

# ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СВЯЗЬ Narrowband PLC ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6-20/0,4 Кв и SMART GRID

## Стандарт G3, G.HNEM

Vladimir OKSMAN (Lantiq Inc.)

Узкополосная связь по линиям электропередач (NB-PLC), работающая в диапазоне частот 3-500(1000) кГц, была разработана и использовалась в прошлых десятилетиях для диспетчерской и технологической телефонной связи, передачи сигналов телемеханики, релейной защиты и противоаварийной автоматики. Недавно, после длительной монополии технологии, использующей фиксированную полосу частот кратную 4 кГц, появились решения NB-PLC на основе OFDM, известные как G3 и PRIME, предлагая более высокие скорости передачи, устойчивость, и гибкость, которые пригодны для всех приложений интеллектуальных сетей. В начале 2010 года Ассоциация по вопросам стандартизации IEEE и ITU-T начали тестирование технологии NB-PLC, основанной на OFDM, инициировав проекты P1901.2 и G.hnem.

В этой статье дается технический обзор стандарта ITU-T G.hnem, который определяет технологию NB-PLC, предназначенную для интеллектуальных сетей, включая измерения, распределенную автоматику, домашнее управление энергопотреблением, домашнюю автоматику и другие, используя IPv6 в качестве основного сетевого протокола.

**Ключевые слова:** ISO/IEC 14908-3, KNX (ISO/IEC14543-3-5), CEBus (CEA-600.31), IEC 61334-3-1, IEC 61334-5, Ariane Controls, VacNet, HomePlug C&C, G3, PRIME, технология NB-PLC G.hnem.

### ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Узкополосная связь по линиям электро-сети (NB-PLC) функционирует в диапазоне частот 3-500 кГц, который включает полосы CENELEC (3-148,5) кГц, определенный Европейским Комитетом по стандартизации, полосу FCC (9-490) кГц, определенную американской Федеральной комиссией связи, и полосу ARIB (10-450) кГц, определенную японской Ассоциацией Радиопромышленности [1, 2]. Электроэнергетические компании во всем мире используют технологию NB-PLC для измерений и управления нагрузкой [3]. NB-PLC также соответствует многим другим приложениям, включая служебные приложения, большую часть приложений контроля и управления для жилого сектора, управления энергопотреблением и автоматизации производства (PEVs) [1].

Для приложений, связанных с умными сетями, будущими цифровыми домами и домашней автоматикой, NB-PLC предлагает высокую надежность, низкую потребляемую мощность и невысокую цену, по сравнению

с другими решениями. Кроме того, NB-PLC позволяет передать сигналы между сетями среднего (MV) и низкого напряжения (LV), что часто является важной функцией инфраструктуры измерений (AMI). Роль и главные преимущества NB-PLC для умной сети подробно рассмотрены в [1].

Первое поколение NB-PLC использовало простую технологию, использующую одну или две несущие с фазовой (PSK) или частотной манипуляцией (FSK). Скорость передачи данных достигали нескольких килобит в секунду. Международные организации по разработке стандарта (SDOs), такие как Международная Электротехническая Комиссия (IEC) и Международная организация по стандартизации (ISO), утвердили несколько из этих технологий: LonWork (ISO/IEC 14908-3), KNX (ISO/IEC14543-3-5), CEBus (CEA-600.31), IEC 61334-3-1, и IEC 61334-5, которые широко применяются в приложениях управления и контроля. Также в мире используются не стандартизованные технологии, такие как Ariane Controls, VacNet, HomePlug C&C, и некоторые другие.

Второе поколение NB-PLC, которое использовало OFDM, обеспечило скорость передачи приблизительно 100 Кбит/с и гибкое использование спектра. Последнее значительно улучшает помехоустойчивость, в особенности передачу сигналов MV-to-LV. Первое оборудование этой технологии появилось в 1999-2001 гг. [4-6], и в дальнейшем появились PRIME [7] и G3 [8], работающие в полосе CENELEC-A, предназначенные, главным образом, для измерений. Испытание NB-PLC технологии прошли на этапе экспериментального развертывания и показали хорошие результаты, как на среднем, так и на низком напряжении. Подробное описание и сравнение G3 и PRIME могут быть найдены в [9], об их производительности и результатах испытания в рабочих условиях сообщают в [10, 11].

К сожалению существующие NB-PLC системы с одной и несколькими несущими, являются несовместимыми. Это усложняет развертывание и увеличивает стоимость. Чтобы решить этот вопрос, в январе 2010 Международный союз электросвязи – Телекоммуникационный Сектор (ITU-T) запустил проект G.hnem с целью разработать унифицированный международный стандарт NB-PLC следующего поколения, который интегрирует функции G3 и PRIME и добавляет новые функции для повышения производительности, пропускной способности, устойчивости и надежности. В феврале 2011, ITU-T согласился на апробацию Рекомендаций G.9955 и G.9956, которые определяют физический уровень G.hnem (PHY) и канальный уровень (DLL).

Протокол сетевого уровня G.hnem – IPv6 облегчает образование шлюзов к другим сетям, таким как сети широкополосного доступа и сети Zigbee. G.hnem позволяет тысячам узлов работать в сети одновременно. Номинальные скорости передачи в соответствующих условиях могут превысить 1 Мбит/с, а скорость передачи данных приложений составит сотни килобит в секунду. G.hnem интегрирует особенности устройства G3 и PRIME, добавляет много новых технических возможностей, таких как:

- Когерентный прием, для лучшей чувствительности приемника.
- Специальная защита от импульсных помех:
  - гибкая частота повторения;
  - синхронизация с полупериодами АС.
  - устойчивая преамбула;
  - устойчивая упаковка текста фрейма.

