\ 0, & \text{если } L = 0. \end{cases} \quad (9-1)$$

Полезная нагрузка XGEM может содержать от одного до семи байтов заполнения в позициях младших байтов. Передатчик заполняет байты заполнения значением 0x55. Процессор XGEM приемника отбрасывает байты заполнения.

Формат полезной нагрузки XGEM показан на рисунке 9-3.

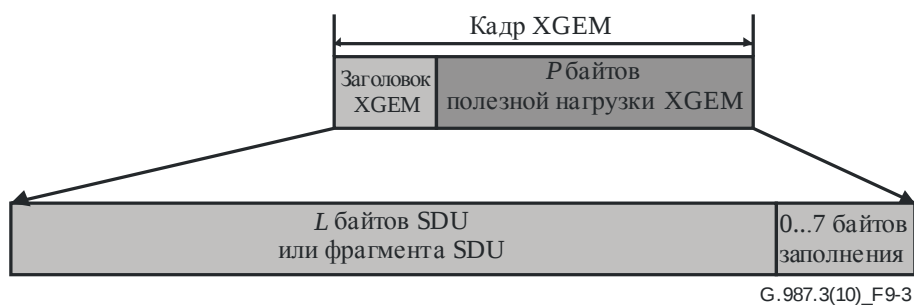


Рисунок 9-3 – Формат полезной нагрузки XGEM

9.1.4 Незанятый кадр XGEM

Всякий раз, когда у передатчика нет SDU или фрагментов SDU для отправки (это относится и к случаю, когда SDU не подходят для передачи по решению планировщика-оптимизатора) или размер SDU или фрагмента SDU превышает размер доступного пространства секции полезной нагрузки XGTC, но его фрагментация нарушает правила пункта 9.3, передатчик генерирует незанятые кадры XGEM для заполнения доступного пространства секции полезной нагрузки XGTC.

Незанятый кадр XGEM – это любой кадр XGEM со значением идентификатора порта XGEM, равным 0xFFFF.

Поле PLI незанятого кадра XGEM содержит фактический размер полезной нагрузки кадра, который может быть равен любому числу, кратному 4, включая 0, вплоть до максимального поддерживаемого размера SDU.

Незанятые кадры XGEM передаются в незашифрованном виде со значением Key_Index, указывающим на отсутствие шифрования, и LF = 1. Приемник игнорирует поля Key_Index и LF заголовка и полезную нагрузку кадров XGEM со значением идентификатора порта XGEM, равным 0xFFFF.

Содержание полезной нагрузки XGEM в незанятом кадре XGEM формируется передатчиком по своему усмотрению с обязательным учетом условий, касающихся управления конфигурацией линии и предотвращения CID. Приемник отбрасывает полезную нагрузку незанятого кадра XGEM.

Если доступное пространство в конце секции полезной нагрузки XGTC меньше размера заголовка XGEM (то есть равно 4 байта), передатчик генерирует короткий незанятый кадр XGEM, который определяется как 4 байта, заполненные нулями.

9.2 Определение границ кадра XGEM

Процесс определения границ в XG-PON зависит от наличия заголовка XGEM в начале каждой секции полезной нагрузки XGTC в нисходящем и восходящем потоках. Приемник, который таким образом знает местоположение первого заголовка XGEM, может использовать поле PLI для определения размера полезной нагрузки XGEM и поиска местоположения следующего заголовка XGEM, повторяя процедуру для всех последующих кадров XGEM. Приемник проверяет правильность разметки кадра XGEM, выполняя проверку HEС в заголовке следующего кадра XGEM.

Если проверка HEС предполагаемого заголовка XGEM завершается неудачей, то приемник отбрасывает текущий кадр вместе с остальной частью полезной нагрузки XGTC. Следует отметить, что хотя в принципе потерянный кадр XGEM можно впоследствии восстановить с помощью конечного автомата определения границ кадра XGEM (см. [b-ITU-T G.984.3]), это событие очень редкое, и такое усложнение считается излишним по сравнению с добавлением запаса производительности.

9.3 Фрагментация SDU

Фрагментация SDU представляет собой процесс, посредством которого SDU или фрагмент SDU, доступные для передачи в нисходящем или восходящем потоке, могут быть разделены на два или более фрагментов, и каждый фрагмент SDU передается в отдельном кадре XGEM, как показано на рисунке 9-4.

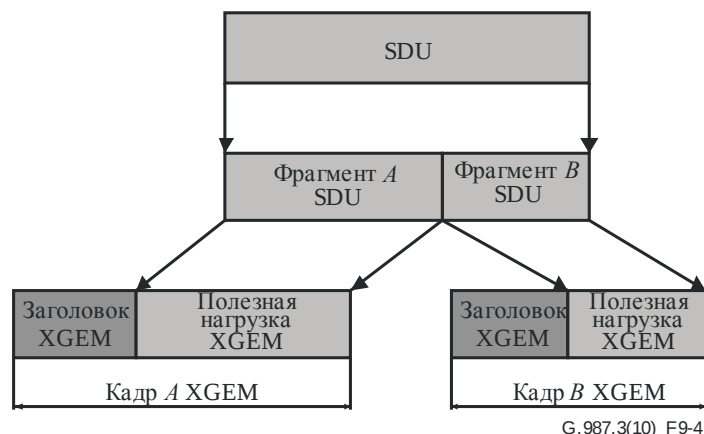


Рисунок 9-4 – Фрагментация SDU

Фрагментация в нисходящем и восходящем потоках подчиняется следующим правилам.

Если в нисходящем направлении полезная нагрузка XGTC, присутствующая в текущем кадре XGTC, имеет размер не менее 16 байтов, а длина SDU, доступного для передачи, включая 8-байтовый заголовок XGEM, превышает эту полезную нагрузку, то SDU делится на два фрагмента, так что первый фрагмент SDU полностью занимает имеющуюся полезную нагрузку текущего кадра XGTC, а второй фрагмент SDU передается в полезной нагрузке XGTC следующего кадра XGTC. Если размер второго фрагмента SDU меньше 8 байтов, то он заполняется до 8 байтов, чтобы соответствовать требуемому минимальному размеру кадра XGEM, равному 16 байтов. После начала фрагментации SDU второй фрагмент SDU передается до любого другого SDU; то есть приоритетная передача SDU в нисходящем направлении не поддерживается.

Если в восходящем направлении полезная нагрузка XGTC, присутствующая в текущем распределении, имеет размер не менее 16 байтов, а длина SDU или фрагмента SDU, планируемого для передачи, включая 8-байтовый заголовок XGEM, превышает эту полезную нагрузку, то SDU делится на два фрагмента, так что первый фрагмент SDU полностью занимает доступную полезную нагрузку XGTC текущего распределения, а остаток SDU передается в полезной нагрузке XGTC следующего распределения восходящего потока, относящегося к тому же Alloc-ID, который подчиняется тем же правилам фрагментации. После начала фрагментации SDU все фрагменты SDU передаются перед любым другим SDU, относящимся к тому же Alloc-ID; то есть приоритетная передача SDU восходящего потока в пределах данного Alloc-ID не поддерживается.

Следующие дополнительные правила применяются как в нисходящем, так и в восходящем направлениях.

- Если в результате фрагментации второй фрагмент SDU оказывается меньше 8 байтов, он заполняется до минимума в 8 байтов, чтобы соответствовать минимальному размеру кадра XGEM, равному 16 байтов.
- Если длина SDU или фрагмента SDU, доступная для передачи, включая 8-байтовый заголовок XGEM, равна или меньше доступного пространства полезной нагрузки XGTC, то дальнейшая фрагментация запрещена; весь доступный SDU или фрагмент SDU передается в текущей полезной нагрузке XGTC.
- Если размер имеющейся полезной нагрузки XGTC составляет менее 16 байтов, то она заполняется незанятым кадром XGEM.

9.4 Преобразование услуг в кадры XGEM

9.4.1 Ethernet поверх XGEM

Кадры Ethernet передаются непосредственно в полезной нагрузке кадра XGEM. Перед инкапсуляцией XGEM байты преамбулы IEEE 802 и начального ограничителя кадра (SFD) отбрасываются. Каждый кадр Ethernet преобразуется в один кадр XGEM, как показано на рисунке 9-5, или в несколько кадров XGEM. В последнем случае применяются правила фрагментации, изложенные в пункте 9.3. Кадр XGEM не может инкапсулировать более одного кадра Ethernet.

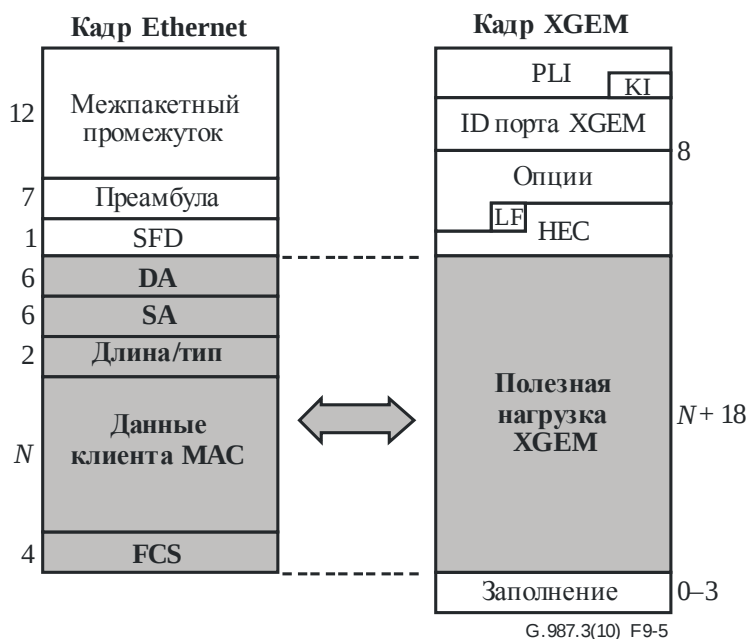


Рисунок 9-5 – Преобразование Ethernet в кадр XGEM

9.4.2 MPLS поверх XGEM

Пакеты многопротокольной коммутации с использованием меток переносятся непосредственно в полезной нагрузке кадра XGEM. Каждый пакет MPLS преобразуется в один кадр XGEM, как показано на рисунке 9-6, или в несколько кадров XGEM. В последнем случае применяются правила фрагментации, изложенные в пункте 9.3. Кадр XGEM не может инкапсулировать более одного пакета MPLS.

Преобразование пакетов MPLS в кадр XGEM показано на рисунке 9-6.

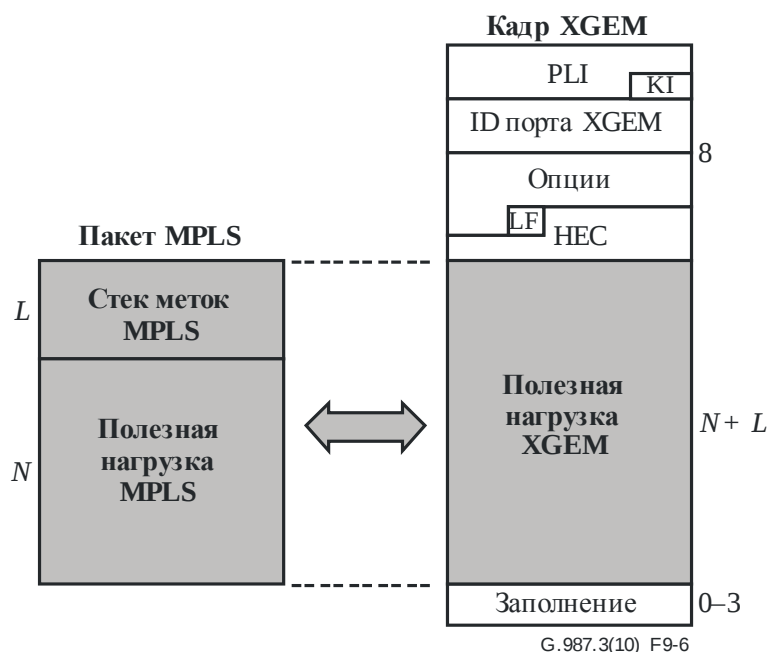


Рисунок 9-6 – Преобразование пакетов MPLS в кадр XGEM

10 Подуровень адаптации РНУ

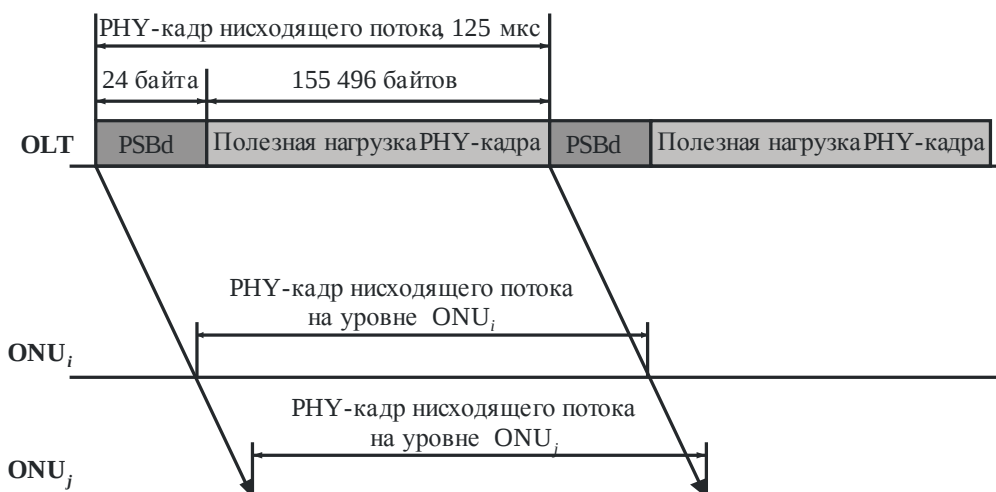
В этом разделе обсуждаются вопросы физической синхронизации и определения границ, упреждающей коррекции ошибок и скремблирования при передаче нисходящего и восходящего потоков в XG-PON.

10.1 РНУ-кадр нисходящего потока

OLT непрерывно ведет передачу в нисходящем направлении. Передача OLT разделяется на РНУ-кадры нисходящего потока фиксированного размера. Длительность РНУ-кадра нисходящего потока составляет 125 мкс, что при скорости нисходящего потока 9,95328 Гбит/с соответствует размеру в 155 520 байтов (38 880 слов). РНУ-кадр нисходящего потока состоит из 24-байтового блока физической синхронизации (PSBd) и полезной нагрузки РНУ-кадра размером 155 496 байтов, представленной кадром XGTC нисходящего потока, содержимое которого защищено посредством FEC и скремблируется.

Начало конкретного РНУ-кадра нисходящего потока определяется в контексте данного сетевого элемента и соответствует передаче (OLT) или приему (ONU) первого бита его PSBd.

Схема РНУ-кадра нисходящего потока приведена на рисунке 10-1.

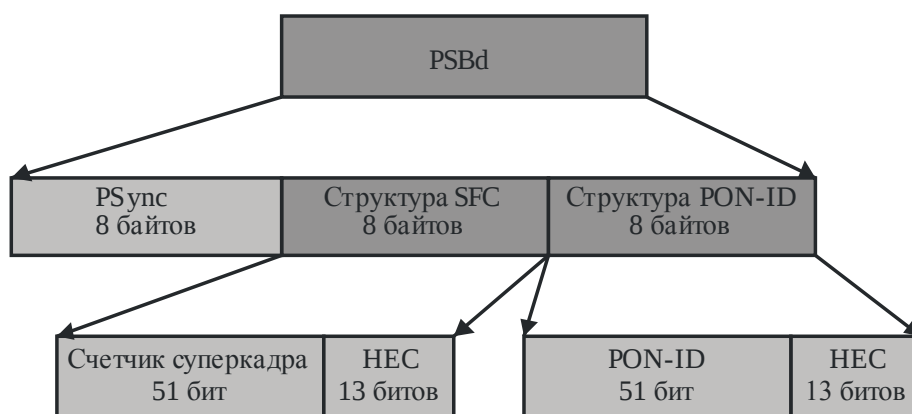


G.987.3(10)_F10-1

Рисунок 10-1 – PHY-кадр нисходящего потока

10.1.1 Блок физической синхронизации нисходящего потока (PSBd)

Размер блока физической синхронизации нисходящего потока (PSBd) составляет 24 байта. Он содержит три отдельные структуры по 8 байтов: PSync, структуру счетчика суперкадра (SFC) и структуру PON-ID (см. рисунок 10-2).



G.987.3(10)_F10-2

Рисунок 10-2 – Блок физической синхронизации нисходящего потока (PSBd)

10.1.1.1 Последовательность физической синхронизации (PSync)

Последовательность физической синхронизации имеет фиксированный 64-битовый формат. ONU использует эту последовательность для выравнивания границ PHY-кадров нисходящего потока. Кодовое представление поля PSync 0xC5E5 1840 FD59 BB49.

10.1.1.2 Структура счетчика суперкадра

Структура SFC представляет собой 64-битовое поле, которое содержит 51-битовый счетчик суперкадра (SFC) и 13-битовое поле HEС (см. рисунок 10-2). Значение SFC в каждом PHY-кадре нисходящего потока увеличивается на единицу относительно предыдущего PHY-кадра. Всякий раз, когда SFC достигает своего максимального значения (все единицы), в следующем PHY-кадре нисходящего потока он устанавливается в 0.

Поле HEС представляет собой комбинацию кода BCH (63, 12, 2), работающего с 63 начальными битами структуры SFC, и одного бита четности. Подробная информация о составе и проверке HEС приведена в Приложении А.

10.1.1.3 Структура PON-ID

Структура PON-ID содержит 51-битовый идентификатор PON и 13-битовое поле HEС (см. рисунок 10-2).

OLT устанавливает PON-ID по своему усмотрению. Значение по умолчанию составляет 51 нулевой бит.

Поле HEС представляет собой комбинацию кода BCH (63, 12, 2), работающего с 63 начальными битами структуры PON-ID, и одного бита четности. Подробная информация о составе и проверке HEС приведена в Приложении А.

10.1.1.4 Скремблирование поля PSBd

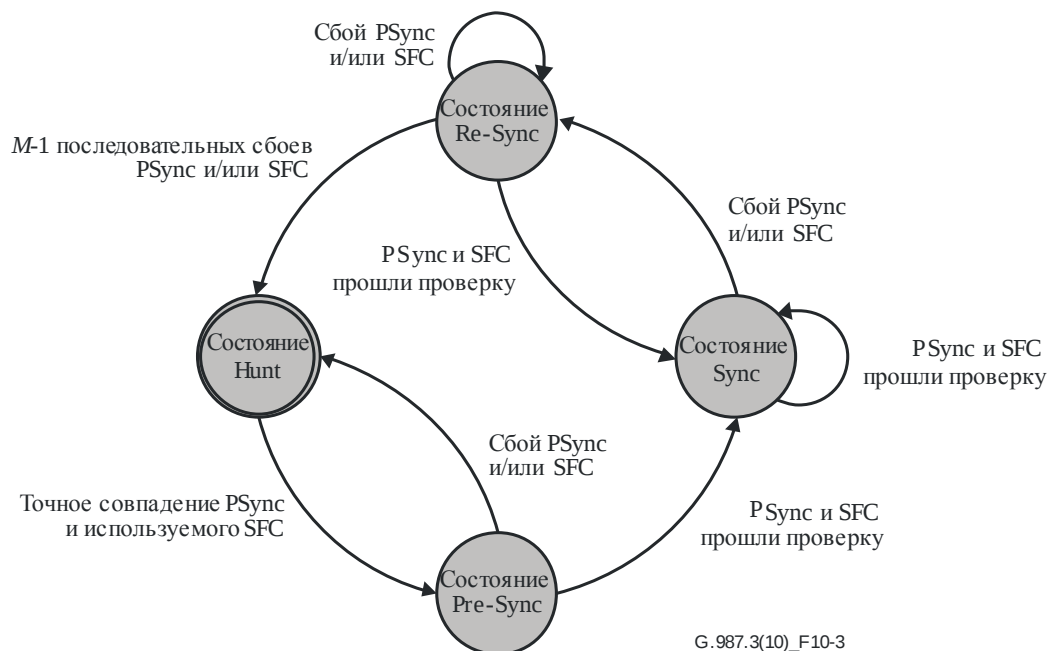
После вычисления HEС в передатчике и до проверки HEС в приемнике структуры счетчика суперкадра и PON-ID соединяются по схеме "исключающее ИЛИ" с фиксированным шаблоном 0x0F0F0F0F0F0F0F0F.

10.1.2 Синхронизация ONU в нисходящем потоке

OLT управляет противолежащими ONU, хранируя их поведение по отношению к началу PHY-кадра нисходящего потока, определяемому соответствующим ONU. Для работы в PON каждый ONU должен быть синхронизирован с последовательностью PHY-кадров нисходящего потока. Хотя детали механизма синхронизации являются внутренними по отношению к ONU и не подлежат стандартизации, ниже приведено описание эталонного конечного автомата синхронизации, который надлежащим образом защищен как от ложной блокировки (в независимом однородном случайном потоке битов), так и от ложной потери синхронизации (при высоком значении BER до 10^{-3}). Ожидается, что реализация поставщиком механизма синхронизации ONU соответствует характеристикам эталонного конечного автомата.

Эталонная реализация конечного автомата синхронизации ONU в нисходящем потоке показана на рисунке 10-3.

ONU начинает с состояния Hunt. Находясь в состоянии Hunt, ONU ищет шаблон PSync при всех возможных вариантах выравнивания (как битов, так и байтов) в сигнале нисходящего потока. Как только найдено точное совпадение с шаблоном PSync, указанным в пункте 10.1.1.1, ONU проверяет, образуют ли 64 бита, непосредственно следующие за шаблоном PSync, действительную (то есть не содержащую ошибок или корректируемую) HEС-защищенную структуру SFC (правила проверки HEС см. в таблице А.4). Если 64-битовая защищенная структура SFC некорректируемая, то ONU остается в состоянии Hunt и продолжает поиск шаблона PSync. Если 64-битовая защищенная структура SFC действительна, ONU сохраняет локальную копию значения SFC и переходит в состояние Pre-Sync.



**Рисунок 10-3 – Конечный автомат синхронизации ONU
в нисходящем потоке**

Обнаружив границу PHY-кадра нисходящего потока и выйдя из состояния Hunt, ONU выполняет проверку PSync и SFC на каждой последующей границе PHY-кадра (то есть через каждые 155 520 байтов) и производит соответствующий переход конечного автомата синхронизации нисходящего потока. Перед проверкой PSync и SFC ONU увеличивает локальное значение SFC на единицу. Первая входящая последовательность из 64 битов на границе PHY-кадра нисходящего потока считается полем PSync, а последующая последовательность из 64 битов – структурой SFC. Проверка PSync выполнена успешно, если по меньшей мере 62 бита входящей 64-битовой последовательности совпадают с фиксированным шаблоном PSync; в противном случае проверка PSync считается неудачной. Проверка SFC выполнена успешно, если входящая 64-битовая последовательность образует допустимое (без ошибок или с возможностью коррекции) HECS-защищенное поле, а входящее значение SFC равно локально сохраненному (и только что увеличенному) значению SFC; в противном случае проверка SFC считается неудачной.

Из состояния Pre-Sync блок ONU переходит в состояние Sync, если обе проверки PSync и SFC выполнены успешно, и возвращается в состояние Hunt, если проверка PSync или проверка SFC неудачная.

ONU остается в состоянии Sync, пока проверка PSync и SFC выполняются успешно, и переходит в состояние Re-Sync, если проверка PSync или проверка SFC неудачная.

Если обе проверки PSync и SFC успешно выполнены, ONU возвращается из состояния Re-Sync в состояние Sync. Однако если проверка PSync или проверка SFC неудачная для $M - 1$ последовательных PHY-кадров, то ONU объявляет о потере синхронизации нисходящего потока, отбрасывает локальную копию SFC и переходит в состояние Hunt.

Рекомендуемое значение параметра M равно 3.

10.1.3 Полезная нагрузка PHY-кадра нисходящего потока

Полезная нагрузка PHY-кадра нисходящего потока имеет размер 155 496 байтов. Он получается из соответствующего кадра XGTC нисходящего потока (см. раздел 8.1), размер которого составляет 135 432 байта, путем применения FEC, так что добавляется в общей сложности 20 064 байта четности (пункт 10.3.1), и скремблирования результата (пункт 10.4.1).

10.2 РНУ-кадры и РНУ-пакеты восходящего потока

Длительность РНУ-кадра восходящего потока составляет 125 мкс, что при скорости восходящего потока 2,48832 Гбит/с соответствует размеру в 38 880 байтов (9720 слов).

По указанию OLT каждый ONU определяет момент времени, соответствующий началу конкретного РНУ-кадра восходящего потока, надлежащим образом смещая начальную точку соответствующего РНУ-кадра нисходящего потока. Последовательность граничных точек РНУ-кадров в восходящем направлении обеспечивает общую привязку синхронизации для OLT и всех ONU в PON, но эти точки не соответствуют никаким конкретным событиям (в отличие от граничных точек РНУ-кадров нисходящего потока, в которых начинается передача или прием PSBd).

В восходящем направлении каждый ONU передает серию относительно коротких РНУ-пакетов и между пакетами неактивен. РНУ-пакет восходящего потока состоит из блока физической синхронизации восходящего потока (PSBu) и полезной нагрузки РНУ-пакета, представленной пакетом XGTC восходящего потока, содержимое которого может быть защищено посредством FEC и скремблировано. OLT использует BWmap для управления синхронизацией и длительностью РНУ-пакетов восходящего потока, с тем чтобы передачи разных ONU в восходящем направлении не перекрывались. РНУ-пакеты восходящего потока каждого ONU опираются на начало соответствующего РНУ-кадра восходящего потока. РНУ-пакет восходящего потока относится к РНУ-кадру N восходящего потока, если этот пакет указан в карте BWmap, передаваемой в РНУ-кадре N нисходящего потока. В этом случае первый байт заголовка пакета XGTC передается в пределах РНУ-кадра N . Часть PSBu РНУ-пакета восходящего потока может передаваться в пределах границ предыдущего РНУ-кадра. РНУ-пакет восходящего потока, относящийся к конкретному РНУ-кадру восходящего потока, может выходить за пределы переменной границы этого кадра.

Соотношение между границами РНУ-кадра и РНУ-пакетами восходящего потока разных ONU иллюстрируется на рисунке 10-4.

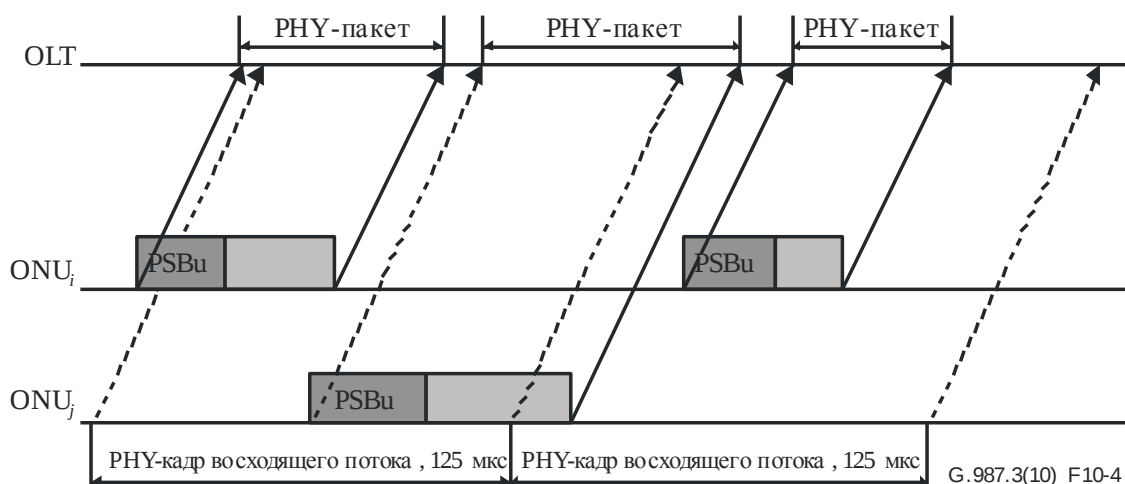


Рисунок 10-4 – РНУ-кадр и РНУ-пакеты восходящего потока

10.2.1 Блок физической синхронизации восходящего потока (PSBu)

Секция PSBu содержит преамбулу и разделитель (см. рисунок 10-5), что позволяет оптическому приемнику OLT настраиваться на уровень оптического сигнала и определять границы пакета. Длина и шаблон преамбулы и разделителя составляют профиль пакета. Набор разрешенных профилей пакетов задается OLT заранее с использованием сообщения Profile PLOAM. OLT выбирает конкретный профиль, который будет использоваться с конкретным РНУ-пакетом, в поле BurstProfile соответствующего распределения BWmap.

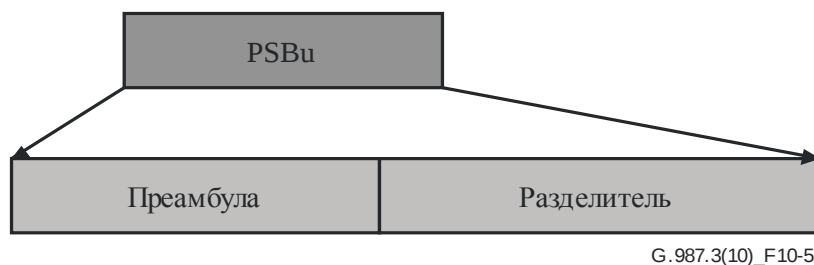


Рисунок 10-5 – Блок физической синхронизации восходящего потока

Шаблоны преамбулы и разделителя и рекомендуемые профили пакетов обсуждаются в Дополнении III.

10.2.2 Полезная нагрузка RHY-пакета восходящего потока

Полезная нагрузка RHY-пакета восходящего потока получается из соответствующего пакета XGTC восходящего потока (см. пункт 8.2) путем возможного применения FEC – по усмотрению OLT в соответствии с профилем пакета (пункт 10.3.2) – и скремблирования результата (пункт 10.4.2).

10.2.3 Защитный интервал

Для предотвращения взаимных помех между передачами в восходящем потоке OLT составляет BWmap, отставляя подходящий защитный интервал между пакетами восходящего потока от разных ONU. Защитный интервал включает в себя интервалы T_h в режиме включения и T_h в режиме выключения, а также запас на дрейф передачи отдельных ONU. Рекомендуемый минимальный защитный интервал составляет 64 бита.

10.3 Упреждающая коррекция ошибок

На подуровне адаптации RHY применяется упреждающая коррекция ошибок (FEC) для обеспечения избыточности передаваемых данных. Это позволяет декодеру обнаруживать и исправлять некоторые ошибки передачи. В системе XG-PON кодирование FEC основано на кодах Рида–Соломона (RS).

Коды RS – это недвоичные коды, которые работают с байтовыми символами и принадлежат к семейству систематических линейных циклических блочных кодов. Код RS принимает блоки данных постоянного размера и добавляет в конце дополнительные байты четности, создавая тем самым кодовое слово. Используя эти дополнительные байты, декодер FEC обрабатывает поток данных, обнаруживает ошибки, исправляет их и восстанавливает исходные данные.

Чаще всего из кодов RS используются код RS(255, 239), когда 255-байтовое кодовое слово состоит из 239 байтов данных, за которыми следуют 16 байтов четности, и код RS(255, 223), когда 255-байтовое кодовое слово состоит из 223 байтов данных, за которым следуют 32 байта четности. Код RS(255, 239) определяется в [ITU-T G.709].

В настоящей Рекомендации используются коды RS в усеченной или сокращенной форме, что позволяет работать с кодовыми словами и блоками данных более удобного размера. Укороченное кодовое слово из 248 символов дополняется в кодере 7 начальными нулевыми символами, которые не передаются, но вставляются также в приемнике перед декодированием.

В нисходящем направлении код FEC представляет собой RS(248, 216), который является усеченной формой RS(255, 223). В восходящем направлении код FEC представляет собой RS(248, 232), который является усеченной формой RS(255, 239). Коды RS(248, 216) и RS(248, 232) формально описываются в Приложении В.

Поддержка FEC обязательна как для OLT, так и для ONU в восходящем и нисходящем направлениях. В нисходящем направлении FEC всегда включен; в восходящем направлении использованием FEC динамически управляет OLT.

10.3.1 FEC в нисходящем потоке

В нисходящем направлении код FEC представляет собой RS(248, 216). Каждый PNY-кадр нисходящего потока содержит 627 кодовых слов FEC. Каждое кодовое слово имеет длину 248 байтов. Внутри кодового слова за 216 байтами данных следуют 32 байта четности.

Секция PSBd из 24 байтов не включена в кодовое слово FEC. В PNY-кадре нисходящего потока первое кодовое слово начинается с 25-го байта PNY-кадра (первый байт секции заголовка XGTC), второе кодовое слово – с 273-го байта PNY-кадра, третье кодовое слово – с 521-го байта PNY-кадра и т. д. Вставка байтов четности FEC и реконструкция полезной нагрузки нисходящего потока показаны на рисунках 10-6 и 10-7 соответственно.

Следует отметить, что этап обработки кода FEC в нисходящем потоке применяется до скремблирования в нисходящем потоке.

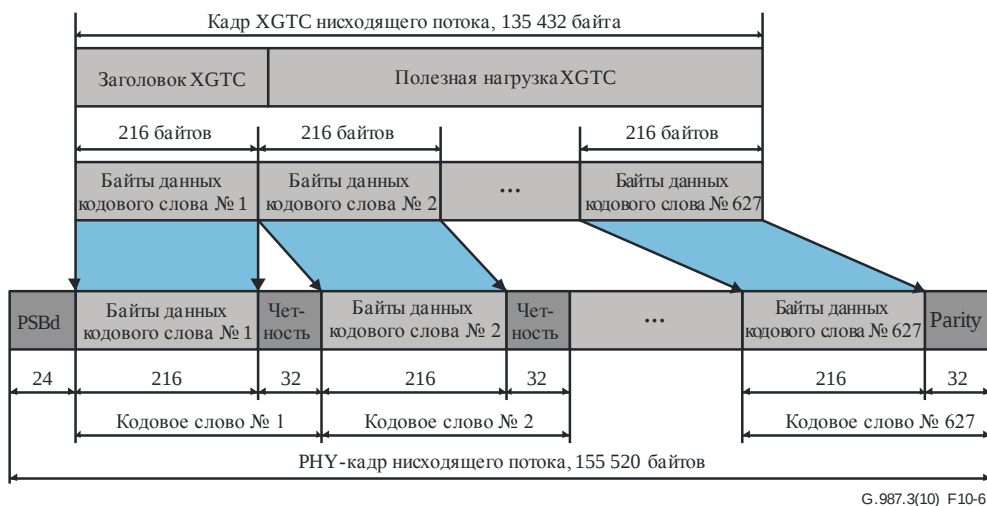


Рисунок 10-6 – Вставка байтов четности FEC в PNY-кадр нисходящего потока

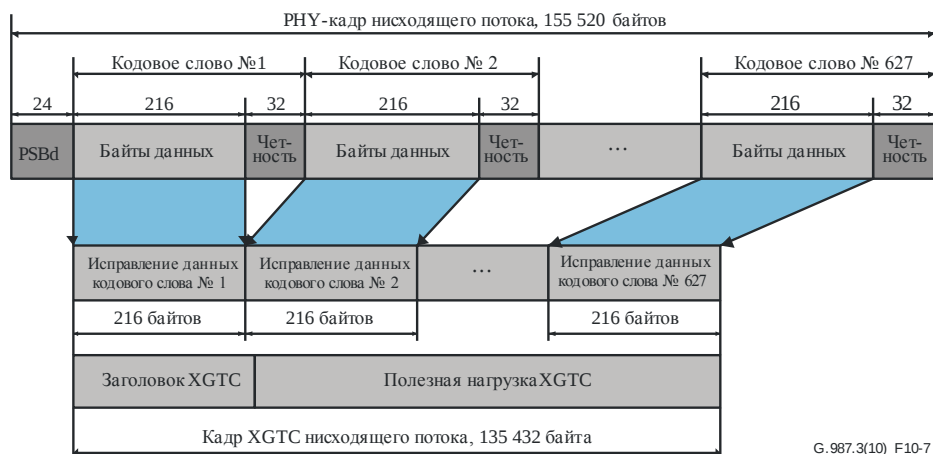


Рисунок 10-7 – Реконструкция полезной нагрузки в декодере FEC нисходящего потока

10.3.2 FEC восходящего потока

Код FEC восходящего потока представляет собой RS(248, 232). Каждое кодовое слово имеет длину 248 байтов. Внутри кодового слова после 232 байтов данных следуют 16 байтов четности. Секция PSBu не включена в кодовое слово FEC. Первое кодовое слово в PNY-пакете начинается с секции заголовка XGTC. Все распределения определенного ONU имеют одинаковый статус FEC. Смежные распределения кодируются как один блок данных, так что в конце пакета имеется не более одного укороченного кодового слова. Вставка байтов четности FEC и реконструкция полезной нагрузки восходящего потока показаны на рисунках 10-8 и 10-9 соответственно.

Следует отметить, что этап обработки кода FEC восходящего потока применяется до скремблирования восходящего потока.

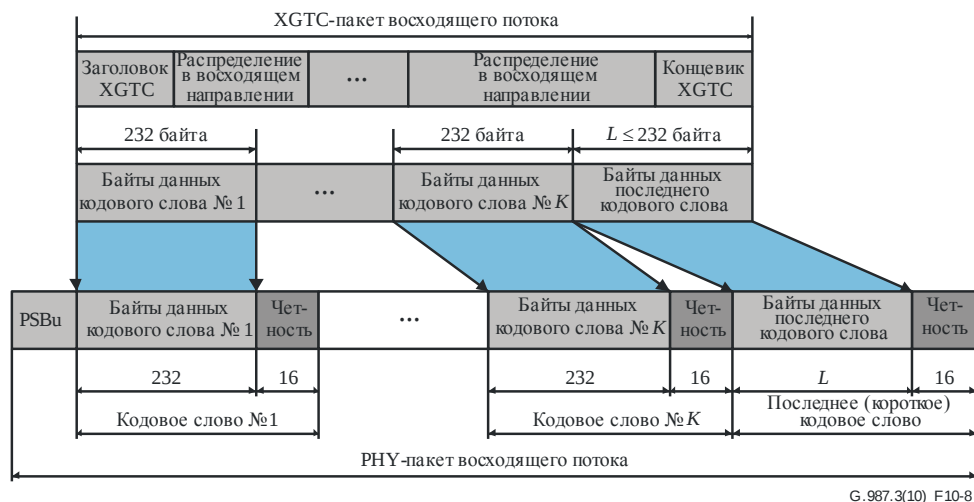


Рисунок 10-8 – Передача восходящего потока с вставкой байтов четности FEC

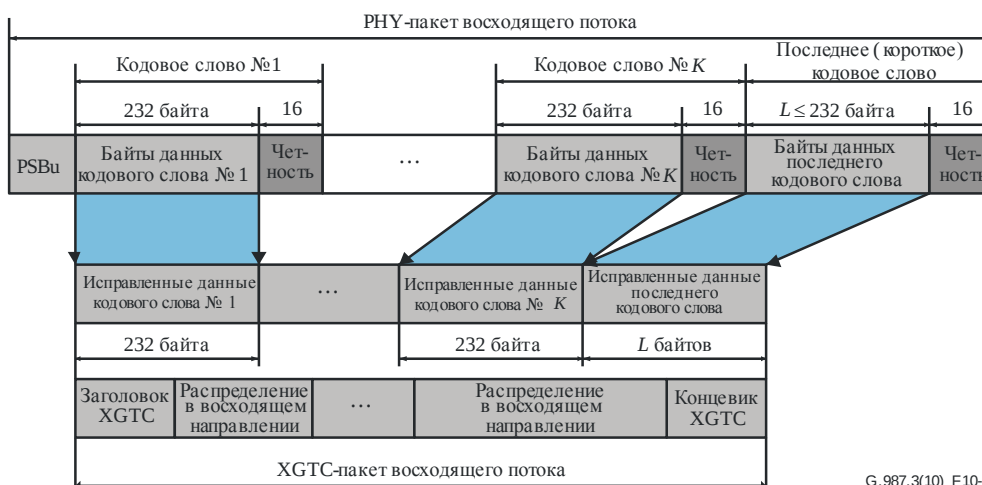


Рисунок 10-9 – Реконструкция полезной нагрузки в декодере FEC восходящего потока

10.3.2.1 Последнее укороченное кодовое слово

Если в последнем кодовом слове RNU-пакета меньше 232 байтов данных, кодер FEC генерирует последнее укороченное кодовое слово следующим образом:

- в начале последнего кодового слова добавляются заполняющие нулевые байты, которые дополняют его до 232 байтов;
- вычисляются байты четности;
- заполняющие байты удаляются и укороченное кодовое слово передается.

