SNB — НОВАЯ LPWAN-ТЕХНОЛОГИЯ «ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ» С ВЫСОКОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

БОРИС ЗВЕРЕВ
АНАТОЛИЙ САРТАКОВ, К. Т. Н.
kb-mars@yandex.ru

К настоящему времени в России нашли практическое применение LPWAN-технологии беспроводного доступа для «Интернета вещей» с широкополосным протоколом LoRaWAN и узкополосными протоколами XNB и NB-Fi, разработанными компаниями Semtech, «Стриж» и «Вэйвиот» соответственно. У каждой из них появились свои сторонники во влиятельных частных и государственных структурах, а технология компании «Вэйвиот» с протоколом NB-Fi взята за основу предварительного национального стандарта «Протокол обмена для «Интернета вещей» в узкополосном спектре (NB-Fi)» [1]. Мы считаем, что этот протокол, как и другие, ранее упомянутые, — неудачный выбор для стандарта и федеральных сетей радиодоступа «Интернета вещей».

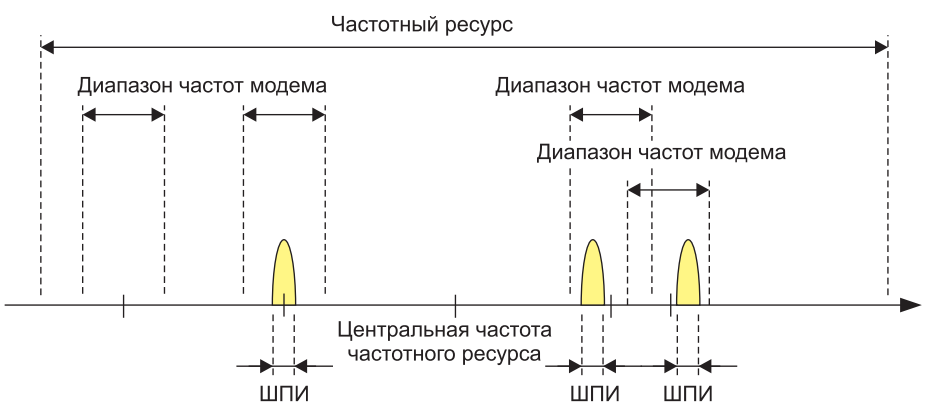


РИС. 1. Иллюстрация непрерывности частоты по множеству модемов при перекрытии их диапазонов частот

ВВЕДЕНИЕ

Прототипом критикуемых узкополосных российских технологий является Ultra Narrow Band (UNB) — технология французской фирмы SigFox [2]. В узкополосных технологиях канал доступа двумерный со случайными частотой и временем, принимающими произвольные значения из непрерывных диапазонов. Непрерывность времени в отсутствие временной синхронизации очевидна, а как проявляется непрерывность частоты в отсутствие частотной синхронизации — проиллюстрировано на рис. 1.

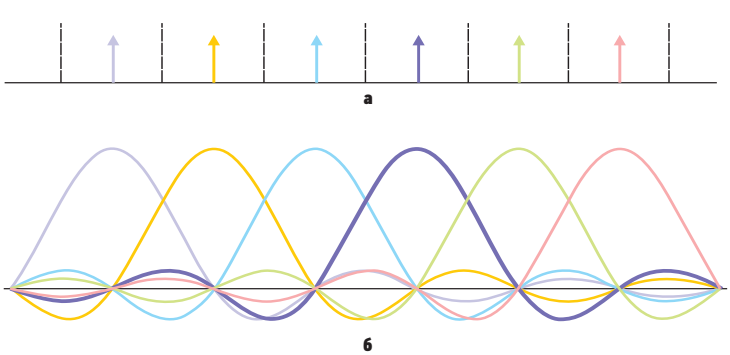


РИС. 2. Дискретный доступ по частоте: а) диапазоны частот модемов сокращены до ШПИ, центральные частоты модемов обозначены цветными стрелками; б) частотные корреляционные функции выходов дискретного преобразователя Фурье в БС (отмечены одинаковым цветом с обозначениями согласованных с ними центральных частот модемов)

Из-за большой нестабильности частоты, превышающей ширину полосы излучений (ШПИ) модемов, частота несущей по множеству модемов может принимать непрерывное множество значений. Мы применили синхронизацию модемов от базовой станции (БС) [3], что позволило реализовать дискретный доступ как по времени, так и по частоте. Дискретность частотного доступа проиллюстрирована на рис. 2.