- Гибкий частотный диапазон, чтобы соответствовать международным стандартам.
- Адаптивные правила доступа к среде передачи, для поддержки больших сетей.
- Поддержка мультисетевых протоколов.

## ОПИСАНИЕ G.HNEM

У технологии NB-PLC G.hnem – есть следующие свойства:

- Глобальная функциональная совместимость – Устройства от поставщиков во всем мире могут прямо связаться при использовании той же самой полосы частот.
- Технические возможности – Обеспечивают более высокую пропускную способность и улучшенную устойчивость, надежность, масштабируемость и гибкость.
- Электромагнитная совместимость (EMC) – Соответствие глобальным и региональным нормам, разработанным в соответствии с ITU – Сектор Радиосвязи (ITU-R).
- Широкий диапазон приложений – Включает большинство приложений Smart Grid.
- Совместимость – технология облегчает взаимодействие с существующими устройствами NB-PLC.

Приемопередатчики G.hnem имеют много режимов работы. PHY может быть запрограммирован для работы с различным частотным планом в полосах частот CENELEC, FCC и ARIB, по различным типам электрических сетей, таким как MV, LV, домашняя электропроводка, АС и контрольным кабелям. Гибкие настройки модуляции и параметров кодирования обеспечивают эффективную адаптацию к средам с разными вариантами ухудшения параметров. Параметризованный DLL облегчает различные сетевые протоколы (например, IPv6, IPv4), оптимизирует передачу для различных размеров пакета (20-1522 байта) и использует параметризованный подход к среде доступа, маршрутизации и безопасности.

## СЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА G.HNEM

### Общий обзор

Сети G.hnem состоят из одного или более логических доменов, где каждый домен составлен зарегистрированными в нем узлами. Схема адресации G.hnem позволяет адресовать до  $2^{15}-1$  узлов в простом домене и до  $2^{16}-1$  доменов в сети. Каждый узел идентифицируется его доменным ID и ID узлом. Один узел в домене

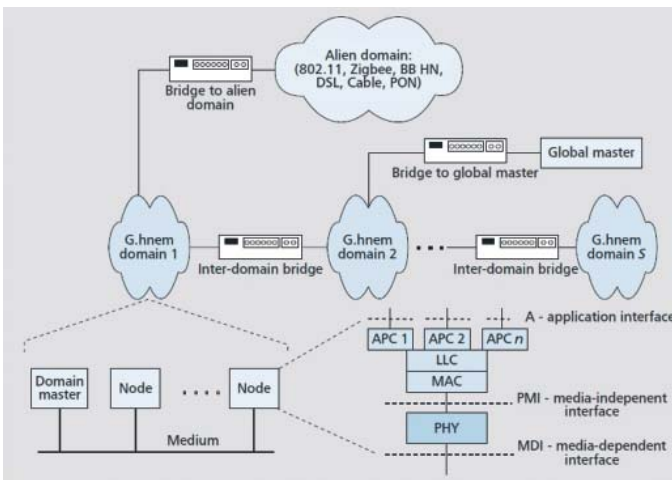


Рис. 1. Модель сети G.hnem, структура домена, и эталонная модель протокола G.hnem

обозначается как мастер (DM). DM руководит функциями всех других узлов, и выполняет администрирование и другие операции управления всего домена. Управление и координация работы узлов в домене DM осуществляет в широковещательных кадрах “неисправность”. DM определяет отправку синхронных меток, отправляемых периодически, и асинхронных

меток, отправляемых по усмотрению DM. Если узел, функционирующий как DM, перестал работать, функцию DM автоматически передают к другому узлу домена.

Домены одной сети соединяются междоменными мостами, как показано на рис. 1. Это позволяет узлам любого домена связываться с узлами любого другого домена. Любой домен может также быть соединен мостом с доменом других сетей, не поддерживающих G.hnem (например, Zigbee, 802.11, G.hn). Узлы в домене могут связаться напрямую, или через один или более узлов. В централизованном режиме все узлы связываются через один выделенный коммутационный узел, называемый доменной точкой доступа.

Пример сети приложений, соединяющей различных потребителей, представлена на рис. 2. Сеть включает узлы для измерений потребления электроэнергии (электрические счетчики) и различное оборудование, включенное в домашние локальные сети (HANs). Концентраторы данных соединяются с MV или LV линиями, в зависимости от конкретной ситуации. Узлы, соединенные с одной линией LV обычно формируют домен, узел концентратора данных часто работает как DM. Узлы, соединенные с линией MV, могут также сформировать домен. Концентраторы данных соединяются с головным узлом (HE) универсальными системами доступа, такими как цифровая абонентская линия (DSL), пассивная оптическая сеть (PON), или беспроводная система пакетной радиосвязи (GPRS). HAN (home area networks) является интерфейсом энергетических сервисов (ESI) и шлюзом ко всем домашним устройствам, таким как электрическое оборудование различных механизмов (electrical vehicle service equipment) EVSE, программируемые климатические установки (programmable-smart thermostat) PST, умные устройства управления энергопотреблением (energy management server) EMS и домашняя система автоматизации. HAN может быть соединен мостом к широкополосной связи домашней сети, которая в этом случае является сторонним доменом для G.hnem.