Декодер FEC в OLT выполняет следующие шаги для декодирования последнего укороченного кодового слова:

- в начале последнего укороченного кодового слова вставляются дополняющие нулевые байты;
- после декодирования дополняющие байты удаляются.

10.3.2.2 Соображения относительно BWmap

При построении BWmap OLT учитывает использование FEC и стремится обеспечить такие распределения, которые приведут к целому числу блоков FEC при использовании FEC.

При вычислении размеров GrantSize для распределений в пакете XGTC OLT может рассчитать размер соответствующего PNY-пакета следующим образом.

- 1) Размер пакета XGTC равен общей сумме значений GrantSize, фиксированной части заголовка XGTC, концевика XGTC и 48-байтового поля PLOAM, если установлен флаг PLOAMu.
- 2) Если запрошенный профиль пакета включает FEC, то служебная нагрузка FEC равна 16-байтовому блоку четности для каждого целого и, возможно, одного частичного 232-байтового блока данных в пакете XGTC.
- 3) В этом случае общий размер пакета PNY равен размеру пакета XGTC, служебной нагрузки FEC (при ее наличии) и размеру блока PSBu. Размер блока PSBu определяется профилем, выбранным OLT.

При назначении StartTime для данного PNY-пакета значение StartTime следующего PNY-пакета в составе BWmap отделяется интервалом, равным как минимум сумме следующих элементов: размер данного пакета XGTC со служебной нагрузкой FEC при ее наличии, минимальный защитный интервал и размер блока PSBu следующего PNY-пакета.

10.3.2.3 Включение/выключение FEC восходящего потока

OLT динамически активирует или деактивирует функцию FEC для данного ONU в восходящем направлении, выбирая соответствующий профиль пакета. Когда FEC активен, декодер FEC обеспечивает оценку BER для восходящей линии связи. Функция FEC может быть отключена, если наблюдаемый BER очень мал и если оператора устраивает компромисс между повышением пропускной способности и фактическим увеличением BER. Когда функция FEC выключена, оценка BER получается с использованием значения ВР-32 в концевике XGTC. Если наблюдаемый BER слишком высок, оператор может вновь включить FEC.

10.4 Скремблирование

10.4.1 Скремблирование PNY-кадров нисходящего потока

PNY-кадры нисходящего потока скремблируются с использованием скремблирующего полинома, синхронизируемого по кадрам. Используется полином $x^{58} + x^{39} + 1$. Эта кодовая комбинация складывается по модулю два с данными нисходящего потока. По первому биту, следующему за блоком PSBd, в сдвиговом регистре, используемом для вычисления этого полинома, устанавливается заданная кодовая комбинация, и он продолжает работать до последнего бита PNY-кадра нисходящего потока.

Для каждого PNY-кадра нисходящего потока предварительно устанавливаемая кодовая комбинация, длина которой составляет 58 битов, изменяется. Старшие 51 бит кода предварительной загрузки (P1...P51) представляются 51-битовым счетчиком суперкадра, передаваемым в блоке PSBd, так что P51, который является младшим разрядом кода предварительной нагрузки, равен значению младшего разряда счетчика суперкадра. Семь младших битов кода предварительной нагрузки установлены в 1.

Схема скремблирования PNY-кадра нисходящего и восходящего потоков приведена на рисунке 10-10. Пример последовательности скремблера приведен в Приложении А.

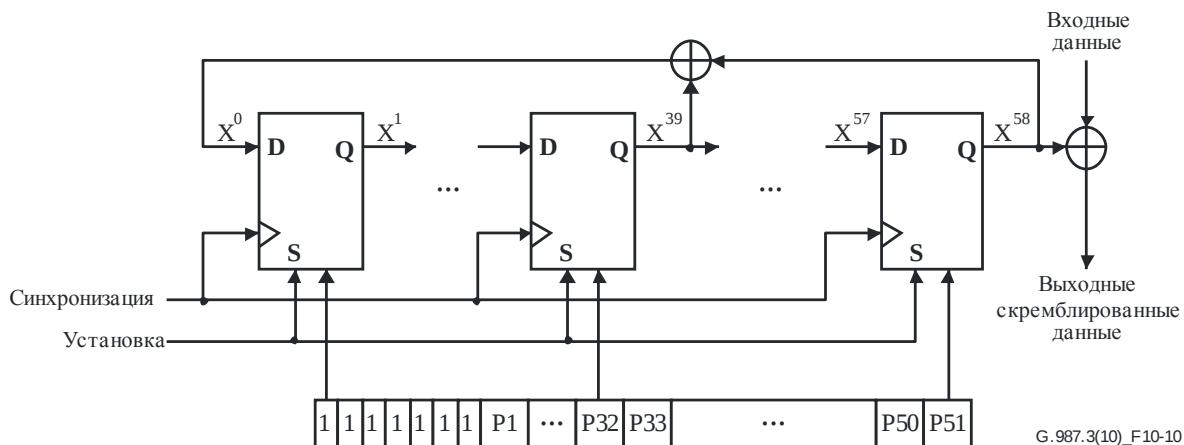


Рисунок 10-10 – Скремблер РНУ-кадров нисходящего и восходящего потоков

10.4.2 Скремблирование РНУ-пакетов восходящего потока

РНУ-пакеты восходящего потока скремблируются с использованием скремблирующего полинома, синхронизируемого по пакетам. Используется полином $x^{58} + x^{39} + 1$. Эта кодовая комбинация складывается по модулю два с данными восходящего потока. По первому биту, следующему за блоком PSB_u, в сдвиговом регистре, используемом для вычисления этого полинома, устанавливается заданная кодовая комбинация, и он продолжает работать до последнего бита РНУ-пакета.

Для каждого РНУ-кадра восходящего потока предварительно устанавливаемая кодовая комбинация, длина которой составляет 58 битов, изменяется. Если ONU передает несколько РНУ-пакетов в пределах одного РНУ-кадра, код предварительной нагрузки для этих пакетов остается неизменным. Старшие 51 бит кода предварительной нагрузки (P1... P51) представляются 51-битовым счетчиком суперкадра, принимаемым в блоке PSB_d соответствующего РНУ-кадра нисходящего потока. Семь младших битов кода предварительной нагрузки установлены в 1.

Схема скремблирования РНУ-пакетов восходящего потока показана на рисунке 10-10. Пример последовательности скремблера приведен в Приложении А.

11 Канал обмена сообщениями PLOAM

11.1 Обзор

Канал обмена сообщениями ОАМ физического уровня (PLOAM) в системе XG-PON служит средством эксплуатации и управления между OLT и блоками ONU, основанным на фиксированном наборе сообщений, передаваемых в специальном поле заголовка кадра XGTC (нисходящий поток) и заголовка пакета XGTC (восходящий поток). Процессоры PLOAM OLT и ONU являются клиентами соответствующих подуровней формирования кадров XGTC. Канал PLOAM обеспечивает более гибкие функциональные возможности, чем встроенный канал управления, и, как правило, работает быстрее канала OMCI.

11.1.1 Функциональные возможности канала PLOAM

Канал PLOAM поддерживает функции управления уровня TC XG-PON. Он основан на обмене сообщениями длиной 48 байтов, которые передаются в сегменте PLOAM заголовка кадра XGTC нисходящего потока и в заголовке пакета XGTC восходящего потока.

Канал PLOAM поддерживает следующие функции:

- передача профиля пакета;
- активация ONU;
- регистрация ONU;
- обмен при замене ключей шифрования;
- сигнализация о защитном переключении;
- управление энергопотреблением.

11.1.2 Ограничения скорости канала PLOAM

Сообщения PLOAM в нисходящем потоке делятся на две категории – передаваемые в вещательном режиме всем ONU и одноадресные, предназначенные для конкретного ONU. В пределах данного кадра 125 мкс OLT может передать не более одного вещательного сообщения PLOAM и не более одного одноадресного сообщения PLOAM для каждого ONU.

ONU может хранить восемь одноадресных и вещательных сообщений PLOAM нисходящего потока до их обработки. Модель обработки PLOAM – однопотоковая. Нормативное время обработки PLOAM-сообщения составляет 750 мкс. То есть когда PLOAM-сообщение нисходящего потока принимается при пустой очереди в PHY-кадре N нисходящего потока, ONU должен извлечь сообщение из очереди, выполнить всю надлежащую обработку и подготовить ответ, который подлежит отправке в восходящем потоке не позднее чем в PHY-кадре $N + 6$ восходящего потока. Кроме того, если в начале кадра восходящего потока, в котором передается ответ PLOAM, очередь PLOAM остается непустой, то обрабатывается сообщение из начала очереди и ответ, если он требуется для сообщений данного типа, должен быть подготовлен к передаче в восходящем потоке не позднее чем в 6-м из последующих PHY-кадров восходящего потока.

Следует отметить, что в соответствии с этими требованиями OLT может определять максимальное количество непризнанных вещательных и одноадресных PLOAM-сообщений, направляемых данному ONU, а также ожидаемое время ответа на любое PLOAM-сообщение нисходящего потока.

ONU передают PLOAM-сообщения восходящего потока под управлением OLT, который явно устанавливает флаг PLOAMu в соответствующих структурах распределения. OLT предоставляет каждому ONU возможность регулярной передачи PLOAM. OLT может также регулировать скорость, с которой он предоставляет возможности передачи PLOAMu в восходящем потоке для отдельных ONU в зависимости от типа ONU, заданных рабочих и служебных параметров, количества и типов сообщений PLOAM, передаваемых в нисходящем потоке, и ответной реакции самого ONU в форме индикации состояния очереди PLOAM.

11.1.3 Надежность канала PLOAM

Когда в результате обработки одноадресного PLOAM-сообщения ONU входит в состояние Operation или остается в нем (см. раздел 12), он подтверждает результат обработки, создавая PLOAM-сообщение в восходящем потоке. Такое ответное PLOAM-сообщение может быть как сообщением определенного типа, требуемым конкретным протоколом PLOAM, так и сообщением типа общего подтверждения. Подтверждающее PLOAM-сообщение также создается в случае ошибки формата или обработки PLOAM в нисходящем потоке. Как специальное ответное сообщение, так и подтверждающее сообщение содержат порядковый номер подтверждаемого сообщения нисходящего потока. Кроме того, ответ подтверждающего типа содержит код завершения, указывающий на результат обработки сообщения PLOAM.

Более того, подтверждающее PLOAM-сообщение используется в ответ на распределение PLOAM при отсутствии PLOAM, готовых к передаче в восходящем потоке. В этом случае код завершения позволяет отличить состояние "линия свободна" (PLOAM-сообщения, находящиеся в очереди для передачи или обрабатываемые, отсутствуют) от состояния занятости (очередь передачи PLOAM в восходящем потоке пуста, но обрабатывается PLOAM-сообщение в нисходящем потоке).

Вещательные PLOAM-сообщения в нисходящем потоке, не требующие ответа (сообщение Key_Control требует ответа, даже если оно вещательное), и сообщения PLOAM в нисходящем потоке, не прошедшие проверку на целостность, не подтверждаются.

Если OLT ожидает от ONU подтверждения или ответа на сообщение, а вместо этого получает только подтверждение активности в ответ на запрос PLOAM, он может сделать вывод, что ONU не смог обработать это сообщение. Если ONU i многократно не подтверждает PLOAM-сообщение в нисходящем потоке, то OLT фиксирует потерю канала PLOAM i (LOPC _{i}).

11.1.4 Возможность расширения

Реализация канала PLOAM должна быть гибкой в целях содействия будущим усовершенствованиям, касающимся метода обеспечения обратной совместимости.

11.2 Формат PLOAM-сообщения

Структура PLOAM-сообщения показана в таблице 11-1, причем каждое поле дополнительно определяется в следующих разделах.

Таблица 11.1. Общая структура сообщений PLOAM

Октет	Поле	Описание
1–2	ONU-ID	Десять битов, выровненные по LSB-концу поля из двух байтов. Шесть старших битов зарезервированы и устанавливаются в 0 передатчиком и игнорируются приемником
3	Идентификатор типа сообщения	Этот байт указывает тип сообщения. Пронумерованные кодовые точки для каждого типа сообщений определяются ниже
4	SeqNo	Порядковый номер
5–40	Message_Content	Содержание сообщения указано в том разделе, в котором описывается идентификатор каждого типа сообщений
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений

11.2.1 Поле ONU-ID

Поле ONU-ID включает в себя шесть зарезервированных битов плюс фактический 10-битовый идентификатор ONU, который указывает получателя сообщения в нисходящем направлении или отправителя сообщения в восходящем направлении. При активации ONU ему назначается ONU-ID в диапазоне от 0 до 1022. Зарезервированное значение ONU-ID 1023 (0x3FF) указывает на вещательное сообщение в нисходящем направлении или на ONU, которому не был назначен ONU-ID в восходящем направлении.

11.2.2 Идентификатор типа сообщения

Идентификатор типа сообщения – это 8-битовое поле, которое указывает тип сообщения и определяет семантику полезной нагрузки сообщения. Кодовые точки идентификатора типа сообщений определяются в нижеследующем пункте 11.3. Кодовые точки идентификатора типа сообщений, не определенные явно в настоящей Рекомендации, зарезервированы. Поставщики не должны распределять зарезервированные кодовые точки идентификатора типа сообщений ни в каких целях, и они не должны передаваться в PLOAM-сообщениях. При получении PLOAM-сообщения восходящего потока с неподдерживаемым идентификатором типа сообщения OLT игнорирует это сообщение, включая поле порядкового номера. При получении PLOAM-сообщения нисходящего потока с зарезервированным или неподдерживаемым идентификатором типа сообщения ONU игнорирует это сообщение, если оно отправлено с вещательным ONU-ID, или отрицательно подтверждает его как сообщение неизвестного типа, если оно отправлено с его конкретным ONU-ID.

11.2.3 Поле SeqNo

SeqNo – это поле длиной 8 битов, содержащее счетчик порядковых номеров, который используется для обеспечения надежности канала обмена PLOAM-сообщениями.

В нисходящем направлении поле SeqNo заполняется значением соответствующего счетчика порядковых номеров OLT. OLT поддерживает отдельный счетчик порядковых номеров для каждой одноадресной передачи ONU и для потока вещательных PLOAM-сообщений. При перезагрузке OLT в счетчике для потока вещательных PLOAM-сообщений устанавливается значение 1. OLT при назначении ONU-ID для каждого ONU инициализирует счетчик порядковых номеров в значение 1. При передаче вещательного или одноадресного PLOAM-сообщения в соответствующий счетчик порядковых номеров добавляется 1. По достижении значения 255 каждый счетчик порядковых номеров возвращается к 1; значение 0 в нисходящем направлении не используется.

В восходящем направлении, когда PLOAM-сообщение восходящего потока является ответом на PLOAM-сообщение нисходящего потока, содержимое поля SeqNo равно содержимому поля SeqNo

сообщения нисходящего потока. Один и тот же SeqNo может присутствовать в нескольких сообщениях PLOAM восходящего потока, например, для передачи многоэлементного ключа шифрования. Если ONU автономно инициировал PLOAM-сообщение, например сообщение Serial_Number_ONU, отправленное в ответ на разрешение серийного номера, то используется значение SeqNo = 0. Значение SeqNo = 0 также используется в ответах на разрешения PLOAM, когда в ONU отсутствует очередь сообщений PLOAM в восходящем потоке.

11.2.4 Содержание сообщения

С 5-го по 40-й октет сообщения PLOAM используются для полезной нагрузки PLOAM-сообщений. Содержание полезной нагрузки сообщения зависит от типа конкретного сообщения и определяется в пункте 11.3. Неиспользуемые октеты полезной нагрузки сообщения дополняются значением 0x00 с помощью процессора передачи PLOAM и игнорируются процессором приема PLOAM.

11.2.5 Проверка целостности сообщений

Код проверки целостности сообщения (MIC) – это поле длиной 8 байтов, которое используется для проверки идентичности отправителя и предотвращения подмены PLOAM-сообщений. Если проверка целостности сообщения оказалась неудачной, приемник отбрасывает PLOAM-сообщение. В целях проверки MIC не существует различий между значимыми и заполняющими октетами содержимого полезной нагрузки сообщения.

Процесс генерации кода MIC описывается в пункте 15.6. Процесс генерации ключей и управления ключами для MIC PLOAM описывается в пункте 15.8.

Используя содержание PLOAM-сообщения и общий ключ целостности PLOAM, отправитель вычисляет MIC и передает его в PLOAM-сообщении. Получатель, используя то же содержание сообщения и общий ключ, вычисляет свою версию MIC и сравнивает ее со значением MIC, переданным в полученном сообщении PLOAM. Если оба значения MIC равны, PLOAM-сообщение считается достоверным. В противном случае сообщение признается недействительным и отбрасывается.

11.3 Определения PLOAM-сообщений

11.3.1 Сводные сведения о сообщениях в нисходящем потоке

В таблице 11-2 приведены сводные данные о сообщениях нисходящего потока.

Таблица 11-2 – Сообщения PLOAM в нисходящем потоке

ИД типа сообщения	Имя сообщения	Назначение	Побудительная причина	Результат получения
0x01	Profile	Вещательное или одноадресное сообщение в целях предоставления информации заголовка пакета восходящего потока	Периодически по усмотрению OLT	ONU сохраняет профиль для использования в последующих передачах в восходящем потоке. Если находится в состоянии O5, то отправляет подтверждение в ответ на направленное сообщение Profile
0x03	Assign_ONU-ID	Связывает свободное значение ONU-ID с серийным номером ONU	Когда OLT распознает уникальный серийный номер ONU в процессе поиска	ONU с этим серийным номером устанавливает свой ONU-ID, а также свой Alloc-ID по умолчанию и Port-ID XGEM OMCC. Подтверждение не передается

0x04	Ranging_Time	Для указания полной задержки выравнивания EqD. В качестве вещательного сообщения может использоваться для смещения EqD всех ONU (например, после события защитного переключения)	Когда OLT решает изменить задержку. См. описание процесса активации ONU в разделе 12	ONU заполняет или обновляет регистр задержки выравнивания этим значением. В состоянии O5 отправляет подтверждение в ответ на направленное сообщение Ranging_Time
------	--------------	--	---	--

Таблица 11-2 (продолжение)

ID типа сообщения	Имя сообщения	Назначение	Побудительная причина	Результат получения
0x05	Deactivate_ONU-ID	Команда конкретному ONU на прекращение передачи трафика восходящего потока и сброс. Это сообщение также может быть вещательным	По усмотрению OLT	ONU с этим ONU-ID выключает свой лазер. ONU-ID, явно назначенный Alloc-ID и Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM по умолчанию, профили пакетов и задержка выравнивания сбрасываются. ONU переходит в исходное состояние. Подтверждение не передается
0x06	Disable_Serial_Number	Вещательное сообщение для включения/выключения ONU с данным серийным номером	По усмотрению OLT	Вариант выключения: переводит указанный ONU или все ONU в состояние Emergency Stop. Выключенный ONU не может вести передачу. Вариант включения: переводит указанный ONU или все ONU из состояния Emergency Stop в состояние Initial. Включенный ONU сбрасывает конфигурацию уровня TC и перезапускает процесс активации, как указано в разделе 12. Подтверждение не передается
0x09	Request_Registration	Для запроса регистрационного ID ONU	По усмотрению OLT; ONU уже активирован	Отправка сообщения Registration
0x0A	Assign_Alloc-ID	Для назначения определенному ONU указанного Alloc-ID	В рамках предоставления услуг. Нет необходимости явно назначать Alloc-ID по умолчанию для OMCC	ONU подтверждает сообщение и затем отвечает на предоставления пропускной способности с этим Alloc-ID
0x0D	Key_Control	OLT дает команду ONU сгенерировать новый или подтвердить существующий ключ шифрования данных	По усмотрению OLT	Отправка одного сообщения Key_Report для каждого фрагмента содержания ответа длиной 32 байта

Таблица 11-2 (окончание)

ID типа сообщения	Имя сообщения	Назначение	Побудительная причина	Результат получения
0x12	Sleep-Allow	Для включения или выключения функции энергосбережения ONU в режиме реального времени	По усмотрению OLT	Если управление питанием ONU было включено через OMCI, то ответ ONU контролируется конечным автоматом, как указано в разделе 16. В противном случае ONU игнорирует это сообщение

11.3.2 Сводные сведения о сообщениях в восходящем потоке

В таблице 11-3 приведены сводные данные о сообщениях в восходящем потоке.

Таблица 11-3 – Сообщения в восходящем потоке

ID типа сообщения	Имя сообщения	Назначение	Побудительная причина	Результат получения
0x01	Serial_Number_ONU	Для сообщения серийного номера ONU	ONU отправляет это сообщение в ответ на разрешение серийного номера, когда находится в состоянии Serial_Number	OLT извлекает серийный номер и может назначить этому ONU свободный ONU-ID. В сообщение включается текущее значение случайной задержки, что позволяет произвести первое измерение полной задержки (RTD) при получении серийного номера
0x02	Registration	Для сообщения регистрационного идентификатора ONU	Когда ONU находится в состоянии Ranging или отвечает на разрешение определения дальности или когда ONU находится в состоянии Operation и отвечает на сообщение Request_Registration	OLT может использовать регистрационный идентификатор ONU, как указано в пункте 15.2.1
0x05	Key_Report	Для передачи фрагмента нового ключа шифрования данных или хеша существующего ключа шифрования данных	В ответ на сообщение Key_Control от OLT	Сведения о протоколе см. в пункте 15.5.1

Таблица 11-3 (окончание)

ID типа сообщения	Имя сообщения	Назначение	Побудительная причина	Результат получения
0x09	Acknowledgement	Для индикации приема указанных сообщений в нисходящем потоке. Также используется для ответов по-ор, егго и busy	При получении сообщения в нисходящем потоке, требующего подтверждения. Также для передачи сообщений busy, егго или по-ор в восходящем потоке	Это сообщение обеспечивает надежную передачу сообщений в нисходящем потоке, а также ответы егго и по-ор
0x10	Sleep_Request	Для сигнализации о намерении ONU включить или выключить режим энергосбережения	Под управлением конечного автомата	См. определение в разделе 16

11.3.3 Форматы сообщений в нисходящем потоке

11.3.3.1 Сообщение профиля

Информация о профиле пакета передается периодически с интервалами в сотни миллисекунд или более. Версия определения профиля конкретного пакета может меняться со временем, поэтому ожидается, что с каждым полученным сообщением ONU будет обновляться исходя из последней версии. Чтобы обеспечить обновление всех ONU, OLT, как ожидается, не будет использовать измененную информацию до тех пор, пока каждый ONU не получит обновленный профиль пакета хотя бы дважды, пока он находится в одном из своих активных состояний (см. раздел 16).

Информация профиля пакета, накопленная ONU, не сохраняется при активации ONU. Вновь активированный ONU может ответить на вещательное разрешение серийного номера только после того, как получит связанную с этим разрешением информацию о профиле пакета. В более общем случае ONU в любом состоянии может реагировать на структуру распределения только в том случае, если он уже получил соответствующую информацию профиля пакета.

OLT несет ответственность за понимание последствий отправки как вещательных, так и одноадресных сообщений Profile. В частности, последующее вещательное сообщение Profile перезаписывает все одноадресные профили с одним и тем же индексом профиля.

Октет	Содержание	Описание
1–2	ONU-ID	Направленное сообщение одному ONU или вещательное сообщение всем ONU. В последнем случае ONU-ID = 0x03FF
3	0x01	Идентификатор типа сообщений Profile
4	SeqNo	Порядковый номер одноадресного или вещательного PLOAM-сообщения в зависимости от ситуации
5	VVVV 00PP	VVVV – четырехбитовая версия профиля. Если содержание профиля изменяется, OLT должен обеспечить также изменение версии, чтобы ONU мог обнаружить обновления исключительно на основе поля версии. PP – двухбитовый индекс профиля
6	0000 000F	Индикация FEC. F = 1 – FEC включена, F = 0 – FEC выключена

Октет	Содержание	Описание
7	0000 DDDD	DDDD – длина разделителя в октетах; четырехбитовое целое число, диапазон 0–8
8–15	Разделитель	Выворнен по старшему концу поля; дополняется значениями 0x00; такое заполнение обрабатывается как "don't care", то есть игнорируется
16	0000 LLLL	LLLL – длина преамбулы в октетах; четырехбитовое целое число, диапазон 1–8
17	000R RRRR	RRRR – пятибитовый счетчик повторений преамбулы, диапазон 0–31. Значение 0 указывает, что эта преамбула вообще не передавалась
18–25	Преамбула	Шаблон преамбулы, выровненный по старшему концу поля; заполняется значениями 0x00; такое заполнение обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
26–33	PON-TAG	Статический идентификатор порта PON OLT длиной 8 байтов, выбираемый оператором и используемый для привязки главного ключа сеанса (MSK) к контексту ассоциации безопасности (см. пункт 15.3.3). Рекомендуется, чтобы PON-TAG был уникальным по крайней мере в пределах домена оператора и фиксированным на все время эксплуатации системы. Например, его можно получать как конкатенацию четырехбайтового идентификатора поставщика OLT с четырехбайтовым VSSN порта PON
34–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений

11.3.3.2 Сообщение Assign_ONU-ID

Октет	Содержание	Описание
1–2	0x03FF	Вещательный ONU-ID
3	0x03	Идентификатор типа сообщений Assign_ONU-ID
4	SeqNo	Порядковый номер вещательного PLOAM-сообщения
5–6	ONU-ID	Выворненное по LSB 10-битовое значение присвоенного ONU-ID, заполненное шестью нулями в старших разрядах; диапазон 0–1022 (0x0000 – 0x03FE)
7–10	Vendor-ID	Код идентификатора поставщика ONU, четырехсимвольная комбинация, определяемая при получении SN
11–14	VSSN	Серийный номер для конкретного поставщика, четырехбайтовое целое без знака, определяемое при получении SN
15–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений

11.3.3.3 Сообщение Ranging_Time

По своему типичному назначению сообщение Ranging_Time используется для установки задержки выравнивания данного ONU (направленное сообщение), как описывается в разделе 12. В качестве вещательного сообщения Ranging_Time может использоваться для указания корректировки, касающейся смещения задержки для всех ONU, положительной или отрицательной, после события защитного переключения. OLT отвечает за анализ взаимодействия между вещательным сообщением Ranging_Time и возможными состояниями управления питанием своих ONU.

Октет	Содержание	Описание
1–2	ONU-ID	Направленное сообщение одному ONU или вещательное сообщение всем ONU. В последнем случае ONU-ID = 0x03FF
3	0x04	Идентификатор типа сообщений Ranging_Time
4	SeqNo	Порядковый номер одноадресного или вещательного PLOAM-сообщения
5	0000 00SP	Битовая маска, указывающая, как следует интерпретировать поле EqualizationDelay. Бит P = 1 – в байтах 6–9 абсолютная задержка; S игнорируется. Бит P = 0 – в байтах 6–9 относительная задержка; S определяет знак. Бит S = 0 – положительная (задержка): увеличить текущий EqD на указанное значение. Бит S = 1 – отрицательная: уменьшить текущий EqD на указанное значение
6–9	EqualizationDelay	Значение задержки выравнивания в единицах времени передачи бита при номинальной скорости передачи восходящего потока 2,48832 Гбит/с
10–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; приемником обрабатывается как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений

11.3.3.4 Сообщение Deactivate_ONU-ID

Один ONU, получивший эту команду, или все ONU в PON безусловно прекращают передачу в восходящем потоке. Они сбрасывают свои идентификаторы ONU-ID и все идентификаторы Alloc-ID и Port-ID XGEM и переходят в состояние Serial_Number.

Октет	Содержание	Описание
1–2	ONU-ID	Направленное сообщение одному ONU или вещательное сообщение всем ONU. В последнем случае ONU-ID = 0x03FF
3	0x05	Идентификатор типа сообщений Deactivate_ONU-ID
4	SeqNo	Порядковый номер одноадресного или вещательного PLOAM-сообщения в зависимости от ситуации
5–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; приемником обрабатывается как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Код проверки целостности сообщения, вычисляемый с использованием ключа целостности PLOAM по умолчанию (см. пункт 15.8)

11.3.3.5 Сообщение Disable_Serial_Number

Октет	Содержание	Описание
1–2	0x03FF	Вещательный ONU-ID
3	0x06	Идентификатор типа сообщений Disable_Serial_Number
4	SeqNo	Порядковый номер вещательного PLOAM-сообщения
5	Выключить/включить	0xFF – ONU с этим серийным номером лишается доступа к восходящему потоку. 0x00 – ONU с этим серийным номером разрешается доступ к восходящему потоку. 0x0F – все ONU лишаются доступа к восходящему потоку. Содержимое байтов 6–13 игнорируется; 0x0F – всем ONU разрешается доступ к восходящему потоку
6–9	Vendor-ID	Код идентификатора поставщика ONU, четырехсимвольная комбинация, определяемая при получении SN
10–13	VSSN	Серийный номер для конкретного поставщика, четырехбайтовое целое без знака, определяемое при получении SN
14–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений

11.3.3.6 Сообщение Request_Registration

Октет	Содержание	Описание
1–2	ONU-ID	Направленное сообщение одному ONU
3	0x09	Идентификатор типа сообщений Request_Registration
4	SeqNo	Порядковый номер одноадресного PLOAM-сообщения
5–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Код проверки целостности сообщения, вычисляемый с использованием ключа целостности PLOAM по умолчанию (см. пункт 15.8)

11.3.3.7 Сообщение Assign_Alloc-ID

Октет	Содержание	Описание
1–2	ONU-ID	Направленное сообщение одному ONU
3	0x0A	Идентификатор типа сообщений Assign_Alloc-ID
4	SeqNo	Порядковый номер одноадресного PLOAM-сообщения
5–6	Alloc-ID-value	14 битов, выровненных по младшему концу поля. Старшие биты устанавливаются в 0 передатчиком и обрабатываются приемником как "don't care", то есть игнорируются
7	Alloc-ID-type	1 – XGEM-инкапсулированная полезная нагрузка. 255 – отмена распределения этого Alloc-ID. Остальные значения зарезервированы
8–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений

11.3.3.8 Сообщение Key_Control

Октет	Содержание	Описание
1–2	ONU-ID	Направленное или вещательное сообщение, предписывающее одному или всем ONU сгенерировать новый ключевой материал или подтвердить существующие ключи. При вещательном сообщении ONU-ID = 0x03FF
3	0x0D	Идентификатор типа сообщений Key_Control
4	SeqNo	Порядковый номер одноадресного или вещательного PLOAM-сообщения
5	Reserved	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
6	0000 000C	Управление: 0 – генерировать: ONU генерирует новый ключ шифрования данных и передает его в восходящем направлении; 1 – подтвердить: ONU передает в восходящем потоке хеш существующего ключа шифрования данных (Key_Name)
7	0000 00bb	bb – индекс ключа; 01 – первый ключ из пары ключей; 10 – второй ключ из пары ключей
8	Key_Length	Требуемая длина ключа в байтах. Значение 0 указывает на ключ из 256 байтов (см. Примечание)
9–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений
ПРИМЕЧАНИЕ. – Этот параметр поддерживает возможность расширения протокола обмена ключами шифрования данных в долгосрочной перспективе. В настоящее время указанный криптографический метод шифрования данных, шифр AES-128 (см. пункт 15.4), использует ключ фиксированного размера из 16 байтов.		

11.3.3.9 Сообщение Sleep_Allow

OLT отправляет сообщение Sleep_Allow, чтобы включать или выключать функцию энергосбережения в режиме реального времени. Если управление питанием ONU не было включено посредством OMCI, то ONU молча отбрасывает это сообщение. Подробное описание использования и функций этого сообщения приведено в разделе 16.

Октет	Содержание	Описание
1–2	ONU-ID	ONU-ID одноадресного или вещательного сообщения. При вещательном сообщении ONU-ID = 0x03FF
3	0x12	Идентификатор типа сообщений Sleep_Allow
4	SeqNo	Порядковый номер одноадресного или вещательного PLOAM-сообщения
5	0000 000A	Этот байт представляет собой битовое поле со следующими значениями: A = 0 – функция энергосбережения (Sleep) выключена; A = 1 – функция энергосбережения (Sleep) включена. Остальные значения зарезервированы

Октет	Содержание	Описание
6–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений

11.3.4 Форматы сообщений в восходящем потоке

11.3.4.1 Сообщение Serial_Number_ONU

Октет	Содержание	Описание
1–2	0x03FF	Неприсвоенный ONU-ID
3	0x01	Идентификатор типа сообщений Serial_Number_ONU
4	0x00	Порядковый номер
5–8	Vendor_ID	Код, установленный для Vendor_ID, указывается в [ATIS-0300220]. Четыре символа преобразуются в поле из 4 байтов путем конкатенации кодов ASCII/ANSI каждого символа. Пример. Vendor_ID = ABCD → байт 5 = 0x41, байт 6 = 0x42, байт 7 = 0x43, байт 8 = 0x44
9–12	VSSN	Серийный номер для конкретного поставщика
13–16	Random_delay	Произвольная задержка, используемая ONU при отправке этого сообщения, измеренная в единицах времени передачи бита при номинальной скорости передачи линии восходящего потока 2,48832 Гбит/с
17–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Код проверки целостности сообщения, вычисляемый с использованием ключа целостности PLOAM по умолчанию (см. пункт 15.8)

11.3.4.2 Сообщение Registration

Октет	Содержание	Описание
1–2	ONU-ID	Идентификатор отправителя
3	0x02	Идентификатор типа сообщений Registration
4	SeqNo	Повторение значения из сообщения Request_Registration нисходящего потока или 0, если сгенерирован в ответ на разрешение, касающееся определения дальности в состоянии Ranging (O4)
5–40	Registration_ID	Строка из 36 октетов, которая может использоваться при определении конкретного ONU, установленного в определенном местоположении. По умолчанию – строка из 0x00 октетов (см. Примечание)
41–48	MIC	Код проверки целостности сообщения, вычисляемый с использованием ключа целостности PLOAM по умолчанию (см. пункт 15.8)
ПРИМЕЧАНИЕ. – В качестве Registration_ID рекомендуется строка символов ASCII, выровненная по младшим байтам сообщения Registration и заполненная значением 0x00 в неиспользуемых позициях байтов.		

11.3.4.3 Сообщение Key_Report

Октет	Содержание	Описание
1–2	ONU-ID	Идентификатор отправителя
3	0x05	Идентификатор типа сообщений Key_Report
4	SeqNo	Повторение значения из сообщения Key_Control нисходящего потока. Если длина ключевого материала требует передачи нескольких сообщений Key_Report в восходящем направлении, то порядковый номер каждого из них будет одинаковым
5	0000 000R	Тип отчета. R: 0 – NewKey: сообщение содержит вновь сгенерированный ключ или фрагмент ключа; 1 – ExistingKey: сообщение содержит криптографический хеш существующего ключа
6	0000 00bb	bb – индекс ключа: 01 – первый ключ из пары ключей; 10 – второй ключ из пары ключей
7	0000 0FFF	Номер фрагмента, диапазон 0–7. Первый фрагмент имеет номер 0 (см. Примечание)
8	Зарезервирован	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
9–40	Key_Fragment	Фрагмент ключа, 32 байта. Любое заполнение, которое может потребоваться, находится в байтах сообщения с более высокими номерами. Для подтверждения существующего ключа передается один фрагмент из 16 байтов, содержащий криптографический хеш ключа (имя ключа): Key_Name = AES_CMAC (KEK, encryption_key 0x33313431353932363533353839373933, 128). Для нового ключа передается фрагмент ключа KEK_encrypted: KEK_Encrypted_key = AES_ECB (KEK, encryption_key) (см. Примечание)
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений
ПРИМЕЧАНИЕ. – Этот параметр поддерживает возможность расширения протокола обмена ключами шифрования данных в долгосрочной перспективе. При использовании криптографического метода шифрования данных (AES-128), рекомендуемого в настоящее время (см. пункт 15.4), и его непосредственного расширения (AES-192 или AES-256) для передачи ключа требуется единственный фрагмент ключа и только одно PLOAM-сообщение Key_Report.		

11.3.4.4 Сообщение Acknowledgment

Октет	Содержание	Описание
1	ONU-ID	Идентификатор отправителя
3	0x09	Идентификатор типа сообщений Acknowledgment

Октет	Содержание	Описание
4	SeqNo	То же, что и порядковый номер для нисходящего потока. Если у ONU нет сообщений для передачи в восходящем потоке (разрешение на активный режим от OLT), он устанавливает порядковый номер в восходящем потоке равным 0
5	Completion_code	0 – все в порядке; 1 – нет сообщений для отправки; 2 – занят, готовит ответ; 3 – неизвестный тип сообщения; 4 – ошибка параметра; 5 – ошибка обработки; Остальные значения зарезервированы
6–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений

11.3.4.5 Сообщение Sleep_Request

ONU отправляет сообщение Sleep_Request, сигнализируя о своем намерении включить или выключить режим энергосбережения. Подробное описание использования и действия этого сообщения приведено в разделе 16.

Октет	Содержание	Описание
1–2	ONU-ID	Идентификатор отправителя
3	0x10	Идентификатор типа сообщений Sleep_Request
4	SeqNo	Всегда 0
5	Activity_level	0 – Sleep_Request (Awake). Ненулевые значения параметра указывают на запрос перехода в определенный режим управления питанием – ONU переключается между Aware-состояниями (SleepAware, DozeAware или WatchAware), когда ONU принимает и передает трафик, и соответствующими состояниями энергосбережения LowPower (Asleep, Listen или Watch), когда ONU не передает восходящий поток: 1 – Sleep_Request (Doze). Запрос режима Doze – в состоянии LowPower (состояние Listen) приемник ONU остается активным, ONU может принимать трафик нисходящего потока; 2 – Sleep_Request (Sleep). Циклический запрос режима ожидания – в состоянии LowPower (состояние Asleep) приемник ONU пассивен, ONU не может принимать трафик нисходящего потока; 3 – Sleep_Request (WSleep). Запрос режима бдительного ожидания – в состоянии LowPower (состояние Watch) ONU периодически проверяет трафик нисходящего потока на сигналы включения от OLT. Остальные значения зарезервированы
6–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается приемником как "don't care", то есть игнорируется
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений

12 Активация ONU

12.1 Обзор

12.1.1 Определения

Термин "процесс активации" относится к набору распределенных процедур, позволяющих неактивному ONU присоединиться или возобновить работу в PON.

Измеренный в OLT интервал времени между передачей PHY-кадра нисходящего потока и наиболее ранним по возможности получением соответствующего PHY-пакета восходящего потока от данного ONU называется полной задержкой ONU (RTD). RTD состоит из задержки распространения в прямом и обратном направлениях, которая пропорциональна длине оптоволокну ONU, и времени отклика ONU. Значения RTD варьируются от одного ONU к другому. Чтобы обеспечить выравнивание пакетов от разных ONU в границах одного и того же PHY-кадра восходящего потока, каждый ONU должен задерживать передачу пакета в восходящем пакете сверх своего обычного времени отклика. Это дополнительное время называется задержкой выравнивания ONU (EqD). OLT вычисляет EqD для каждого ONU, измеряя соответствующее значение RTD.

Во избежание коллизий с регулярными пакетами восходящего потока во время получения серийного номера и определения дальности вновь присоединившихся ONU OLT временно подавляет передачу в восходящем потоке действующими ONU на то время, когда можно ожидать поступления пакета восходящего потока от нового ONU. Этот интервал времени называется окном или периодом молчания.

Процесс активации включает в себя три этапа: синхронизацию, получение серийного номера и определение дальности.

На этапе синхронизации ONU, оставаясь пассивным, инициализирует локальный экземпляр конечного автомата синхронизации нисходящего потока и достигает синхронизации с PHY-кадрами нисходящего потока.

ONU на этапе получения серийного номера начинает изучать параметры профиля пакета, которые будут использоваться для передачи в восходящем потоке. ONU объявляет о своем присутствии в PON, отвечая на разрешения серийного номера. Разрешение на серийный номер представляет собой структуру распределения с установленным флагом PLOAMu, адресованную вещателю Allos-ID. OLT обнаруживает новый ONU по его серийному номеру и присваивает ему уникальный идентификатор ONU-ID.

На этапе определения дальности ONU отвечает на направленные разрешения касательно определения дальности. Разрешение на определение дальности представляет собой структуру распределения с установленным флагом PLOAMu, адресованную Allos-ID по умолчанию данного ONU. OLT выполняет измерение полной задержки, вычисляет задержку выравнивания и передает ее в ONU.