Распространение сигналов NB-PLC значительно изменяются в зависимости от эксплуатации электрической сети, так как каждое электрическое устройство, при включении и выключении, может существенно изменить параметры канала, вызывая изменения волнового сопротивления и помех. Поэтому разделение сигнала между доменами не может быть

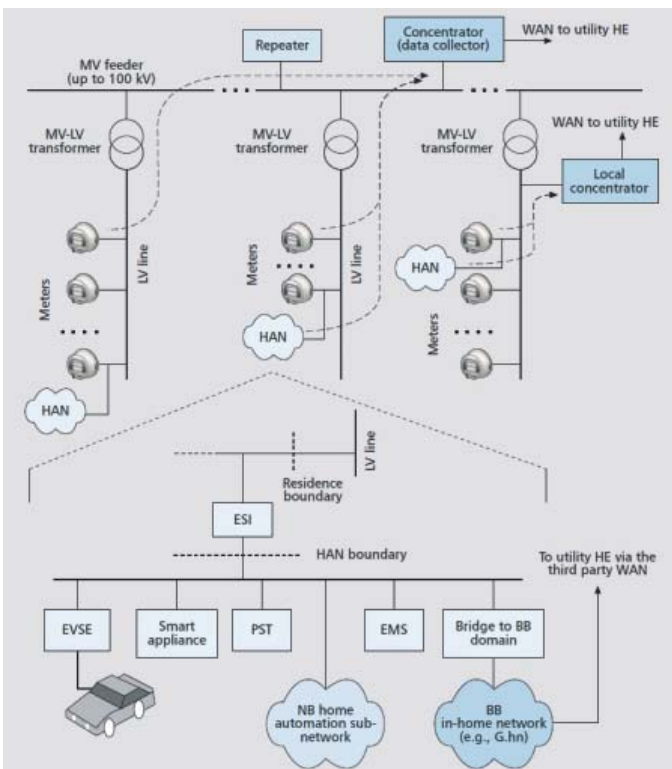


Рис. 2. Пример сетевой топологии: сеть приложений (AMI), соединенная с сетями жилого сектора (HANs)

гарантировано: сигналы передачи в одном домене обычно обнаруживаются в других. Таким образом, разделение на домены является исключительно логическим и коллизии между переданными кадрами сокращаются благодаря правилам доступа к среде передачи, главным образом, основанным на распознавании несущей. Прямая связь между узлами одного домена также не гарантируется. Взаимно недоступные узлы могут связаться посредством ретрансляции; число транзитных участков может превысить. Узлы, которые скрыты от DM, координируются через узлы DM-прокси, определяемые DM.

### Координация между доменами

Домены одной сети часто требуют координации, чтобы избежать чрезмерной взаимной интерференции. Интерференция происходит в том случае, если домены используют одинаковые частотные диапазоны и существует взаимное проникновение сигналов или не могут инициировать механизмы поиска несущей. В результате один домен интерферирует с передачей другого. Координация между доменами — ответственность глобального ведущего устройства (**Global Master**) **GM** (рис. 1). **GM** собирает статистические данные от доменов и внешних объектов управления, определяет адекватные параметры для каждого домена (мощность передачи, частотный план и т.д.) и передает их к DM соответствующих доменов. Каждый DM помещает эти параметры во все узлы своего домена. **GM** может также оптимизировать соединения, направленные через разные домены.

Интерференцией между соседними доменами сетей **G.hnem** управляют, используя адаптивный протокол доступа к среде, основанный и на физическом и на виртуальном распознавании несущей.

### Совместимость с другими сетями

Если разные системы PLC используют ту же самую полосу частот, но недостаточно пространственно разделены, их взаимные помехи могут быть снижены механизмами **G.hnem**, обеспечивающими совместимость в следующих случаях:

- с соседними NB-PLC, использующими одну несущую — вырезая используемые полосы частот одночастотных PLC;
- с другим NB OFDM — системами PLC (**G3**, **P1901.2**, **PRIME**) — механизм совместимости в настоящий момент изучается (1);

- с радиосвязью — выполняются соответствующие спецификации EMC (например, **EN-50065-1** для **CENELEC**) и вырезаются частоты, которые могут создать проблемы EMC;
- с домашними и широкополосными сетями доступа — проблем нет вследствие разделения полос частот [3].

### Обзор физического уровня

**G.hnem** использует OFDM со следующим набором программируемых параметров для различных приложений и различных типов проводного соединения:

- число несущих: **128, 256**;
- разнос несущих частот: **1,5625 кГц, 3,125 кГц**;
- модуляция несущих: квадратурная амплитудная манипуляция (**QAM**);
- защитный интервал: 0 — для заголовка кадра и **30 μs, 60 μs** и **120 μs** для полезной нагрузки;
- размер окна: **8, 16** выборок.

Выбранные значения разноса несущих частот упрощают реализацию приложений **G.hnem** (**G3** и **PRIME**), и согласовывают **G.hnem** с **IEEE P1901.2**, так как у значений разноса несущих частот во всех этих системах (2) есть общий делитель.

Выбранные защитные интервалы перекрывают ожидаемые задержки распространения во всех упомянутых типах проводного соединения, таким образом, худшие остаточные межсимвольные помехи (**ISI**) намного ниже чем ожидаемые помехи. Так как заголовок кадра должен быть получен при отрицательном отношении сигнал-шум (**SNR**), его защитный интервал устанавливается на 0, чтобы уменьшить время и упростить обработку. Для полезной нагрузки защитные интервалы определяются и для разноса несущих частот на **3,125 кГц** и на **1,5625 кГц**: **60/120 μs** и **30/60 μs**, соответственно. Двойной защитный интервал используется для **QAM 16**, который более чувствителен к межсимвольной интерференции (**Intersymbol Interference — ISI**). Максимальные издержки вследствие наличия защитного интервала составляют **18,75** процентов.