12.1.2 Причинно-следственный порядок событий активации

OLT управляет процессом активации ONU путем выдачи зависящих от функции разрешений на пропускную способность и обмена сообщениями PLOAM в восходящем и нисходящем потоках. Ниже приводится схема событий процесса активации в их причинно-следственном порядке:

- ONU, начинающий процесс активации, анализирует передачу в нисходящем потоке и достигает синхронизации PSync и суперкадров;
- ONU проверяет сообщения PLOAM Profile, периодически передаваемые OLT, начиная изучение профилей пакетов, указанных для передачи в восходящем потоке;
- когда ONU получает разрешение на серийный номер с известным профилем, он объявляет о своем присутствии в PON посредством PLOAM-сообщения Serial_Number_ONU;
- OLT обнаруживает серийный номер вновь подсоединившегося ONU и назначает ему ONU-ID с помощью сообщения Assign_ONU-ID;
- OLT в качестве опции передает вновь обнаруженному ONU направленное разрешение касательно определения дальности и готовится к точному измерению времени отклика;
- ONU отвечает PLOAM-сообщением Registration;

- OLT выполняет первоначальную аутентификацию ONU на основе идентификатора регистрации, вычисляет индивидуальную задержку выравнивания и передает ее ONU с использованием PLOAM-сообщения Ranging_Time;
- ONU регулирует начальный момент тактового сигнала своего PHY-кадра восходящего потока с учетом определенной задержки выравнивания;
- ONU завершает активацию и приступает к регулярной работе.

Если ONU находятся в режиме регулярной работы, то OLT контролирует фазу и BER приходящих сигналов от передачи в восходящем потоке. Основываясь на контролируемой информации о фазе, OLT может пересчитывать и динамически обновлять значение задержки выравнивания для любого ONU.

12.2 Механизм активации в ONU

12.2.1 Состояния активации, таймеры и счетчики ONU

Определено шесть состояний активации ONU:

- O1 – состояние Initial;
- O2-3 – состояние Serial Number;
- O4 – состояние Ranging (определение дальности);
- O5 – состояние Operation;
- O6 – состояние Intermittent LODS (периодическая потеря синхронизации нисходящего потока);
- O7 – состояние Emergency Stop (аварийный останов).

В поддержку процедуры активации ONU использует два таймера:

- TO1 – таймер Ranging. Таймер TO1 используется для отмены неудачной попытки активации путем ограничения общего времени, в течение которого ONU может оставаться в состоянии Ranging (O4). Рекомендуемое начальное значение TO1 составляет 10 секунд;
- TO2 – таймер LODS (потери синхронизации нисходящего потока). Таймер TO2 используется для того, чтобы зафиксировать неудачную попытку восстановления из состояния перемежающейся LODS путем ограничения времени, в течение которого ONU может оставаться в состоянии Intermittent LODS (O6). Рекомендуемое начальное значение TO2 составляет 100 мс.

12.2.2 Спецификация состояния активации ONU

Семантика состояний активации ONU определяется следующим образом.

a) Состояние Initial (O1)

ONU находится в этом состоянии при включении питания и переходит в него при выключении или включения после аварийного останова. Передатчик выключается. Параметры конфигурации уровня TC, включая ONU-ID, Alloc-ID по умолчанию и явно назначенные, Port-ID XGEM по умолчанию, профили пакетов и задержка выравнивания, а также MSK и производные общие ключи сбрасываются. Инициализируется конечный автомат синхронизации ONU (см. пункт 10.1.2). Как только синхронизация с PHY-кадром нисходящего потока достигнута, ONU переходит в состояние Serial_Number (O2-3).

b) Состояние Serial_Number (O2-3)

ONU включает свой передатчик для работы в пакетном режиме под управлением OLT. ONU анализирует сегмент PLOAM кадров XGTC нисходящего потока и начинает изучение профилей пакетов, указанных в PLOAM-сообщениях Profile. Если ONU получает разрешение на серийный номер с известным профилем пакета, он отвечает кадром XGTC, содержащим заголовок XGTC с PLOAM-сообщением Serial_Number_ONU и концевик XGTC. Отвечая на разрешение серийного номера, ONU игнорирует значения флага DBRu и поля GrantSize структуры распределения. Получив PLOAM-сообщение Assign_ONU-ID со своим собственным серийным номером, ONU устанавливает ONU-ID вместе с Alloc-ID по умолчанию и Port-ID XGEM OMCC и переходит в состояние Ranging (O4). Получив PLOAM-

сообщение `Disable_Serial_Number` для своего собственного серийного номера или для всех ONU, ONU переходит в состояние `Emergency Stop` (O7).

Если ONU, который возвращается в PON, например при восстановлении после потери питания, уже известен OLT, то OLT может передать ONU с известным серийным номером сообщение `Assign_ONU-ID`. В этом случае ONU может перейти в состояние `Ranging` (O4), минуя состояние `Serial_Number` (O2-3) и не отвечая на разрешение серийного номера.

c) **Состояние Ranging (O4)**

В ожидании назначения от OLT задержки выравнивания ONU отвечает на направленные гранты определения дальности. Если ONU получает разрешение на определение дальности с известным профилем пакета, он передает кадр XGTC, содержащий заголовок XGTC с PLOAM-сообщением `Registration` и концевик XGTC. ONU игнорирует значения флага DBRu и поля `GrantSize` структуры распределения разрешений на определение дальности. ONU анализирует сегмент PLOAM кадров XGTC нисходящего потока, реагируя исключительно на PLOAM-сообщения следующих типов: `Profile` (направленное или вещательное), `Ranging_Time` (направленное с абсолютным параметром), `Deactivate_ONU-ID` (направленное или вещательное), `Disable_Serial_Number` (вещательное для собственного серийного номера ONU или для всех ONU). Получив сообщение `Ranging_Time` со значением абсолютной задержки выравнивания, ONU переходит в состояние `Operation` (O5). Если таймер TO1 срабатывает, пока ONU находится в состоянии O4, ONU сбрасывает присвоенное ему значение ONU-ID вместе со значениями `Alloc-ID` по умолчанию и `Port-ID` XGEM OMCI по умолчанию и переходит в состояние `Serial Number` (O2-3), сохраняя полученную информацию профиля пакета.

Если OLT уже измерил полную задержку ONU при получении серийного номера или при включении ONU, то OLT может передать сообщение `Ranging_Time` с ранее рассчитанной задержкой выравнивания. В этом случае ONU может перейти в состояние `Operation` (O5), минуя состояние `Ranging` (O4) и не отвечая на разрешение, касающееся определения дальности.

d) **Состояние Operation (O5)**

ONU передает данные восходящего потока и PLOAM-сообщения как направленные от OLT. В этом состоянии OLT может устанавливать дополнительные соединения с ONU по мере необходимости. Когда в сети определены значения дальности и все ONU работают со своими надлежащими задержками выравнивания, все пакеты в восходящем потоке между всеми ONU будут синхронизированы. Передачи в восходящем потоке поступают раздельно, каждая на своем положенном месте в рамках PHY-кадра восходящего потока.

Пока ONU находится в состоянии O5, OLT может в любой момент времени инициировать процедуру безопасной взаимной аутентификации одним из доступных методов. Безопасная взаимная аутентификация не требует дополнительного состояния активации и происходит исключительно по усмотрению OLT. Если OLT решает выполнить безопасную взаимную аутентификацию, то до завершения первого выполнения процедуры после активации ONU OLT ограничивает передаваемый трафик нисходящего потока и предоставляет распределения в восходящем потоке для нужд процедуры аутентификации.

e) **Состояние Intermittent LODS (O6)**

ONU переходит в это состояние из состояния `Operation` (O5) при потере синхронизации нисходящего потока. При переходе в состояние `Intermittent LODS` (O6) ONU запускает таймер TO2. Если сигнал нисходящего потока возобновляется до срабатывания TO2, ONU возвращается в состояние `Operation` (O5). Если таймер сработал, ONU переходит в исходное состояние `Initial` (O1).

Этот способ обработки состояния `Intermittent LODS` предполагает, что любое событие защитного переключения в сети, относящееся к одному и тому же интерфейсу ONU, либо находится под управлением OLT и, следовательно, OLT может при переключении предпринять соответствующие шаги для корректировки задержек выравнивания участвующих ONU, либо задержки выравнивания для первичной и новой (в результате переключения) трасс статически выравнены в пределах допустимых границ дрейфа путем вставки в более короткую из двух трасс отрезков оптоволокна соответствующей длины.

f) **Состояние Emergency Stop (O7)**

ONU, получивший сообщение Disable_Serial_Number с опцией "disable", переходит в состояние Emergency Stop (O7) и выключает свой лазер. Параметры конфигурации уровня ТС, включая ONU-ID, Alloc-ID по умолчанию и явно назначенный, Port-ID XGEM по умолчанию, профили пакетов и задержка выравнивания, а также MSK и производные общие ключи, фактически сбрасываются.

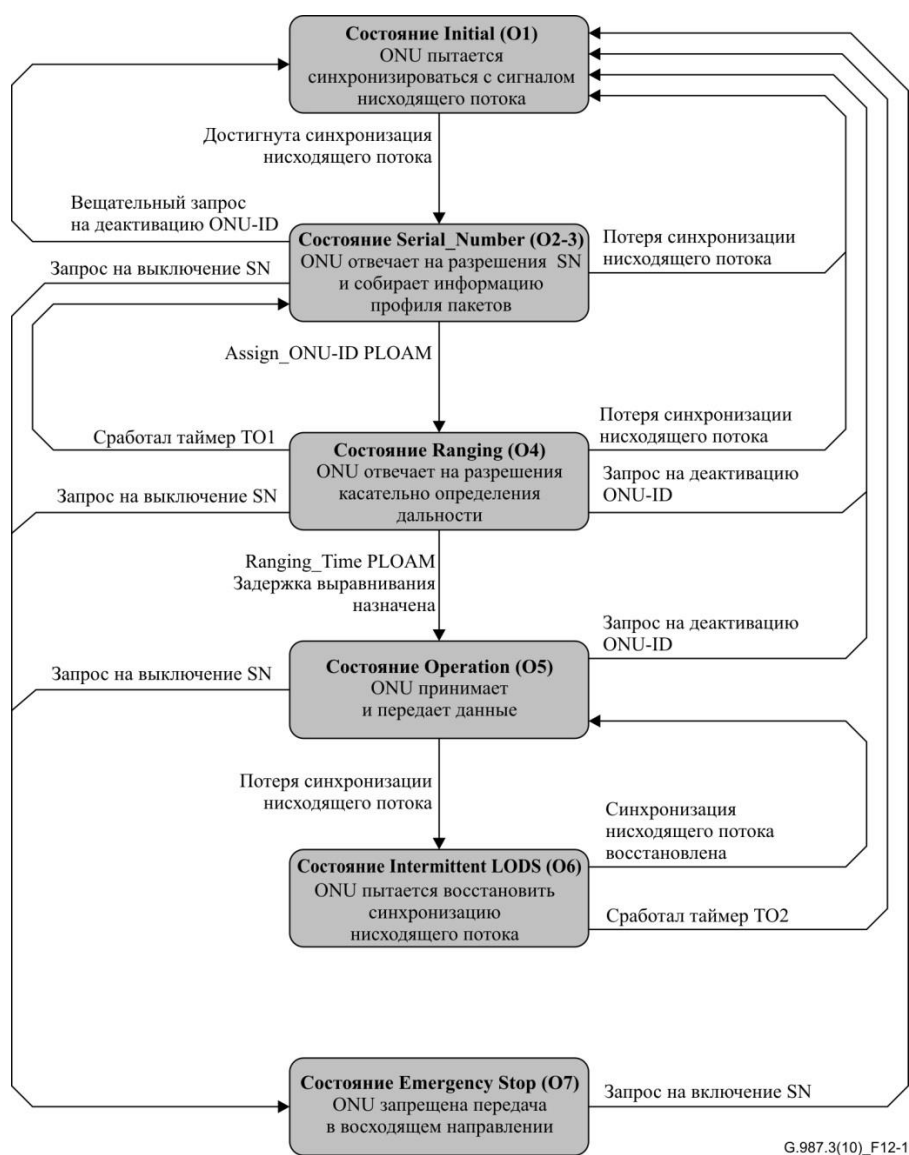
Когда ONU находится в состоянии Emergency Stop, его конечный автомат синхронизации нисходящего потока продолжает работать и анализирует сегмент PLOAM кадров XGTC нисходящего потока, но не должны пересылать данные в нисходящем направлении или отправлять данные в восходящем направлении.

Когда причина отключения ONU устраняется, OLT может снова включить ONU, чтобы вернуть его к регулярной работе. OLT заново включает ONU, находящийся в состоянии Emergency Stop, отправляя PLOAM-сообщение Disable_Serial_Number с опцией "enable". В результате ONU возвращается в состояние Initial (O1).

Состояние Emergency Stop сохраняется после перезагрузки ONU и выключения-включения питания.

12.2.3 Диаграмма состояний ONU

На рисунке 12-1 приведено графическое представление шести состояний ONU вместе с основными входными событиями и соответствующими переходами между состояниями.



G.987.3(10)_F12-1

Рисунок 12-1 – Диаграмма состояний при активации ONU

12.2.4 Таблица переходов состояний ONU

Таблица 12-1 содержит более подробную информацию, чем диаграмма состояний в пункте 12.2.3. Прочерк в ячейках таблицы 12-1 указывает на то, что данное событие неприменимо или не распознается в данном состоянии.

Таблица 12-1. Таблица переходов состояний при активации ONU

Событие	Состояние активации ONU					
	Initial O1	Serial Number O2-3	Ranging O4	Operation O5	Intermittent LODS O6	Emergency Stop O7
Включение питания Если последнее эксплуатационное состояние было O7 ==> O7 иначе ==> O1	–	–	–	–	–	–
Достигнута синхронизация нисходящего потока (LODS устранена)	==> O2-3;	–	–	–	Останов TO2; ==> O5;	–

Таблица 12-1 (продолжение)

Событие	Состояние активации ONU					
	Initial O1	Serial Number O2-3	Ranging O4	Operation O5	Intermittent LODS O6	Emergency Stop O7
Потеря синхронизации нисходящего потока (LODS)	–	==> O1;	Сброс ONU-ID, Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию) и профилей пакетов; Останов TO1; ==> O1;	Пуск TO2; ==> O6;	–	–
Получение вещательного PLOAM-сообщения Profile	–	Сохранение нового профиля;	Сохранение нового профиля;	Сохранение нового профиля;	–	–
Получение одноадресного PLOAM-сообщения Profile	–	–	Сохранение нового профиля;	Сохранение нового профиля; Отправить ACK;	–	–
Получение вещательного разрешения Serial Number	–	Если профиль разрешения известен, отправить PLOAM Serial_Number_ONU;	–	–	–	–
Получение PLOAM присвоения ONU-ID (совпадение SN)	–	Установить ONU-ID, Alloc-ID по умолчанию и Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию); запустить TO1; ==> O4;	Если назначается тот же ONU-ID, игнорировать; иначе, {Сброс ONU-ID, Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию), и профилей пакетов; Останов TO1; ==> O1;}	Если назначается тот же ONU-ID, игнорировать; иначе, {Сброс ONU-ID, явно назначенных Alloc-ID и Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию), профилей пакетов и задержки выравнивания; ==> O1;}	–	–
Получение разрешения на определение дальности	–	–	Отправить PLOAM-сообщение Registration;	–	–	–
Получение направленного PLOAM с временем определения дальности	–	–	Относительное время? Игнорировать; Абсолютное время? {Останов TO1; Установить значение EqD; Отправить ACK; ==> O5; }	Относительное время? Настроить значение EqD; Абсолютное время? Установка значения EqD; Отправить ACK;	–	–

Таблица 12-1 (продолжение)

Событие	Состояние активации ONU					
	Initial O1	Serial Number O2-3	Ranging O4	Operation O5	Intermittent LODS O6	Emergency Stop O7
Получение вещательного PLOAM с временем определения дальности	–	–	–	Относительное время? Настроить значение EqD; Абсолютное время? Игнорировать;	–	–
Сработал TO1	–	–	Сброс ONU-ID, Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию); Останов TO1; ==> O2-3;	–	–	–
Получение направленного PLOAM деактивации ONU-ID	–	–	Сброс ONU-ID, Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию) и профилей пакетов; Останов TO1; ==> O1;	Сброс ONU-ID, явно назначенных Alloc-ID и Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию), профилей пакетов и задержки выравнивания; ==> O1;	–	–
Получение вещательного PLOAM деактивации ONU-ID	–	Сброс профилей пакетов; ==> O1;	Сброс ONU-ID, Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию) и профилей пакетов; Останов TO1; ==> O1;	Сброс ONU-ID, явно назначенных Alloc-ID и Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию), профилей пакетов и задержки выравнивания; ==> O1;	–	–
Получение PLOAM на выключение с опцией выключения конкретного SN (совпадение SN)	–	Сброс профилей пакетов; ==> O7;	Останов TO1; ==> O7;	==> O7;	–	–
Получение PLOAM на выключение – опция "Выключить все"	–	Сброс профилей пакетов; ==> O7;	Останов TO1; ==> O7;	==> O7;	–	–
Получение PLOAM на выключение – опция включения конкретного SN (совпадение SN)	–	–	–	–	–	Сброс ONU-ID, явно назначенных Alloc-ID и Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию), профилей пакетов и задержки выравнивания; ==> O1;

Таблица 12-1 (окончание)

Событие	Состояние активации ONU					
	Initial O1	Serial Number O2-3	Ranging O4	Operation O5	Intermittent LODS O6	Emergency Stop O7
Получение PLOAM на выключение – опция "Включить все"	–	–	–	–	–	Сброс ONU-ID, явно назначенных Alloc-ID и Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию), профилей пакетов и задержки выравнивания; ==> O1;
Сработал TO2	–	–	–	–	Сброс ONU-ID, явно назначенных Alloc-ID и Alloc-ID по умолчанию, Port-ID XGEM OMCI (по умолчанию), профили пакетов и задержки выравнивания; ==> O1;	–
Получение разрешения на пропускную способность с распределением данных	–	–	(Alloc-ID по умолчанию) Игнорировать распределение данных;	(Явно назначенный Alloc-ID или Alloc-ID по умолчанию) Передать пакет;	–	–
Получение направленного разрешения на PLOAM-сообщение	–	–	Отправить PLOAM-сообщение Registration;	Если у ONU имеется PLOAM-сообщение для передачи, отправить PLOAM; иначе отправить ACK;	–	–
Получение PLOAM-сообщения Request Registration	–	–	–	Отправить PLOAM-сообщение Registration;	–	–
Получение PLOAM о присвоении Alloc-ID	–	–	–	Настроить Alloc-ID; Отправить ACK;	–	–
Получение PLOAM об управлении ключами	–	–	–	Согласно состоянию конечного автомата по управлению ключами ONU	–	–
Получение PLOAM о разрешении на спящий режим	–	–	–	Согласно состоянию конечного автомата по управлению питанием ONU	–	–
ПРИМЕЧАНИЕ. – В этой таблице действие "отправить ACK" в ответ на событие приема PLOAM-сообщения нисходящего потока означает создание PLOAM восходящего потока и его помещение в очередь для передачи в восходящем потоке. ONU фактически передает сообщение из своей очереди PLOAM восходящего потока, когда OLT дает разрешение на PLOAMu.						

12.3 Поддержка OLT процесса активации

Для того чтобы ONU могли присоединяться или возобновлять работу в PON, OLT регулярно выдает разрешения на серийный номер. Разрешения на серийный номер адресуются вещательному Alloc-ID, содержат общеизвестный профиль вещательного пакета и имеют установленный флаг PLOAMu. У разрешений на серийный номер должен быть сброшен флаг DBRu, GrantSize равен 0, и они должны сопровождаться соответствующим окном молчания. Частота выдачи разрешений на серийный номер может изменяться в зависимости от условий работы, включая планируемые установки ONU и знание временно неактивных или неисправных ONU.

Как только OLT обнаруживает ONU, который намерен присоединиться или возобновить работу в PON, он выполняет назначение ONU-ID и может выдать этому ONU разрешения на определение дальности для измерения полной задержки. Разрешения на определение дальности адресуются Alloc-ID по умолчанию ONU, находящегося в состоянии Ranging, содержат профиль пакета, ранее переданный ONU, и имеют установленный флаг PLOAMu. У разрешений на определение дальности должен быть сброшен флаг DBRu, GrantSize равен 0, и они должны сопровождаться соответствующим окном молчания. В некоторых случаях, например после потери питания или события защитного переключения, OLT может назначать идентификаторы ONU-ID и выдавать разрешения на определение дальности известным ONU без явного повторного обнаружения их серийных номеров. Принимая решение о размере окна молчания, сопровождающего разрешение на определение дальности, OLT может использовать информацию по определению дальности, полученную из ответа на сообщение серийного номера во время предыдущих активаций ONU или, в случае защищенной оптической распределительной сети (ODN), по альтернативной трассе ODN.

Когда ONU находится в состоянии Operation, OLT может использовать любое разрешение, направленное этому ONU, для выполнения измерения полной задержки и настройки задержки выравнивания в процессе работы.

OLT по своему усмотрению может деактивировать ранее назначенный ONU-ID, заставив ONU сбросить всю информацию о конфигурации уровня TC и повторно начать процесс активации, или отключать определенный серийный номер, переводя этот ONU в состояние Emergency Stop и заблокировав любые передачи в восходящем потоке или передачи состояния этого ONU до получения явного разрешения в будущем.

OLT может использовать перенастройку задержки выравнивания, деактивацию ONU-ID и отключение серийного номера для предотвращения подключения, обнаружения и изоляции злонамеренных ONU. В экстремальной ситуации, когда злонамеренное поведение проявляет ONU, который не смог объявить свой серийный номер, OLT может глобально отключить все ONU в PON и впоследствии заново включить легитимные ONU один за другим.

13 Временные соотношения между OLT и ONU

13.1 Время передачи и задержка выравнивания ONU

Сведения, представленные в этом разделе, основаны на следующих определениях.

- 1) Начало PHY-кадра нисходящего потока – это момент передачи/приема первого бита поля PSync.
- 2) Время начала отсчета PHY-пакета восходящего потока – это момент передачи/приема первого бита слова, идентифицируемого указателем StartTime соответствующей структуры распределения пропускной способности. Это первый бит заголовка пакета XGTC.
- 3) Начало PHY-кадра восходящего потока представляет собой момент передачи/приема (фактического или вычисленного) первого бита слова, которое, если оно присутствует, будет идентифицировано указателем StartTime с нулевым значением.
- 4) Сдвиг окна молчания в OLT – это время между началом PHY-кадра нисходящего потока, в котором передается разрешение на серийный номер или разрешение на определение дальности, и самым ранним возможным началом PHY-пакета восходящего потока, содержащего ответное PLOAM-сообщение.

- 5) Смещение РНУ-кадра восходящего потока в OLT T_{eqd} – это время между началом РНУ-кадра нисходящего потока, несущего определенную карту BWmap, и РНУ-кадра восходящего потока, реализующего эту карту BWmap¹.

ODN может характеризоваться двумя параметрами – минимальным расстоянием по оптоволокну $L_{\min}$ и максимальной разностью расстояний по оптоволокну $D_{\max}$. Эти параметры выражаются в километрах, определяются конструкцией ODN и известны OLT *априори*. Расстояние по оптоволокну L_i для ONU i удовлетворяет следующему уравнению:

$$L_{\min} \leq L_i \leq L_{\min} + D_{\max} . \quad (13-1)$$

13.1.1 Время передачи ONU в восходящем направлении

Время всех событий передачи ONU отсчитывается от начала РНУ-кадра нисходящего потока, несущего в себе BWmap с соответствующей серией распределения пакетов. В частности следует отметить, что время события передачи ONU отсчитывается не с момента приема самой указанной серии распределения пакетов, который может происходить в разное время внутри РНУ-кадра нисходящего потока.

ONU постоянно поддерживает тактовый сигнал РНУ-кадров восходящего потока, который синхронизируется с тактовым сигналом РНУ-кадров нисходящего потока и смещен на точную величину. Величина смещения представляет собой сумму двух значений – времени отклика ONU и необходимую задержку, как показано на рисунке 13-1.

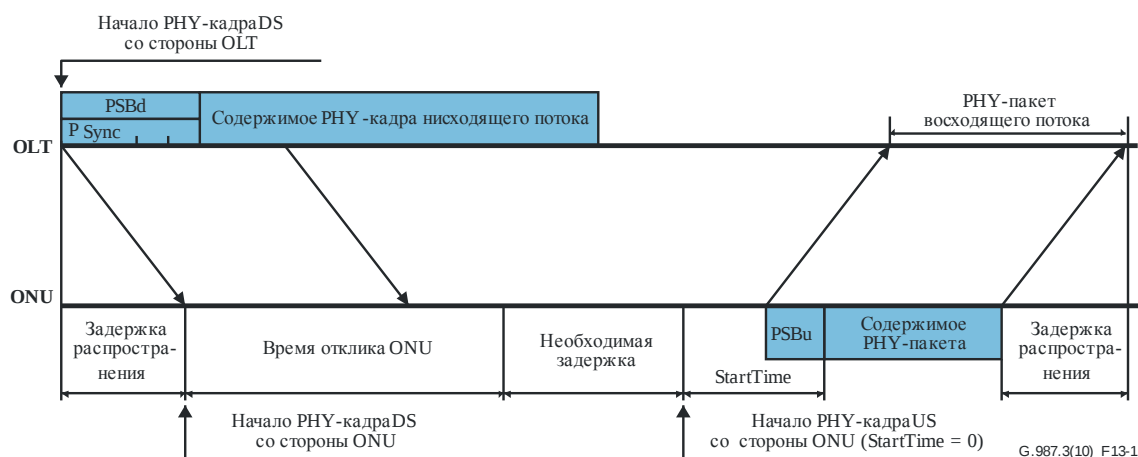


Рисунок 13-1 – Временная диаграмма ONU – общий случай

Диапазон значений времени отклика ONU – это общесистемный параметр, который выбирается так, чтобы предоставить ONU достаточно времени для приема кадра нисходящего потока, включая карту пропускной способности восходящего потока, выполнения по мере необходимости FEC в нисходящем и восходящем потоках и подготовки ответа в восходящем потоке. Время отклика всех ONU должно составлять 35 ± 1 мкс. Кроме того, от ONU требуется знание его времени отклика.

Общий термин "необходимая задержка" относится к суммарной дополнительной задержке сверх его обычного времени отклика, которая может потребоваться ONU для передачи в восходящем потоке. Целью использования необходимой задержки является компенсация изменений задержек распространения и обработки отдельных ONU, а также избежание или уменьшение вероятности коллизий между передачами в восходящем потоке. Ниже показано, как значение необходимой задержки изменяется в зависимости от состояния ONU.

¹ В [b-ITU-T G.984.3] этот параметр называется задержкой выравнивания для нулевого расстояния.

13.1.2 Временные соотношения и окно молчания во время получения серийного номера

Рисунок 13-2 иллюстрирует временные соотношения и окно молчания во время получения серийного номера.

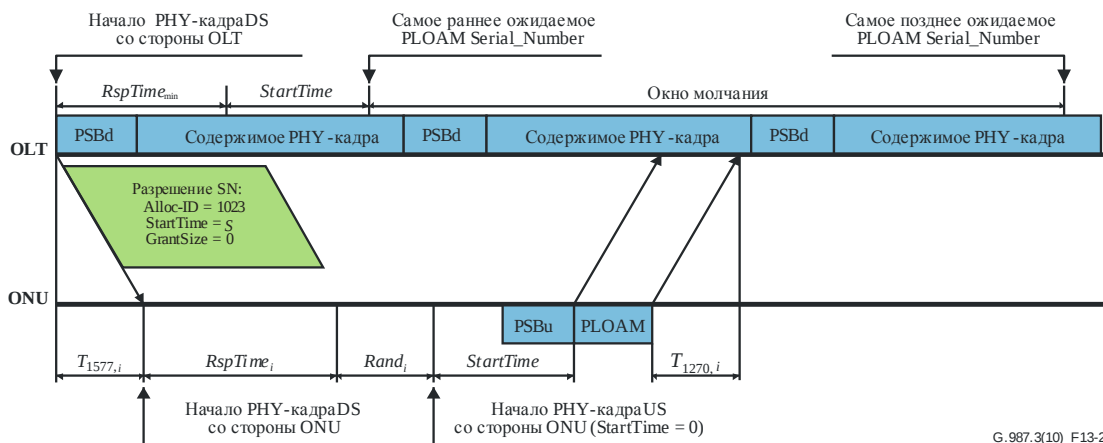


Рисунок 13-2 – Временные соотношения при получении серийного номера

ONU переходит в состояние Serial_Number (O2-3) после достижения синхронизации с PHY-кадрами нисходящего потока в процессе активации. Когда в этом состоянии ONU получает разрешение на серийный номер, он передает ответ на разрешение серийного номера в виде сообщения PLOAM Serial_Number_ONU.

Во избежание коллизий между ответом на разрешение серийного номера от ONU, находящегося в состоянии Serial_Number, и регулярными пакетами восходящего потока от ONU, находящихся в состоянии Operation, OLT открывает окно молчания для временного подавления передачи в восходящем потоке от работающих ONU.

Поскольку разрешение на серийный номер представляет собой вещательное распределение пропускной способности, адресованное всем ONU, находящимся в состоянии Serial_Number, на него могут ответить несколько ONU, и когда OLT одновременно получает несколько ответов на разрешение серийного номера, может возникнуть коллизия. Чтобы уменьшить вероятность коллизии, вырабатывается случайная локально создаваемая необходимая задержка в состоянии Serial_Number. Случайная задержка имеет диапазон 0–48 мкс и выражается в единицах времени передачи бита при номинальной линейной скорости в восходящем канале 2,48832 Гбит/с. Для каждого ответа на разрешение серийного номера ONU генерирует новую случайную задержку.

Смещение окна молчания при получении серийного номера определяется минимальными задержками в системе, включая минимальную полную задержку распространения и минимальное время обработки ONU, а также динамически генерируемое значение StartTime для разрешение на серийный номер:

$$W_0^{SN} = RspTime_{min} + \frac{L_{min}(n_{1577} + n_{1270})}{c} + \frac{StartTime}{R_{nom}}. \quad (13-2)$$

Здесь c – скорость света в км/мкс, а R_{nom} – номинальная линейная скорость передачи в восходящем потоке в словах/мкс.

Размер окна молчания при получении серийного номера определяется максимальным изменением неизвестных компонентов полной задержки и продолжительностью ответного пакета на разрешение серийного номера. К неизвестным компонентам полной задержки относятся полная задержка распространения, время отклика ONU и случайная задержка ONU. Пакет ответа на разрешение серийного номера включает в себя преамбулу, разделитель, заголовок XGTC с PLOAM-сообщением Serial_Number_ONU и концевик XGTC:

$$W_{\Delta}^{SN} = RspTime_{var} + \frac{D_{max}(n_{1577} + n_{1270})}{c} + Rand_{max} + \frac{BurstSize}{R_{nom}}. \quad (13-3)$$

Длительность ответного пакета на разрешение серийного номера (как правило, менее 0,3 мкс) незначительна по сравнению с другими компонентами.

Для ODN с разностью расстояний по оптоволокну 20 км эти значения составляют:

- 200 мкс – для изменения полной задержки распространения;
- 2 мкс – для изменения времени отклика ONU;
- 48 мкс – для максимальной случайной задержки ONU.

Предполагаемая продолжительность окна молчания при получении серийного номера составляет 250 мкс.

Для ODN с разностью расстояний по оптоволокну 40 км эти значения составляют:

- 400 мкс – для изменения полной задержки распространения;
- 2 мкс – для изменения времени отклика ONU;
- 48 мкс – для максимальной случайной задержки ONU.

Предполагаемая продолжительность окна молчания при получении серийного номера составляет 450 мкс.

13.1.3 Временные соотношения и окно молчания в период определения дальности

Рисунок 13-3 иллюстрирует временные соотношения и окно молчания в период определения дальности.

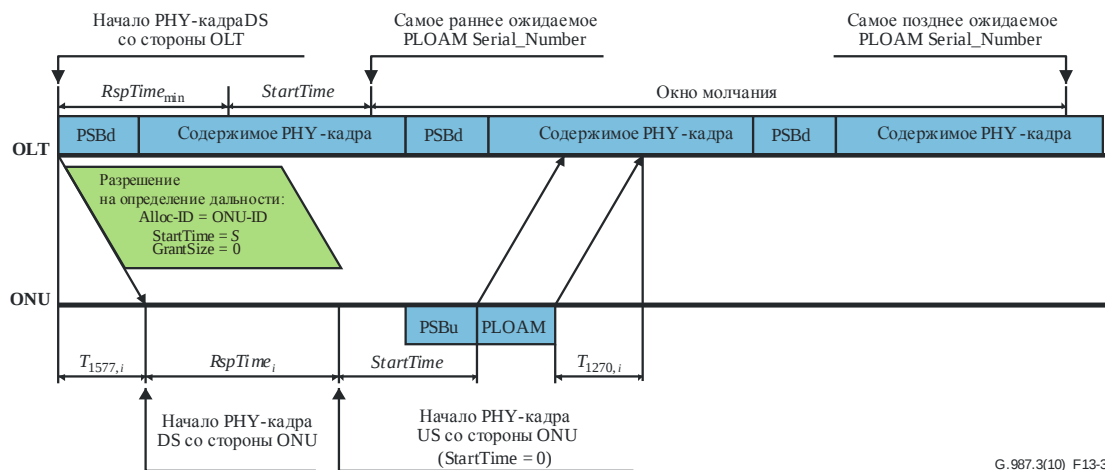


Рисунок 13-3 – Временные соотношения в период определения дальности

ONU после назначения ONU-ID переходит в состояние Ranging (O4). В состоянии Ranging ONU интерпретирует любое направленное распределение пропускной способности с установленным флагом PLOAMu по причине разрешения на определение дальности и отвечает на него PLOAM-сообщением Registration.

Во избежание коллизий между ответом на грант определения дальности и регулярными пакетами восходящего потока от ONU, находящихся в состоянии Operation, OLT открывает окно молчания для временного подавления передачи в восходящем потоке от работающих ONU. Во время определения дальности необходимая задержка равна нулю.

Смещение окна молчания во время определения дальности вычисляется с учетом минимальной полной задержки распространения и минимального времени обработки ONU, а также динамически генерируемого значения $StartTime$ в разрешении на определение дальности:

$$W_0^{RNG} = \text{RspTime}_{\min} + \frac{L_{\min}(n_{1577} + n_{1270})}{c} + \frac{\text{StartTime}}{R_{\text{nom}}}. \quad (13-4)$$

Размер окна молчания во время измерения определяется максимальным изменением неизвестных компонентов полной задержки и длительностью регистрационного пакета. Если OLT еще не произвел измерение или оценку полной задержки при получении серийного номера, то неизвестные компоненты полной задержки включают в себя полную задержку распространения и время отклика ONU. Пакет ответа на разрешение определения дальности содержит преамбулу, разделитель, заголовок XGTC с PLOAM-сообщением Registration и концевик XGTC:

$$W_{\Delta}^{RNG} = \text{RspTime}_{\text{var}} + \frac{D_{\max}(n_{1577} + n_{1270})}{c} + \frac{\text{BurstSize}}{R_{\text{nom}}}. \quad (13-5)$$

Длительность ответного пакета на разрешение определения дальности (как правило, менее 0,3 мкс) незначительна по сравнению с другими компонентами.

Для ODN с разностью расстояний по оптоволокну 20 км эти значения составляют:

- 200 мкс – для изменения полной задержки распространения;
- 2 мкс – для вариации времени отклика ONU.

Максимальная предлагаемая длительность окна молчания во время определения дальности составляет 202 мкс.

Для ODN с разностью расстояний по оптоволокну 40 км эти значения составляют:

- 400 мкс – для изменения полной задержки распространения;
- 2 мкс – для изменения времени отклика ONU.

Максимальная предлагаемая длительность окна молчания во время определения дальности составляет 402 мкс.

На практике максимальные предлагаемые значения, полученные выше, могут быть уменьшены, если OLT использует информацию по определению дальности, полученную из ответа на разрешение серийного номера, во время предыдущих активаций ONU или, в случае защищенного ODN, по альтернативной трассе ODN.

13.1.4 Вычисление задержки выравнивания

OLT выбирает смещение PHY-кадра восходящего потока T_{eqd} на основе проектных параметров ODN:

$$T_{\text{eqd}} \geq \text{RspTime}_{\max} + (L_{\min} + D_{\max}) \frac{(n_{1577} + n_{1270})}{c}. \quad (13-6)$$

Выбранное значение T_{eqd} остается постоянным на протяжении всего срока эксплуатации PON.

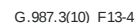
Когда OLT выдает разрешение на определение дальности ONU, находящемуся в состоянии Ranging (O4), OLT точно измеряет время Δ_i^{RNG} , прошедшее между PHY-кадром нисходящего потока, содержащим разрешение на определение дальности, и PHY-пакетом восходящего потока, содержащим ответное PLOAM-сообщение Registration (см. рисунок 13-4). С учетом выбранного смещения PHY-кадра восходящего потока задержка выравнивания ONU определяется следующим образом:

$$\text{EqD}_i = T_{\text{eqd}} - \text{RTD}_i = T_{\text{eqd}} - \left(\Delta_i^{RNG} - \frac{\text{StartTime}}{R_{\text{nom}}} \right). \quad (13-7)$$

В качестве альтернативы OLT может измерить задержку выравнивания напрямую, определив интервал между фактическим и желаемым временем прибытия пакета, содержащего PLOAM-сообщение Registration.

Величина задержки выравнивания, вычисленная OLT и переданная в ONU, имеет точность до времени передачи одного бита при номинальной линейной скорости восходящего потока

Как только ONU получил свое значение задержки выравнивания, он считается синхронизированным с началом РНУ-кадра восходящего потока. Данные восходящего потока передаются в пределах интервала, указанного структурой распределения, относительно начала РНУ-кадра восходящего потока.



13.1.5 Временные соотношения в период регулярной работы

G.987.3(10) F13-5

Рек. МСЭ-Т G.987.3 (01/2014)

13.1.6 Регулировка задержки выравнивания в процессе работы

OLT ожидает, что передача ONU в восходящем потоке будет получена в фиксированное время в течение PHY-кадра восходящего потока. Фаза момента получения передачи ONU может дрейфовать из-за старения оборудования, изменений температуры и других факторов. В этих случаях задержка выравнивания может пересчитываться и регулироваться с учетом дрейфа передачи в восходящем потоке. Регулировка задержки выравнивания в процессе работы позволяет выполнять небольшие корректировки без необходимости повторного определения дальности ONU.

Изменение задержки выравнивания равно времени дрейфа с противоположным знаком. Если PHY-пакет прибывает раньше, OLT увеличивает задержку выравнивания на время дрейфа. Если PHY-пакет прибывает позже, OLT уменьшает задержку выравнивания на время дрейфа. Настройки задержки выравнивания передаются в ONU в состоянии Operation с использованием PLOAM-сообщения Ranging_Time. Для этой цели может оказаться удобным использование параметра относительной задержки.

Во избежание чрезмерно частых настроек задержки выравнивания и чтобы обеспечить соблюдение ONU соответствующих требований, OLT поддерживает два порога дрейфа, применимых ко всем ONU. Нижний порог устанавливает безопасные границы, в пределах которых дрейф передачи считается приемлемым и не требует никаких мер по смягчению последствий. Когда дрейф превышает нижний порог, OLT вычисляет новое значение задержки выравнивания и передает его в ONU с помощью PLOAM-сообщения Ranging_Time. OLT также распознает событие дрейфа окна (DOWi). Верхний порог устанавливает критические границы, за которыми дрейф передачи может влиять на другие ONU в пределах PON. Если этот дрейф превышает верхний порог (событие, которое не должно произойти, пока ONU соблюдает допустимые настройки задержки выравнивания), OLT объявляет предупреждение о помехах передачи (TIWi) и принимает дальнейшие меры по ослаблению мешающего воздействия, которые могут включать в себя деактивацию или выключение нарушающего ONU-ID или же выполнение процедуры диагностики ONU-нарушителя.

Предлагаемые пороговые значения DOWi и TIWi для номинальной линейной скорости передачи восходящего потока 2,48832 Гбит/с составляют ± 8 битов и ± 16 битов соответственно.

13.1.7 Соображения, касающиеся реализации окна молчания

Когда ONU находятся в состоянии Serial Number и Ranging, они передают PLOAM-сообщения Serial_Number_ONU и Registration. Поскольку OLT еще не знает задержку выравнивания для этих ONU, он открывает окно молчания в целях предотвращения коллизий между ответами на получение серийного номера или измерения и регулярными передачами действующих ONU в восходящем потоке.

Рассмотрим пример, показанный на рисунке 13-6. Здесь $L_{\min} = 0$; $D_{\max} = 20$ км; $T_{\text{eqd}} = 236$ мкс. В этом примере основное внимание уделяется получению серийного номера и предполагается, что задержка распространения ограничивается значением 100 мкс, тогда как время отклика ONU для разных ONU может колебаться, без ведома OLT, в диапазоне 35 ± 1 мкс. Следовательно, если OLT передает PHY-кадр нисходящего потока с конкретной BWmap в момент времени t_0 , совпадающий с началом PHY-кадра N нисходящего потока, то он может запланировать PHY-кадр восходящего потока, реализующий эту BWmap, не ранее чем через 236 мкс. Задача OLT – создать окно молчания длительностью 250 мкс, начиная с момента времени $t_0 = t_0 + 236$ мкс.

BWmap, передаваемая в PHY-кадре N нисходящего потока, пуста, в то время как единственная структура распределения BWmap, передаваемая с PHY-кадром $N + 1$ нисходящего потока, – это разрешение на серийный номер со смещением StartTime в 77 мкс, что соответствует значению слова 5989 восходящего потока. Начало возможного окна передачи ответа на получение серийного номера смещается не менее чем на 111 мкс относительно начала кадра, содержащего разрешение на серийный номер, и не менее чем на 236 мкс относительно кадра N .

Следует отметить, что PHY-кадр $N - 1$ должен обеспечить необходимый запас пакетного режима в конце BWmap.

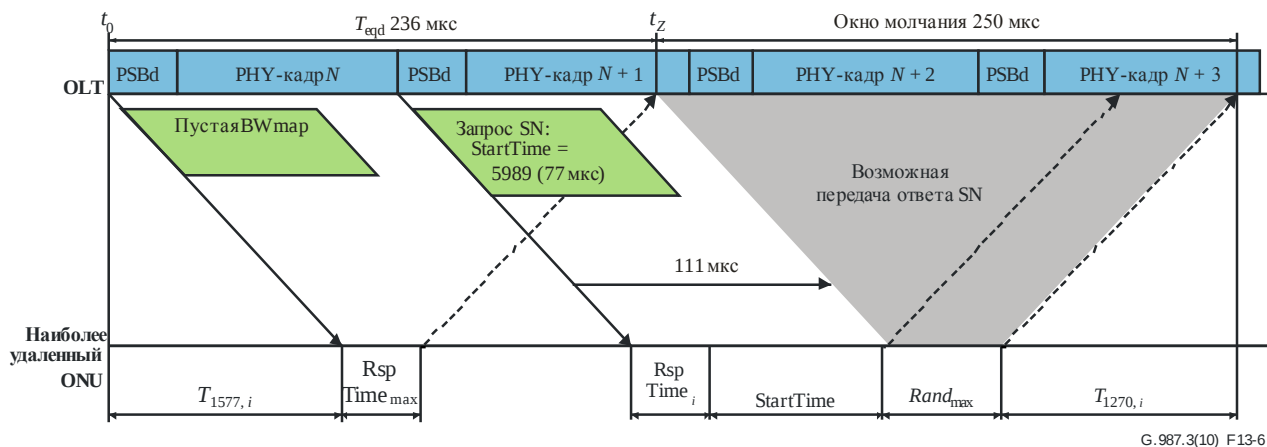


Рисунок 13-6 – Создание окна молчания

Поскольку каждое такое окно молчания затрагивает по крайней мере два, а возможно и три последовательные карты пропускной способности, OLT должен обеспечивать, чтобы влияние окон молчания на пропускную способность и на чувствительные к дрожанию потоки трафика было минимальным. Это может быть достигнуто, например, путем реконфигурации карт BWmap и предоставления дополнительных распределений для затронутых Alloc-ID непосредственно до или после окна молчания.

Если OLT доступна некоторая информация о местах расположения ONU, он сможет создать меньшее окно молчания, более точное и создающее меньше помех, смещение которого относительно начала PHY-кадра нисходящего потока зависит от расстояния по оптоволокну до ближайшего ONU, а размер – от максимальной разности расстояний по оптоволокну.

13.1.8 Измерение расстояния по оптоволокну

OLT может оценить расстояние по оптоволокну исходя из измерения полной задержки с использованием параметра $RspTime_i$, фактического времени отклика ONU i , которое можно получить посредством OMCC. Оценку расстояния по оптоволокну между OLT и данным ONU i (в метрах) можно вычислить по следующей формуле:

$$FD_i = \left(RTT_i - RspTime_i - EqD_i - \frac{StartTime}{R_{nom}} \right) \times 102. \quad (13-8)$$

Здесь RTT_i – это полное время задержки, то есть фактическое смещение начала PHY-пакета восходящего потока относительно начала PHY-кадра нисходящего потока, определяющее этот пакет, в микросекундах, измеренный OLT; $RspTime_i$ – истинное время отклика ONU i в микросекундах по сообщению ONU i ; EqD_i – задержка выравнивания ONU; $StartTime$ – динамически генерируемое значение $StartTime$ пакета при проведении измерения; R_{nom} – номинальная линейная скорость в восходящем направлении в словах/мкс, а числовой коэффициент 102 м/мкс – наиболее подходящее значение, отражающее диапазон показателей преломления, которые оптоволокну [ITU-T G.652] проявляет в условиях эксплуатации. Этот метод позволяет производить оценку с точностью приблизительно $\pm 1\%$.

13.2 Распределение времени суток по сети XG-PON

В этом разделе описывается метод уровня ТС, который используется для получения точного времени суток (ToD) в каждом ONU XG-PON, временных соотношений между OLT и ONU и анализа погрешностей определения времени. Требуемая точность тактового генератора при определении ToD в ONU равна ± 1 мкс. Достижение лучшей точности тактового генератора при определении ToD в ONU – это тема для дальнейшего изучения.

Принцип работы заключается в следующем. Предполагается, что OLT имеет высокоточный тактовый генератор для определения реального времени, причем точность показаний достигается с помощью средств, выходящих за рамки рассмотрения настоящей Рекомендации. OLT информирует ONU о

времени суток, когда определенный кадр XGTC нисходящего потока приходит в гипотетический ONU с нулевой задержкой выравнивания и нулевым временем отклика ONU. Определенный кадр нисходящего потока идентифицируется значением N его счетчика суперкадра, который представляет собой существующую характеристику протокола. Передача информации осуществляется с использованием канала OMCI и не обязательно происходит в режиме реального времени. Зная время прибытия ToD для кадра N , ONU может использовать свою задержку выравнивания и время отклика для вычисления с очень высокой точностью ToD, связанного с поступлением произвольного кадра нисходящего потока.

13.2.1 Условные обозначения

$Tstamp_N$ – этот термин относится к точному ToD прибытия первого бита XGTC-кадра N нисходящего потока в гипотетический ONU с нулевой EqD и нулевым временем отклика. Прибытие сигнала в ONU определяется как момент времени, когда оптический сигнал пересекает оптический соединитель или место срачивания, которое служит границей между ODN и ONU.

$Tsend_N$ – точное значение ToD, когда первый бит кадра N нисходящего потока покидает OLT. Момент отправки сигнала определяется как момент времени, когда оптический сигнал пересекает оптический соединитель или место срачивания, которое служит границей между OLT и ODN.

$Trecv_{N,i}$ – точное значение ToD, когда первый бит кадра N нисходящего потока прибывает в ONU i . Прибытие сигнала в ONU определяется как момент, когда оптический сигнал пересекает оптический соединитель или место срачивания, которое служит границей между ODN и ONU.

$RspTime_i$ – значение времени отклика для ONU i , которое находится в диапазоне от 34 до 36 мкс.

T_{eqd} – смещение PHY-кадра восходящего потока относительно PHY-кадра нисходящего потока в месте расположения OLT. OLT регулирует задержку выравнивания для каждого ONU таким образом, чтобы для всех ONU начало кадра восходящего потока в OLT происходило через T_{eqd} секунд после начала кадра нисходящего потока.

n_{1270} – показатель преломления при групповой скорости для светового луча с длиной волны 1270 нм в ODN.

n_{1577} – показатель преломления при групповой скорости для светового луча с длиной волны 1577 нм в ODN.

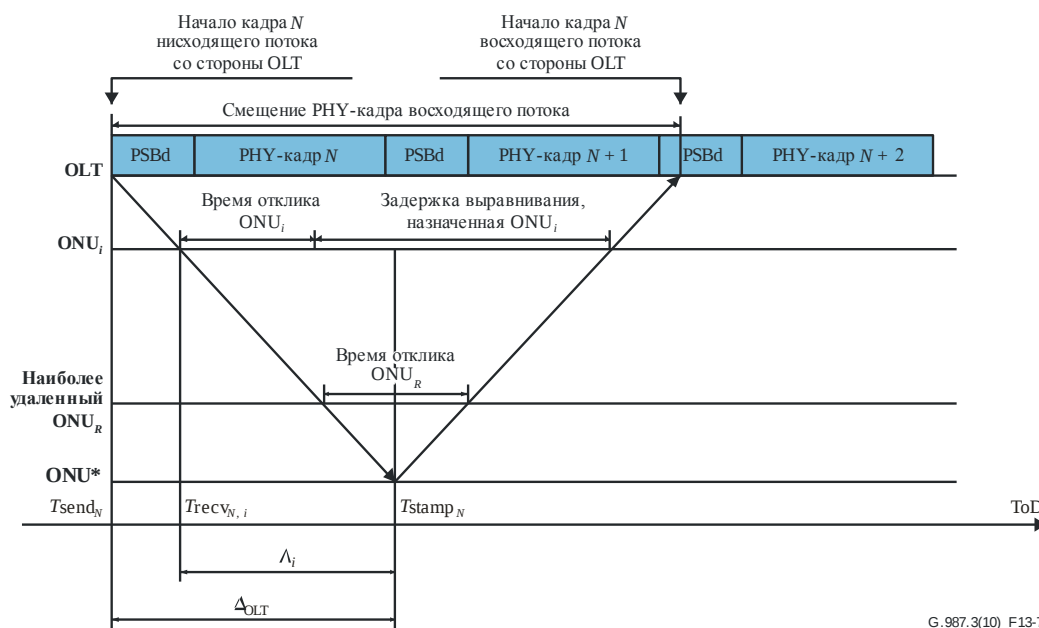


Рисунок 13-7 – Расчеты времени суток

13.2.2 Процесс синхронизации тактового генератора ONU

Следующий процесс синхронизирует ведомый тактовый генератор ONU с ведущим тактовым генератором OLT.

- 1) OLT выбирает XGTC-кадр нисходящего потока, который будет использоваться в качестве эталонного при определении времени. Этот кадр идентифицируется счетчиком суперкадра как N , и с ним связано значение $Tsend_N$. Рекомендуется, чтобы выбранный кадр находился в пределах десятисекундного окна текущего времени.
- 2) OLT вычисляет значение $Tstamp_N$, основанное на значении $Tsend_N$ кадра N . Этот расчет производится по формуле

$$Tstamp_N = Tsend_N + \Delta_{OLT},$$

где:

$$\Delta_{OLT} = Teqd \frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}}.$$

Следует отметить, что все значения $Tsend_N$ и $Tstamp_N$ относятся к оптическому интерфейсу, что обеспечивает их инвариантность к реализации. OLT отвечает за компенсацию всех своих внутренних задержек.

- 3) Эта пара значений ($N, Tstamp_N$) хранится локально на стороне OLT.
- 4) OLT отправляет эту пару значений ($N, Tstamp_N$) одному или нескольким ONU через OMCI.
- 5) ONU i вычисляет значение $Trecv_{N,i}$ на основе $Tstamp_N$ и своих собственных временных параметров. Этот расчет выполняется по формуле

$$Trecv_{N,i} = Tstamp_N - \Delta_i,$$

где:

$$\Delta_i = (EqD_i + RspTime_i) \frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}}.$$

Необходимо использовать точное значение времени отклика для ONU i . Следует отметить, что все значения $Tsend_N$ и $Tstamp_N$ относятся к оптическому интерфейсу ONU, что обеспечивает их инвариантность к реализации. ONU отвечает за компенсацию всех своих внутренних задержек.

- 6) Когда ONU i принимает произвольный кадр K нисходящего потока, он может установить на своем тактовом генераторе определения ToD значение $Trecv_{K,i} = Trecv_{N,i} + (K - N) \times 125,0$ мкс. Необходимо следить за переполнением счетчика суперкадра. Ожидается, что ONU завершит синхронизацию тактового генератора в течение 10 с после передачи пары значений ($N, Tstamp_N$) по OMCI.
- 7) Если в процессе установки тактового генератора определения ToD производится настройка задержки выравнивания ONU, то ONU производит соразмерную коррекцию прогнозируемого значения $Trecv_{N,i}$. Таким образом тактовый генератор определения ToD отслеживает любые изменения задержки распространения в системе PON.

Предполагается (и это справедливо для общей системы XG-PON), что OLT поддерживает один и только один домен тактового генератора определения ToD. В этом случае системный тактовый генератор XG-PON может быть синхронизирован с тактовым генератором определения ToD, что позволяет уменьшить периодичность процедуры распределения ToD. Случай с несколькими доменами тактового генератора определения ToD на один OLT не рассматривается.

13.2.3 Анализ рабочих характеристик

В этом разделе не предъявляются никакие новые требования к системе. Содержащийся здесь анализ основан на требованиях, сформулированных в других разделах настоящей Рекомендации.

13.2.3.1 Точность задержки выравнивания

Точность задержки выравнивания определяется пороговым значением DOW (см. пункт 13.1.6), который в сети XG-PON 2,48832 Гбит/с рекомендуется установить на уровне ± 8 битов, или приблизительно ± 3 нс. Это намного меньше, чем общее требование точности определения времени в системе на уровне 1 мкс, поэтому данным показателем, вероятно, можно пренебречь.

13.2.3.2 Задержка распространения в оптоволокне

Для типичных образцов оптоволокна SMF-28 $n_{1270} = 1,4677$, $n_{1577} = 1,4686$. Оценка поправочного коэффициента показателя преломления такова:

$$\frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}} = 0,500153.$$

Следует отметить, что использование приближенной величины 0,5 для этой константы приведет к систематической погрешности в 170 ppm, что для PON 200 мкс соответствует погрешности в 34 нс. Следует также отметить, что разные виды оптоволокна могут иметь разные абсолютные показатели преломления; однако относительная дисперсия между 1270 нм и 1577 нм очень хорошо контролируется. Подробнее об анализе погрешности см. в Дополнении II.

13.2.3.3 Внутренние корректировки при определении времени

Как OLT, так и ONU отвечают за компенсацию своих внутренних задержек между тем местом, где производятся логические вычисления и/или действуют триггеры событий, и оптическими интерфейсами, которые используются в качестве опорных точек для целей стандартизации. В системе PON требования TDMA подразумевают, что эти внутренние задержки стабильны по крайней мере на протяжении каждого цикла измерения с указанной выше точностью (± 8 битов). Стабильность и предсказуемость оборудования PON в течение более длительных периодов времени не указываются. Однако можно ожидать, что изменчивость от цикла к циклу будет оставаться в пределах ± 16 битов при скорости 2,5 Гбит/с, что соответствует двум неконтролируемым задержкам сериализатора-десериализатора в нисходящей линии связи. Даже в этом случае возникающая неопределенность $\pm 6,4$ нс при измерении времени очень мала.

14 Контроль за рабочими характеристиками, наблюдение и дефекты

Этот раздел посвящен механизмам обнаружения отказов в линии и контроля за состоянием и рабочими характеристиками линий. Он не охватывает функции, которые могут использовать информацию по контролю за рабочими характеристиками, такую как управление станцией, распределение пропускной способности или предоставление ресурсов.

14.1 Контроль за рабочими характеристиками

Для облегчения поиска неисправностей желательно, чтобы OLT и ONU вели разные счетчики контроля за рабочими характеристиками (PM). Собранные значения счетчика могут инициировать те или иные действия – от предупреждений о превышении пороговых значений до сигналов на защитное переключение, что в основном выходит за рамки настоящей Рекомендации.

В этом разделе определяются обязательные и дополнительные параметры PM, а для тех параметров PM, которые собираются в OLT, указывается, должны ли они собираться для каждого ONU отдельно или по совокупности для всех ONU.

Контроль оптических характеристик, таких как передаваемая и принимаемая оптическая мощность, рассматривается в [ITU-T G.988].

Счетчики, собранные в ONU, доступны для OLT через OMCI.

В таблице 14-1 указываются параметры контроля рабочих характеристик PHY, XGEM, PLOAM и OMCI.

Таблица 14-1 – Параметры контроля рабочих характеристик

Параметр	Обязательный или дополнительный	Описание	Собираемые каждым ONU	Собираемые OLT для каждого ONU i	Собираемые OLT
PM PHY					

Исправленные байты FEC	О	Количество байтов, исправленных функцией FEC	Да, для всех потоков трафика	Да, если включена FEC восходящего потока для ONU <i>i</i>	Н/д
Исправленные кодовые слова FEC	О	Количество кодовых слов FEC, содержащих ошибки, но исправленных функцией FEC	Да, для всех потоков трафика	Да, если включена FEC восходящего потока для ONU <i>i</i>	Н/д
Неисправленные кодовые слова FEC	О	Количество кодовых слов FEC, содержащих ошибки, которые невозможно исправить посредством функции FEC	Да, для всех потоков трафика	Да, если включена FEC восходящего потока для ONU <i>i</i>	Да
Общее количество кодовых слов FEC	О	Общее количество принятых кодовых слов FEC	Да, для всех потоков трафика	Да, если включена FEC восходящего потока для ONU <i>i</i>	Да
Общее количество принятых слов, защищенных ВРР-32	О	Количество принятых 4-байтовых слов, включенных в проверку ВРР-32	Н/д	Да	Да
Ошибки ВРР-32	О	Количество ошибочных битов согласно ВРР-32 (Примечание 1)	Н/д	Да	Да
Счетчик ошибок НЕС PSBd	Д	Ошибка НЕС в любом из полей PSBd	Да, для всех потоков трафика	Н/д	Н/д
Счетчик ошибок НЕС XGTC	Д	Принятые ошибки НЕС заголовка XGTC	Да, для всех потоков трафика	Да	Н/д
Неизвестный профиль	Д	ONU не может вести передачу, поскольку указанный профиль пакета неизвестен	Да	Н/д	Н/д
PM XGEM					
Переданные кадры XGEM	О	Общее количество переданных кадров XGEM	Да	Нет	Да
Переданные кадры XGEM на порт XGEM	Д	Количество переданных кадров XGEM	Да, на каждый порт XGEM	Нет	Да, на каждый порт XGEM

Таблица 14-1 (продолжение)

Параметр	Обязательный или дополнительный	Описание	Собираемые каждым ONU	Собираемые OLT для каждого ONU <i>i</i>	Собираемые OLT
Принятые кадры XGEM	О	Общее количество принятых кадров XGEM	Нет	Нет	Да
Принятые кадры XGEM на порт XGEM	Д	Количество принятых кадров XGEM	Да, на каждый порт XGEM, принадлежащий ONU	Нет	Да, на каждый порт XGEM
Количество переданных кадров XGEM с неустановленным битом LF	Д	Количество операций фрагментации передачи	Да	Нет	Да
Ошибки НЕС заголовка кадра XGEM	О	Количество событий, связанных с потерей описания границ канала XGEM	Да	Да	Нет
Количество слов кадра XGTC, потерянных из-за ошибки НЕС кадра GEM	Д	Совокупная степень серьезности событий, связанных с потерей описания границ канала XGEM. Следует отметить, что количество потерянных кадров XGEM недоступно	Да	Да	Н/д
Ошибки ключа XGEM	О	Кадры XGEM, отбрасываемые из-за неизвестного или недействительного ключа шифрования. Примеры: для данного индекса ключа не установлен ни один одноадресный или вещательный ключ, индекс ключа указывает на зашифрованный кадр XGEM в порте XGEM, не предназначенном для шифрования, индекс ключа указывает на шифрование восходящего потока в порте XGEM, предназначенном только для шифрования нисходящего потока, или недействительный индекс ключа (11). Это количество ошибок включается в счет кадров XGEM Rx	Да	Да	Н/д

Таблица 14-1 (продолжение)

Параметр	Обязательный или дополнительный	Описание	Собираемые каждым ONU	Собираемые OLT для каждого ONU <i>i</i>	Собираемые OLT
PM PLOAM					
Количество разрешений SN	Д	Обнаружение разрешений на серийный номер для ONU	Н/д	Н/д	Да
Ошибки MIC PLOAM	Д		Да	Да	Н/д
Периоды времени ожидания PLOAM	Д	Количество повторных передач: отсутствующий, запоздавший или ошибочный ответ. Нет ответа на запрос ключа или Request_Registration, отсутствие подтверждения и т. д.	Н/д	Н/д	Да
Количество DG	Д	Количество пакетов, принятых при сообщении "dying gasp"	Н/д	Да	Н/д
Количество сообщений PLOAM в нисходящем потоке	Д	Количество сообщений PLOAM, отправленных OLT и принятых ONU, вещательных или направленных определенному ONU-ID	Да	Да	Да (вещательное)
Профиль	Д		Да	Н/д	Да
Assign ONU-ID	Д		Да	Н/д	Да
Ranging_Time	О	Следует отметить, что этот подсчет обязателен, так как он обеспечивает оценку частоты событий нарушения порога DOW	Да	Да	Да
Deactivate_ONU-ID	Д		Да	Н/д	Да
Disable_Serial_Number	Д		Да	Н/д	Да
Request_Registration	Д		Да	Да	Н/д
Assign_Alloc-ID	Д		Да	Да	Н/д
Key_Control	Д		Да	Да	Да
Sleep_Allow	Д		Да	Да	Да
Количество сообщений PLOAM в восходящем потоке	Д	Количество сообщений (кроме сообщений подтверждения), отправленных ONU и принятых OLT	Да	Да	
Serial_Number_ONU	Д		Да	Да (Примечание 2)	Да
Registration	Д		Да	Да	Н/д

Таблица 14-1 (окончание)

Параметр	Обязательный или дополнительный	Описание	Собираемые каждым ONU	Собираемые OLT для каждого ONU <i>i</i>	Собираемые OLT
Key_Report	Д		Да	Да	Н/д
Подтверждение	Д		Да	Да	Н/д
Sleep_Request	Д		Да	Да	Н/д
PM OMCI					
Количество базовых сообщений OMCI	Д		Да, сообщения, направленные данному ONU	Да	Н/д
Количество расширенных сообщений OMCI	Д		Да, сообщения, направленные данному ONU	Да	Н/д
Автономные сообщения	Д		Нет	Да	Нет
Ошибки MIC OMCI	Д		Да	Да	Н/д
Энергосбережение					
Время нахождения в каждом из состояний OLT/ONU с малым энергопотреблением соответственно	Д	Время нахождения в каждом из состояний OLT/ONU с малым энергопотреблением соответственно	Да	Да	Н/д
ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Признано, что ВР-32 как индикатор количества ошибочных битов становится неточным, когда интенсивность ошибок значительно ниже наихудшего случая спецификации PON для восходящего потока. Тем не менее ожидается, что FEC восходящего потока в OLT будет включена для компенсации высокого наблюдаемого показателя BER. В этом случае для получения точной оценки BER следует использовать результаты коррекции FEC. ПРИМЕЧАНИЕ 2. – OLT назначает ONU-ID и обновляет подсчет для каждого ONU только после распознавания серийного номера ONU.					

14.2 Дефекты

В этом разделе указаны необходимые действия, выполняемые на уровне ТС, в отличие от тех, которые остаются на усмотрение разработчика. В частности, последствия повторяющихся дефектов одного и того же типа – это вопрос реализации.

14.2.1 События, обнаруживаемые на уровне OLT

Тип		Описание			
		Условия обнаружения	Действия	Условия устранения	Действия
LOBi	Потеря пакета для ONU i	Невозможность по какой-либо причине определить указанное количество Clob _i последовательных ожидаемых пакетов от ONU i , если они не исключены конечным автоматом управления питанием. (Взамен прежних условий LOSi и LOFi.) Порог Clob _i настраиваемый. При нормальных условиях он по умолчанию равен четырем пропущенным последовательным пакетам; однако при определенных обстоятельствах (например, в целях экономии энергии) этот порог поддерживается в качестве специального индикатора и устанавливается OLT для ONU в соответствии с фактическим допустимым количеством пропущенных пакетов	По усмотрению OLT; может включать дополнительное время ожидания; изменение плана распределения; деактивацию или отключение неисправного ONU или же выполнение процедуры диагностики неисправного ONU. Сообщение о состоянии LOBi квалифицируется любым принятым DG	Ожидаемый пакет от ONU принят успешно	
LOS	Потеря сигнала	OLT не получил никакой ожидаемой передачи в восходящем потоке (полный отказ PON) в четырех последовательных кадрах	По усмотрению OLT; может потребоваться дополнительная диагностика для определения, потеряна ли PON, что в конечном счете приведет к событию защитного переключения	Когда OLT принимает хотя бы одну передачу восходящего потока	—
TIW	Предупреждение о помехах передачи для ONU i	Дрейф передачи ONU превышает внешний порог (TIW) и остается за этим порогом после трех последовательных попыток исправления с помощью PLOAM-сообщения Ranging_Time	По усмотрению OLT; может включать деактивацию, или отключение неисправного ONU, или выполнение процедуры его диагностики	Дрейф передачи ONU не превышает нижний порога (DOW)	

Тип		Описание			
		Условия обнаружения	Действия	Условия устранения	Действия
SUFi	Ошибка запуска ONU <i>i</i>	Неудачная попытка определения дальности для ONU <i>i</i> . OLT обнаруживает серийный номер ONU, но ONU не может выполнить последовательность запуска	Отправка PLOAM-сообщения Deactivate_ONU-ID	Определение дальности для ONU успешно выполнено	
DFi	Ошибка выключения ONU <i>i</i>	ONU продолжает отвечать на распределения восходящего потока после попытки выключить ONU с использованием его серийного номера (с помощью одного или нескольких PLOAM-сообщений Disable_Serial_Number), которой может предшествовать неудачная попытка деактивировать ONU (с помощью одного или нескольких PLOAM-сообщений Dectivate_ONU). Следует отметить, что OLT может обнаружить это условие только в том случае, если он продолжает предоставлять ONU распределения пропускной способности восходящего потока	Меры в целях ослабления последствий принимаются по усмотрению OLT. Могут включать в себя процедуры диагностики неисправного ONU. Нарушающий ONU-ID и связанные с ним Alloc-ID могут быть исключены из перераспределения	Неисправный ONU успешно реактивируется и остается управляемым или отстраняется от передачи восходящего потока	
LOPCi	Потеря канала связи PLOAM с ONU <i>i</i>	Характерный дефект, указывающий на нарушение протокола PLOAM: устойчивый отказ MIC в восходящем потоке; отсутствие подтверждений или надлежащих PLOAM-ответов от ONU. Устойчивость означает, что одно и то же нарушение наблюдается последовательно не менее трех раз	Меры в целях ослабления последствий принимаются по усмотрению OLT; может включать повторную аутентификацию ONU, деактивацию или отключение неисправного ONU или же выполнение процедуры его диагностики		—

Тип		Описание			
		Условия обнаружения	Действия	Условия устранения	Действия
LOOCi	Потеря канала связи OMCI с ONU <i>i</i>	Распознается процессором OMCI OLT (по наличию устойчивого отказа MIC в восходящем потоке)	Меры в целях ослабления последствий принимаются по усмотрению OLT; может включать повторную аутентификацию ONU, деактивацию или отключение неисправного ONU или же выполнение процедуры его диагностики		

14.2.2 События, обнаруживаемые на уровне ONU

Тип		Описание			
		Условия обнаружения	Действия	Условия устранения	Действия
LODS	Потеря синхронизации нисходящего потока	Конечный автомат синхронизации нисходящего потока ONU находится в состоянии Hunt или Pre-Sync (см. пункт 10.1.2)	Обеспечение необходимой визуальной индикации и сигнализации через интерфейс на стороне пользователя. Выполнение соответствующего перехода конечного автомата активации ONU	Конечный автомат синхронизации нисходящего потока ONU находится в состоянии Sync или Re-Sync	Выполнение соответствующего перехода конечного автомата активации ONU

15 Безопасность XG-PON

В этом разделе обсуждаются модели угроз, характерные для операционной среды XG-PON, и определяются аспекты аутентификации, целостности данных и защиты конфиденциальности в системе.

15.1 Модель угроз для XG-PON

Система безопасности XG-PON предназначена для защиты от следующих угроз.

- Поскольку данные нисходящего потока передаются в вещательном режиме на все ONU, подключенные к OLT XG-PON, злоумышленник, способный подменить или перепрограммировать ONU, может принимать все данные нисходящего потока, предназначенные для всех подключенных пользователей.
- Поскольку данные восходящего потока, полученные терминалом оптической линии (OLT), могут исходить от любого ONU, подключенного к оптической распределительной сети XG-PON (ODN), злоумышленник, способный подменить или перепрограммировать ONU, может подделывать пакеты так, чтобы они выдавали себя за пакеты другого ONU (то есть хищение услуг).
- Злоумышленник может подключать вредоносные устройства в разных точках инфраструктуры (например, путем взлома уличных шкафов, запасных портов или волоконных кабелей). Такие устройства могут перехватывать и/или генерировать трафик. В

зависимости от местоположения такого устройства оно может подменять OLT или в иных случаях ONU.

- d) При любом из вышеперечисленных сценариев злоумышленник может записывать пакеты, передаваемые в пассивной оптической сети (PON), и позднее воспроизводить их в этой PON или осуществлять атаки с манипулированием данными на уровне битов.

Пассивные оптические сети (PON) развертываются в самых разных вариантах. В некоторых случаях ODN, оптический разветвитель или даже ONU может быть установлен таким образом, что его можно считать физически защищенным или защищенным от несанкционированного доступа.

Для экономичной реализации этих вариантов активация некоторых из средств безопасности XG-PON не является обязательной, как указано в следующих разделах.

15.2 Аутентификация

Система XG-PON поддерживает несколько механизмов аутентификации. Первый механизм основан на регистрационном идентификаторе. Он реализуется в процессе активации ONU и может повторяться в течение всего цикла активации, то есть до следующего перехода ONU в состояние Initial (O1). Механизм аутентификации на основе регистрации обеспечивает базовый уровень аутентификации ONU со стороны OLT. Он не обеспечивает аутентификацию OLT со стороны ONU. Поддержка механизма аутентификации на основе регистрации обязательна для всех устройств XG-PON. Два других механизма аутентификации обеспечивают надежную взаимную аутентификацию как OLT, так и ONU. Один из них основан на обмене сообщениями интерфейса управления и контроля ONU (OMCI) (см. Приложение C). Другой основан на обмене сообщениями IEEE 802.1X и предоставляет широкий спектр расширяемых функций (см. Приложение D). Поддержка механизмов аутентификации на основе OMCI и IEEE 802.1X обязательна для реализации на уровне компонентов, но факультативна с точки зрения спецификации оборудования. Другими словами, реализация уровня конвергенции передачи (ТС) обеспечит возможность поддержки обоих методов надежной взаимной аутентификации, но оборудование, построенное с использованием этой реализации уровня ТС, может их не поддерживать.

Вопрос о требовании поддержки одного или обоих механизмов надежной взаимной аутентификации на этапе спецификации оборудования и использования того же или иного метода аутентификации, включая базовую аутентификацию на основе регистрации, когда система находится в эксплуатации, решается по усмотрению оператора.

В случае отказа системы аутентификации OLT может принять меры по восстановлению функциональности и предотвращению возможного нарушения безопасности, которые могут включать повторную аутентификацию с использованием того же или альтернативного механизма, блокирование восходящего и нисходящего трафика, деактивацию или отключение неисправного ONU или же выполнение процедуры диагностики такого ONU.

15.2.1 Аутентификация на основе регистрационного идентификатора

Механизм аутентификации на основе регистрационного идентификатора может обеспечить аутентификацию ONU со стороны OLT, но не наоборот. Его поддержка обязательна для всех систем XG-PON. Для обеспечения полной функциональности этот метод требует следующих мер:

- присвоения абоненту регистрационного идентификатора на уровне управления;
- предоставления регистрационного идентификатора в OLT и передачи его персоналу на местах или непосредственно абоненту;
- поддержки со стороны ONU метода ввода регистрационного идентификатора на местах (описание такого метода выходит за рамки настоящей Рекомендации);
- фактического ввода персоналом на местах или абонентом регистрационного идентификатора в ONU.

15.2.1.1 Процедура со стороны OLT

OLT должен поддерживать возможность выполнения аутентификации ONU на основе переданного ему регистрационного идентификатора (детали этой процедуры зависят от оператора), а также

выполнения процедуры расчета MSK и производных общих ключей на основе этого сообщенного идентификатора (см. пункт 15.3).

OLT запрашивает регистрационный идентификатор у ONU в следующих ситуациях:

- в процессе активации ONU путем выдачи разрешения на определение дальности;
- в качестве окончательного подтверждения установления связи по завершении процедуры надежной взаимной аутентификации путем передачи в ONU сообщения Request_Registration;
- в любой момент времени в течение цикла активации ONU по своему усмотрению путем отправки в ONU сообщения Request_Registration.

Если во время получения регистрационного идентификатора от ONU (то есть в ходе активации ONU или если надежная взаимная аутентификация не выполнена или дала сбой) между OLT и ONU не происходит действительного надежного соединения (SMA), OLT:

- вычисляет главный ключ сеанса (MSK) и производные общие ключи на основе переданного регистрационного идентификатора;
- может выполнить аутентификацию ONU на основе переданного регистрационного идентификатора.

Оператор должен указать, выполняется ли аутентификация на основе регистрации и как используется результат. Безуспешная попытка аутентификации на основе регистрации не должна препятствовать передаче значения задержки выравнивания от OLT в ONU (то есть ONU все равно разрешается перейти в состояние Operation (O5)) или поддержанию связи с ONU на уровне управления, но может повлиять на то, как OLT будет в дальнейшем работать с ONU и, в частности, на последующее предоставление услуг.

Если во время передачи регистрационного идентификатора имеет место действительная связь SMA между OLT и ONU, то аутентификация на основе регистрации не выполняется и регистрационный MSK и производные общие ключи не вычисляются.

Передав в ONU сообщение Request_Registration и ожидая использования переданного регистрационного идентификатора для вычисления общих ключей, OLT воздерживается от отправки этому ONU других сообщений PLOAM или OMCI с помощью MIC этого конкретного ONU (см. пункты 15.3.2 и 15.3.3) до тех пор, пока не будет получен регистрационный идентификатор и не будут рассчитаны регистрационный MSK и производные общие ключи.

Как только OLT завершает расчет регистрационного MSK и производных общих ключей для конкретного ONU, он немедленно вводит эти ключи в действие.

OLT в начале цикла активации ONU отбрасывает все активные регистрационные MSK и производные общие ключи.

15.2.1.2 Процедура со стороны ONU

ONU должен иметь возможность выполнять вычисление ключа MSK и производных общих ключей по регистрационному идентификатору.

ONU вычисляет регистрационный MSK и производные общие ключи при включении питания (сначала с использованием известного регистрационного идентификатора по умолчанию (см. пункт 11.3.4.2)) и при каждом изменении регистрационного идентификатора. Вычисленные значения сохраняются для использования в будущем. Поскольку набор регистрационных ключей может потребоваться в любое время, то для ONU будет полезно хранить регистрационный MSK и производные общие ключи по отдельности на основе надежной взаимной аутентификации.

ONU сообщает для OLT свой регистрационный идентификатор в следующих ситуациях:

- в процессе активации ONU в ответ на разрешение, касающееся определения дальности;
- в любое время цикла активации ONU в ответ на сообщение Request_Registration.

События, которые вызывают повторное вычисление регистрационного ключа, не синхронизированы с операциями физического уровня и событиями канала эксплуатации, администрирования и технического обслуживания (PLOAM). Ожидается, что регистрационный MSK и производные ключи доступны для ONU в момент передачи им в OLT своего регистрационного ID.

Если действительное SMA между OLT и ONU отсутствует, ONU сразу после отправки регистрационного PLOAM-сообщения передает набор общих ключей, основанный на присланном регистрационном идентификаторе.

ONU удерживает регистрационный идентификатор и сохраненные регистрационные MSK и производные общие ключи между циклами активации и между циклами включения-выключения питания.

15.2.2 Варианты надежной взаимной аутентификации

Определено два механизма надежной взаимной аутентификации – аутентификация на основе OMCI (Приложение C) и аутентификация на основе IEEE 802.1X (Приложение D). Эти механизмы аутентифицируют OLT для ONU, а также ONU для OLT. Поддержка обоих механизмов надежной взаимной аутентификации на системном уровне не обязательна.

Если надежная взаимная аутентификация поддерживается системой и используется оператором, OLT инициирует процедуру надежной взаимной аутентификации с использованием соответствующего механизма по завершении процедуры активации ONU до передачи трафика пользовательских данных и впоследствии может инициировать повторную аутентификацию в любое время в соответствии с политикой оператора и по его усмотрению.

В ходе выполнения процедуры надежной взаимной аутентификации OLT и ONU вычисляют надежный главный ключ сеанса (MSK) и набор надежных общих ключей для конкретных задач управления и эксплуатации.

OLT и ONU в начале цикла активации ONU сбрасывают MSK и производные общие ключи, полученные в процессе надежной взаимной аутентификации, вместе с другими параметрами уровня TC.

15.3 Формирование ключей

OLT и ONU обмениваются математическими деталями вычисления MSK и производных общих ключей.

ONU вычисляет регистрационный MSK и производные общие ключи при включении питания (сначала с использованием известного регистрационного идентификатора по умолчанию (см. пункт 11.3.4.2)) и при каждом изменении регистрационного идентификатора.

OLT вычисляет регистрационный MSK и производные общие ключи при следующих условиях:

- a) каждый раз, когда ONU сообщает OLT свой регистрационный идентификатор в ответ на разрешение касательно определения дальности в процессе активации ONU, независимо от того, используется ли переданный регистрационный идентификатор для аутентификации и каков результат процедуры аутентификации на основе регистрации;
- b) каждый раз, когда ONU сообщает OLT свой регистрационный идентификатор в ответ на PLOAM-сообщение Request_Registration, но только если между OLT и ONU нет действительной надежной взаимной связи.

OLT и ONU вычисляют надежный MSK и производные общие ключи всякий раз при выполнении процедуры надежной взаимной аутентификации с использованием механизма на основе OMCI или на основе IEEE 802.1X.

15.3.1 Криптографический метод

Процедура формирования надежных ключей использует алгоритм кода аутентификации сообщений на основе шифра (CMAC), приведенный в [NIST SP800-38B], с использованием алгоритма расширенного стандарта шифрования (AES) [NIST FIPS-197] в качестве базового блочного шифра.

Функция AES-CMAC принимает в качестве входных данных:

- ключ K блочного шифра;
- информационное сообщение M ; а также
- длину $Tlen$ выходного сигнала в битах

и выдает на выходе код T длиной $Tlen$ аутентификации сообщения. Запись для инициирования функции AES-CMAC имеет вид:

$$T = \text{AES-CMAC}(K, M, Tlen). \quad (15-1)$$

Для целей настоящей Рекомендации размер блока соответствующего блочного шифра и длина ключа AES в битах составляют 128 битов. Далее эта версия блочного шифра будет называться AES-128.

15.3.2 Главный ключ сеанса

Главный ключ сеанса (MSK) представляет собой 128-битовое значение, которое совместно используется OLT и данным ONU в результате процедуры аутентификации и служит отправной точкой для формирования всех других секретных ключей, используемых для последующих надежных сообщений.

Для формирования регистрационного ключа создается MSK с использованием регистрационного идентификатора ONU:

$$\text{MSK} = \text{AES-CMAC}((0x55)_{16}, \text{Registration_ID}, 128). \quad (15-2)$$

Здесь $(0x55)_{16}$ – это ключ по умолчанию, состоящий из шестнадцатеричного шаблона 0x55, повторяемого 16 раз, а *Registration_ID* – это 36-байтовое значение, передаваемое в PLOAM-сообщении Registration. Следует отметить, что PLOAM-сообщение Registration может содержать идентификатор *Registration_ID* для конкретного ONU или известное значение по умолчанию.

После того как процесс формирования ключа запущен в результате успешной надежной взаимной аутентификации, процедура получения MSK зависит от конкретного механизма аутентификации.

15.3.3 Производные общие ключи

Ключ сеанса (SK) связывает MSK с контекстом безопасного соединения между OLT и ONU. SK, который используется для последующих процедур формирования ключей, получается по следующей формуле:

$$SK = \text{AES-CMAC}(\text{MSK}, (\text{SN} \mid \text{PON-TAG} \mid 0x536573736966e4b), 128), \quad (15-3)$$

где информационное сообщение длиной 24 байта представляет собой конкатенацию трех элементов: серийного номера ONU (SN, то есть конкатенации Vendor_ID и VSSN), как отмечено в октетах 5–12 PLOAM-сообщения Serial_Number_ONU в восходящем потоке (пункт 11.3.4.1); значения PON-TAG, указанного в октетах 26–33 PLOAM-сообщения Profile в нисходящем направлении (пункт 11.3.3.1); и шестнадцатеричного представления строки символов ASCII "SessionK".