### Частотный план

**G.hnem** определяет несколько частотных планов, чтобы соответствовать различным правилам и приложениям во всем мире. Каждый частотный план устанавливает несущие частоты с последовательными индексами, характеризующими их начало и конец и исполь-



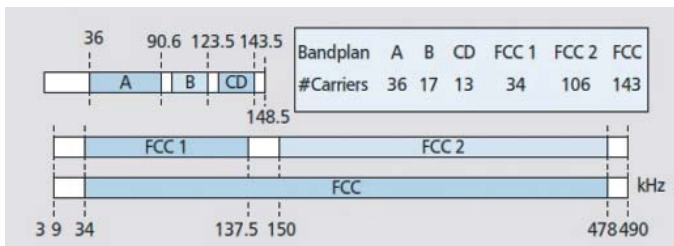


Рис. 3. Частотный план G.hnem для SENELEC и FCC с номерами несущих

зующий определенный разнос несущих частот и защитный интервал. Рис. 3 показывает допустимый частотный план и число несущих частот, используемых в каждом частотном плане; другие несущие частоты маскируются. Полоса CENELEC (3-148,5 кГц) делится на А, Си, и CD частотный план с границами, совместимыми с [2] и использует разнос несущих частот 1,5625 кГц. В настоящий момент определены три частотных плана по полосе FCC, это FCC, FCC 1, и FCC – 2, все с разном несущих частот 3,125 кГц [3]. Для соответствия G.9955,

устройство должно поддерживать, по крайней мере, один частотный план.

**FEC и INTERLEAVER (INTERLEAVER)** – предназначен для борьбы с пакетами ошибок путём их разнесения во времени.

**FEC (Forward Error Correction)** – прямая коррекция ошибок реализуется каскадом сверточных кодов и кодом Рида-Соломона (**Reed-Solomon- RS**).

**Interleaver** применяется для борьбы с частотными и временными провалами, включая периодически повторяющиеся провалы с периодом 1/2 цикла AC и продолжительностью до 1/4 цикла AC, улучшая чувствительность приемника при воздействии **AWGN (Additive White Gaussian Noise)**. Interleaver разделяет полезную нагрузку во фрагменты. Затем каждый фрагмент может быть повторен для 2, 4, 6 или 12 раз увеличивая устойчивость. В режиме **Interleave-over-fragment (IoF)** чередуется каждый фрагмент. Чередувание – “по циклу AC” (IoAC) режим разрабатывается для каналов с глубокими периодически замираниями сигнала.

**Модуляция и распределение частот**

В отличие от PRIME и G3, G.hnem не использует дифференциальную фазовую модуляцию PSK (DPSK), [4], а применяет QAM, которая требует когерентного приемника. Используется – QAM 2, QAM 4, и QAM 16).

Известно, что когерентный прием в каналах с AWGN дает улучшение результатов на 2-3 дБ SNR (Signal-to-noise ratio) по сравнению с дифференциально-кодовой модуляцией. Однако, многократные моделирования, представленные комитету, показали даже более высокое значение SNR в присутствии искажений спектральных и временных параметров. Этот вывод не противоречит результатам, полученным в [14], показывая, что некогерентные схемы ухудшают производительность, если в канале периодически происходят временные искажения и возникают импульсные помехи. Так как сильные импульсные помехи и временные искажения свойственны каналам NB-PLC, комитет заключил, что использование когерентного приема может значительно увеличить чувствительность и устойчивость к нестабильности канала, таким образом, сокращая количество переключений в маршруте.

Нарис. 4 а представлены результаты моделирования, которые показывают значения SNR, при получении 100-байтовых пакетов с **PER (Packet Error Rate) 0,1** в присутствии AWGN, искажений временных параметров и частот-

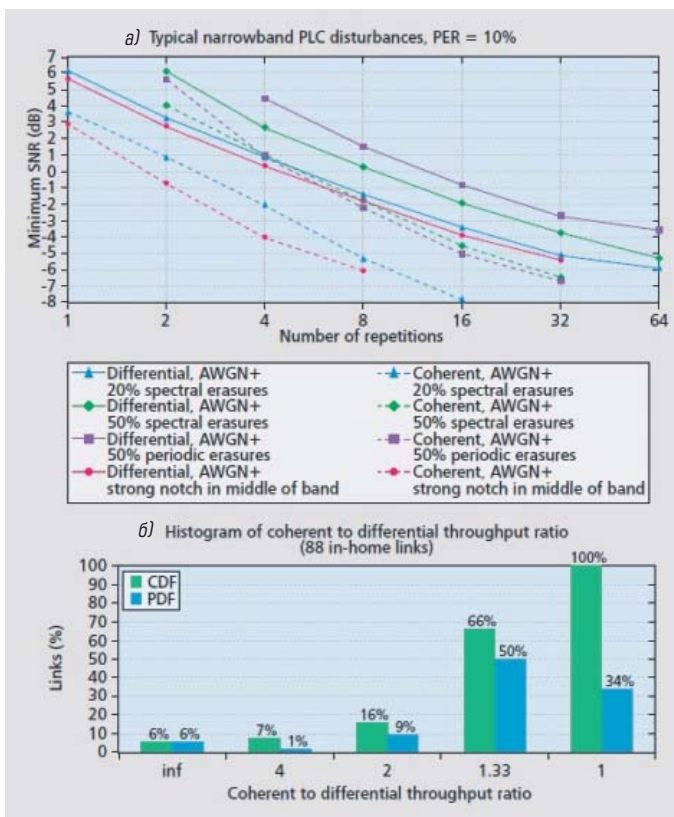


Рис. 4. а) сравнение чувствительности когерентного приемника и дифференциально кодовой модуляции с различным количеством повторений и различными процентами потерь; б) результаты полевых испытаний пропускной способности