Ключ проверки целостности OMCI (OMCI_IK) используется для создания и проверки целостности OMCI-сообщений. OMCI_IK формируется из SK по следующей формуле:

$$\text{OMCI_IK} = \text{AES-CMAC}(SK, 0x4f4d4349496e746567726974794b6579, 128). \quad (15-4)$$

Здесь параметр информационного сообщения функции AES-CMAC имеет длину 128 битов и является шестнадцатеричным представлением строки символов ASCII "OMCIIntegrityKey".

Ключ проверки целостности PLOAM (PLOAM_IK) используется для создания и проверки целостности одноадресных PLOAM-сообщений на уровне XGTC. PLOAM_IK формируется из SK по следующей формуле:

$$\text{PLOAM_IK} = \text{AES-CMAC}(SK, 0x504c4f414d496e7465677274794b6579, 128). \quad (15-5)$$

Здесь параметр информационного сообщения функции AES-CMAC имеет длину 128 битов и является шестнадцатеричным представлением строки символов ASCII "PLOAMIntegrityKey".

Для вещательных PLOAM-сообщений в нисходящем потоке и одноадресных PLOAM-сообщений, передаваемых в ходе активации ONU до получения регистрационного MSK, используется значение по умолчанию PLOAM_IK, которое равно $(0x55)_{16}$, где индекс отмечает количество повторений указанного шестнадцатеричного шаблона.

Ключ шифрования ключей (КЕК) используется для шифрования/дешифрования и защиты/проверки целостности данных ключа шифрования, который передается по каналу PLOAM. КЕК формируется из SK по следующей формуле:

$$KEK = \text{AES-CMAC}(SK, 0x4b6579456e63727970746966e4b6579, 128). \quad (15-6)$$

Здесь параметр информационного сообщения функции AES-CMAC имеет длину 128 битов и является шестнадцатеричным представлением строки символов ASCII "KeyEncryptionKey".

15.4 Система шифрования полезной нагрузки XGEM

Полезные нагрузки XGEM могут шифроваться для передачи в целях обеспечения конфиденциальности данных при наличии потенциальной угрозы перехвата.

15.4.1 Криптографический метод

Алгоритм, используемый для шифрования полезной нагрузки методом инкапсуляции XG-PON (XGEM), – это шифр AES-128 [NIST FIPS-197], применяемый в режиме счетчика (AES-CTR), как описывается в [NIST SP800-38A]. Алгоритм AES-CTR применяет прямое шифрование с секретным ключом, известным только OLT и ONU (или нескольким ONU в случае вещательного ключа), к последовательности входных блоков счетчика для создания последовательности выходных блоков, которые подвергаются операции "исключающее ИЛИ" с незашифрованной полезной нагрузкой XGEM. Последовательность блоков счетчика для каждого поля полезной нагрузки кадра XGEM начинается со значения, называемого "начальным блоком счетчика", а затем дискретно увеличивается с использованием стандартной функции приращения, применяемой ко всему блоку счетчика (см. раздел B.1 [NIST SP800-38A]). Чтобы декодировать зашифрованный текст, для каждого кадра XGEM применяется прямое шифрование с тем же секретным ключом к последовательности входных блоков счетчика, начиная с того же самого значения начального блока счетчика. Чтобы восстановить незашифрованную полезную нагрузку XGEM, выходные блоки подвергаются операции "исключающее ИЛИ" с блоками зашифрованного текста полезной нагрузки XGEM.

15.4.2 Выбор секретного ключа

Шифрование полезной нагрузки XGEM может применяться к любой одноадресной передаче в нисходящем и восходящем потоках и к одному потоку определенной многоадресной услуги для вещательной передачи в нисходящем потоке. OLT обеспечивает постоянное наличие пары ключей для вещательной рассылки в пределах всей PON, которая используется для вещательной передачи одного или нескольких идентификаторов Port-ID XGEM, и пары ключей для одноадресной рассылки на каждый ONU, которая используется для всех Port-ID XGEM, относящихся к этому ONU. Механизм обмена ключами и их активации, который всегда позволяет выбрать действительный ключ для каждой поддерживаемой пары ключей, описывается в пункте 15.5.

То, какая именно пара ключей будет использоваться для шифрования полезной нагрузки XGEM, зависит от Port-ID XGEM. Для данного Port-ID XGEM (одноадресного или вещательного) отправитель выбирает конкретный ключ из соответствующей пары ключей согласно правилам пункта 15.5 и обеспечивает индикацию выбранного ключа в заголовке XGEM.

Заголовок каждого кадра XGEM, как определено в пункте 9.1.2, содержит двухбитовое поле, называемое индексом ключа, в котором указывается, зашифрована ли полезная нагрузка данного кадра XGEM, и если да, то какой из ключей шифрования использовался. Для поля индекса ключа определяются следующие кодовые точки:

- 00 – полезная нагрузка кадра XGEM не зашифрована;
- 01 – полезная нагрузка кадра XGEM зашифрована с использованием первого ключа шифрования;
- 10 – полезная нагрузка кадра XGEM зашифрована с использованием второго ключа шифрования;
- 11 – зарезервировано.

15.4.3 Начальный блок счетчика

128-битовое значение начального блока счетчика для конкретного кадра XGEM определяется значениями счетчика суперкадра (SFC) и внутрикадрового счетчика (IFC), связанного с данным кадром XGEM.

В нисходящем направлении значение SFC содержится в поле PSBd PHY-кадра, в котором передается данный кадр XGEM нисходящего потока. В восходящем направлении значение SFC содержится в поле PSBd PHY-кадра, определяющего PHY-пакет восходящего потока, в котором передается данный кадр XGEM восходящего потока. Для целей построения начального блока счетчика старший бит (MSB) значения SFC опускается, и используется поле из 50 битов.

В целях получения значения IFC для данного кадра XGEM применяется следующая процедура нумерации блоков (см. рисунок 15-1).

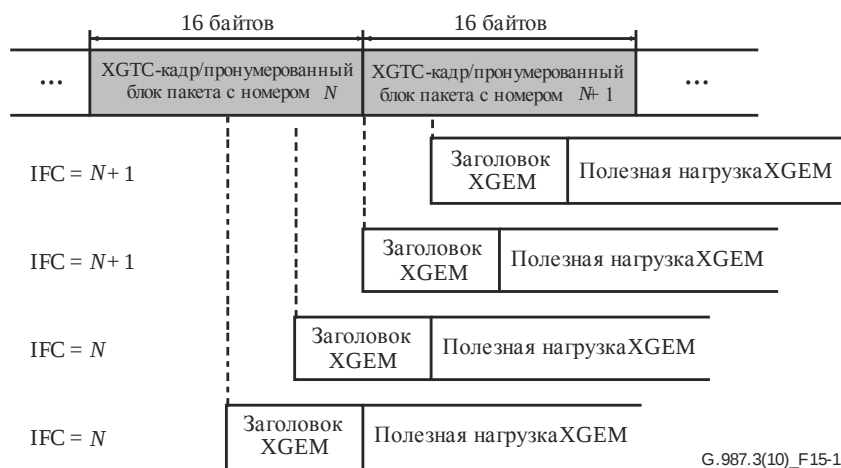


Рисунок 15-1 – Получение значения внутрикадрового счетчика для кадра XGEM

В нисходящем направлении кадр XGTC подуровня формирования кадров (см. рисунок 8-1) разбит на блоки по 16 байтов, и эти блоки последовательно пронумерованы от 0 до 8464, причем последний блок имеет половинный размер. Размер порядкового номера 14 битов.

В восходящем направлении пакет XGTC подуровня формирования кадров (см. рисунок 8-5) разбит на блоки по 16 байтов, и эти блоки последовательно нумеруются от $\lfloor \text{StartTime}/4 \rfloor$ до $\lfloor \text{StartTime}/4 \rfloor + X$, где X – это количество полных и неполных блоков по 16 байтов в пакете XGTC за вычетом 1. Размер порядкового номера 14 битов. Для справки, в восходящем потоке 2,5G наибольшее значение StartTime составляет 9719. Следовательно, наибольший номер первого блока пакета составляет 2429. Максимальный размер пакета XGTC составляет 9720 слов, или 2430 блоков. Следовательно, наибольший возможный номер блока из 16 байтов в пакете XGTC восходящего потока равен 4858.

Кадр XGEM, присутствующий в полезной нагрузке XGTC-кадра нисходящего потока или XGTC-пакета восходящего потока, может находиться в одном из четырех фазовых положений по отношению к границе 16-байтового блока. IFC кадра XGEM представляет собой порядковый номер 16-байтового блока, к которому принадлежат первые 4 байта заголовка XGEM.

128-битовый начальный блок счетчика конкретного кадра XGEM нисходящего потока представляет собой конкатенацию значений SFC и IFC данного кадра, полученных, как описывается выше, за счет соединения с ним самим. 128-битовый начальный блок счетчика конкретного кадра XGEM восходящего потока представляет собой конкатенацию значений SFC и IFC данного кадра, полученных, как описывается выше, за счет соединения с дополнением его битов.

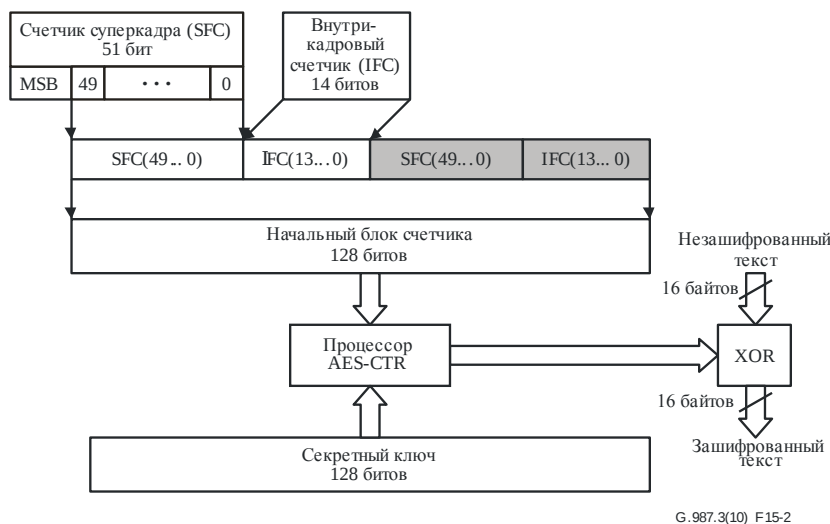


Рисунок 15-2 – Формирование начального блока счетчика для шифрования в нисходящем потоке (для восходящего потока заштрихованные поля берутся в битовом дополнении)

ПРИМЕЧАНИЕ. – Показано, что два значения SFC (49... 0), $0b1(0)_{49}$ и $0b0(1)_{49}$, могут приводить к созданию нескольких одинаковых блоков счетчика в восходящем и нисходящем направлениях. Поскольку эти значения находятся в середине диапазона SFC (49... 0), окно слабых блоков счетчика появляется примерно на 250 мкс один раз в 4000 лет. Потенциальное влияние можно уменьшить путем инициализации SFC с малого значения.

15.5 Механизм обмена ключами шифрования данных и их активации

15.5.1 Обзор

Настройка шифрования данных ONU производится через OMCI. Каждый ONU объявляет о своих возможностях по обеспечению безопасности, которые требуются для включения как минимум поддержки AES-128. OLT может не выбирать никакую или выбрать любую из объявленных возможностей ONU; выбор OLT становится после этого обязательным для ONU. Для каждого порта XGEM, кроме порта по умолчанию, OLT настраивает атрибут "кольцо для ключей" шифрования порта (СТР-управляемый объект сети GEM-портов, пункт 9.2.3 [ITU-T G.988]), который указывает, допускает ли порт шифрование, и если да, то в каком направлении оно применяется (только в нисходящем или в нисходящем и восходящем) и какого типа ключ шифрования данных (одноадресный или вещательный) следует использовать для зашифрованного трафика. Порт XGEM по умолчанию не имеет настраиваемого кольца для ключей, и для него определено двунаправленное шифрование с использованием одноадресного ключа.

Наличие порта XGEM не по умолчанию для шифрования не означает, что трафик всегда зашифрован. Статус шифрования каждого отдельного кадра XGEM определяется динамически отправителем в границах явно настраиваемых или предопределенных возможностей соответствующего порта XGEM и указывается в заголовке кадра XGEM.

Если трафик порта XGEM по умолчанию шифруется в нисходящем направлении, то ожидается, что ONU будет шифровать трафик порта XGEM по умолчанию в восходящем потоке.

Для каждого из двух типов ключей (одноадресных и вещательных) OLT и ONU поддерживают индексированный массив из двух записей о ключах шифрования данных. Вещательные ключи генерируются OLT и передаются в ONU через OMCI, как описывается в пункте 15.5.4. Одноадресные ключи генерируются и передаются в ONU в восходящем потоке по указанию OLT с использованием канала PLOAM, как описывается в пункте 15.5.3. Значение одноадресного ключа не раскрывается для OMCI.

Тип ключа шифрования данных, используемого для шифрования полезной нагрузки конкретного кадра XGEM при передаче, подразумевается в Port-ID XGEM. Поле Key_Index заголовка кадра

XGEM указывает, шифруется ли полезная нагрузка, и если да, то какой из двух ключей заданного типа для шифрования данных используется. Конкретный ключ, выбранный для шифрования, должен быть действительным на момент передачи кадра XGEM, как определено соответствующим протоколом обмена ключами. Отправитель начинает использовать новый ключ шифрования данных в течение интервала времени, когда оба ключа соответствующего типа действительны. Если действительный ключ шифрования данных отсутствует (например, сразу после повторной активации ONU), отправитель передает кадры XGEM без шифрования с использованием значения Key_Index, равного 0.

15.5.2 Криптографический метод

Сами ключи шифрования данных передаются между OLT и ONU зашифрованными с использованием блочного шифра AES-128 [NIST FIPS-197], который применяется в режиме электронной кодовой книги (AES-ECB), как указано в [NIST SP800-38A]. При шифровании AES-ECB функция прямого шифрования AES-128 применяется непосредственно и независимо к каждому блоку исходного текста с использованием секретного ключа для создания блока зашифрованного текста. В расшифровке AES-ECB обратная функция AES-128 применяется непосредственно и независимо к каждому блоку зашифрованного текста с тем же секретным ключом для восстановления блока исходного текста. Запись для вызова алгоритма AES-ECB имеет вид:

$$C = \text{AES-ECB}(K, P);$$

$$P = \text{AES-ECB}^{-1}(K, C).$$

Здесь P – это блок исходного текста, C – блок зашифрованного текста, а K – ключ блочного шифра. Для целей настоящей Рекомендации размер блока и длина ключа равны 128 битов.

15.5.3 Одноадресное шифрование

OLT и ONU сохраняют ряд переменных логического состояния, которые связаны с функциями шифрования и дешифрования, и эта информация о состоянии управляет обменом материалом новых ключей и их активацией. Диаграмма состояний OLT показана на рисунке 15-4, а диаграмма ONU – на рисунке 15-5. Оба конечных автомата работают целиком в состоянии Operation (O5). Когда ONU активируется или реактивируется, ключи шифрования данных становятся недействительными и вновь приобретаются через PLOAM-обмен, после того как установлен общий КЕК.

15.5.3.1 Последовательность обмена ключами шифрования и событий активации

Процесс обмена и активации для одноадресных ключей шифрования данных выполняется под управлением OLT с помощью последовательности PLOAM-сообщений. События процесса активации описываются ниже.

- OLT начинает с запроса нового одноадресного ключа шифрования данных от ONU с использованием PLOAM-сообщения Key_Control(Generate), содержащего индекс ключа для нового ключа. Отправляется один экземпляр запроса, и если ответа нет, то OLT повторяет запрос.
- Получив от OLT PLOAM-сообщение Key_Control(Generate), ONU генерирует новый ключ шифрования с использованием генератора случайных чисел, подходящего для криптографических целей. ONU сохраняет новый ключ в своих структурах управления шифрованием и дешифрованием (в соответствии с определенным индексом ключа). Затем ONU отправляет OLT новый ключ, используя PLOAM-сообщение Key_Report(NewKey). Этот ключ зашифрован в PLOAM-сообщении Key_Report(NewKey) с помощью AES-ECB с использованием КЕК.
- Получив PLOAM-сообщение Key_Report(NewKey), OLT расшифровывает новый ключ и сохраняет его в своих логических структурах управления шифрованием и дешифрованием для инициирования ONU в соответствии с определенным индексом ключа.
- Затем OLT отправляет PLOAM-сообщение Key_Control(Confirm), содержащее индекс вновь сгенерированного ключа.
- Получив PLOAM-сообщение Key_Control(Confirm), ONU узнает о том, что у OLT теперь имеется новый ключ. Тогда ONU изменяет состояние нового ключа в структуре управления

шифрованием на активное. ONU отвечает PLOAM-сообщением Key_Report(ExistingKey), указывающим название "Key_Name" определенного ключа.

- Если OLT в любой момент времени решит сверить ключ ONU со своим собственным (для диагностики ситуации рассогласования ключей), OLT может выдать PLOAM-сообщение Key_Control(Confirm) для key_index существующего ключа. Это заставит ONU ответить PLOAM-сообщением Key_Report(ExistingKey), содержащим имя ключа.

Предыдущее описание относится к обычному процессу обмена ключами; однако основным справочным материалом для данного поведения служат диаграммы состояний, приведенные в пунктах 15.5.3.2 и 15.5.3.3.

Если при получении PLOAM-сообщения Key_Report(ExistingKey) OLT обнаруживает несоответствие между сообщенным и локально вычисленным хешами ключа, он прекращает использование ключа шифрования данных с указанным индексом ключа и немедленно принимает ответные меры по своему усмотрению. Такие меры могут включать, например, повторное подтверждение ключа, генерирование нового ключа или повторную аутентификацию ONU.

На диаграммах состояний на рисунках 15-3 и 15-4 условные обозначения oldkey (старый ключ) и newkey (новый ключ) означают два ключа шифрования данных (с соответствующими индексами ключей), первый из которых активен до начала обмена ключами, а последний – после его завершения.

Следует отметить, что в ходе обмена ключами с точки зрения как OLT, так и ONU момент, когда старый ключ перестает быть действительным для передачи, отличается от момента, когда старый ключ перестает быть действительным для приема, и момент, когда новый ключ становится действительным для передачи, отличается от момента, когда новый ключ становится действительным для приема.

Для OLT, как и для ONU, существует временной интервал, когда старый и новый ключи действительны для передачи, и временной интервал, когда старый и новый ключи действительны для приема. В течение интервала, когда и старый, и новый ключи действительны для передачи, соответствующий отправитель выбирает момент, когда он начинает шифровать исходящую полезную нагрузку кадра XGEM с новым ключом, и помещает key_index нового ключа в заголовок исходящего кадра XGEM. Приступив к использованию нового ключа для передачи, отправитель прекращает использование старого ключа и сбрасывает его. В течение интервала времени, когда и старый и новый ключи действительны для приема, получатель принимает любой key_index для расшифровки входящей полезной нагрузки кадра XGEM. Вне этого интервала получатель отбрасывает полезную нагрузку кадра XGEM, зашифрованную недействительным ключом.

За правильную установку параметра key_index PLOAM-сообщения Key_Control отвечает OLT. В частности, OLT должен воздержаться от передачи PLOAM-сообщения Key_Control(Confirm) для key_index, который на данный момент недействителен в ONU, и, за исключением ситуаций восстановления при рассогласовании ключей, от передачи PLOAM-сообщения Key_Control(Generate) для единственного действительного на данный момент параметра key_index в ONU.

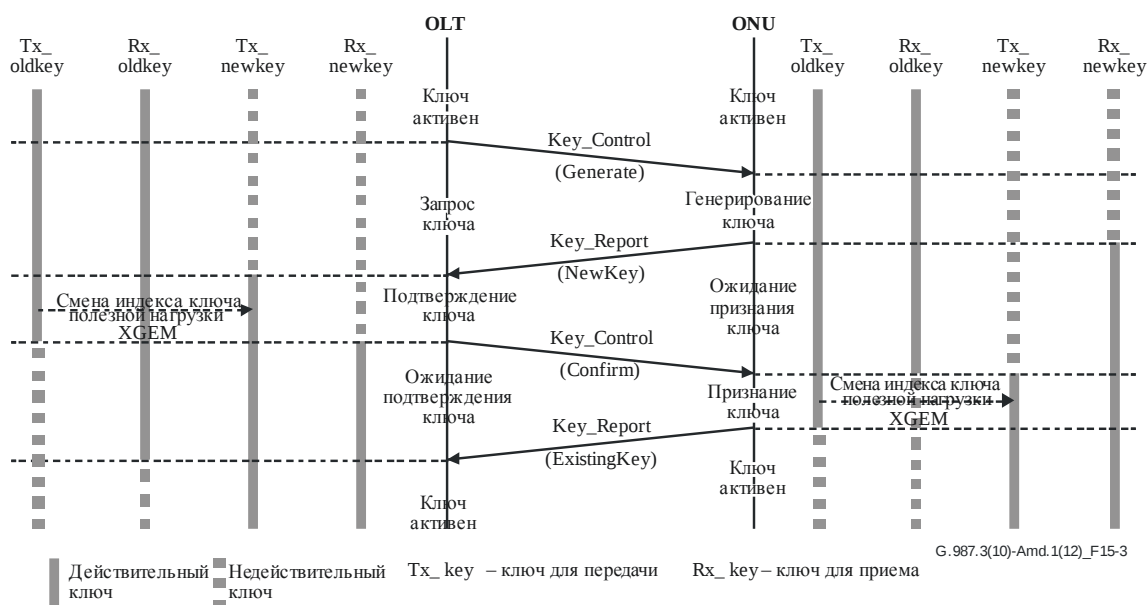


Рисунок 15-3 – Проверка достоверности ключей при обмене ключами

15.5.3.2 Состояния и диаграмма состояний OLT

Для OLT определяются следующие пять состояний обмена ключами шифрования и их активации.

а) Неактивное состояние ключа (KL0)

ONU регистрируется и находится в состоянии O5. Активный ключ шифрования полезной нагрузки XGEM отсутствует. Действительные ключи для приема и/или передачи между OLT и ONU отсутствуют. Когда OLT решает инициировать одноадресный обмен ключами шифрования данных, он переходит в состояние запроса ключа (KL1).

б) Состояние запроса ключа (KL1)

OLT инициирует новый запрос ключа, отправив PLOAM-сообщение Key_Control(Generate), которое дает указание ONU сгенерировать новый ключ и отправить его в восходящем потоке. В этом состоянии новый ключ пока неизвестен OLT и поэтому недействителен для приема и для передачи. Если имеется старый (то есть существующий) ключ, то старый ключ остается действительным для приема и передачи в данном OLT. Как только PLOAM-сообщение Key_Report(NewKey) получено, OLT переходит в состояние подтверждения ключа (KL2).

Если таймер TK1 сработал, а сообщение Key_Report(NewKey) не получено, то OLT инициирует новый запрос ключа.

с) Состояние подтверждения ключа (KL2)

В этом состоянии новый ключ действителен для передачи и недействителен для приема в OLT. Старый ключ (если он имеется) остается действительным для приема и передачи в данном OLT. OLT выбирает момент, чтобы начать шифрование полезной нагрузки XGEM новым ключом.

д) Состояние ожидания подтверждения ключа (KL3)

OLT отправляет PLOAM-сообщение Key_Control(Confirm) для указанного индекса ключа. Новый ключ становится действительным для приема и для передачи в данном OLT. Старый ключ (если он имеется) остается действительным для приема, но становится недействительным для передачи в данном OLT. После приема PLOAM-сообщения Key_Report(ExistingKey) OLT переходит в состояние активного ключа (KL4).

Если таймер TK2 сработал, а сообщение Key_Report(ExistingKey) не получено, OLT отправляет новое PLOAM-сообщение Key_Control(Confirm).

е) Состояние активного ключа (KL4)

После получения PLOAM-сообщения Key_Report(ExistingKey) старый ключ (если он имеется) становится недействительным для приема и для передачи. Новый ключ остается единственным активным ключом для приема и передачи между OLT и ONU.

Если требуется сменить ключ, OLT переходит в состояние запроса ключа (KL1).

Если требуется проверить ключ, OLT отправляет PLOAM-сообщение Key_Control(Confirm), но изменения состояния не происходит.

Для поддержки обмена ключами шифрования и их активации OLT использует три таймера:

TK1 – таймер ожидания обмена ключами OLT. Таймер TK1 используется для прерывания неудачной попытки обмена ключами или проверки ключа путем ограничения общего времени, в течение которого OLT может пребывать в состояниях KL1, KL2 или KL3. Рекомендуемое начальное значение TK1 составляет 100 мс;

TK2 – таймер ожидания ключа. Таймер TK2 используется для прерывания неудачной попытки запроса ключа путем ограничения общего времени, в течение которого OLT может пребывать в состоянии KL1. Рекомендуемое начальное значение TK2 составляет 10 мс;

TK3 – таймер ожидания подтверждения ключа. Таймер TK3 используется для прерывания неудачной попытки подтверждения ключа путем ограничения общего времени, в течение которого OLT может пребывать в состоянии KL3. Рекомендуемое начальное значение TK3 составляет 10 мс.

На рисунке 15-4 показано графическое представление состояний OLT.

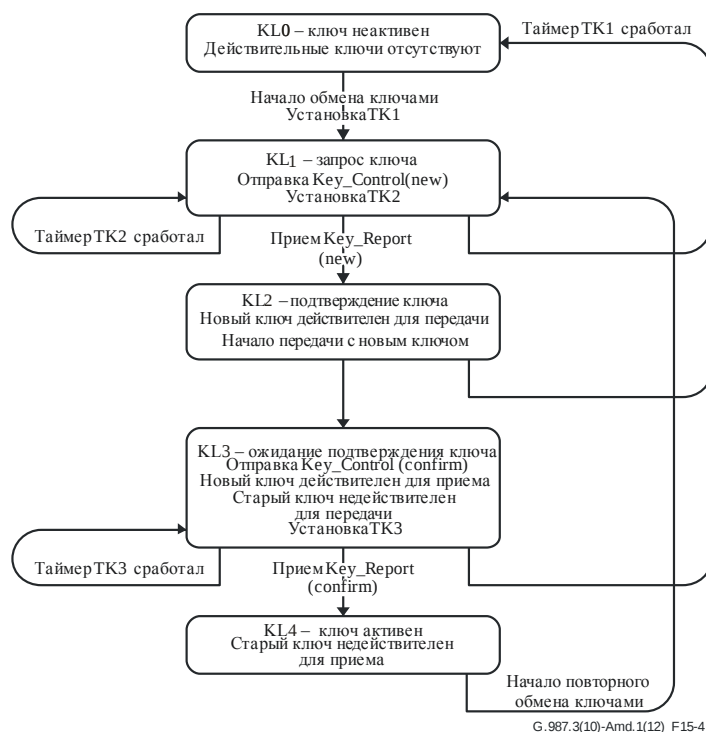


Рисунок 15-4 – Диаграмма состояний при обмене ключами OLT

15.5.3.3 Состояния и диаграмма состояний ONU

Для ONU определяются следующие пять состояний обмена ключами шифрования и их активации.

а) Неактивное состояние ключа (KN0)

ONU регистрируется и находится в состоянии O5. Активные ключи для шифрования полезной нагрузки XGEM между OLT и ONU отсутствуют. Как только получено PLOAM-сообщение Key_Control(Generate) для нового ключа, ONU переходит в состояние генерирования ключа (KN1).

b) Состояние генерирования ключа (KN1)

ONU генерирует новый ключ. Если имеется старый ключ, он остается действительным для приема и передачи в данном ONU. Новый ключ недействителен для приема и для передачи в данном ONU.

с) Состояние ожидания признания ключа (KN2)

ONU отправляет PLOAM-сообщение Key_Report(NewKey), информируя OLT о новом ключе. Новый ключ шифруется для передачи PLOAM с AES-ECB при использовании КЕК. Новый ключ становится действительным для приема и остается недействительным для передачи в данном ONU. Как только получено PLOAM-сообщение Key_Control(Confirm), ONU переходит в состояние признания ключа (KN3).

Если таймер TK5 сработал, а сообщение Key_Control(Confirm) не получено, ONU повторно передает PLOAM-сообщение Key_Report(NewKey) с новым ключом. Если устройство ONU получает новое PLOAM-сообщение Key_Control(Generate), то оно также повторно передает PLOAM-сообщение Key_Report(NewKey). В этом случае ONU принимает решение об использовании ранее сгенерированного ключа или о создании еще одного нового ключа.

d) Состояние признания ключа (KN3)

В этом состоянии новый ключ действителен для приема и становится действительным для передачи в данном ONU. Старый ключ (если он имеется) остается действительным для передачи, но становится недействительным для приема в ONU. ONU начинает шифровать полезную нагрузку XGEM новым ключом. ONU передает подтверждение OLT, отправив PLOAM-сообщение Key_Report(ExistingKey) со значением Key_Name вновь созданного ключа. После передачи PLOAM-сообщения Key_Report(ExistingKey) ONU переходит в состояние активного ключа (KN4).

e) Состояние активного ключа (KN4)

В этом состоянии новый ключ действителен для приема и передачи в данном ONU. Старый ключ (если он имеется) становится недействительным для приема и для передачи в данном ONU.

Получив PLOAM-сообщение Key_Control(Generate) для неактивного в настоящее время key_index, ONU переходит в состояние генерирования ключа (KN1), при этом активный ключ становится старым ключом.

Если в любой момент времени получено PLOAM-сообщение Key_Control(Confirm) для существующего ключа, ONU отправляет PLOAM-сообщение Key_Report(ExistingKey), но изменения состояния не происходит.

Для поддержки обмена ключами шифрования и их активации ONU использует два таймера:

TK4 – таймер ожидания обмена ключами ONU. Таймер TK4 используется для прерывания неудачной попытки обмена ключами или проверки ключа путем ограничения общего времени, в течение которого ONU может пребывать в состояниях KN1, KN2 или KN3. Рекомендуемое начальное значение TK4 составляет 100 мс;

TK5 – таймер ожидания признания ключа. Таймер TK5 используется для ограничения общего времени, в течение которого ONU может находиться в состоянии KN2. Рекомендуемое начальное значение TK5 составляет 20 мс.

На рисунке 15-5 показано графическое представление состояний ONU.

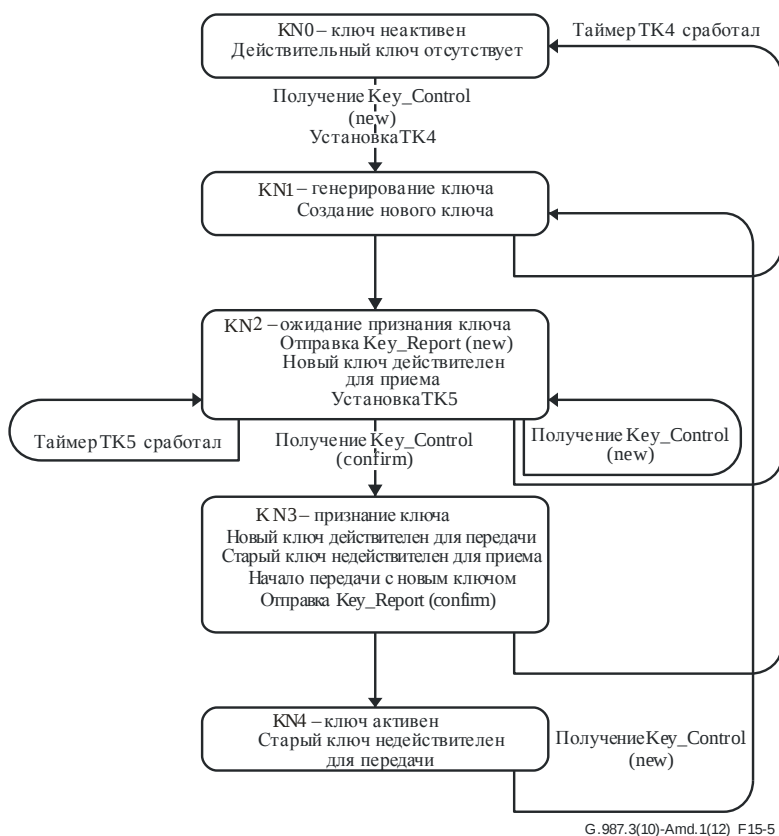


Рисунок 15-5 – Диаграмма состояний обмена ключами ONU

15.5.4 Шифрование многоадресных сообщений нисходящего потока

Процесс обмена ключами инициируется OLT. OLT выбирает индекс ключа, подлежащего замене. OLT выводит этот индекс ключа из употребления во избежание несоответствия ключей во время их замены. OLT генерирует каждый вещательный ключ с использованием генератора случайных чисел, подходящего для криптографических целей.

Затем OLT через OMCI записывает ключ в атрибут таблицы вещательных ключей (см. пункт 9.13.11 [ITU-T G.988]) в MIB каждого ONU, рассчитанного на прием многоадресного трафика. Вещательный ключ шифрования шифруется при помощи алгоритма AES-ECB с использованием KEK.

OMCI представляет собой общепризнанный канал, поэтому OLT может подтвердить, что в ONU действительно изменен рассматриваемый атрибут ключа. После того как OLT подтвердит, что у всех надлежащих ONU имеется новый вещательный ключ, OLT может вернуть индекс ключа в эксплуатацию.

15.6 Защита целостности и проверка источника данных для PLOAM

Проверка подлинности отправителя и защита канала обмена сообщениями PLOAM от подлога достигается с использованием 8-байтового поля проверки целостности сообщений (MIC) формата PLOAM-сообщения.

15.6.1 Криптографический метод

Поле MIC формата PLOAM-сообщения построено с использованием алгоритма кода аутентификации сообщений на основе шифрования (CMAC), приведенного в [NIST SP800-38B], со 128-битовым алгоритмом расширенного стандарта шифрования (AES-128) [NIST FIPS-197] в качестве базового блочного шифра.

Параметры функции AES-CMAC и система символов для ее вызова приведены в пункте 15.3.1.

15.6.2 Расчет MIC

С учетом 40 байтов содержания PLOAM-сообщения и ключа целостности PLOAM (PLOAM_IK) отправитель и получатель могут вычислить поле MIC следующим образом:

$$PLOAM-MIC = AES-CMAC (PLOAM_IK, C_{dir} | PLOAM_CONTENT, 64), \quad (15-7)$$

где C_{dir} – это код направления: $C_{dir} = 0x01$ для нисходящего потока и $C_{dir} = 0x02$ для восходящего потока, а поле $PLOAM_CONTENT$ с 1-го по 40-й октеты означает PLOAM-сообщения.

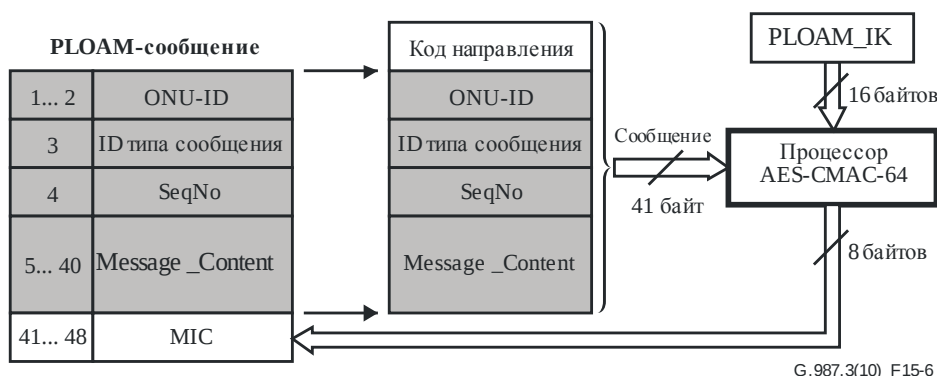


Рисунок 15-6 – Защита целостности PLOAM

15.7 Защита целостности и проверка источника данных для OMCI

Проверка подлинности отправителя и защита канала OMCC от подлога достигаются с использованием 4-байтового поля проверки целостности сообщений (MIC) формата сообщения OMCI.

15.7.1 Криптографический метод

Поле MIC формата сообщения OMCI построено с использованием алгоритма кода аутентификации сообщений на основе шифрования (CMAC), приведенного в [NIST SP800-38B], со 128-битовым алгоритмом расширенного стандарта шифрования (AES-128) [NIST FIPS-197] в качестве базового блочного шифра.

Параметры функции AES-CMAC и система символов для ее вызова приведены в пункте 15.3.1.

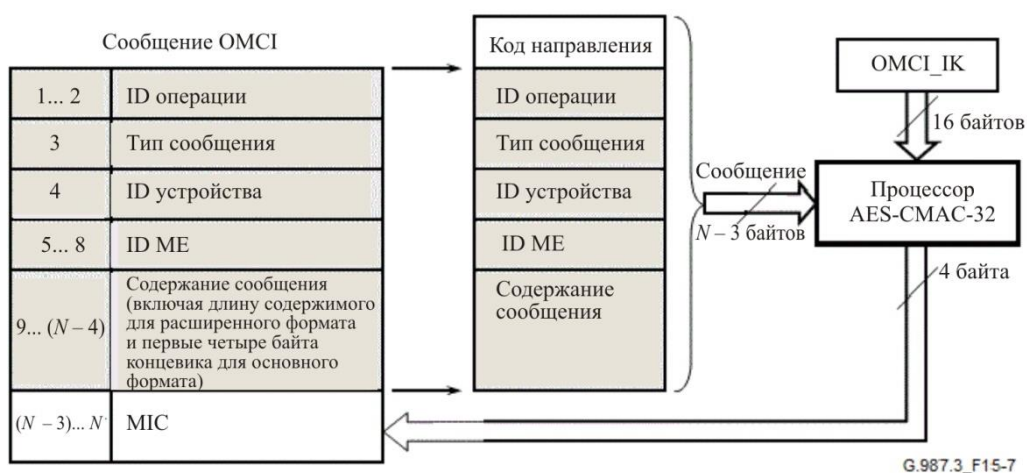


Рисунок 15-7 – Защита целостности OMCI

15.7.2 Расчет MIC

С учетом содержания сообщения OMCI и ключа проверки целостности OMCI (OMCI_IK) отправитель и получатель могут вычислить поле MIC следующим образом:

$$OMCI-MIC = \text{AES-CMAC} (OMCI_IK, (C_{dir} \mid OMCI_CONTENT), 32), \quad (15-8)$$

где C_{dir} – это код направления: $C_{dir} = 0x01$ для нисходящего потока и $C_{dir} = 0x02$ для восходящего потока, а поле $OMCI_CONTENT$ относится к сообщению OMCI, за исключением последних 4 байтов.

15.8 Смена ключей проверки целостности и источника данных

15.8.1 Использование ключа по умолчанию

В начале активации ONU устанавливается значение ключа проверки целостности PLOAM по умолчанию $(0x55)_{16}$ для данного ONU, которое используется для обмена PLOAM-сообщениями в отсутствие MSK. После того как ONU передал OLT свой регистрационный идентификатор, создается базовый MSK и вычисляются все производные общие ключи. Для ключа проверки целостности OMCI не требуется явного значения по умолчанию, так как до создания MSK никакого обмена OMCI не происходит, и вещательный канал OMCI не поддерживается.

Вещательные PLOAM-сообщения, PLOAM-сообщение Serial_Number_ONU (восходящего потока), PLOAM-сообщение Deactivate_ONU-ID (нисходящего потока), а также PLOAM-сообщения Request_Registration (нисходящего потока) и Registration (восходящего потока) всегда защищаются посредством MIC, генерируемой с использованием ключа проверки целостности PLOAM по умолчанию. Таким образом указанные сообщения могут быть успешно переданы, даже если OLT и ONU не установили или не согласовали динамически создаваемые ключи.

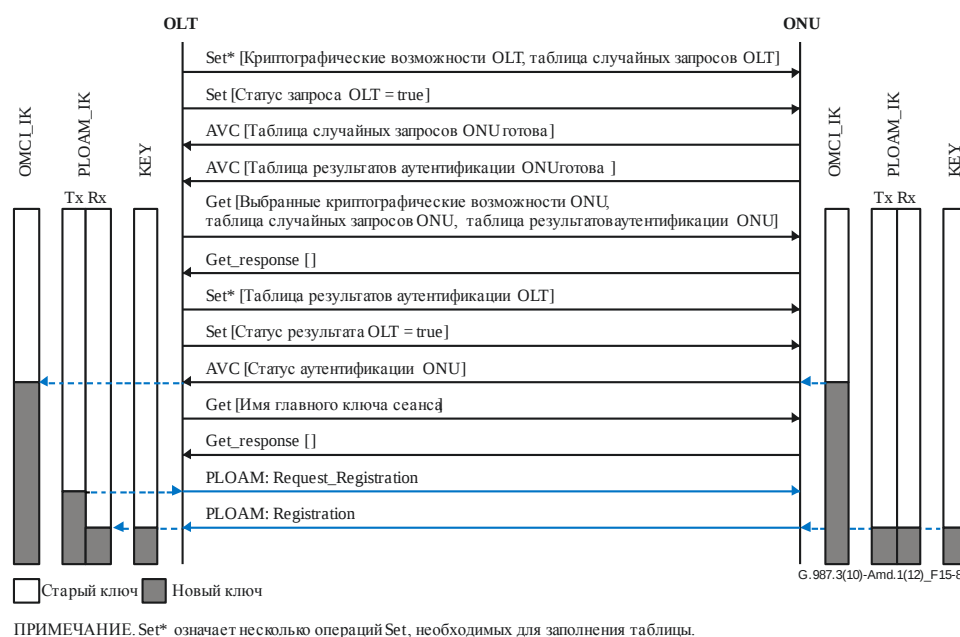
15.8.2 Смена ключей для надежной взаимной аутентификации на основе OMCI

Следующее описание относится к атрибутам и процедурам расширенного контроля безопасности, указанным в пункте 9.13.11 [ITU-T G.988].

Аутентификация выполняется как трехступенчатая процедура запрос-ответ с применением симметричных ключей в канале OMCI, за которой следует подтверждение установления связи посредством PLOAM-сообщений в форме обмена регистрационными идентификаторами.

OLT инициирует аутентификацию на основе OMCI по своему усмотрению, составляя атрибут таблицы случайных запросов к OLT. С этого момента и до завершения процедуры аутентификации OLT воздерживается от отправки в ONU любых сообщений OMCI, не связанных с аутентификацией.

ONU генерирует свой собственный случайный запрос, вычисляет ответ на запрос OLT и инициирует надежную процедуру вычисления MSK и производных общих ключей. Вычисленные надежные ключи сохраняются для использования в будущем.



ПРИМЕЧАНИЕ. Set* означает несколько операций Set, необходимых для заполнения таблицы.

Рисунок 15-8 – Надежная процедура взаимной аутентификации на основе OMCI.
 Если явно не указано иное, то обмен сообщениями происходит по каналу OMCI

Получив ответ ONU на случайный запрос терминала оптической линии (OLT) вместе с таблицей случайных запросов ONU, OLT в одностороннем порядке проверяет статус аутентификации ONU. Если односторонняя аутентификация ONU-OLT терпит неудачу, дальнейшее выполнение процедуры аутентификации прерывается. В случае успеха односторонней аутентификации ONU-OLT OLT вычисляет MSK и производные общие ключи, сохраняя их для использования в будущем. OLT по завершении вычисления ключей выполняет процедуру аутентификации, записывая в ONU таблицу результатов аутентификации со стороны OLT и статус результатов OLT.

Получив ответ OLT, ONU проверяет статус аутентификации OLT и заполняет атрибут состояния аутентификации ONU. ONU использует следующее доступное разрешение Alloc-ID по умолчанию для передачи изменений значения атрибута (AVC) в атрибут состояния аутентификации ONU. Если односторонняя аутентификация OLT-ONU не удалась, то поле проверки целостности сообщения (MIC) в сообщении AVC формируется с использованием ранее активного OMCI_IK. Если односторонняя аутентификация OLT-ONU прошла успешно (и таким образом была выполнена взаимная аутентификация), то поле MIC в сообщении AVC формируется с использованием нового значения OMCI_IK. Новый OMCI_IK становится активным в ONU.

OLT при приеме от ONU сообщения AVC о состоянии аутентификации ONU проверяет, было ли поле MIC сформировано с использованием старого или нового OMCI_IK. Если в ONU использовался старый OMCI_IK, то OLT сбрасывает ранее рассчитанный относящийся к ключу материал. Если ONU использовал новый OMCI_IK, то OLT фиксирует новый OMCI_IK как активный. Затем OLT инициирует подтверждение установления связи посредством PLOAM, формируя PLOAM-сообщение Request_Registration нисходящего потока для ONU. Целью подтверждения установления связи является определение активации надежных общих ключей в случае успеха аутентификации или получение MSK и производных общих ключей на основе регистрации в случае неудачной аутентификации. PLOAM-сообщение Request_Registration по определению защищено с использованием PLOAM_IK по умолчанию. После передачи сообщения Request_Registration OLT фиксирует новый PLOAM_IK как активный для передачи.

Получив PLOAM-сообщение Request_Registration нисходящего потока, ONU формирует PLOAM-сообщение Registration восходящего потока, которое по определению защищено с использованием PLOAM_IK по умолчанию. После передачи сообщения Registration ONU фиксирует новые PLOAM_IK и KEK как активные.

Получив от ONU PLOAM-сообщение Registration восходящего потока, OLT фиксирует PLOAM_IK и KEK как активные для приема, тем самым завершая процедуру смены ключей.

15.8.3 Смена ключей для аутентификации на основе IEEE 802.1X

OLT и аутентифицированному ONU после завершения процедуры взаимной аутентификации или повторной аутентификации на основе IEEE 802.1X предоставляется льготный интервал 200 мс для вычисления нового набора производных общих ключей. В течение этого интервала отправитель либо остается в режиме молчания, либо продолжает использовать старый ключ проверки целостности и переходит на новый, как только обнаружит новый ключ в полученном сообщении, или, самое позднее, в конце льготного интервала. Пока вычисляется новый ключ, получатель продолжает проверять принимаемые сообщения старым ключом. Когда новый ключ становится доступным, получатель начинает проверку сообщений как старым, так и новым ключами и переходит на использование только нового ключа после успешной проверки нового ключа или, самое позднее, в конце льготного интервала.

15.8.4 Сообщения, касающиеся случаев нарушения MIC

Если нарушение программы MIC вызвано случайными ошибками передачи, то это скорее всего редкое событие, которое можно соотнести с наблюдаемым коэффициентом ошибок по битам (BER). С другой стороны, постоянное нарушение MIC скорее всего вызвано несоответствием ключа целостности в передатчике и приемнике и может указывать либо на угрозу безопасности, либо на нарушение процедуры аутентификации и генерирования ключей. В случае постоянного нарушения проверки целостности сообщений, о котором OLT узнает либо напрямую (нарушение MIC в восходящем потоке), либо по отсутствию ожидаемого потока трафика управления от ONU (нарушение MIC в нисходящем потоке), OLT считает это дефектом потери канала PLOAM (LOPCi) или потери канала OMCI (LOOCi) данного ONU и выбирает по своему усмотрению подходящие

меры ослабления последствий, в число которых могут входить повторение аутентификации с использованием того же или альтернативного механизма, блокирование трафика восходящего и нисходящего потоков, деактивация или выключение нарушающего ONU или выполнение процедуры диагностики неисправного ONU.

15.9 Системы XG-PON с пониженной криптостойкостью шифрования данных

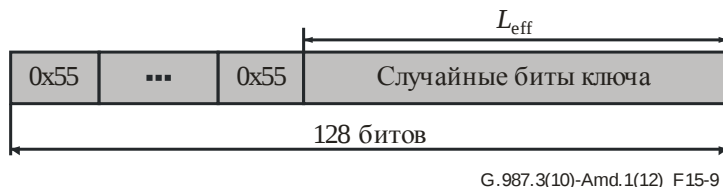
В пункте 15.9.1 вводится понятие эффективной длины ключа. В пункте 15.9.2 содержатся условные требования, обязательные только для систем XG-PON с заданной эффективной длиной ключа менее 128 битов. Для ONU эффективная длина ключа обеспечивается с использованием атрибута эффективной длины ключа (см. пункт 9.13.11 [ITU-T G.988]).

15.9.1 Эффективная длина ключа

Стандартный размер ключа, используемый для шифрования данных AES в XG-PON, составляет 128 битов. В соответствии с требованиями оператора система XG-PON может при желании использовать систему шифрования данных с пониженной криптостойкостью, для чего часть ключа заменяется четко определенным набором битов. Количество случайно сгенерированных битов ключа называется эффективной длиной ключа.

15.9.2 Формат ключа шифрования данных

В системе XG-PON с пониженной криптостойкостью шифрования данных эффективная длина ключа L_{eff} кратна 8 битам, и каждый элемент сети, ответственный за генерирование ключа шифрования данных, заменяет $(128 - L_{\text{eff}})/8$ старших октетов 128-битового ключа значением 0x55, как показано на рисунке 15-9.



**Рисунок 15-9 – Формат ключа шифрования данных
с уменьшенной эффективной длиной**

В системе XG-PON с пониженной криптостойкостью шифрования данных сетевой элемент, ответственный за генерирование ключа шифрования данных, должен иметь возможность сообщать системе управления элементами эффективную длину ключа.

16 Управление энергопотреблением ONU

По целому ряду причин желательно по возможности уменьшить мощность, потребляемую ONU.

- Со временем естественная эволюция технологий ведет к более эффективной реализации заданных функций – тенденция, которая, по крайней мере отчасти, компенсируется повышением уровня функциональных возможностей и быстродействия.
- Если ONU может определить, что интерфейс абонента неактивен, то желательно, чтобы ONU уменьшал расход энергии в цепях, связанных с этим интерфейсом, сохраняя в то же время возможность обнаруживать активность абонента. Подробности данной операции зависят от типа интерфейса.
- Степень возможного снижения потребляемой мощности зависит от приемлемого влияния на обслуживание. Максимально возможная экономия достигается, когда абонент намеренно выключает ONU, например, на ночь или на время отпуски.
- Как правило, допустимо некоторое ухудшение обслуживания в случае общего отказа источника питания переменного тока. Чтобы продлить срок службы резервной батареи, желательно, чтобы ONU уменьшал расход энергии всех цепей, связанных с интерфейсами, за исключением тех, которые считаются обеспечивающими важнейшие услуги. Разные

операторы и потребители могут по-разному определять важнейшие услуги и могут пожелать определить приоритеты в отношении того времени, когда интерфейсы находятся в режиме пониженного питания. Эта функция, называемая сбросом мощности, описывается в [ITU-T G.988].

Вышеупомянутые методы управления энергопотреблением являются предметом проектирования ONU и практики абонентов и операторов и выходят за рамки настоящей Рекомендации.

В этом разделе рассматриваются три дополнительных средства управления энергопотреблением, для которых требуется поддержка на уровне ТС. Один из них называется режимом Doze (дозированный спящий режим), другой – режимом Cyclic sleep (циклический спящий режим), а третий – режимом Watchful sleep (режим бдительного или чуткого сна). Режим Watchful sleep сочетает в себе семантические особенности Doze и Cyclic sleep, в то же время повторно используя состояния и переходы режима Doze на стороне ONU и режима Cyclic sleep на стороне OLT.

Согласование режимов управления энергопотреблением ONU на основе протокола осуществляется с помощью OMCI и может сочетаться с любыми другими способами снижения потребляемой мощности.

Совместимые реализации MCЭ-Т G.987.3 должны:

- реализовать режим Watchful sleep (который посредством настройки параметров сводится к режиму Doze или Cyclic sleep); или
- реализовывать режим Doze; или
- реализовывать режимы Doze и Cyclic sleep.

Конкретные возможности управления энергопотреблением зависят от требований к системе оператора и для каждого ONU согласовываются с помощью OMCI при активации ONU.

16.1 Конфигурация и сигнализация системы управления энергопотреблением

OLT использует OMCI для выявления возможностей управления энергопотреблением ONU и настройки его атрибутов и режимов управления энергопотреблением. Для контроля за режимом управления энергопотреблением данного ONU этот ONU и OLT поддерживают пару конечных автоматов управления энергопотреблением. Конечный автомат ONU и соответствующий конечный автомат OLT работают в режиме частичного согласования состояний. Основной механизм сигнализации, используемый для координирования работы конечных автоматов ONU и OLT, основан на PLOAM-сообщениях. Выходные PLOAM-сообщения генерируются и помещаются в очередь для передачи при переходах между состояниями. Состояния конечных автоматов ONU и OLT можно разделить на два взаимоисключающих подмножества – состояния полной потребляемой мощности и состояния энергосбережения. Выходное сообщение PLOAM генерируется только при переходе между состояниями полной потребляемой мощности и энергосбережения. Если время пребывания в заданном состоянии перехода контролируется таймером, то таймер не запускается до момента фактической передачи сообщения. В качестве вторичного механизма сигнализации, используемого для ускорения перехода ONU в спящий режим или выхода его из этого состояния, в структуре распределения BWmap передается бит индикации принудительного пробуждения.

16.2 Определения параметров управления энергопотреблением

В таблице 16-1 определяются основные интервалы времени, таймеры и счетчики. Обмен параметрами, известными как ONU, так и OLT, производится через OMCI [ITU-T G.988]. Параметры, локальные для ONU или OLT, определяются только для использования в соответствии с нижеследующим описанием.

Таблица 16-1 – Параметры управления энергопотреблением

Параметр	Описание	Кем определяется	Кому известен
Plowpower	Plowpower – это максимальное время, в течение которого ONU пребывает в состоянии LowPower (то есть в состоянии Asleep, Listen или Watch), выраженное количеством кадров по 125 мкс. Пребывание ONU в этих состояниях может быть прервано локальными индикациями пробуждения (LWI) или обнаруженными удаленными событиями	OLT	ONU, OLT
Tlowpower	Локальный таймер ONU. При входе в состояние LowPower (то есть в состояние Asleep, Listen или Watch) ONU инициализирует таймер Tlowpower, присваивая ему значение, равное или меньшее значению Plowpower. Для гарантии того, что ONU будет полностью работоспособен при переходе в состояние Awake через интервал, не превышающий Plowpower, могут потребоваться вторичные внутренние таймеры	ONU	ONU
Iaware	Iaware – это минимальное время, которое ONU проводит в состоянии Awake (то есть SleepAware, DozeAware или WatchAware) до перехода в состояние LowPower, выраженное количеством кадров по 125 мкс. Во время интервала Iaware локальные или удаленные события могут независимо вызывать переход ONU в состояние ActiveHeld вместо возврата в состояние LowPower	OLT	ONU, OLT
Taware	Локальный таймер в ONU, инициализируемый со значением, равным или превышающим значение Iaware, после синхронизации нисходящего потока при переходе в состояние Awake (то есть SleepAware, DozeAware или WatchAware). Taware управляет временем пребывания в состоянии Awake перед возвратом ONU в соответствующее состояние LowPower	ONU	ONU
Itransinit	Время инициализации приемопередатчика для наихудшего случая – время, необходимое ONU для полного восстановления функциональных возможностей при выходе из состояния LowPower, измеряемое количеством PHY-кадров по 125 мкс и известное из проектной документации. Нулевое значение указывает на то, что ONU, находясь в режиме низкого энергопотребления, может без задержки отвечать на разрешение, касающееся пропускной способности	ONU	ONU, OLT
Itxinit	Время инициализации передатчика – время, необходимое ONU для полного восстановления функциональных возможностей при включении передатчика, когда приемник оставался включенным, измеряемое количеством PHY-кадров по 125 мкс. Нулевое значение указывает на то, что ONU, находясь в режиме низкого энергопотребления, может без задержки отвечать на разрешение, касающееся пропускной способности	ONU	ONU, OLT

Таблица 16-1 (окончание)

Параметр	Описание	Кем определяется	Кому известен
Irxcff	Irxcff – это максимальное время, которое OLT может предоставить на ожидание с момента принятия решения о пробуждении ONU, находящегося в одном из режимов низкого энергопотребления, до обретения ONU полной работоспособности, измеряемое количеством PHY-кадров по 125 мкс. Таймер Trxcff ONU и таймер Talrted OLT инициализируются со значением Irxcff	OLT	ONU, OLT
Trxcff	Локальный таймер в ONU. ONU использует этот таймер в состоянии Watch режима Watchful sleep во время проверки сигнала нисходящего потока на наличие индикаций удаленных событий пробуждения для обеспечения того, чтобы время между двумя последовательными проверками не превышало заданного интервала Irxcff	ONU	ONU
Talrted	Локальный таймер для привязки времени, в течение которого конечный автомат OLT остается в состоянии готовности перед переходом в состояние AwakeForced. Таймер Talrted устанавливается в начальное значение не менее Irxcff + Itransinit + круговая задержка распространения + допуски на синхронизацию приемника, нерегулярности разрешений на пропускную способность и время обработки	OLT	OLT
Ter _i	Локальный таймер подтверждения установления связи OLT, определяющий последний момент, в течение которого ожидается поступление пакета восходящего потока от ONU <i>i</i> , когда тот находится в одном из режимов низкого энергопотребления. OLT вновь инициализирует и запускает этот таймер, когда конечный автомат OLT для данного ONU переходит в состояние LowPowerSleep или LowPowerDoze/Watch, и каждый раз при поступлении пакета восходящего потока от ONU, пребывающего в этом состоянии. Если Ter _i сработал, OLT объявляет о нарушении подтверждения относительно установления связи и пытается принудительно активировать ONU. Чтобы определить начальное значение Ter _i , OLT следит за предустановленным интервалом Powpower и любыми возможными эффектами инициализации приемопередатчика, синхронизации и нерегулярностей цикла разрешений, касающихся пропускной способности	OLT	OLT
Ihold	Минимальное время пребывания в состоянии ActiveHeld	OLT	ONU, OLT
Thold	Локальный таймер в ONU, который устанавливается в значение Ihold при передаче сообщения SR(Awake) после перехода в состояние ActiveHeld и обеспечивает минимальное время пребывания в состоянии ActiveHeld	ONU	ONU

16.3 Спецификации конечного автомата управления энергопотреблением

Поведение системы управления энергопотреблением ONU контролируется парой конечных автоматов, размещенных в OLT и ONU. Хотя у конечного автомата OLT набор состояний аналогичен такому набору у конечного автомата ONU, оба они работают лишь с частичным согласованием состояний. Жесткое отслеживание состояний не является целью данного протокола.

16.3.1 Конечный автомат ONU

Состояния системы управления энергопотреблением ONU вместе с их соответствующим семантическим описанием перечислены в таблице 16-2. Набор входных событий представлен в

таблице 16-3. Диаграмма переходов состояний показана на рисунке 16-1. Нормативная спецификация переходов и выходов состояний приведена в таблице 16-4.

Таблица 16-2 – Состояния системы управления энергопотреблением ONU

Состояние	Семантическое описание
ActiveHeld	ONU является устройством, в полной мере реагирующим на события, передающим нисходящий трафик и отвечающим на все распределения пропускной способности. Переходов между состояниями управления энергопотреблением не происходит. Минимальное время пребывания в этом состоянии обеспечивается таймером Thold. При входе в это состояние ONU отправляет PLOAM-сообщение Sleep_Request(Awake). На диаграммах состояний оно сокращенно обозначается как SR(Awake)
ActiveFree	ONU является устройством, в полной мере реагирующим на события, передающим нисходящий трафик и отвечающим на все распределения пропускной способности. Запросы на смену состояний управления энергопотреблением являются локальным решением
Asleep	ONU выключает приемник и передатчик, сохраняя способность к активации по локальным управляющим сигналам. Если это состояние не прервано поступившим локальным сигналом LWI, оно сохраняется в течение заданного интервала времени Powpower. Прежде чем выйти из этого состояния, ONU убеждается в том, что полностью обеспечены его электропитание, синхронизация, а также способность реагирования на трафик и управления им как в нисходящем, так и в восходящем потоках
Listen	Приемник ONU включен, передатчик выключен. ONU слушает сигнал нисходящего потока и ретранслирует нисходящий трафик, сохраняя при этом способность снова активировать передатчик по локальному или дистанционному управляющему сигналу. Если это состояние не прервано поступившим локальным сигналом LWI или приемом от OLT сигнала SA(OFF) или FWI, оно сохраняется в течение заданного интервала времени Powpower. Прежде чем выйти из этого состояния, ONU убеждается в том, что полностью обеспечены его электропитание, а также способность реагирования на трафик и управления им как в нисходящем, так и в восходящем потоках
Watch	Передатчик ONU выключен. ONU периодически включает приемник на короткое время, чтобы проверить сигнал нисходящего потока на индикацию дистанционного пробуждения. Когда сигнал нисходящего потока проверяется, ONU не отвечает на распределения пропускной способности и не ретранслирует нисходящий трафик. Если это состояние не прервано поступившим локальным управляющим сигналом LWI или приемом от OLT сигнала SA(OFF) или FWI, оно сохраняется в течение заданного интервала времени Powpower. Прежде чем выйти из этого состояния, ONU убеждается в том, что обеспечены его полное электропитание, а также способность реагирования на трафик и управления им как в нисходящем, так и в восходящем потоках

Таблица 16-2 (окончание)

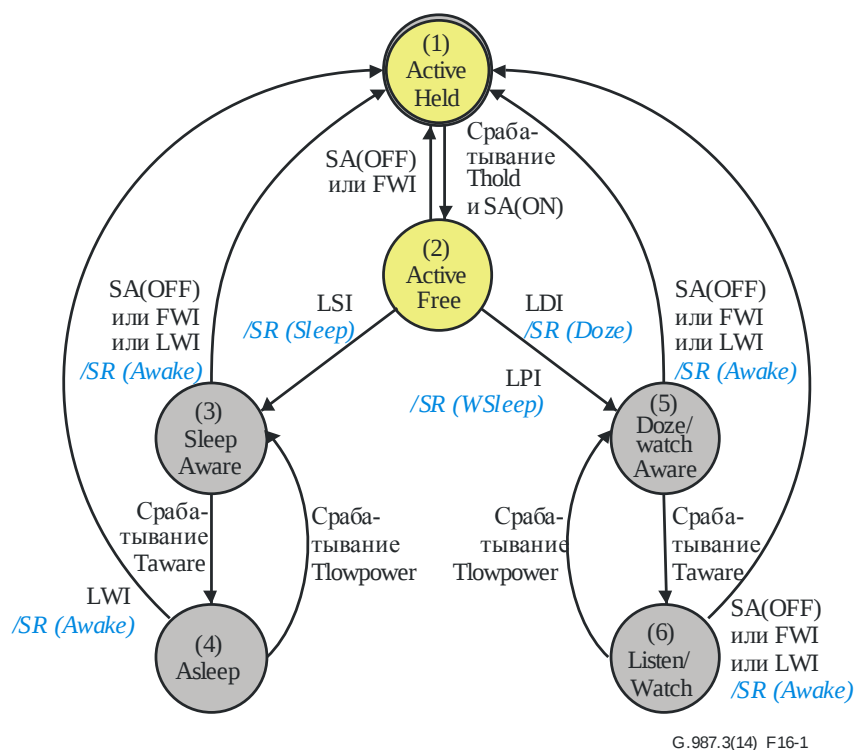
Состояние	Семантическое описание
DozeAware SleepAware WatchAware	Приемник и передатчик ONU остаются включенными. Если это состояние не прервано поступившим локальным управляющим сигналом LWI или приемом от OLT сигнала SA(OFF) или FWI, оно сохраняется в течение заданного интервала времени Iaware. ONU ретранслирует нисходящий трафик и отвечает на все распределения пропускной способности. OLT отвечает за передачу распределений пропускной способности, содержащих флаг PLOAMu, с частотой, достаточной для обеспечения того, чтобы работающий ONU получил хотя бы одно из них

Таблица 16-3 – Входные сигналы конечного автомата ONU

Категории входных сигналов	Входной сигнал	Семантическое описание
События PLOAM	Sleep_Allow(ON)	OLT дает ONU разрешение на реализацию любого согласованного режима управления энергопотреблением и оставляет выбор режима на усмотрение ONU
	Sleep_Allow(OFF)	OLT отзывает разрешение на реализацию любого режима управления энергопотреблением
Событие индикации в битах	Индикация принудительного пробуждения (FWI)	Передавая FWI в виде флага структуры распределения, OLT требует немедленного пробуждения ONU и его перехода в состояние полной потребляемой мощности
События таймеров	Срабатывание Thold	Это событие применяется в состоянии ActiveHeld и контролирует минимальное время пребывания в этом состоянии
	Срабатывание Taware	Это событие применяется в состоянии Aware (то есть SleepAware, DozeAware или WatchAware) и контролирует время пребывания в этом состоянии
	Срабатывание Tlowpower	Это событие применяется в состоянии LowPower (то есть Asleep, Listen или Watch) и контролирует время пребывания в этом состоянии
Локальные события	Локальная индикация спящего режима (LSI)	ONU не имеет локальных причин оставаться в состоянии полной потребляемой мощности и желает перейти в режим Cyclic sleep в рамках системы управления энергопотреблением
	Локальная индикация режима Doze (LDI)	ONU не имеет локальных причин оставаться в состоянии полной потребляемой мощности и желает перейти в режим Doze в рамках системы управления энергопотреблением

Таблица 16-3 (окончание)

Категории входных сигналов	Входной сигнал	Семантическое описание
Локальные события	Локальная индикация пониженной потребляемой мощности (LPI)	ONU не имеет локальных причин оставаться в состоянии полной потребляемой мощности и желает перейти в режим Watchful sleep в рамках системы управления энергопотреблением
	Локальная индикация пробуждения (LWI)	Локальный управляющий сигнал запрещает ONU реализацию любого режима системы управления энергопотреблением
ПРИМЕЧАНИЕ. – События LSI, LDI, LPI и LWI концептуально выводятся из уровня состояний двоичных управляющих сигналов ONU (Full power/Power save) наряду с выбором режима по своему усмотрению (CyclicSleep/Doze/Watch) и соответствуют событиям изменения уровня или, в случае состояния ActiveFree, значению, выбранному во время перехода. Конкретные критерии определения локальных управляющих сигналов остаются вне области применения настоящей Рекомендации. Способность ONU распознавать события LSI/LDI/LPI ограничена режимом/режимами системы управления энергопотреблением, согласованными через OMCI.		

Рисунок 16-1 – Диаграмма переходов состояний ONU
(начальное состояние обведено)

Я.

- (1) На этой диаграмме состояний вершины, соответствующие состояниям (1) и (2), могут быть квалифицированы как напряженные и образуют подграф напряженных состояний, тогда как вершины, соответствующие состояниям (3), (4), (5) и (6), могут быть квалифицированы как расслабленные и образуют подграф расслабленных состояний. Как правило, выходное PLOAM-сообщение генерируется только при переходе состояния, когда пересекается граница подграфа.

- (2) Использование правосторонней ветви конечного автомата зависит от согласований режима энергопотребления между OLT и ONU. Если выбраны режим Doze или режимы Doze и Cyclic sleep, то применяется условие LDI и состояния называются DozeAware (5) и Listen (6). Если выбран режим Watchful sleep, то применяется условие LPI, а состояния называются WatchAware (5) и Watch (6). Тем не менее все переходы остаются в точности теми же, поэтому графически они объединены.

Таблица 16-4 – Таблица переходов и выходов состояний ONU

Входы	Состояния управления энергопотреблением ONU					
	(1) ActiveHeld	(2) ActiveFree	(3) SleepAware	(4) Asleep	(5) DozeAware/ WatchAware	(6) Listen/ Watch
FWI	*	→ (1)	→ (1) /SR(Awake)		→ (1) /SR(Awake)	→ (1) /SR(Awake)
SA (OFF)	*	→ (1)	→ (1) /SR(Awake)		→ (1) /SR(Awake)	→ (1) /SR(Awake)
SA (ON)	→ (2) Если сработал Thold (Примечание)	*	*		*	*
LWI	*	*	→ (1) /SR(Awake)	→ (1) /SR(Awake)	→ (1) /SR(Awake)	→ (1) /SR(Awake)
LSI		→ (3) /SR(Sleep)	*	*		
LDI		→ (5) /SR(Doze)			*	*
LPI		→ (5) /SR(WSleep)			*	*
Срабатывание Tlowpower				→ (3)		→ (5)
Срабатывание Taware			→ (4)		→ (6)	
Срабатывание Thold	→ (2) Если получен сигнал SA(ON) (Примечание)					
* Указывает на автопереход. ■ Затемненная ячейка означает, что этот вход неприемлем для данного состояния. ПРИМЕЧАНИЕ. – ONU после входа в состояние ActiveHeld остается в нем по крайней мере на время Ihold, независимо от значения параметра сообщения SA, указанного OLT. Минимальное пребывание в состоянии ActiveHeld контролируется таймером Thold, который устанавливается в начальное значение Ihold после входа ONU в состояние ActiveHeld. Когда Thold срабатывает, ONU переходит в состояние ActiveFree, если было зафиксировано значение ON параметра сообщения SA или как только получено сообщение SA(ON).						

16.3.2 Конечный автомат OLT

Состояния системы управления энергопотреблением OLT вместе с их соответствующим семантическим описанием перечислены в таблице 16-5. Набор входных событий представлен в таблице 16-6. Диаграмма переходов состояний показана на рисунке 16-2. Нормативная спецификация переходов и выходов состояний приведена в таблице 16-7.

Таблица 16-5 – Состояния системы управления энергопотреблением OLT

Состояние	Семантическое описание
AwakeForced	OLT обеспечивает нормальные распределения для ONU i , ретранслирует нисходящий трафик и ожидает ответа на каждое разрешение, касающееся пропускной способности. OLT объявляет дефект LOB_i при обнаружении заданного количества пропущенных распределений. При переходе в это состояние OLT отправляет PLOAM-сообщение Sleep_Allow(OFF), тем самым отменяя свое разрешение на переход ONU в любой режим с низким энергопотреблением
AwakeFree	OLT обеспечивает нормальные распределения для ONU, ретранслирует нисходящий трафик и готов принять индикацию перехода состояний системы управления энергопотреблением от ONU. При переходе в это состояние OLT отправляет PLOAM-сообщение Sleep_Allow(ON), тем самым давая разрешение на переход ONU в любой согласованный режим с низким энергопотреблением по его усмотрению. OLT ожидает ответа на каждое разрешение, касающееся пропускной способности, и в случае пропуска распределения переходит в состояние AwakeForced, в котором затем может быть объявлено условие LOB_i . Существуют две комбинации стабильных состояний, включающих состояние AwakeFree конечного автомата OLT – конечный автомат ONU может находиться либо в состоянии ActiveFree, либо в состоянии ActiveHeld
LowPowerSleep LowPowerDoze LowPowerWatch	OLT поддерживает ONU в режиме низкого энергопотребления. OLT обеспечивает нормальные распределения для ONU, но ожидает только нерегулярных ответов ONU на разрешения, касающиеся пропускной способности. OLT в состоянии LowPowerDoze пересылает нисходящий трафик; в состояниях LowPowerSleep и LowPowerWatch OLT может накапливать нисходящий трафик. Если таймер T_{er_i} срабатывает до того, как OLT получит пакет от ONU i , OLT фиксирует нарушение в плане подтверждения установления связи и переходит в состояние AwakeForced
AlertedSleep AlertedDoze AlertedWatch	OLT пытается активировать ONU. Отправив сообщение Sleep_Allow(OFF) о переходе в данное состояние, OLT устанавливает бит FWI в каждом распределении для ONU вместе с флагом PLOAMu. OLT пересылает, отбрасывает или накапливает нисходящий трафик для ONU, как это было и во время предыдущего состояния LowPowerDoze/Sleep/Watch. OLT переходит в состояние AwakeForced, если он получает от ONU пакет, содержащий PLOAM-сообщение Sleep_Request(Awake), или если срабатывает таймер Talerted

Таблица 16-6 – Входные сигналы конечного автомата OLT

Категории входных сигналов	Входной сигнал	Семантическое описание
События PLOAM	Sleep_Request(Doze)	ONU информирует OLT о своем намерении использовать режим Doze в рамках системы управления энергопотреблением
	Sleep_Request(Sleep)	ONU информирует OLT о своем намерении использовать режим Cyclic sleep в рамках системы управления энергопотреблением
	Sleep_Request(WSleep)	ONU информирует OLT о своем намерении использовать режим Watchful sleep в рамках системы управления энергопотреблением
	Sleep_Request(Awake)	ONU информирует OLT о своем намерении оставаться в режиме полной потребляемой мощности
События таймера	Срабатывание Ter _i	Это событие происходит только в состояниях LowPowerDoze/Sleep/Watch, указывая на нарушение ONU заданных временных параметров режима пониженного энергопотребления
	Срабатывание Talerted	Это событие происходит только в состояниях AlertedDoze/Sleep/Watch, указывая на неудачную попытку ONU перейти в режим пробуждения по требованию OLT
Локальные события	Локальная индикация пробуждения OLT-LWI	Локальная индикация пробуждения и ее инверсия указывают соответственно на наличие и отсутствие локального управляющего сигнала для сохранения ONU в режиме полной потребляемой мощности
События интерфейса	Пропуск распределения	Отсутствие действительного оптического сигнала от ONU в пределах группы последовательных распределений для этого ONU
ПРИМЕЧАНИЕ. – Событие OLT-LWI и его инверсия концептуально выводятся из уровня состояний двоичных управляющих сигналов OLT и соответствуют изменению уровней этих сигналов. Конкретные критерии определения локальных управляющих сигналов остаются вне области применения настоящей Рекомендации.		

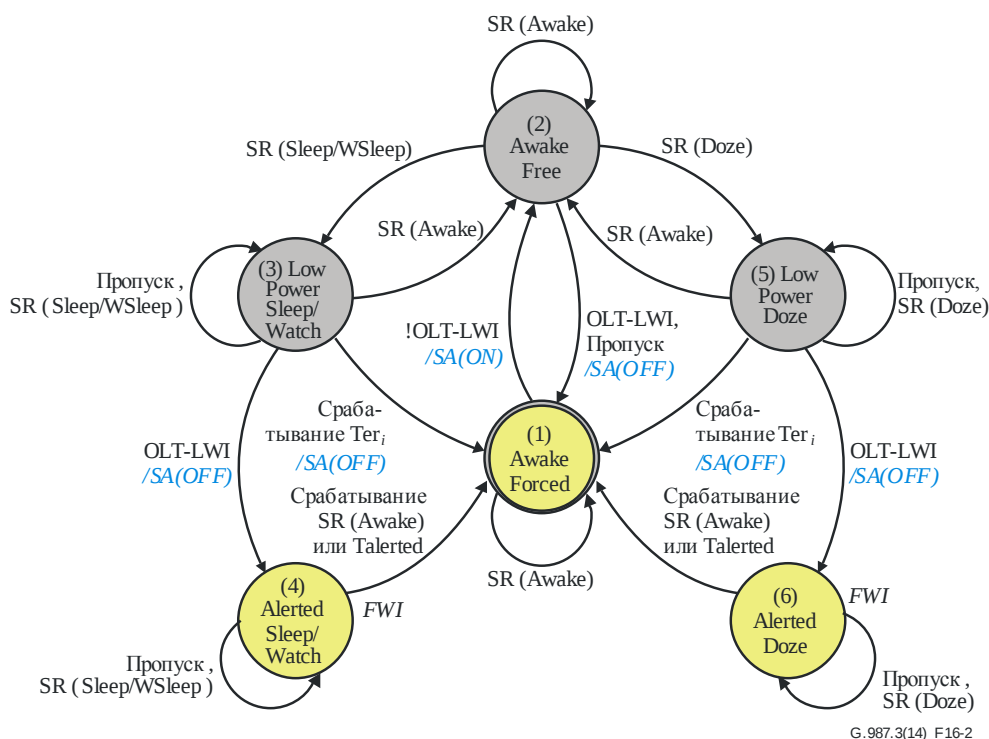


Рисунок 16-2 – Диаграмма переходов состояний OLT (начальное состояние обведено)

ПРИМЕЧАНИЯ.

- (1) На этой диаграмме состояний вершины, соответствующие состояниям (1), (4) и (6), могут быть квалифицированы как напряженные и образуют подграф напряженных состояний, тогда как вершины, соответствующие состояниям (2), (3) и (5), могут быть квалифицированы как расслабленные и образуют подграф расслабленных состояний. Как правило, выходное PLOAM-сообщение генерируется только при переходе состояния, когда пересекается граница подграфа.
- (2) Использование левосторонней ветви конечного автомата зависит от согласований режима энергопотребления между OLT и ONU. Если выбран режим Doze или режимы Doze и Cyclic sleep, то применяется условие SR(Sleep), и состояния называются LowPowerSleep (3) и AlertedSleep (4). Если выбран режим Watchful sleep, применяется условие SR(WSleep), а состояния называются LowPowerWatch (3) и AlertedWatch (4). Тем не менее все переходы и семантические описания состояний остаются в точности теми же, поэтому графически они объединены.

Таблица 16-7 – Таблица переходов и выходов состояний OLT

Входы	Состояния управления энергопотреблением OLT					
	(1) AwakeForced	(2) AwakeFree	(3) LowPower Sleep/Watch	(4) Alerted Sleep/Watch/ FWI	(5) LowPower Doze	(6) Alerted Doze/ FWI
SR(Awake)	*	*	→ (2)	→ (1)	→ (2)	→ (1)
SR(Sleep/WSleep)	* /SA(OFF) (Примечание 1)	→ (3)	*	*	→ (1) /SA(OFF) (Примечание 2)	→ (1) /SA(OFF) (Примечание 2)

Таблица 16-7 (окончание)

Входы	Состояния управления энергопотреблением OLT					
	(1) AwakeForced	(2) AwakeFree	(3) LowPower Sleep/Watch	(4) Alerted Sleep/Watch/ FWI	(5) LowPower Doze	(6) Alerted Doze/ FWI
SR(Doze)	* /SA(OFF) (Примечание 1)	→ (5)	→ (1) /SA(OFF) (Примечание 2)	→ (1) /SA(OFF) (Примечание 2)	*	*
Пропуск распределения	*	→ (1) /SA(OFF)	*	*	*	*
OLT-LWI ON	*	→ (1) /SA(OFF)	→ (4) /SA(OFF)	*	→ (6) /SA(OFF)	*
OLT-LWI OFF	→ (2) /SA(ON)	*	*	*(Примечание 3)	*	*(Примечание 3)
Срабатывание Talerted				→ (1)		→ (1)
Срабатывание Ter _i			→ (1) /SA(OFF)		→ (1) /SA(OFF)	
* Указывает на автопереход. ■ Затемненная ячейка означает, что этот вход неприемлем для данного состояния. ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Исключение из правила подграфов; выходной сигнал может содействовать стабилизации конечного автомата в том случае, если данное условие вызвано потерянными сообщением SA(OFF). Выходной сигнал на диаграмме FSM не показан. ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Прямые переходы между режимами Doze и Cyclic sleep запрещены. Когда OLT получает запрос на выполнение такого перехода, он пытается восстановить синхронизацию конечного автомата путем пробуждения ONU. Для сохранения компактности эти переходы не показаны на диаграмме. ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Это ситуация, когда OLT инициирует пробуждение, но сигнал OLT-LWI отключается до пробуждения ONU. В этом случае OLT, вместо того чтобы отменить процесс пробуждения и попытаться немедленно вернуться в состояние энергосбережения, настаивает на пробуждении ONU с намерением вновь войти в состояние энергосбережения через состояния AwakeForced и AwakeFree.						

16.4 Операции управления в режиме низкого энергопотребления

Устройство ONU может принимать и обрабатывать нисходящий трафик управления по любому из трех каналов, описываемых в пункте 6.3, за исключением случаев, когда оно находится в состоянии LowPower (Asleep или Watch) и его приемник выключен. За информирование о времени, когда ONU сможет получить нисходящий трафик управления или столкнется с возможностью неполучения такого трафика, отвечает OLT.

Если ONU получает встроенные команды OAM, такие как запросы DBRu или PLOAMu, когда он не может ответить немедленно, то есть когда он находится в состоянии LowPower, но его приемник включен, он игнорирует эти команды. За введение поправки на дополнительную задержку ответа, когда OLT отправляет PLOAM- или OMCI-команды ONU, который может оказаться не в состоянии ответить в течение нормального интервала времени, отвечает OLT.

Для OLT разумно будет вызвать принудительную активацию ONU перед выполнением операций управления.

OLT разрешено отправлять однонаправленные передачи управления, включая PLOAM-сообщения Profile, Deactivate_ONU-ID, Disable_Serial_Number и Sleep_Allow, в любое время. OLT должен быть готов к возможности того, что ONU в спящем режиме не получит эту передачу.

Для целей настоящего раздела ONU становится объектом управления энергопотреблением только тогда, когда он находится в состоянии O5. Когда OLT известно, что ONU не находится в состоянии O5, например если ONU только что обнаружен или еще не зарегистрирован, нормальные операции определения дальности и присвоения происходят независимо от модели состояний системы энергосбережения.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Возможно, что ONU, находящиеся в состоянии O1 или O2, тоже целесообразно переводить в состояние Doze или Sleep для экономии электроэнергии в ожидании их включения. Для этого потребовалась бы гораздо более простая модель состояний и не потребуются обмен информацией между OLT и ONU, внешне воспринимаемый просто как замедленное обнаружение. Такая возможность выходит за рамки области применения настоящей Рекомендации.