ных искажений 20 процентов и 50 процентов, (5) глубоких частотных провалов в середине полосы. Данные показывают, что преимущество когерентного приема для моделируемых сценариев значительно растет, поскольку замирания встречаются очень часто, достигая до 6 дБ SNR. Кроме того, измерения пропускной способности в полевых испытаниях, выполненных в более чем 88 реальных домашних соединениях показали (рис. 4b), что модемы, используя когерентный прием, могут достигнуть той же самой пропускной способности, что и модемы, использующие дифференциальное кодирование на всех соединениях (зеленый столбец справа) или достигнуть более высокой пропускной способности (см. столбцы для отношения пропускной способности 2 и 4); 6 процентов линий, использующих дифференциальное кодирование, не смогли осуществить соединение, в то время как модемы, используя когерентный прием, работали.

Чтобы обеспечить достоверную синхронизацию и оценку канала, необходимые для когерентного приема, добавляются пилот-сигналы в предопределенных местах заголовка и в информационной части сигнала, один пилот на 12 несущих. Позиция пилот-сигнала в каждый раз смещается на три несущие от предыдущего обозначения, чтобы уменьшить ошибки интерполяции. Пилотные сигналы очень значимы для улучшения приема временных каналов.

Чтобы адаптироваться к изменяющимся условиям канала, G.hnem использует **TONE MAPPING** (выбор несущих); карта несущих определяет число бит, которые вкладываются в несущую, основываясь на фактическом SNR. **TONE MAPPING**, используемом для полезной нагрузки, обозначается в заголовке кадра. Для целей функциональной совместимости, заголовки кадра поочередно использует QAM 4 для всех несущих частотного плана. Так как SNR в образованном канале NB-PLC обычно низок, на несущую может быть загружено только небольшое количество бит. Также, рассматривая относительно небольшое количество несущих и низкую скорость кодирования, в настоящий момент используется только загрузка 1, 2, и 4 бита на несущую.

Частотное маскирование может выключать определенные несущие, чтобы обеспечить соответствие местным правилам EMC. Данные передаются только на несущих, которые используются в применяемом частотном плане и обеспечивают необходимый SNR; другие несущие частоты или маскируются (выключаются)

или не нагружаются (в соответствии с частотным планом). Список используемых несущих (частотный план) обозначается в заголовке кадра, в то время как маскируемые частоты, приемлемые для передачи, распределяются метками. Биты заголовка, для целей функциональной совместимости, загружаются во все несущие, применяемого частотного плана, включая несущие имеющие низкий SNR и запрещенные местными правилами, передаваемые с нулевой мощностью. Ненагруженные несущие могут также быть переданы с нулевой мощностью, чтобы улучшить SNR на загруженных несущих, используя ту же самую мощность передачи.

**Фрейм**

Фрейм передачи (фрейм PHY) состоит из преамбулы, заголовка и полезной информации (рис. 5). Преамбула используется для временной и символьной синхронизации, обнаружения фрейма, и оценки канала. Заголовок фрейма PHY (PFH) передает параметры, необходимые для распознавания виртуальных несущих и декодирования полезной нагрузки.

Полезная нагрузка несущих, управление доступом к среде (MAC), блок данных протокола (PDU), MPDU (Message Protocol Data Unit), разделяются на одно или более кодовых слов FEC. В заголовке MPDU (MPH) переносится адресная информация и указывается тип MPDU, заданный тип подтверждения и другие параметры, необходимые для распаковки полезной нагрузки. Чтобы ускорить дешифровку адреса, MPH передается как отдельная кодовая комбинация FEC. На MPDU устанавливается один или более логических каналов PDU (LPDUs). Каждый LPDU переносит сегмент

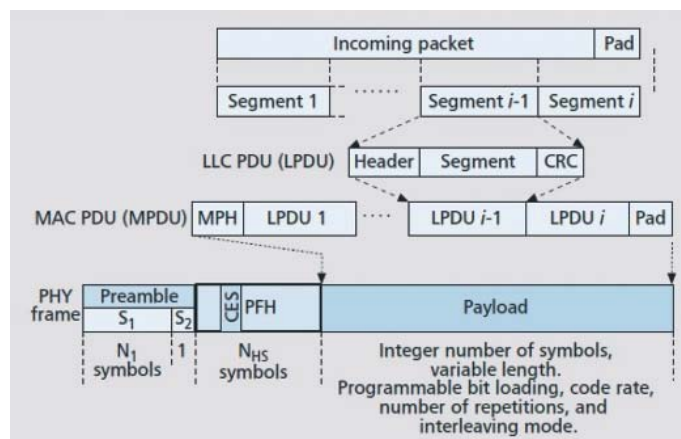


Рис. 5. Формат передаваемых фреймов

входящего пакета и защищается 32-разрядным циклическим избыточным кодом (CRC); MPH защищается 8-разрядным CRC. Размер передаваемого кадра адаптируется к реальным условиям канала посредством сегментации. Для низкопрофильных реализаций G.hnem определен упрощенный формат MPDU, передавая единственный LPDU без CRC, защищенного 32-разрядной последовательностью проверки MPDU (MPCS), добавленный после стартовой.