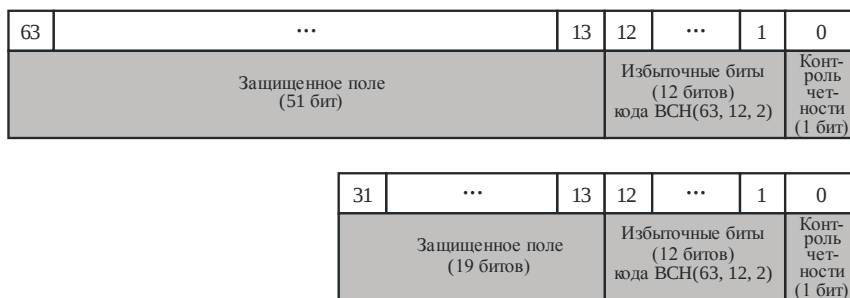
Приложение А

Декодирование гибридного кода коррекции ошибок (НЕС) и последовательность скремблера

(Это Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

А.1 Декодирование НЕС

Структура гибридного кода коррекции ошибок (НЕС) показана на рисунке А.1. Следует отметить, что НЕС используется в нескольких местах XG-PON. В заголовке XGTC он применяется к защищенному полю из 19 битов с образованием общей структуры из 32 битов. В приложениях BWmap и XGEM он применяется к защищенному полю из 51 бита с образованием общей структуры из 64 битов. Для целей расчета НЕС 19-битовое защищенное поле предваряется 32 нулевыми битами (которые не передаются).



G.987.3(10)_FA.1

Рисунок А.1 – Структура гибридного кода коррекции ошибок, демонстрирующая детали 13-битового поля контроля ошибок заголовка

НЕС представляет собой код с возможностью исправления двойных ошибок и обнаружения тройных ошибок. Он состоит из двух частей. Первая часть – это код BCH(63, 12, 2). Порождающий многочлен для этого кода имеет вид $x^{12} + x^{10} + x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$. Этот код применяется к защищенному полю (длиной 51 бит), так что 63-битовый результат кратен порождающему многочлену. Свойства этого кода таковы, что каждой единичной или двойной ошибке соответствует уникальный 12-битовый синдром. Таким образом все подобные ошибки можно исправить. Кроме того, тройные ошибки могут образовывать синдромы, соответствующие синдромам двойных ошибок или запрещенным кодам, но синдрома тройной ошибки, соответствующего синдрому единичной ошибки, не существует. Это последнее свойство позволяет использовать один бит четности для обнаружения и исключения тройных ошибок.

Таблица синдромов ошибок для этого кода приведена в таблице А.1. Следует отметить, что бит в позиции 63 – это первый бит защищенного 51-битового поля, а бит в позиции 1 следует за последним битом НЕС. Позиция 0 (последний бит) зарезервирована для бита контроля четности. В случае короткой структуры первый бит защищенного 19-битового поля является битом в позиции 31.

Таблица А.1 – Синдромы ошибок НЕС

Позиция ошибоч- ного бита	Синдром (по основа- нию 16)	Позиция ошибоч- ного бита	Синдром (по основа- нию 16)	Позиция ошибоч- ного бита	Синдром (по основа- нию 16)	Позиция ошибоч- ного бита	Синдром (по основа- нию 16)
63	A9C	47	A09	31	B04	15	1DD
62	54E	46	F98	30	582	14	A72
61	2A7	45	7CC	29	2C1	13	539
60	BCF	44	3E6	28	BFC	12	800
59	F7B	43	1F3	27	5FE	11	400

Таблица А.1 – Синдромы ошибок НЕС

Позиция ошибоч- ного бита	Синдром (по основа- нию 16)	Позиция ошибоч- ного бита	Синдром (по основа- нию 16)	Позиция ошибоч- ного бита	Синдром (по основа- нию 16)	Позиция ошибоч- ного бита	Синдром (по основа- нию 16)
58	D21	42	A65	26	2FF	10	200
57	C0C	41	FAE	25	BE3	9	100
56	606	40	7D7	24	F6D	8	080
55	303	39	977	23	D2A	7	040
54	B1D	38	E27	22	695	6	020
53	F12	37	D8F	21	9D6	5	010
52	789	36	C5B	20	4EB	4	008
51	958	35	CB1	19	8E9	3	004
50	4AC	34	CC4	18	EE8	2	002
49	256	33	662	17	774	1	001
48	12B	32	331	16	3BA	0	Н/д (четность)

Поскольку существует 63 уникальных синдрома единичной ошибки, общее количество уникальных синдромов двойной ошибки составляет 1953. Поскольку в 12-битовом пространстве имеется 4095 возможных синдромов, остаются 2079 неиспользуемых кодов. Эти неиспользуемые коды считаются запрещенными, поскольку они могут быть результатом только трех или более ошибок.

Вторая часть НЕС – это простой бит четности. Этот бит четности устанавливается так, чтобы общее количество единиц в защищенном поле + НЕС было четным. Таким образом этот бит четности указывает, было ли в заголовке нечетное количество ошибок. Следует отметить, что в вычислении кода ВСН бит четности не участвует, но код ВСН участвует в вычислении бита четности.

В таблице А.2 приведено несколько примеров действительных 64-битовых структур, защищенных кодом НЕС. Они могут использоваться для проверки реализации процессов кодирования и декодирования.

Таблица А.2 – Действительные 64-битовые структуры, защищенные кодом НЕС

58472D504F4E0A55	204B616E692C1748	69726F616B690C8B
2077617320701574	204A6F6520530247	204D756B61690A22
726F64756365128E	6D6974682C201A23	2C20446176651A73
64207468616E1A18	5269636861720A6E	20486F6F642C0F79
6B7320746F201705	6420476F6F64176E	20576569204C04F2
416E6E6120430915	736F6E2C20440F00	696E2C20616E05E9

Таблица А.2 (окончание)

75692C204661159F	656E6973204B1780	64206F6620631C47
6272696365200372	686F74696D731F44	6F757273652C0405
426F75726761033D	6B792C205975155F	204672616E6B0601
72742C204A751760	616E7169752005E8	20456666656E1897
6E2D6963686908A8	4C756F2C204817D2	6265726765720486

В таблице А.3 приведено несколько примеров действительных 32-битовых структур, защищенных кодом НЕС.

Таблица А.3 – Действительные 32-битовые структуры, защищенные кодом НЕС

58470E66	696E07CC	6B201FCB
2D5011A6	20731B4E	4861190A
4F4E03DA	7069115E	6A6411EA
20680AD7	746518A3	75631541
6170070D	206F1E9B	7A650166
70651D5D	66200F13	6E691F63
6E651360	4D61022E	612E011B
642018D4	72650A9A	2020162F

НЕС может декодироваться в приемнике путем вычисления синдрома и проверки на четность с последующим применением описываемой ниже логики.

В таблице А.4 представлены результаты проверки НЕС, показывающие максимальную вероятность комбинации базовых событий и возможность использования заголовка (после соответствующей коррекции ошибок) для каждой комбинации результатов декодирования блочного кода ВСН и проверки четности.

**Таблица А.4 – Проверка НЕС (максимальная вероятность событий/
возможность использования поля)**

Результат декодирования блока ВСН	Результат проверки четности	
	Удовлетворительный	Неудовлетворительный
Ошибки отсутствуют	Без ошибок/ защищенное поле в порядке	Ошибка бита четности/ защищенное поле в порядке
Единичная ошибка	Единичная ошибка блочного кода + ошибка четности/ защищенное поле исправимо с помощью ВСН	Единичная ошибка блочного кода/ защищенное поле исправимо с помощью ВСН
Двойная ошибка	Двойная ошибка блочного кода/ защищенное поле исправимо с помощью ВСН	Тройная ошибка блочного кода/ защищенное поле неисправимо
Неисправимо	Ошибки нескольких битов/ защищенное поле неисправимо	Ошибки нескольких битов/ защищенное поле неисправимо

А.2 Последовательность скремблера

В таблице А.5 приведены первые 256 битов последовательности скремблера в двоичном и шестнадцатеричном представлениях (предполагается, что счетчик суперкадра равен нулю).

Таблица А.5 – Пример последовательности скремблера

0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0
0001 1	1111 F	1100 C	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0011 3	1111 F
1000 8	0000 0	0000 0	0111 7	1111 F	0000 0	0000 0	0000 0	0111 7	1111 F	0000 0	0000 0
0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0000 0	0001 1	0000 0	0010 2	0000 0	0000 0	0001 1	1111 F
1100 C	0000 0	0000 0	0010 2	0000 0	0100 4	0000 0	0000 0	0111 7	1111 F	0000 0	0000 0
0000 0	0011 3	1111 F	1000 8								

Приложение В

Упреждающая коррекция ошибок с использованием укороченных кодов Рида–Соломона

(Это Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

Материалы, представленные в этом Приложении, основаны на [ITU-T G.709].

В.1 Полиномиальное представление по полю Галуа

Двоичный примитивный многочлен $f(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ с корнем α , $f(\alpha) = 0$, определяет конечное поле:

$$\text{GF}(2^8) = \{0, 1, \alpha^1, \dots, \alpha^{254}\}$$

Вектор из n 8-битовых символов

$$(B_{n-1}, B_{n-2}, \dots, B_1, B_0)$$

может быть представлен как многочлен с коэффициентами из $\text{GF}(2^8)$:

$$B(z) = B_{n-1}(\alpha)z^{n-1} + B_{n-2}(\alpha)z^{n-2} + B_1(\alpha)z^1 + B_0(\alpha),$$

где:

$$B_j(\alpha) = b_{7j} \cdot \alpha^7 + b_{6j} \cdot \alpha^6 + \dots + b_{1j} \cdot \alpha^1 + b_{0j} \cdot \alpha^0$$

и $(b_{7j}, b_{6j}, \dots, b_{0j})$ – биты символа B_j .

В.2 Структура кодового слова RS(248, 232)

Порождающий многочлен

$$G(z) = \prod_{i=0}^{15} (z - \alpha^i).$$

Кодовое слово FEC состоит из 232 информационных байтов и 16 байтов четности и представлено многочленом относительно z с коэффициентами из $\text{GF}(2^8)$:

$$C(z) = I(z) \cdot z^{16} + R(z).$$

Информационные байты представлены выражением

$$I(z) = D_{231} \cdot z^{231} + D_{230} \cdot z^{230} + \dots + D_0 \cdot z^0,$$

где D_j (j – от 0 до 231) – это информационный байт, представленный выражением

$$D_j = d_{7j} \cdot \alpha^7 + d_{6j} \cdot \alpha^6 + \dots + d_{1j} \cdot \alpha + d_{0j}.$$

Полиномиальное представление символов четности

$$R(z) = R_{15} \cdot z^{15} + R_{14} \cdot z^{14} + \dots + R_1 \cdot z^1 + R_0$$

рассчитывается следующим образом:

$$R(z) = I(z) \cdot z^{16} \bmod G(z),$$

где $\bmod$ – это расчет по модулю согласно порождающему многочлену кода $G(z)$ с элементами из $\text{GF}(2^8)$.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Если число L информационных байтов, доступных для кодового слова, меньше 232, то для $(L - 232)$ коэффициентов более высокого порядка $I(z)$ устанавливаются нули во всех разрядах, и они не передаются по линии связи.

Порядок передачи представлен на рисунке В.1.

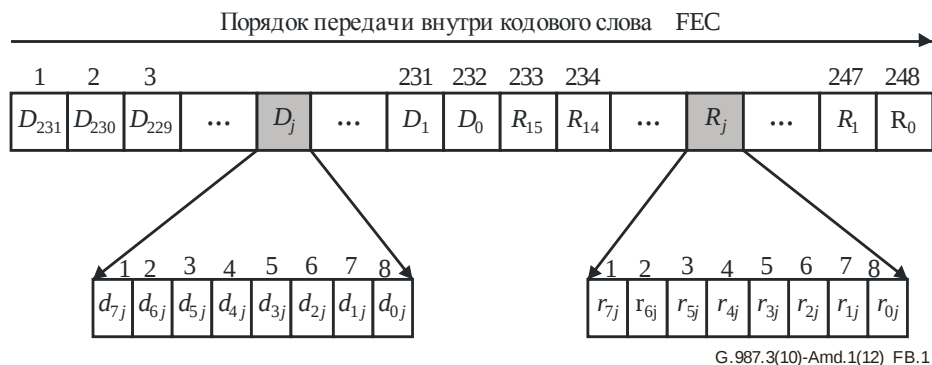


Рисунок В.1 – Порядок передачи кодового слова RS(248, 232)

В.3 Структура кодового слова RS(248, 216)

Порождающий многочлен

$$G(z) = \prod_{i=0}^{31} (z - \alpha^i).$$

Кодовое слово FEC состоит из 216 информационных байтов и 32 байтов четности и представлено многочленом относительно z с коэффициентами из $GF(2^8)$:

$$C(z) = I(z) \cdot z^{32} + R(z).$$

Информационные байты представлены выражением

$$I(z) = D_{215} \cdot z^{215} + D_{214} \cdot z^{214} + \dots + D_0 \cdot z^0,$$

где D_j (j = от 0 до 215) – это информационный байт, представленный выражением

$$D_j = d_{7j} \cdot \alpha^7 + d_{6j} \cdot \alpha^6 + \dots + d_{1j} \cdot \alpha + d_{0j}.$$

Полиномиальное представление символов четности

$$R(z) = R_{31} \cdot z^{31} + R_{30} \cdot z^{30} + \dots + R_1 \cdot z^1 + R_0$$

рассчитывается следующим образом:

$$R(z) = I(z) \cdot z^{32} \bmod G(z),$$

где $\bmod$ – это расчет по модулю согласно порождающему многочлену кода $G(z)$ с элементами из $GF(2^8)$.

Порядок передачи представлен на рисунке В.2.

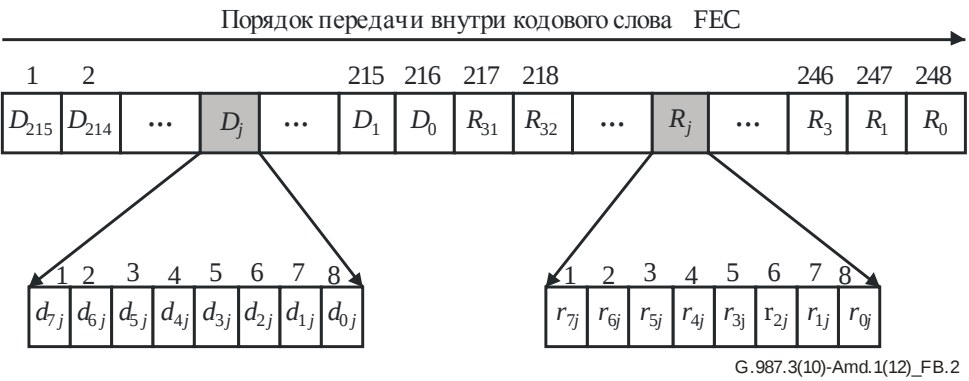


Рисунок В.2 – Порядок передачи кодового слова RS(248, 216)

Приложение С

Надежная взаимная аутентификация через OMCI

(Это Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

При использовании этого метода для выполнения трехэтапной аутентификации на основе хеш-функций применяется управляемый объект (ME) расширенного контроля безопасности, определяемый в пункте 9.13.11 [ITU-T G.988]. OLT после регистрации ONU может инициировать процесс взаимной аутентификации, составив случайный запрос от OLT. Детали соответствующей диаграммы состояний ME и диаграммы состояний аутентификации приведены в пункте 9.13.11 [ITU-T G.988].

После успешной взаимной аутентификации (или повторной аутентификации) через OMCI устройства OLT и ONU совместно используют главный ключ сеанса (MSK), определяемый следующим образом:

$MasterSessionKey = SelectedHashFunction(PSK, OLT\ random_challenge \mid ONU\ random_challenge)$,

где $SelectedHashFunction()$ – это хеш-функция, выбранная ONU из списка, предоставленного OLT, PSK – это предварительно распространенный общий (pre-shared) секретный ключ OMCI-аутентификации, а "|" означает конкатенацию байтов.

После этой взаимной аутентификации MSK готов к использованию для выработки ключей, как указано в пункте 15.3.

Приложение D

Надежная взаимная аутентификация на основе стандарта IEEE 802.1X

(Это Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

D.1 Введение

IEEE 802.1X – это протокол для аутентификации канального уровня, управления доступом к портам и создания ключей. Конкретные учетные данные, используемые для аутентификации (например, пароли, открытые ключи и т. д.), не входят в стандарт [IEEE 802.1X]. Вместо этого кадры IEEE 802.1X инкапсулируют пакеты расширяемого протокола аутентификации IETF (EAP), который поддерживает разнообразные типы учетных данных (например, пароли, открытые ключи на основе RSA, смарт-карты и т. д.), а также механизмы согласования возможностей и принципов аутентификации. IEEE 802.1X и EAP описываются в документах [IEEE 802.1X], [IETF RFC 3748] и [IETF RFC 5247].

Следует отметить, что функции IEEE 802.1X, поддерживаемые в пунктах 9.3.14–9.3.17 [ITU-T G.988], предназначены для того, чтобы позволить надежному ONU аутентифицировать непроверенные CPE. Они не связаны с аутентификацией на основе IEEE 802.1X, описываемой в этом Приложении.

D.1.1 Сетевая модель для аутентификации по [IEEE 802.1X]

На рисунке D.1 показана общая архитектура аутентификации [IEEE 802.1X] для XG-PON.

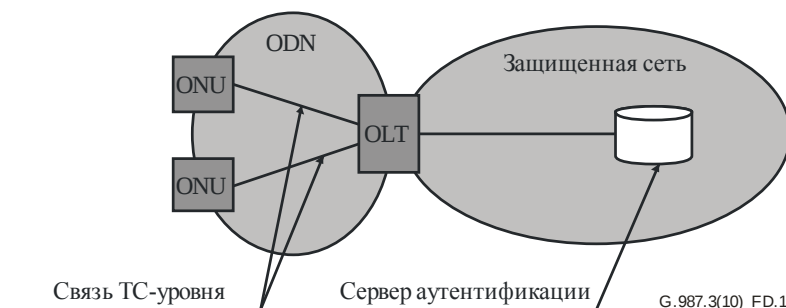


Рисунок D.1 – Аутентификация на основе [IEEE 802.1X] в XG-PON

В этой модели:

- ONU поддерживают физически незащищенную связь ТС-уровня с OLT через ODN;
- OLT поддерживает физически защищенную или логически защищенную связь с сервером аутентификации. Связь между OLT и сервером аутентификации обычно (но не обязательно) осуществляется с использованием протокола для реализации политики, такого как RADIUS. Сервер аутентификации может быть физически совмещен с OLT.

Протокол IEEE 802.1X используется для взаимной аутентификации OLT (который выступает в роли аутентификатора – IEEE 802.1X) и ONU (запрашивающее устройство – IEEE 802.1X). После успешной аутентификации OLT обеспечивает полноценное соединение сети с аутентифицированным ONU. Успешный процесс аутентификации приводит к созданию главного ключа сеанса (MSK), который затем используется для защиты последующей выработки ключей между OLT и ONU.

D.1.2 Учетные данные для аутентификации XG-PON с использованием стандарта [IEEE 802.1X]

Механизм EAP [IEEE 802.1X] поддерживает разнообразные учетные данные для аутентификации. Каждый поддерживаемый тип учетных данных связан с названием метода EAP и типом EAP. Актуальный список учетных данных и соответствующих типов EAP ведется по адресу <http://www.iana.org/assignments/eap-numbers>.

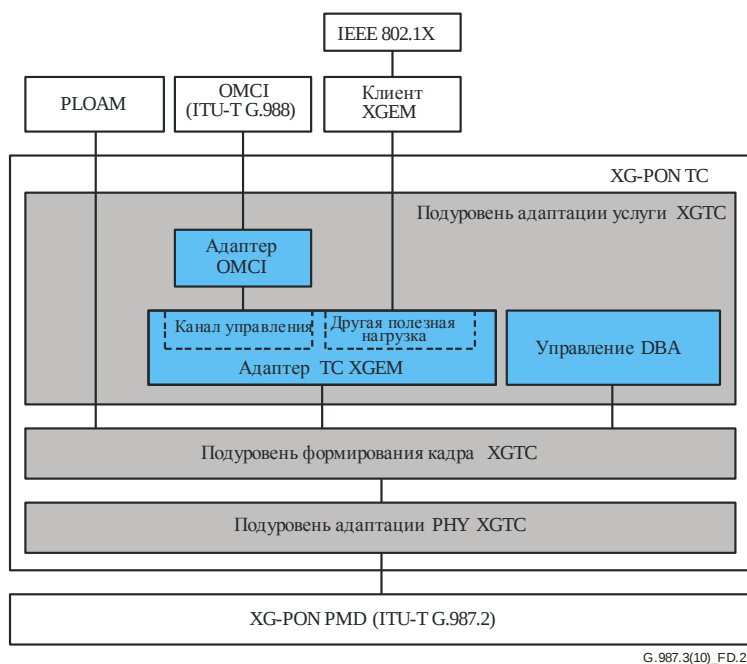
Протоколы XG-PON позволяют использовать EAP любого типа в зависимости от местной политики оператора. Однако для XG-PON нельзя использовать тип EAP, который не поддерживает взаимную аутентификацию и создание главного ключа.

Чтобы гарантировать совместимость, во всех устройствах OLT и ONU в системе XG-PON, поддерживающих аутентификацию [IEEE 802.1X], реализован подход EAP-GPSK [IETF RFC 5433], обеспечивающий аутентификацию пользователей на основе предварительно распространенных общих ключей (то есть паролей, которые могут быть распределены пользователям по телефону или с помощью какого-либо другого внеполосного механизма). Идентификаторы пользователей и соответствующие предварительно распространенные общие ключи предоставляются как в устройства ONU, так и на сервер аутентификации в порядке, определяемом каждой реализацией.

Некоторые операторы могут быть заинтересованы в аутентификации устройств на основе криптографии с открытым ключом. OLT и ONU в таких системах реализуют подход EAP-TLS [IETF RFC 5216]. Идентификаторы пользователей и соответствующие сертификаты предоставляются как в устройства ONU, так и на сервер аутентификации в порядке, определяемом каждой реализацией.

D.2 Стековая модель для аутентификации XG-PON с использованием [IEEE 802.1X]

Протокол [IEEE 802.1X] логически располагается над клиентом XGEM и ниже клиентов MAC в стеке XG-PON (как для ONU, так и для OLT).



G.987.3(10)_FD.2

Рисунок D.2 – Стековая модель аутентификации IEEE 802.1X

Перед аутентификацией протокол [IEEE 802.1X] блокирует пользовательские Ethernet-пакеты и не передает их клиентам MAC. После успешной аутентификации ONU и OLT кадры передаются между клиентами MAC и уровнем TC.

Даже когда ONU не аутентифицирован, на уровнях PLOAM и OMCI происходит свободный обмен кадрами, поскольку в стеке они находятся ниже объекта IEEE 802.1X.

D.3 Поведение на входе в сеть

OLT после завершения процесса активации ONU (см. раздел 12) и до возможного начала передачи любого реального трафика из ONU может запустить процедуру IEEE 802.1X (в зависимости от локальной политики).

После регистрации ONU и до обмена любым пользовательским трафиком OLT реализует обмен IEEE 802.1X для аутентификации ONU (путем отправки идентификационного кадра запроса расширяемого протокола аутентификации по сети ЛВС (EAPOL) в аутентифицируемый ONU). OLT отбрасывает

весь трафик Ethernet-пакетов, исходящий из ONU, за исключением кадров EAPOL, необходимых для аутентификации IEEE 802.1X. Весь трафик, генерируемый ONU, OLT начинает принимать только после успешного завершения аутентификации IEEE 802.1X. Признаком успешного завершения аутентификации служит передача или прием сообщения EAP-Success.

На рисунке D.3 иллюстрируется инкапсуляция пакетов EAPOL IEEE 802.1X в кадры XGEM.

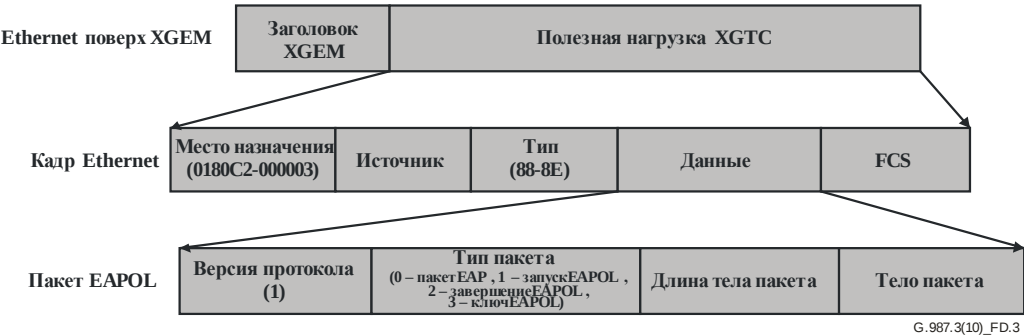


Рисунок D.3 – Инкапсуляция пакетов EAPOL в XGEM

После успешной взаимной аутентификации на основе протокола IEEE 802.1X OLT и аутентифицированный ONU обладают общим секретным ключом длиной не менее 64 октетов в зависимости от типа EAP. 16 старших октетов общего секретного ключа используются в качестве MSK для процедуры выработки ключей, как указано в пункте 15.3.

Приложение Е

Обслуживание PON-ID

(Это Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

Реализация этого Приложения необязательна. Системы XG-PON, OLT и ONU ITU-T G.987, необходимые для поддержки положений настоящего Приложения, называются здесь совместимыми. Соответствие ONU требованиям этого Приложения можно определить через OMCI (см. пункт 9.1.1 [ITU-T G.988]).

Е.1 Введение

В этом Приложении содержатся положения, позволяющие персоналу на местах считывать идентификатор порта PON и показания введенной мощности в сети, взятые из концепции контроля оптического уровня, определяемой в [b-ITU-T G.984.2A2], и применимые к возможностям оптического модуля XG-PON. Указанный метод определяет формат структуры PON-ID. Сравнение локально измеренной оптической мощности и отображения источника введенной мощности, закодированного в поле PON-ID, обеспечивают операторам возможность различать потери оптоволоконной линии, вызванные колебаниями введенной мощности. Предполагается унификация кода с существующими результатами измерения мощности, описываемыми в [ITU-T G.988], а также его согласование с [b-SFF SFF8472], где определена информация, присутствующая в интерфейсе показателя мощности принятого сигнала (RSSI) соответствующих оптоэлектронных преобразователей в реализациях OLT.

Е.2 Структура PON-ID

Система, соответствующая требованиям настоящего Приложения, должна поддерживать структуру PON-ID согласно следующему определению, которое заменяет пункт 10.1.1.3.

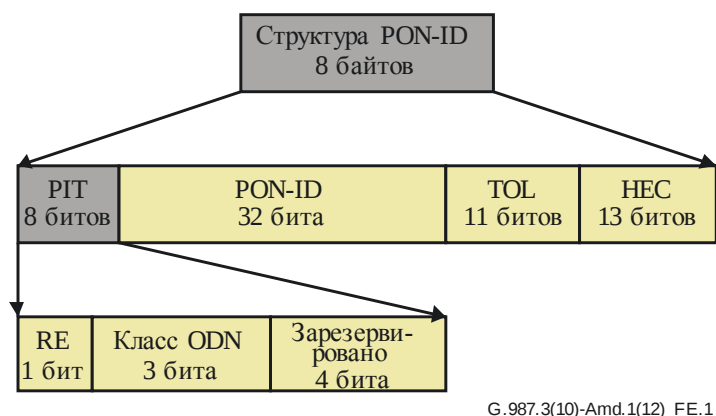


Рисунок Е.1. Структура PON-ID

Структура PON-ID (см. рисунок Е.1) содержит следующие поля.

Тип PON-ID (PIT) (8 битов, статический, заданный оператором) – индикация архитектуры ODN, источника указанной введенной мощности и класса ODN. Поле типа PON-ID (PIT) далее подразделяется следующим образом:

флаг RE (1 бит) – указывает, содержит ли поле оптического уровня передачи (TOL) введенную мощность OLT или расширителя;

класс ODN (3 бита) – определяет номинальные оптические параметры приемопередатчика в соответствии с классом ODN, как указано в [ITU-T G.987.2], в следующем коде;

Значение кода	Класс бюджета ODN
000	N1
001	N2a
010	N2b
011	E1
100	E2a
101	E2b
110	Зарезервирован
111	Зарезервирован

зарезервировано (4 бита) – биты зарезервированы для будущего использования; установлены в 0000, если не указано иное.

PON-ID (32 бита, статический, задается оператором) – любое значение, представляющее интерес для оператора, которое может, например, отражать установленный план логических адресов.

TOL (11 битов, динамический, поддерживаемый системой) – оптический уровень передачи, показание текущей введенной мощности приемопередатчика соответствующего элемента сети. Его значение представляет собой целое число, отнесенное к 1 мкВт (то есть нулевое значение соответствует –30 дБм) с дискретностью 0,1 дБ. Значение по умолчанию 0x7FF указывает, что данный интерфейс PON не поддерживает уровень TOL. Это кодирование рассчитано на поддержку всего набора заданных классов ODN XG-PON (N1, N2a, N2b, E1, E2a, E2b) и опций расширителя, охватывающих диапазон введенной мощности приемопередатчика от +2 дБм до +16,5 дБм.

НЕС (13 битов, динамически вставляется передатчиком) – комбинация кода BCH(63, 12, 2), применяемого к 63 начальным битам структуры SFC, и одного бита четности. Подробная информация о составе и проверке НЕС приведена в Приложении А настоящей Рекомендации.

Приложение F

Расширенные возможности ослабления воздействия вредоносных ONU

(Это Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

Соблюдение требований этого Приложения обязательно для всех новых реализаций. Системы XG-PON, OLT и ONU ITU-T G.987, поддерживающие положения настоящего Приложения, называются здесь совместимыми.

F.1 Введение

Настоящее Приложение содержит положения, которые позволяют системе XG-PON смягчить ситуацию, когда ONU демонстрирует вредоносное поведение на этапе обнаружения процесса активации, прежде чем определен его серийный номер и до того, как ему будет присвоен ONU-ID. Положения настоящего Приложения позволяют OLT, обнаружившему вредоносные помехи в PON, выборочно отключать конкретные ONU на этапе обнаружения в процессе активации.

F.2 Дополнительный код типа PLOAM-сообщений, связанных с операцией выключения

Совместимые OLT и совместимые ONU поддерживают PLOAM-сообщение типа Disable_Serial_Number, определение которого отличается от описания в пункте 11.3.1 и спецификации формата в пункте 11.3.3.5, как указано ниже.

ИД типа сообщения	Имя сообщения	Функция	Побудительная причина	Действие на приеме
0x06	Disable_Serial_Number	Вещательное сообщение для выключения/включения заданного устройства ONU	По усмотрению OLT	Варианты выключения: переводит указанный ONU, ONU, находящийся на этапе обнаружения, или все ONU в состояние Emergency Stop. Выключенный ONU не может вести передачу. Варианты включения: переводит указанный ONU или все ONU из состояния Emergency Stop в состояние Initial. Включенный ONU сбрасывает конфигурацию уровня ТС и перезапускает процесс активации, как указано в разделе 12. Подтверждение не передается

Измененное сообщение Disable_Serial_Number имеет следующий формат.

Октет	Содержание	Описание
1–2	0x03FF	Вещательный ONU-ID
3	0x06	Идентификатор типа сообщения Disable_Serial_Number
4	SeqNo	Порядковый номер вещательного PLOAM-сообщения
5	Выключить/включить	0xFF – ONU с этим серийным номером лишается доступа к восходящему потоку. 0x00 – ONU с этим серийным номером разрешается доступ к восходящему потоку. 0x0F – все ONU лишаются доступа к восходящему потоку. Содержимое байтов 6–13 игнорируется. 0x3F – Disable_Discovery – ONU, находящиеся в состоянии O2-3, лишаются доступа к восходящему потоку. Содержимое байтов 6–13 игнорируется. 0xF0 – всем ONU разрешается доступ к восходящему потоку
6–9	Идентификатор поставщика	Код идентификатора поставщика ONU, четырехсимвольная комбинация, обнаруживаемая при получении SN
10–13	VSSN	Серийный номер конкретного поставщика, четырехбайтовое целое без знака, обнаруживаемое при получении SN
14–40	Заполнение	Устанавливается передатчиком в 0x00; обрабатывается как "dont'care" в приемнике, то есть игнорируется
41–48	MIC	Проверка целостности сообщений

F.3 Дополнительный переход диаграммы переходов состояний в цикле активации ONU

F.3.1 Диаграмма переходов состояний

Совместимая система соблюдает стандартную диаграмму переходов состояний в цикле активации ONU, приведенную на рисунке F.1, где определение события запроса на выключение SN зависит от состояния.

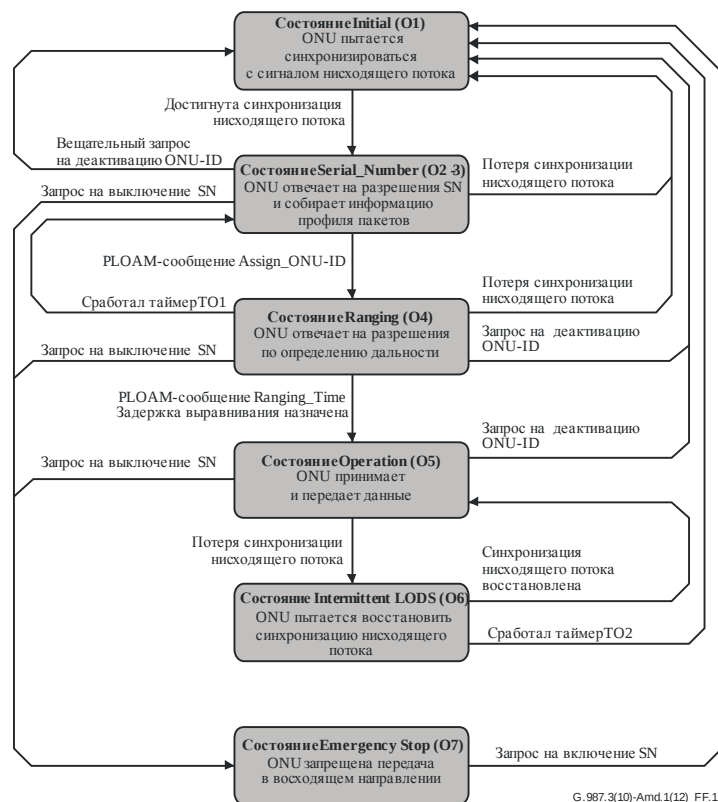


Рисунок F.1 – Измененная диаграмма состояний при активации ONU

В состоянии O2-3 запросы на выключение SN генерируются после получения PLOAM-сообщения Disable_Serial_Number с вариантами выключения определенного SN, всех SN или Disable_Discovery. В состояниях O4 и O5 запросы на выключение SN генерируются после получения PLOAM-сообщения Disable_Serial_Number с вариантами выключения определенного SN или всех SN, но не генерируются после получения PLOAM-сообщения Disable_Serial_Number с вариантом Disable_Discovery.

F.3.2 Таблица переходов состояний ONU

В дополнение к событиям и переходам таблицы 12-1 в пункте 12.2.4 совместимая система поддерживает переход из состояния ожидания Serial Number (O2-3) в состояние Emergency Stop (O7) после получения PLOAM-сообщения Disable_Serial_Number с вариантом Disable_Discovery.

Состояние	Состояние активации ONU						
	Initial O1	Serial Number O2-3	Ranging O4	Operation O5	Intermittent LODS O6	Emergency Stop O7	Suspension O8
Получение PLOAM на выключение – Вариант Disable_Discovery	–	==> O7;	–	–	–	–	–

Дополнение I

Формирование структуры данных нисходящей линии

(Это Дополнение не является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

В этом Дополнении указано несколько причин и методов управления структурой данных, передаваемых по линии. Эти методы обратно совместимы и необязательны для использования. Первая причина заключается в том, чтобы управлять спектром модулированного сигнала во избежание определенных явлений из-за оптических помех. Представлен один метод частичного управления. Вторая причина заключается в том, чтобы избежать намеренного нарушения работы линии передачи злоумышленником. Представлены два метода управления для достижения этой цели.

I.1 Управление спектром с использованием незанятых кадров XGEM

В системе XG-PON у передатчика есть возможность время от времени отправлять незанятые кадры XGEM. В обычных случаях это происходит, когда у передатчика нет пакетов пользовательских данных, готовых к отправке. Размер и содержание незанятого кадра XGEM целиком зависит от передатчика. Эта свобода обеспечивает OLT возможность управлять спектром сигнала, передаваемого в нисходящем направлении.

Размер незанятых пакетов выбирается произвольно в зависимости от реализации. Однако чтобы сделать систему эффективной как в отношении передачи данных, так и в отношении управления их структурой, рекомендуется, чтобы размер незанятых пакетов в составе полезной нагрузки составлял от 64 до 128 байтов. Это делает долю управляемого сигнала линии при отсутствии реальных данных превышающей 90%, и он будет занимать линию не более 0,13 мкс.

Port-ID, используемый для незанятых кадров XGEM, указан в пункте 9.1.4.

В пункте I.1.1 описывается концепция полезной нагрузки в виде незанятого кадра, зависящей от фазы скремблера. По существу, это та же идея, которая представлена в пункте V.1.2 [b-ITU-T G.984.3].

Следует отметить, что скремблер в XG-PON имеет очень большую длину повторения и, следовательно, не является источником структуры с короткой длиной повторения. Фактически самая быстро повторяющаяся структура – это шаблон формирования кадра 8 кГц. Эта достаточно низкая частота, чтобы в системе ею можно было пренебречь. Таким образом представляется, что она, в отличие от G-PON, будет мало использоваться в качестве полезной нагрузки, не зависящей от фазы скремблера.

I.1.1 Полезная нагрузка, зависящая от фазы скремблера

Разработка структуры полезной нагрузки, зависящей от фазы скремблера, включает два аспекта. Первый – это разработка структуры, присутствие которой желательно в линии. Желаемая структура выбирается так, чтобы она имела благоприятные спектральные или временные характеристики. Один конкретный подходящий шаблон описывается ниже, но существует неограниченное количество таких возможных шаблонов. Второй аспект – это управление скремблером нисходящего потока. Этот скремблер подвергается операции "исключающее ИЛИ" с незанятыми кадрами XGEM и таким образом рандомизирует структуру в линии. Для выполнения обратной операции OLT должен подвергнуть желаемый шаблон операции "исключающее ИЛИ" с шаблоном скремблера до скремблирования незанятых кадров. Оборудование OLT должно позаботиться о том, чтобы шаблон скремблера был точно согласован по битам со скремблером линии.

Что касается выбора желаемого шаблона, то имеется ряд характеристик сигнала в линии, которые могут представлять интерес. Одна из них – наличие повторяющихся шаблонов, которые могут создавать гармоники частот в сигнале линии. Затем эти гармоники могут проникать в другие сигналы (например, наложение видеосигналов) посредством вынужденного комбинационного рассеяния (SRS), тем самым вызывая перекрестные помехи. Другой характеристикой является общий спектр сигнала в линии. Обычное скремблированное кодирование NRZ создает спектр, задаваемый функцией $\text{sinc}^2(f)$. Он взвешивается в направлении низких частот, как показано на рисунке I.1. С этими низкими частотами связаны повышенные нелинейные перекрестные помехи в оптоволокне.

С учетом этих характеристик желателен шаблон с очень большой длиной повторения, спектр которого смещен в сторону более высоких частот. Простой шаблон, обладающий этими свойствами, представляет собой псевдослучайную манчестерскую кодированную последовательность. Можно выбрать генератор псевдослучайных чисел, содержащий примитивный полином высокого порядка (например, $2^{43} - 1$) и настроенный для работы с половинной скоростью передачи битов сигнала в нисходящем потоке. Затем каждый псевдослучайный разряд кодируется как символ манчестерского кода (01 или 10). У полученного шаблона будет спектр, показанный на рисунке I.1.

Следует иметь в виду, что управление холостым шаблоном эффективно только в то время, когда система XG-PON нисходящего потока простаивает. Для иллюстрации этого предположим, что система загружена примерно на 25% и в режиме простоя создается полезная нагрузка в виде незанятого пакета длиной 64 байта. В этом случае желаемый шаблон присутствует в линии примерно 67% времени. Таким образом спектр сигнала в линии будет составлять средневзвешенную величину спектров скремблированного и манчестерского кодов. Комбинированная кривая интенсивности спектра показана на рисунке I.1. В важной низкочастотной области (0,01 от битовой скорости 10 Гбит/с) уменьшение спектральной плотности мощности для этого примера составляет около 4 дБ. Это приведет к уменьшению рамановских искажений при наложении сигналов в PON на 3 дБ. Следует отметить, что при более высокой степени использования нисходящего потока степень улучшения уменьшится, и наоборот.