**Преамбула и обозначения оценки канала**

Преамбулы состоят из N1 символов S1, следующий символ S2 = -S1. Переход между S1 и S2 – контрольная точка для запуска полученного кадра. Все значения преамбулы обеспечивают лучшее распространение сигнала, для уменьшения внеполосного излучения, маскирования несущих, которые создают проблемы EMC.

В высококачественных каналах, без сильных и длительных импульсных помех, N1 = 8 достаточен для фрейма с низким SNR – 7 дБ. В более тяжелых каналах периодические импульсные помехи могут сделать невозможным передачу информации до 50 процентов времени каждого 1/2 цикла AC. Для этого G.hnem определяет устойчивую преамбулу с помощью дополнительного числа значений S1, которые охватывают 1/4 цикла AC. Более того, дополнительная защита представляется для обозначения S2, потому что, если S2 стирается (даже короткими импульсными помехами), теряется целый фрейм. Чтобы защитить S2, используются два последовательных символа обозначения оценки канала (channel estimation symbols – CESs): CESs помещается в заголовке кадра, особенно S2 за 1/4 цикла AC (рис. 5). Первое CESs – то же самое, что символы S2, второе CESs – символы S1. Эта модель гарантирует, что по крайней мере одно обозначение S2 останется в живых, если продолжительность

импульсных помех будет до 1/4 цикла AC. CES S2 может отличить от преамбулы S2 детектированием текста следующего обозначения S1.

Все обозначения преамбулы модулируются псевдослучайной двоичной последовательностью (PRBS) с использованием QAM 4 на всех несущих частотах. Последовательность PRBS перезапускается в первой несущей каждого символа.

**Заголовок кадра PHY (PHYSICAL layer protocol)**

Обнаружение PFH является очень важным, потому что его порча подразумевает порчу всего пакета для принимающего узла и порчу распознавания виртуальных несущих на всех других узлах. Для устойчивости PFH всегда использует QAM 4, сверточный код скорости 1/2 и 12 повторений, в то время как кодирование RS пропускается. PFH символы передаются без защитного интервала, чтобы сохранить длину символов, так же как в преамбуле. Это упрощает определение границы фрейма, используя и преамбулу и CES (в случае, если символы S2 преамбулы получились стертыми). Адресная информация не передается в PFH, чтобы уменьшить “время на проводе”. PFH защищается 12-разрядным CRC, который обеспечивает достаточно низкую вероятность необнаруженной ошибки при распознавании виртуальных несущих частот. Для более высокой защиты от периодических импульсных помех, биты PFH чередуются по программируемому временному интервалу. В устойчивом режиме временной интервал PFH увеличивается до кратных полупериодов AC, применяя дополнительные повторения. В нормальном режиме функционирования временной интервал покрывает один полупериод AC.

**ОБЩИЙ ОБЗОР УРОВНЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ (DATA LINK LAYER)**

**Метод доступа к среде**

G.hnem определяет contention-based множественный доступ по приоритетам с контролем несущей и предотвращения коллизий (CSMA/CA) с четырьмя приоритетными уровнями. Три более низких приоритета имеются для фреймов информации пользователя, четвертый приоритет для фреймов, переносящих аварийную сигнализацию. Всем фреймам управления предоставляют третий приоритет, чтобы сделать управление сетью более динамичным.

Каждый Contention Period (CP, рис. 6) CSMA/CA запускается с определения при-

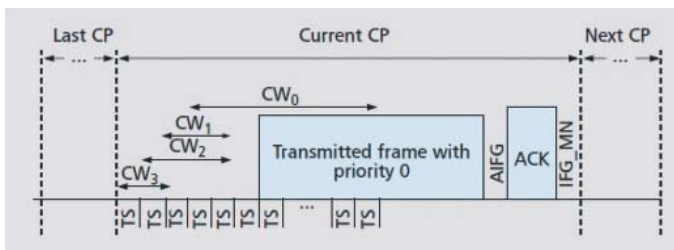


Рис. 6. Пример доступа – Contention Period (CP) к среде передачи: передача фрейма с приоритетом 0



оритета: каждый приоритет присваивается **Contention Window (CW)** с корректируемым размером и позицией; CWs различных приоритетов могут совмещаться. Каждое устройство выбирает в произвольном порядке слот передачи **transmission slot (TS)** в соответствующем CW и далее мониторит среду, используя механизм распознавания несущей (текста преамбулы); если среда занята до выбранного TS, то устройство воздерживается от передачи. Устройства, которые не передают в CP, обнаруживают конец CP, используя механизм распознавания несущей.

Размер CW для каждого приоритета динамически обновляется на основании ожидаемого числа устройств, получающих доступ в следующем CP. Это обновление обеспечивается сочетанием автономных и централизованных механизмов. Автономно, каждый узел корректирует CW. Это используется для каждого приоритета, контролируя передачу других узлов, собирая действующие значения CW и TS, используемые переданными кадрами, применяя алгоритм, предложенный в [15]. Однако, параметры этого алгоритма, такие как начальный размер CW и позиция, скорость обновлений и коэффициент масштабирования, устанавливаются DM централизованным способом. Формируя определенные значения этих параметров, DM или его помощники могут управлять процессом обновления, и даже требуют, чтобы определенное количество узлов использовали фиксированные параметры CW (полностью централизованная установка). Счетчики сдвига передачи также обновляются после каждого CP.

Синхронный доступ к среде передачи является опциональным. Если разрешено, DM координирует узлы периодически отправляемыми (синхронизирующими) метками. Каждая метка может включать много contention-based and contention-free периодов, подобных [16]. В течение contention-based периодов узлы, участвующие в обработке данных используют CSMA/CA.

#### Ретрансляция и подтверждение приема

Поддержка IPv6 и некоторых других сетевых протоколов требует передачи довольно длинных пакетов, которая проблематична в условиях быстро изменяющихся помех в электрических линиях. Таким образом, длинные пакеты сегментируются так, чтобы размер сегмента соответствовал фактическим

параметрам канала. Если сегменты передаются в отдельных фреймах, пропускная способность теряется из-за многократных межкадровых интервалов и подтверждений. Поэтому, для более высокой эффективности, фрейм G.hnem может переносить многократные сегменты, каждый инкапсулированный в **LPDU** и защищенный его собственным **CRC** (рис. 5). Продолжительность, порядок, и общее количество сегментов в пакете обозначаются в **MPH**.

Передача фреймов, содержащих множество сегментов, подтверждается выборочным квитированием: приемник проверяет CRC каждого сегмента и определяет все поврежденные сегменты, которые далее ретранслируются. Фрейм подтверждения следует за переданным кадром, разделенным коротким межкадровым интервалом (**AIFG** на рис. 6).

Чтобы уменьшить сложность, применяется механизм “стоп-стартовой ретрансляции”. Таким образом, передатчику не позволяют передать следующий пакет, пока все предыдущие сегменты или получают подтверждение или закончится время ожидания. После первых сегментов переносящих фреймы определенного пакета происходит подтверждение. Приоритет всех следующих фреймов, переносящих оставшиеся сегменты того же самого пакета, может повыситься до высшего приоритета, допустимого для кадров данных.

#### Полнодоступная сеть с распределенной топологией (MESH NETWORKING) и адаптация L3

G.hnem поддерживает многие сетевые протоколы, по умолчанию – IPv6. Каждый протокол поддерживается функциями соответствующих конвергентных прикладных протоколов (**Application Protocol Convergence – APC**); (APC 1 до APC-n на рис. 1). Тип APC, используемого передатчиком, обозначается в заголовке пакета. **APC IPv6** позволяет компрессию IPv6, включая методы, стандартизированные для беспроводных персональных сетей с малой мощностью (LoWPANs) [17, 18].

Полнодоступная сеть (**Mesh networking**) – главная особенность для большинства приложений Smart Grid. Ожидается, что маршрутизация на сетевом уровне (уровень 3, L3, маршрутизация) будет использоваться в большей части сетей IPv6, включая Smart Grid. Однако, для приложений кроме IPv6, G.hnem устанавливает дополнительную маршрутизацию DLL (маршрутизация L2), которая вы-



ключается, если маршрутизация L3 позволяет избежать проблем управления межуровневой маршрутизацией. При маршрутизации L3 большая часть доменных функций управления также обеспечиваются сетевым уровнем, в то время как аналогичные средства управления L2 отключаются.

### Безопасность

Приложения Smart Grid требуют надежной защиты против внешних и внутренних угроз. Внешний атакующий не имеет учетных данных для доступа к сети, но способен подслушивать передаваемую информацию и передавать злонамеренные кадры в сеть (например, повторениями- replay attack). Внутренний законный, но злонамеренный пользователь сети – “угроза соседу” (**a compromised neighbor in an AMI network**). Для взаимно скрытых узлов, позиция транзитного узла а “**man-in-the-middle**” – угроза.

G.hnem определяет средства защиты от упомянутых типов атак шифрованием, аутентификацией данных и соответствующим управлением сообщениями, используя кодовый алгоритм (CCM) [19], основанный на 128-разрядном усовершенствованном стандарте шифрования (**Advanced Encryption Standard – AES 128**). Этого шифрования достаточно против атакующих с приемлемо мощными вычислительными ресурсами, но без доступа во внутреннее функционирование узлов. Ключи шифрования могут быть парные, групповые и доменные. Парные ключи обеспечивают единственный ключ шифрования для каждой пары связывающихся узлов, который неизвестен всем другим узлам. Это гарантирует конфиденциальность между пользователями в пределах сети и создает дополнительный уровень защиты против внешних вторжений. Степень безопасности конфигурируема и, с высоким уровнем, эквивалентна определенной в IEEE 802.11n.

Сквозная безопасность обеспечивается верхними уровнями (сетевой уровень или выше). Для достаточной безопасности верхнего уровня, шифрование фреймов MAC может быть выключено или установлено доменное, если безопасное сетевое управление доступом требуется в дополнение к надежности и конфиденциальности передачи данных, обеспеченных верхними уровнями. Физическая безопасность и механизмы безопасности верхнего уровня выходят за рамки G.hnem.

### Поддержка регионального регулирования

При сетевой инсталляции, DM (Domain master) загружается адекватными региональными настройками частотного плана, масками несущих частот, пределами мощности сигнала, и так далее, которые распространяются по домену соответствующими метками. Чтобы получить допуск, новый узел сначала ищет метки домена, к которому он намеревается присоединиться. При получении метки, узел получает всю доменно-ориентированную информацию, включая регулирующие параметры, настройки относительно уровня безопасности, тип маршрутизации и другие соответствующие функции. После разрешения узел запоминает соответствующие региональные настройки и использует их для будущих соединений. Таким образом, метки облегчают функциональную совместимость, глобальную поддержку местных правил и функции Plug and Play. Разрабатываются другие функции Plug and Play, такие как “слепое” разрешение и аутентификация.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

G.hnem – международная ITU-T NB-PLC Рекомендация, основанная на технике OFDM, которая предназначена для большинства приложений **smart grid: (Automated Meter Reading), AMI (Advanced Metering Infrastructure), AMR** для жилых помещений и офисов, распределенной автоматизации, управление домашним энергопотреблением, универсальной домашней автоматикой и зарядкой электромобилей – PEV (Plug-in Electric Vehicle). Эта технология способна работать по сетям LV и MV, переходя через трансформаторы MV-LV, по электропроводке в домах, кабелям для зарядки аккумуляторов PEV и другим подобным типам проводных соединений.