Другой способ использования холостой полезной нагрузки, зависящей от фазы скремблера, – преднамеренное создание шаблонов для линии со значительными одночастотными тонами. Эти тона можно использовать для реализации системы рефлектометрии оптической области частот (OFDR). При этой концепции передатчик используется в качестве дельта-сигма-модулятора, и произвольная форма сигнала может генерироваться путем модуляции долей количества нулей и единиц, переданных за определенный период. Как показано на рисунке I.2, возможна весьма эффективная генерация низкочастотных сигналов. В этом примере синусоидальная функция (кривая) аппроксимируется последовательностью единиц и нулей (мелкие точки). Накопленная погрешность показана пунктирной кривой ниже.

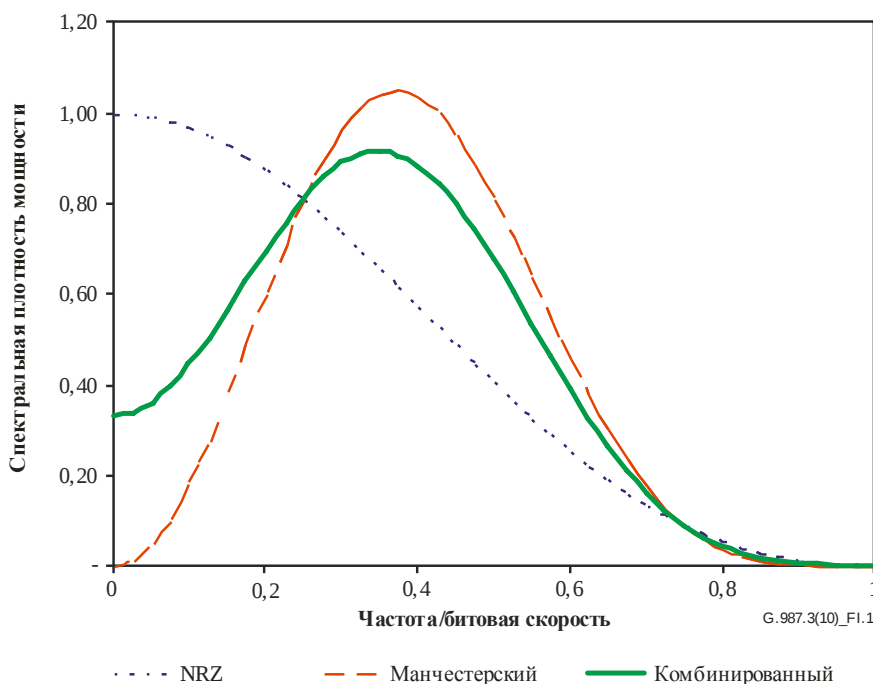


Рисунок I.1 – Спектры шаблонов NRZ, манчестерского кода и комбинированных шаблонов

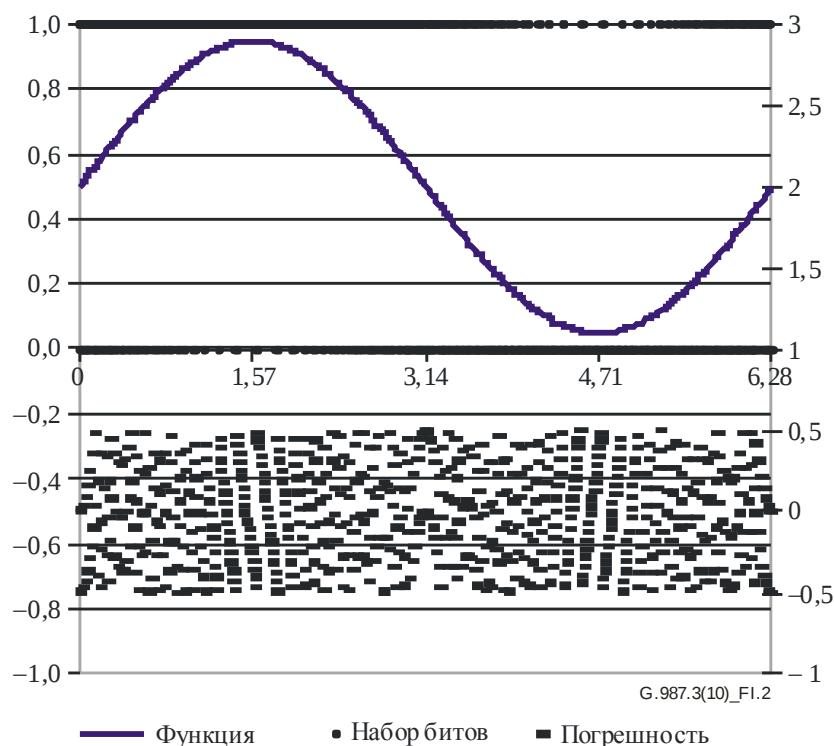


Рисунок 1.2 – Синтезированная форма сигнала с использованием управления холостой полезной нагрузкой

1.2 Преднамеренное нарушение работы PON

Злонамеренный пользователь может попытаться умышленно нарушить работу PON, загружая пакеты, заполненные последовательностью скремблера. Это может привести к передаче лишних одинаковых последовательных символов, что чревато потерей синхронизации приемников ONU. Потеря синхронизации может привести к прекращению обслуживания всех других легитимных пользователей PON.

Первая линия защиты от этой атаки в XG-PON заключается в использовании скремблера с большим полиномом и в использовании предварительной нагрузки, которая изменяется от кадра к кадру. Это делает вероятность того, что злоумышленник угадает фазу скремблера при каждой попытке, очень малой, так что среднее время между успешными атаками измеряется годами. При таком маловероятном выигрыше подобные атаки считаются непривлекательными для типичного хакера.

Однако остаточная вероятность преднамеренного нарушения существует (в любой скремблируемой системе). Дополнительные решения этой проблемы обсуждаются в пунктах 1.2.1 и 1.2.2.

1.2.1 Шифрование данных

Одним из способов усложнения взлома PON является шифрование пользовательских данных. В этом случае пользователь не имеет возможности прямого управления структурой данных, передаваемых в PON. Это особенно усложняет задачу случайному хакеру, который имеет доступ к PON только через UNI-интерфейсы в ONU и, следовательно, не знает секретного ключа PON.

У искушенного злоумышленника может быть доступ к внутренней памяти своего ONU, и поэтому он может знать ключ шифрования. Таким образом он может организовать такое изменение структур атаки, чтобы при их шифровании создавался шаблон скремблера. Такой пользователь также может знать и фазу скремблера, так как предполагается, что он обладает непосредственным эмпирическим знанием PON.

1.2.2 Управление временем передачи пакетов

Альтернативный метод для передатчика предотвратить взлом шаблона линии со стороны злонамеренного пользователя заключается в применении выборочной задержки пакетов. В большинстве рационально спланированных систем передачи данных передатчик отправляет пакеты

по мере их поступления. Однако перед лицом рассматриваемой возможности взлома пакетов он может принять меры предосторожности. Предварительно вычислив скремблированный шаблон линии, который возникнет в случае немедленной передачи пакета, передатчик сможет выявить любой проблемный результат, прежде чем это произойдет. Если окажется, что пакет создает неприемлемые шаблоны линий, передатчик может вставить незанятый кадр любой разумной длины (достаточно даже незанятого кадра, состоящего только из заголовка длиной 8 байтов). Это может сдвинуть пакет пользователя на множество битов и рассогласовать его полезную нагрузку с фазой скремблера.

Такой подход позволяет особенно успешно противостоять потенциальному злоумышленнику, потому что тот даже не узнает, что его атака обнаружена и отражена. При этом протоколы XG-PON никак не изменяются. Этот метод также можно использовать для уменьшения случайных отклонений шаблона линии, которые могут быть обусловлены просто случайными данными, с учетом ограничений на разрешенное отступление от рационального планирования работы.

Дополнение II

Вывод модели распределения времени суток и анализ погрешностей

(Это Дополнение не является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

В этом Дополнении представлены математические данные для выработки модели распределения времени суток и анализа погрешностей. Оно основано на системе условных обозначений, приведенной в пункте 13.2.1. Кроме того:

T_{1270} – это задержка распространения восходящего потока при длине волны 1270 нм; и

T_{1577} – задержка распространения нисходящего потока при длине волны 1577 нм.

По построению (см. рисунки 13-4 и 13-7 с сопроводительным текстом) смещение PHY-кадра в восходящем потоке можно представить с использованием параметров ONU i следующим образом:

$$\begin{aligned} Teqd &= T_{1577,i} + RspTime_i + EqD_i + T_{1270,i} \\ &= T_{1577,i} \frac{n_{1270} + n_{1577}}{n_{1577}} + RspTime_i + EqD_i. \end{aligned} \quad (II-1)$$

Затем выразим $T_{1577,i}$ из уравнения (II-1) как

$$T_{1577,i} = (Teqd - RspTime_i - EqD_i) \frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}} \quad (II-2)$$

и подставим это выражение в формулу для принятого экземпляра XGTC-кадра N :

$$Trecv_{N,i} = Tsend_{N,i} + T_{1577,i}. \quad (II-3)$$

После соответствующей перегруппировки получим представление фактического экземпляра ToD, когда XGTC-кадр N поступает в ONU i :

$$Trecv_{N,i} = Tsend_N + Teqd \left[\frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}} \right]_{OLT} - (EqD_i + RspTime_i) \left[\frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}} \right]_{ONU}, \quad (II-4)$$

где положительный аддитивный член может быть вычислен OLT и передан в нисходящем потоке, а отрицательный аддитивный член может быть вычислен ONU.

Следует отметить, что для сохранения этой модели результаты измерения $Teqd$, $Tsend_{N,i}$ и $Trecv_{N,i}$ должны быть последовательно привязаны к интерфейсу оптоволокна в OLT и ONU соответственно.

Отмечается также, что в дополнение к приведенному здесь времени отклика ONU имеются внутренние задержки, которые необходимо компенсировать как в OLT, так и в ONU. Эти компенсации внутренних задержек непосредственно влияют на точность доставленного значения времени, поэтому определить результирующую погрешность довольно легко. Эти погрешности здесь подробно не рассматриваются.

Следует отметить, что при расчетах с обеих сторон PON используются коэффициенты, связанные с показателем преломления, и их значения могут различаться в зависимости от реализации. Чтобы устранить ошибку, вызванную несогласованными значениями, рекомендуется использовать с обеих сторон общее значение, которое оценивается ниже.

Затем результирующая погрешность определения времени, вызванная изменениями показателя преломления, задается уравнением:

$$Error_{N,i} = Teqd \delta \left[\frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}} \right]_{OLT} - (EqD_i + RspTime_i) \delta \left[\frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}} \right]_{ONU}. \quad (II-5)$$

Здесь δ – погрешность оценки показателя преломления, полученная для конкретного элемента сети.

Это уравнение показывает, что погрешность, связанная с изменением показателя преломления OLT, фиксируется (по всем ONU), и ее максимальное значение равно T_{eqd} , которое обычно составляет 250 мкс. Погрешность из-за изменения показателя преломления ONU зависит от E_{qD} и времени отклика этого ONU; следовательно, у соседних ONU ошибка будет больше из-за неточностей показателя преломления ONU (весьма противоестественный результат). Следует однако отметить, что эти ошибки можно в некоторой степени сократить. Для этого рекомендуется использовать в расчетах общее значение, оценка которого приводится ниже.

Углубляясь в данные показателя преломления, можно переписать уравнение, обозначив групповой показатель преломления для 1577 нм символом n , а разность между групповыми показателями для 1270 нм и 1577 нм – символом Δn :

$$\frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}} = \frac{n_{1577}}{2n_{1577} + (n_{1270} - n_{1577})} = \frac{n}{2n + \Delta n} \approx \frac{2n^2 - n\Delta n}{4n^2} = \frac{1}{2} - \frac{\Delta n}{4n}. \quad (\text{II-6})$$

Учитывая влияние вариаций n и Δn и взяв частные производные по этим переменным, получим

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta n}{4n} \right) = + \frac{\Delta n}{4n^2} \text{ и } \frac{\partial}{\partial \Delta n} \left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta n}{4n} \right) = - \frac{1}{4n}. \quad (\text{II-7})$$

Важно отметить, что значение n примерно на 3 порядка больше Δn . Поэтому первое выражение намного меньше второго и им можно пренебречь. Второе выражение означает, что небольшие изменения Δn превращаются в небольшие изменения показателя преломления в соотношении $1/4n$.

Итак, нужно вычислить Δn (разность показателей преломления), а затем рассмотреть ее вариации.

Расчет разности показателей преломления

Разность зависящих от длины волны показателей преломления Δn зависит от свойств оптоволокну и от фактически задействованных длин волн (поскольку реальные передатчики PON могут работать в некотором диапазоне длин волн). Точное значение показателя преломления оптоволокну согласно МСЭ-Т G.652 получить трудно. Известны типичные значения для 1310 нм и 1550 нм, но они не обеспечивают необходимой точности. Для определенных окон (например, окно 1310 нм) известна дисперсия оптоволокну, но при экстраполяции этих формул за пределы окна они неточны. Между тем результат для стандартизованного коэффициента дисперсии страдает потенциальной неточностью, вызванной таким обобщением. Если удастся определить лучшую функцию, то анализ можно применить к ней.

Дисперсия оптоволокну согласно МСЭ-Т G.652 вычисляется следующим образом:

$$D(\lambda) = \frac{\lambda S_0}{4} \left[1 - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^4} \right], \quad (\text{II-8})$$

где S_0 – наклон кривой дисперсии (не более 0,092 пс/нм²/км), а λ_0 – длина волны при нулевой дисперсии (в диапазоне от 1300 до 1324 нм).

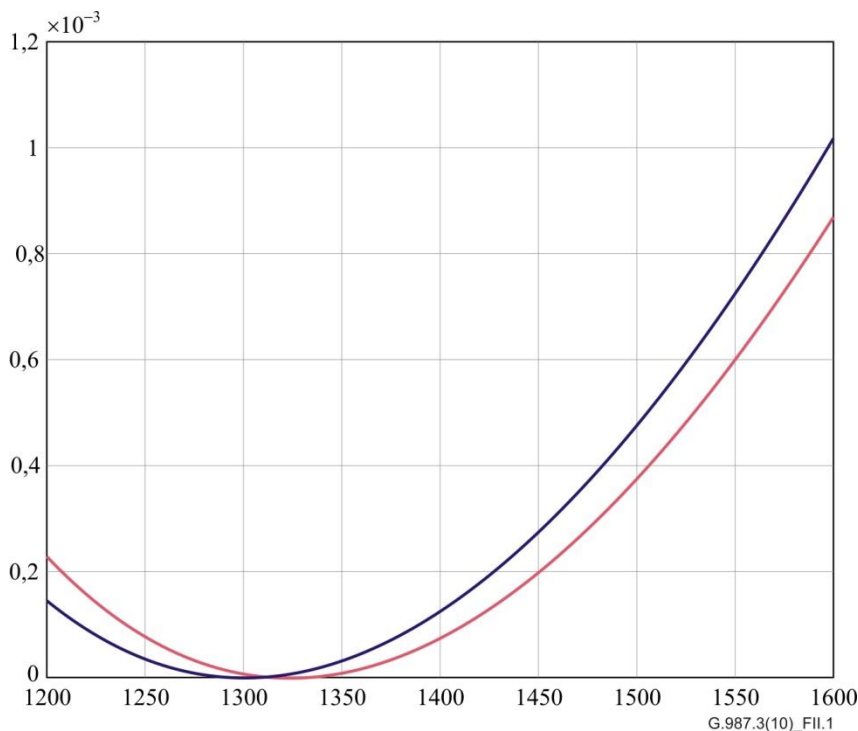
Показатель преломления и D связаны соотношением $\frac{dn}{d\lambda} = cD(\lambda)$, а основная теорема исчисления дает

$$n = n_0 + c \int_{\lambda_0}^{\lambda} D(\lambda) d\lambda. \quad (\text{II-9})$$

Проинтегрировав, можно обнаружить, что

$$n - n_0 = \frac{cS_0}{8} \lambda^2 \left[1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda^2} \right]^2. \quad (\text{II-10})$$

На рисунке II.1 графически изображена функция разности показателей преломления для двух крайних вариантов оптоволокон согласно МСЭ-Т G.652 при длине волн с нулевой дисперсией 1300 нм и 1324 нм. Также показаны диапазоны длин волн для передатчиков XG-PON "уменьшенного" варианта длин волн (1260–1280 нм для восходящего потока и 1575–1580 нм для нисходящего потока). Максимальная разность показателей преломления составляет 0,000893, а минимальная – 0,000676.



**Рисунок II.1 – Разность показателей преломления
в зависимости от рабочей длины волны**

В реальных системах рабочие длины волн не контролируются и точное значение дисперсии оптоволокон не известно. Следовательно, разность показателей преломления – это абсолютно неизвестное число. С качественной стороны вариация передатчика 1260 нм оказывает небольшое влияние, поскольку она близка к минимуму кривой. Интересно, что вариация при длине волны с нулевой дисперсией оптоволокон и вариация при длине волны передатчика 1577 нм оказывают почти одинаковое влияние на изменение разности показателей преломления.

Изменчивость значений показателя преломления

Используя уравнение (II-6) и подставив значение $n = 1,47$, что является допустимым приближением для групповых показателей преломления широко распространенных оптоволокон (точность здесь не важна), получаем, что значение показателя преломления может варьироваться в диапазоне от 0,500115 до 0,500153. Наиболее вероятное значение показателя преломления составляет 0,500134, но фактическое значение может отличаться на величину до $\pm 0,000019$. Наиболее точное решение достигается, когда OLT и ONU используют следующие общие значения:

$$\frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}} \approx 0,500134;$$

$$\delta \left[\frac{n_{1577}}{n_{1270} + n_{1577}} \right] \leq 0,000019,$$

что исключает ошибку, вызванную разными значениями по обе стороны PON. Тогда погрешность показаний времени равна $\pm 0,000019$ от времени прохождения сигнала по оптоволокону в обоих

направлениях. Для ONU протяженностью 20 км время прохождения сигнала в обоих направлениях составляет около 200 нс, так что погрешность составляет $\pm 3,8$ нс и ничтожно мала

Дополнение III

Профили пакетов

(Это Дополнение не является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

В этом Дополнении описываются профили пакетов, используемые подуровнем адаптации физического уровня ONU для формирования PNH-пакета. Представлены предлагаемые значения преамбулы и разделителя пакета.

В системе XG-PON передача восходящего потока от ONU к OLT осуществляется путем доставки нескольких PNH-пакетов. После 64-битового защитного интервала для предотвращения перекрытия пакетов PNH-пакет начинается с секции PSBu (физический блок синхронизации) в восходящем потоке. PSBu содержит преамбулу и разделитель. Преамбула и разделитель используются приемником пакетного режима OLT для опознавания и определения границ PNH-пакетов. Они также используются для определения тактового сигнала в целях правильного восстановления передаваемого сигнала.

Длина и структура преамбулы и разделителя формируются так, как это определено OLT в поле BurstProfile карты BWmap. Индекс в поле BurstProfile относится к набору допустимых профилей пакета, которые передаются в устройства ONU по каналу обмена PLOAM-сообщениями. Для каждого заданного профиля индекс преломления явно определяется в PLOAM-сообщении Profile.

PLOAM-сообщение Profile может быть вещательным или одноадресным. OLT управляет профилями пакетов и прогнозирует, какие профили будут иметь те или иные ONU. В этой ситуации ONU является исключительно подчиненным и выполняет команды OLT. В простейшем случае OLT может отправлять только вещательные сообщения профиля. В этом случае профили имеют глобальный охват и одинаковы во всех ONU. В более сложном случае OLT может рассылать одноадресные профили каждому ONU. Эти одноадресные профили могут затем различаться для каждого ONU (опять же OLT должен сам следить за тем, как он настроил каждый ONU). Что касается поведения в отношении времени, то OLT всегда должен отправлять сообщение профиля несколько раз, прежде чем пытаться использовать их в BWmap. Это значительно уменьшит вероятность использования устройством ONU старого профиля.

Рекомендуемый размер преамбулы составляет 160 битов [ITU-T G.987.2]. Меняющиеся размеры преамбулы достигаются путем установки требуемых параметров профиля пакета.

Традиционный шаблон преамбулы 0x AAAA AAAA. Хотя он обеспечивает максимальную плотность переходов и среднюю мощность, некоторые реализации могут предъявлять иные требования к преамбуле. Например, если в приемнике пакетного режима есть входные устройства с ограниченной пропускной способностью, то вышеупомянутый шаблон преамбулы не сможет поддерживать высокоэффективное обнаружение наличия пакетов. Другим примером могут служить приемники пакетного режима с пиковыми детекторами. Если цепи выборки и хранения пиковых детекторов имеют ограниченную скорость нарастания, то вышеупомянутая преамбула не сможет выполнять высокоэффективное обнаружение наличия пакетов. Поэтому в число возможных шаблонов преамбулы добавляются шаблоны, подобные данным. Ожидается, что у выбранных шаблонов преамбулы, подобных данным, будут сбалансированные по постоянному току характеристики, равномерный спектр мощности и плотность переходов, как у случайных данных, а также большая длина кода. Предлагаемые значения шаблонов преамбулы XG-PON приведены в таблице III.1.

Рекомендуемый размер разделителя составляет 32 бита. Если в случае высокого BER требуется более длительное время разграничения, могут использоваться разделители длиной 64 бита, что обеспечит более надежное определение границ пакетов. К ожидаемым характеристикам выбранных разделителей относятся сбалансированные единицы и нули, большое расстояние от любых собственных сдвинутых шаблонов и большое расстояние от сдвинутых шаблонов преамбулы.

В других случаях желательно указать, включена ли в пакет FEC либо используется ли пара разных разделителей. Предлагаемые значения таких пар разделителей приведены в таблице III.1.

Таблица III.1. Предлагаемые значения преамбулы и разделителя

Преамбула	32-битовый разделитель	64-битовый разделитель
0x BB52 1E26	0x A376 70C9	0x B9D4 3E68 462B C197
	0x 4BDE 1B90/(FEC включена)	0x B9D4 3E68 462B C197 (FEC включена)
	0x A376 70C9 (FEC выключена)	0x B752 1F06 48AD E879 (FEC выключена)
0x AAAA AAAA	0x AD4C C30F	0x B3BD D310 B2C5 0FA1
	0x A566 79E0 (FEC включена)	0x B3BD D310 B2C5 0FA1 (FEC включена)
	0x AD4C C30F (FEC выключена)	0x CE99 CE5E 5028 B41F (FEC выключена)

Дополнение IV

Золотые векторы

(Это Дополнение не является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации)

IV.1 Кодовое слово FEC нисходящего потока

Это пример кодового слова FEC для нисходящего потока. Полезная нагрузка представляет собой инкрементирующую строку из 216 байтов, начинающуюся с 0x01. 32 байта четности FEC подчеркнуты.

RS(248, 216)

0x01	0x02	0x03	0x04	0x05	0x06	0x07	0x08	0x09	0x0a	0x0b	0x0c	0x0d	0x0e	0x0f	0x10
0x11	0x12	0x13	0x14	0x15	0x16	0x17	0x18	0x19	0x1a	0x1b	0x1c	0x1d	0x1e	0x1f	0x20
0x21	0x22	0x23	0x24	0x25	0x26	0x27	0x28	0x29	0x2a	0x2b	0x2c	0x2d	0x2e	0x2f	0x30
0x31	0x32	0x33	0x34	0x35	0x36	0x37	0x38	0x39	0x3a	0x3b	0x3c	0x3d	0x3e	0x3f	0x40
0x41	0x42	0x43	0x44	0x45	0x46	0x47	0x48	0x49	0x4a	0x4b	0x4c	0x4d	0x4e	0x4f	0x50
0x51	0x52	0x53	0x54	0x55	0x56	0x57	0x58	0x59	0x5a	0x5b	0x5c	0x5d	0x5e	0x5f	0x60
0x61	0x62	0x63	0x64	0x65	0x66	0x67	0x68	0x69	0x6a	0x6b	0x6c	0x6d	0x6e	0x6f	0x70
0x71	0x72	0x73	0x74	0x75	0x76	0x77	0x78	0x79	0x7a	0x7b	0x7c	0x7d	0x7e	0x7f	0x80
0x81	0x82	0x83	0x84	0x85	0x86	0x87	0x88	0x89	0x8a	0x8b	0x8c	0x8d	0x8e	0x8f	0x90
0x91	0x92	0x93	0x94	0x95	0x96	0x97	0x98	0x99	0x9a	0x9b	0x9c	0x9d	0x9e	0x9f	0xa0
0xa1	0xa2	0xa3	0xa4	0xa5	0xa6	0xa7	0xa8	0xa9	0xaa	0xab	0xac	0xad	0xae	0xaf	0xb0
0xb1	0xb2	0xb3	0xb4	0xb5	0xb6	0xb7	0xb8	0xb9	0xba	0xbb	0xbc	0xbd	0xbe	0xbf	0xc0
0xc1	0xc2	0xc3	0xc4	0xc5	0xc6	0xc7	0xc8	0xc9	0xca	0xcb	0xcc	0xcd	0xce	0xcf	0xd0
0xd1	0xd2	0xd3	0xd4	0xd5	0xd6	0xd7	0xd8	<u>0x6d</u>	<u>0x8d</u>	<u>0x89</u>	<u>0x21</u>	<u>0x88</u>	<u>0x4d</u>	<u>0x6b</u>	<u>0x21</u>
<u>0x2e</u>	<u>0x3c</u>	<u>0xd6</u>	<u>0x8e</u>	<u>0x68</u>	<u>0x54</u>	<u>0x72</u>	<u>0x31</u>	<u>0x52</u>	<u>0xbd</u>	<u>0x9e</u>	<u>0xf7</u>	<u>0x45</u>	<u>0xf5</u>	<u>0x70</u>	<u>0x20</u>
<u>0x60</u>	<u>0xc4</u>	<u>0xe2</u>	<u>0xec</u>	<u>0x0b</u>	<u>0xef</u>	<u>0x18</u>	<u>0x1a</u>								

IV.2 Кодовое слово FEC восходящего потока

Это пример кодового слова FEC для восходящего потока. Полезная нагрузка представляет собой инкрементирующую строку из 232 байтов, начинающуюся с 0x01. 16 байтов четности FEC подчеркнуты.

RS(248, 232)

0x01	0x02	0x03	0x04	0x05	0x06	0x07	0x08	0x09	0x0a	0x0b	0x0c	0x0d	0x0e	0x0f	0x10
0x11	0x12	0x13	0x14	0x15	0x16	0x17	0x18	0x19	0x1a	0x1b	0x1c	0x1d	0x1e	0x1f	0x20
0x21	0x22	0x23	0x24	0x25	0x26	0x27	0x28	0x29	0x2a	0x2b	0x2c	0x2d	0x2e	0x2f	0x30
0x31	0x32	0x33	0x34	0x35	0x36	0x37	0x38	0x39	0x3a	0x3b	0x3c	0x3d	0x3e	0x3f	0x40
0x41	0x42	0x43	0x44	0x45	0x46	0x47	0x48	0x49	0x4a	0x4b	0x4c	0x4d	0x4e	0x4f	0x50
0x51	0x52	0x53	0x54	0x55	0x56	0x57	0x58	0x59	0x5a	0x5b	0x5c	0x5d	0x5e	0x5f	0x60
0x61	0x62	0x63	0x64	0x65	0x66	0x67	0x68	0x69	0x6a	0x6b	0x6c	0x6d	0x6e	0x6f	0x70
0x71	0x72	0x73	0x74	0x75	0x76	0x77	0x78	0x79	0x7a	0x7b	0x7c	0x7d	0x7e	0x7f	0x80
0x81	0x82	0x83	0x84	0x85	0x86	0x87	0x88	0x89	0x8a	0x8b	0x8c	0x8d	0x8e	0x8f	0x90
0x91	0x92	0x93	0x94	0x95	0x96	0x97	0x98	0x99	0x9a	0x9b	0x9c	0x9d	0x9e	0x9f	0xa0
0xa1	0xa2	0xa3	0xa4	0xa5	0xa6	0xa7	0xa8	0xa9	0xaa	0xab	0xac	0xad	0xae	0xaf	0xb0

```

0xb1 0xb2 0xb3 0xb4 0xb5 0xb6 0xb7 0xb8 0xb9 0xba 0xbb 0xbc 0xbd 0xbe 0xbf 0xc0
0xc1 0xc2 0xc3 0xc4 0xc5 0xc6 0xc7 0xc8 0xc9 0xca 0xcb 0xcc 0xcd 0xce 0xcf 0xd0
0xd1 0xd2 0xd3 0xd4 0xd5 0xd6 0xd7 0xd8 0xd9 0xda 0xdb 0xdc 0xdd 0xde 0xdf 0xe0
0xe1 0xe2 0xe3 0xe4 0xe5 0xe6 0xe7 0xe8 0x41 0x42 0xda 0xe0 0x73 0x7c 0x7b 0x52
0xb8 0x27 0xe4 0xb8 0x4e 0x2b 0xee 0xbf

```

IV.3 Сокращенное кодовое слово FEC восходящего потока

Это пример сокращенного кодового слова FEC для восходящего потока. Полезная нагрузка представляет собой инкрементирующую строку из 204 байтов, начинающуюся с 0x01. 16 байтов четности FEC подчеркнуты.

RS(220, 204)

```

0x01 0x02 0x03 0x04 0x05 0x06 0x07 0x08 0x09 0x0a 0x0b 0x0c 0x0d 0x0e 0x0f 0x10
0x11 0x12 0x13 0x14 0x15 0x16 0x17 0x18 0x19 0x1a 0x1b 0x1c 0x1d 0x1e 0x1f 0x20
0x21 0x22 0x23 0x24 0x25 0x26 0x27 0x28 0x29 0x2a 0x2b 0x2c 0x2d 0x2e 0x2f 0x30
0x31 0x32 0x33 0x34 0x35 0x36 0x37 0x38 0x39 0x3a 0x3b 0x3c 0x3d 0x3e 0x3f 0x40
0x41 0x42 0x43 0x44 0x45 0x46 0x47 0x48 0x49 0x4a 0x4b 0x4c 0x4d 0x4e 0x4f 0x50
0x51 0x52 0x53 0x54 0x55 0x56 0x57 0x58 0x59 0x5a 0x5b 0x5c 0x5d 0x5e 0x5f 0x60
0x61 0x62 0x63 0x64 0x65 0x66 0x67 0x68 0x69 0x6a 0x6b 0x6c 0x6d 0x6e 0x6f 0x70
0x71 0x72 0x73 0x74 0x75 0x76 0x77 0x78 0x79 0x7a 0x7b 0x7c 0x7d 0x7e 0x7f 0x80
0x81 0x82 0x83 0x84 0x85 0x86 0x87 0x88 0x89 0x8a 0x8b 0x8c 0x8d 0x8e 0x8f 0x90
0x91 0x92 0x93 0x94 0x95 0x96 0x97 0x98 0x99 0x9a 0x9b 0x9c 0x9d 0x9e 0x9f 0xa0
0xa1 0xa2 0xa3 0xa4 0xa5 0xa6 0xa7 0xa8 0xa9 0xaa 0xab 0xac 0xad 0xae 0xaf 0xb0
0xb1 0xb2 0xb3 0xb4 0xb5 0xb6 0xb7 0xb8 0xb9 0xba 0xbb 0xbc 0xbd 0xbe 0xbf 0xc0
0xc1 0xc2 0xc3 0xc4 0xc5 0xc6 0xc7 0xc8 0xc9 0xca 0xcb 0xcc 0x1e 0xe8 0xd8 0xc6
0xca 0x13 0xf9 0xed 0x3b 0xb3 0x53 0xe7 0x04 0x51 0x13 0x93

```

IV.4 Шифрование AES-128 нисходящего потока

Ключ шифрования данных: 0x112233445566778899AABBCCDDEEFF00

Счетчик суперкадра: 0x0001028385834

Внутрикадровый счетчик: 0x0078

Обычный текст

```

0x00 0x01 0x02 0x03 0x04 0x05 0x06 0x07 0x08 0x09 0x0a 0x0b 0x0c 0x0d 0x0e 0x0f
0x10 0x11 0x12 0x13 0x14 0x15 0x16 0x17 0x18 0x19 0x1a 0x1b 0x1c 0x1d 0x1e 0x1f
0x20 0x21 0x22 0x23 0x24 0x25 0x26 0x27 0x28 0x29 0x2a 0x2b 0x2c 0x2d 0x2e 0x2f
0x30 0x31 0x32 0x33 0x34 0x35 0x36 0x37 0x38 0x39 0x3a 0x3b 0x3c 0x3d 0x3e 0x3f

```

Блоки счетчика

```

0x00040a0e160d007800040a0e160d0078
0x00040a0e160d007800040a0e160d0079
0x00040a0e160d007800040a0e160d007a
0x00040a0e160d007800040a0e160d007b

```

Зашифрованный текст

0xff 0xd1 0xae 0x0c 0x4b 0x46 0xc9 0xc1 0x29 0x2f 0xde 0x06 0x1b 0x18 0xef 0x9c
0x87 0xb5 0x65 0x61 0x76 0xff 0x1c 0x6e 0xb2 0xf0 0xda 0xcd 0x53 0x8d 0x4a 0xd0
0x5b 0x38 0x9b 0xff 0xee 0x94 0x7b 0x54 0xcf 0xf7 0x74 0x54 0xd4 0x2d 0x08 0xfa
0x20 0x30 0x96 0x50 0xa4 0x3b 0xc1 0x40 0xc6 0x73 0xb0 0xf4 0x6e 0xcd 0x5b 0xeb

IV.5 Шифрование AES-128 восходящего потока

Ключ шифрования данных: 0x112233445566778899AABBCCDDEEFF00

Счетчик суперкадра: 0x0001028385834

Внутрикадровый счетчик: 0x097c

Обычный текст

0x00 0x01 0x02 0x03 0x04 0x05 0x06 0x07 0x08 0x09 0x0a 0x0b 0x0c 0x0d 0x0e 0x0f
0x10 0x11 0x12 0x13 0x14 0x15 0x16 0x17 0x18 0x19 0x1a 0x1b 0x1c 0x1d 0x1e 0x1f
0x20 0x21 0x22 0x23 0x24 0x25 0x26 0x27 0x28 0x29 0x2a 0x2b 0x2c 0x2d 0x2e 0x2f
0x30 0x31 0x32 0x33 0x34 0x35 0x36 0x37 0x38 0x39 0x3a 0x3b 0x3c 0x3d 0x3e 0x3f

Блоки счетчика

0x00040a0e160d097cffffbf5f1e9f2f683
0x00040a0e160d097cffffbf5f1e9f2f684
0x00040a0e160d097cffffbf5f1e9f2f685
0x00040a0e160d097cffffbf5f1e9f2f686

Зашифрованный текст

0xd 0x5a 0x46 0x57 0xfd 0x68 0x6f 0xa4 0xb3 0x8f 0x77 0x3a 0x88 0x7a 0x2b 0x33
0x86 0xd7 0xfe 0x53 0x3c 0x52 0x24 0xab 0x39 0x61 0xae 0x20 0xe6 0x15 0x12 0x0e
0xbb 0x2f 0xec 0xe4 0x16 0x50 0x5a 0x02 0x73 0x68 0x39 0x59 0x73 0x8b 0xd6 0x7d
0x75 0x96 0x85 0xcd 0x62 0x14 0x69 0xc1 0x14 0x66 0x59 0xf1 0xc3 0xa7 0xe4 0xd8

IV.6 Шифрование выработки ключей

MSK-128 = 0x112233445566778899AABBCCDDEEFF00

PON-TAG = 0x4f4c542344556677

ONU SN = 0x564e445200112233

SK = 0x795fcf6cb215224087430600dd170f07

OMCI_IK = 0x184b8ad4dlac4af4dd4b339ecc0d3370

PLOAM_IK = 0xe256ce76785c78717c7b3044ab28e2cd

KEK = 0x6f9c99b8361768937e453b165f609710

IV.7 Проверка целостности PLOAM-сообщения в нисходящем потоке

Параметры PLOAM-сообщения:

Тип сообщения: Assign_Alloc-ID

ONU-ID = 0x13

SeqNo = 0x03

Alloc-ID value = 0x0445

Alloc-ID type = 0x01 (XGEM)

PLOAM_IK = 0xe256ce76785c78717c7b3044ab28e2cd

AES-CMAC-64 (PLOAM_IK, 0x01|MSG)

0x46 0x39 0x87 0x56 0x28 0x08 0x14 0xe6

IV.8 Проверка целостности PLOAM-сообщения в восходящем потоке

Параметры PLOAM-сообщения:

Тип сообщения: Sleep_Request

ONU-ID = 0x13

SeqNo = 0x00

Activity_level = 0x02

PLOAM_IK = 0xe256ce76785c78717c7b3044ab28e2cd

AES-CMAC-64 (PLOAM_IK, 0x02|MSG)

0x68 0xae 0x4d 0xd7 0x75 0x55 0x0a 0xcb

IV.9 Передача ключей в восходящем потоке

Data_encryption_key = 0x112233445566778899AABBCCDDEEFF00

KEK = 0x6f9c99b8361768937e453b165f609710

AES-ECB (KEK, Data_encryption_key)

0x4018340d538bb3f50df3186cf075f7b6

AES-CMAC (KEK, Data_encryption_key | 0x33313431353932363533353839373933, 128)

0x3cc507bb1731c569ed7b79f8bdc376be

IV.10 Проверка целостности сообщения OMCI в нисходящем потоке

Направление сообщения OMCI:

Cdir = 0x01 (нисходящий поток)

OMCI_CONTENT:

Идентификатор корреляции транзакций: 0x80 0x00

Тип сообщения: 0x49 (GET)

Идентификатор устройства: 0x0A (Baseline OMCI)

Идентификатор управляемого объекта: 0x01 0x00 0x00 0x00 (ONU-G)

Содержание сообщения:

0x00 0x80 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00

0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00

0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00

0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00

Концевик OMCI [1:4]: 0x00 0x00 0x00 0x28

OMCI_IK = 0x184b8ad4d1ac4af4dd4b339ecc0d3370

AES-CMAC (OMCI_IK, (Cdir | OMCI_CONTENT), 32)

0x78dca53d

Библиография

- [b-ITU-T G.671] Recommendation ITU-T G.671 (2012), *Transmission characteristics of optical components and subsystems*
- [b-ITU-T G.841] Recommendation ITU-T G.841 (1998), *Types and characteristics of SDH network protection architectures*
- [b-ITU-T G.984.2A2] ITU-T Recommendation G.984.2 (2003) Amd.2 (2008), *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification*
- [b-ITU-T G.984.3] Recommendation ITU-T G.984.3 (2014), *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification*
- [b-SFF SFF8472] SFF-8472 Rev. 11.3 (2013), *Specification for Diagnostic Monitoring Interface for Optical Transceivers*. <ftp://ftp.seagate.com/sff/SFF-8472.PDF>

СЕРИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ МСЭ-Т

Серия А	Организация работы МСЭ-Т
Серия D	Общие принципы тарификации
Серия E	Общая эксплуатация сети, телефонная служба, функционирование служб и человеческие факторы
Серия F	Нетелефонные службы электросвязи
Серия G	Системы и среда передачи, цифровые системы и сети
Серия H	Аудиовизуальные и мультимедийные системы
Серия I	Цифровая сеть с интеграцией служб
Серия J	Кабельные сети и передача сигналов телевизионных и звуковых программ и других мультимедийных сигналов
Серия K	Защита от помех
Серия L	Конструкция, прокладка и защита кабелей и других элементов линейно-кабельных сооружений
Серия M	Управление электросвязью, включая СУЭ и техническое обслуживание сетей
Серия N	Техническое обслуживание: международные каналы передачи звуковых и телевизионных программ
Серия O	Требования к измерительной аппаратуре
Серия P	Оконечное оборудование, субъективные и объективные методы оценки
Серия Q	Коммутация и сигнализация
Серия R	Телеграфная передача
Серия S	Оконечное оборудование для телеграфных служб
Серия T	Оконечное оборудование для телематических служб
Серия U	Телеграфная коммутация
Серия V	Передача данных по телефонной сети
Серия X	Сети передачи данных, взаимосвязь открытых систем и безопасность
Серия Y	Глобальная информационная инфраструктура, аспекты протокола Интернет и сети последующих поколений
Серия Z	Языки и общие аспекты программного обеспечения для систем электросвязи