Основная масса Рекомендации указывает PHY (G.9955) и DLL (G.9956), в то время как приложения документируют существующие решения OFDM G3 и PRIME, облегчая переходный период и соответствие местным правилам.

G.hnem гарантирует полную функциональную совместимость между сетевыми узлами, независимо от проводного типа соединения, сценария развертывания, и производителя. G.hnem – объединяет NB-PLC нового поколения, интегрирует функции существующих решений OFDM и добавляет многие техни-

ческие усовершенствования для увеличения сетевого покрытия, скорости передачи, с использованием когерентного приема, гибкого повторения, устойчивой преамбулы и заголовка, адаптации к среде доступа, и других средств. При соответствующих условиях среды доступа, скорость передачи G.hnem может превысить **1 Мбит/с**. Многие доступные частотные планы улучшают использование спектра и помогают адаптации к различным параметрам канала связи и региональным правилам регулирования. Кроме того, G.hnem определяет инструменты, которые уменьшают интерференцию между граничащими сетями G.hnem и облегчают совместимость с наследием систем PLC – PSK/FSK/S-FSK NB и системами радиосвязи. Разрабатываются инструменты совместимости с non-G.hnem OFDM NB-PLC сетями, такими как IEEE P1901.2 [11].

G.hnem предлагает глобальное взаимоувязанное решение для коллективных и частных установок, прокладывая путь к глобальному применению NB-PLC.

#### Список литературы

1. *S. Galli, A. Scaglione and Z. Wang*. “For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid”, Proc. IEEE, vol. 99, no. 6, June 2011, pp. 998-1027.
2. *CENELEC EN 50065-1*. “Signalling on Low-Voltage Electrical Installations in the Frequency Range 3 kHz to 148.5 kHz. Part 1: General Requirements, Frequency Bands and Electromagnetic Disturbances”.
3. *H. Ferreira et al., Eds*. Power Line Communications: Theory and Applications for Narrow-band and Broadband Communications over Power Lines, 1st ed., Wiley, 2010.
4. *M. Deinzer and M. Stoger*. “Integrated PLC-Modem Based on OFDM”, Int’l. Symp. Power Line Commun., Lancaster, U.K., Mar. 31-Apr. 1, 1999.
5. *G. Bumiller and M. Deinzer*. “Narrow Band Power-Line Chipset for Telecommunication and Internet Applications”, Int’l. Symp. Power Line Commun., Malmö, Sweden, Apr. 4, 2001.
6. *G. Bumiller and M. Sebeck*. “Complete Power-Line Narrow Band System for Urban-Wide Communications”, Int’l. Symp. Power Line Commun., Malmö, Sweden, Apr. 4, 2001.
7. *PRIME: Powerline Related Intelligent Metering Evolution (PRIME)*, available: <http://www.prime-alliance.org/>
8. *G3-PLC: Open Standard for SmartGrid Implementation*; <http://www.maxim-ic.com/products/powerline/g3-plc/>
9. *M. Hoch*. “Comparison of PLC G3 and PRIME”, IEEE Int’l. Symp. Power Line Commun., Udine, Italy, Apr. 3-6, 2011.
10. *A. Arzuaga et al.* “PRIME Interoperability Tests and Results from Field”, IEEE Int’l. Conf. Smart Grid Commun., Gaithersburg, MD, Oct. 4-6, 2010.
11. *K. Razazian et al.* “G3-PLC Specification for Powerline Communication: Overview, System Simulation and Field Trial Results”, IEEE Int’l. Symp. Power Line Commun., Rio de Janeiro, Brazil, Mar. 28-31, 2010.
12. *IEEE*: “Low-Frequency Narrow-Band Power Line Communications”, <http://grouper.ieee.org/groups/1901/2/>
13. *The HomeGrid Forum* — for Any Wire Anywhere in Your Home, <http://www.homegridforum.org>
14. *D. Umehara, M. Kawai and Y. Morihiro*. “Performance Analysis of Non-Coherent Coded Modulation for Power Line Communications”, Int’l. Symp. Power Line Commun., Malmö, Sweden, Apr. 4, 2001.
15. *R. Gazit and A. Avidan*. “An Innovative Adaptive Channel Access Mechanism”, Int’l. Symp. Power Line Commun., Zaragoza, Spain, Mar. 31, 2004.
16. *IEEE Std. 802.15.4*, “Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for LowRate Wireless Personal Area Networks (WPANs)”.
17. *IETF*. “Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks”. RFC 4944, Sept. 2007.
18. *IETF*. “Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks”, RFC 6282, Sept. 2011.
19. *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, “Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The CCM Mode for Authentication and Confidentiality”, Special Publication 800-38C, May 2004.

*Vladimir Oksman* — Technical Marketing director at Lantiq Inc.

Статья переведена *Лифшицем Александром Михайловичем* — генеральным директором ООО “НПЦ Приоритет”.