Для удобства будем обобщенно называть все критикуемые системы несинхронными. Несинхронные системы используют случайный доступ модемов к БС как по времени, так и по частоте, с непрерывными значениями этих параметров. Такой тип случайного доступа известен как алгоритм «чистая» ALOHA [4]. Он предложен и исследован применительно к одномерному каналу с фиксированной частотой и переменным временем. Мы обобщили теорию одномерных алгоритмов ALOHA на двумерные каналы с двумя переменными параметрами. Характеристики двумерных каналов со случайным доступом приведены в Приложении к статье. В несинхронных системах оба пара-

метра — частота и время — непрерывные, что соответствует двумерному обобщению алгоритма «чистая» ALOHA. Расчеты показали, что для получения заявленной в стандарте вероятности коллизий пакетов 0,05 при использовании двусторонней радиолинии с автоматическим запросом повторных передач (ARQ) загрузка канала первичными передачами пакетов должна быть 1,5%. Несинхронные системы часто применяют одностороннюю радиолинию, в которой для надежности доставки пакеты передаются три раза. В этом случае загрузка канала первичными передачами пакетов должна быть 0,5%. Допустимой загрузкой канала и определяется пропускная способность доступа к БС в той или иной технологии. Учитывая вдвое увеличенную длительность передаваемых модемами символов по отношению к времени их обработки приемником БС в технологиях компаний «Стриж» и «Вэйвиот», фактическая допустимая загрузка канала, а значит, и его пропускная способность, в два раза ниже, то есть при двусторонней радиолинии составляет 0,75%, а при односторонней — 0,25%. Такое нерациональное использование невосполнимых ресурсов времени и частоты недопустимо. Тем более недопустимо принимать один из этих несовершенных протоколов в качестве национального стандарта «Интернета вещей».

СИНХРОНИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ ДОСТУПА В СИСТЕМЕ SNB

Для «Интернета вещей» мы разработали новую технологию беспроводного доступа модемов к БС [3], которую назвали Sinchronous Narrow Band (SNB), а соответствующий протокол получил имя SNBWAN, и он лишен главного недостатка всех ранее упомянутых протоколов — низкой пропускной способности. Для увеличения пропускной способности в технологии SNB производится синхронизация модемов с БС по частоте и времени. Для этого БС перед передачей каждого пакета по восходящей радиолинии передает пакет синхронизации по нисходящей радиолинии (рис. 3). В результате синхронизации модемы передают свои пакеты на дискретных частотах приема БС (рис. 2) и в дискретное время, согласованное с интервалами преобразования Фурье в БС.

Регулярный доступ

Значительную часть передаваемых сведений в «Интернете вещей» составляют сообщения от счетчиков энергии или ресурсов, которые должны отправлять свои показания периодически. Для таких сообщений в SNB используется доступ с предварительным резервированием времени передачи и частотного канала. Этот доступ уже не случайный, а регулярный, и его теоретическая пропускная способность равна 100%, а фактическая в системе SNB — 92%.

Случайный доступ

В отличие от счетчиков, датчики срабатывания формируют свои сообщения спорадически, в произвольное время. Эти сообщения, как правило, срочные, не допускают большую задержку доставки. Они передаются в системе SNB при случайном доступе к каналу, но, в противоположность несинхронным системам, не по алгоритму «чистая» ALOHA, а по алгоритму «слотовая» ALOHA, то есть с выделением временных интервалов и частотных каналов [4].

В приложении к статье приведены характеристики двумерного обобщения алгоритма «слотовая» ALOHA. Теоретическая пропускная способность случайного доступа по двумерному каналу при алгоритме «слотовая» ALOHA в четыре раза выше, чем при алгоритме «чистая» ALOHA (для двусторонней радиолинии с ARQ она равна 6%), а фактическая пропускная способность случайного доступа в системе SNB составляет 5,6%.

Смешанный доступ

В системе SNB совместный временной и частотный ресурс может перераспределяться между сообщениями с регулярным и случайным доступом. С учетом того, что в SNB половина временного ресурса используется для синхронизации модемов от БС, в случае деления второй половины временного и всего частотного ресурса между регулярным и случайным доступом поровну средняя пропускная способность системы SNB равна 24,4%, что в 32,5 раза выше пропускной способности несинхронных систем с двусторонней радиолинией.

Экономические преимущества системы SNB

Прямым следствием преимущества системы SNB в пропускной способности является экономическая выгода от ее использования. Больше пропускная способность — больше число обслуживаемых абонентских модемов при одинаковых затратах на инфраструктуру сети. И если в начальный период после установки БС при малом количестве обслуживаемых абонентских модемов все системы легко справляются с малой сетевой нагрузкой, то по мере подключения к БС новых модемов несинхронные системы быстро исчерпают свой запас пропускной способности и оператору сети придется устанавливать новую БС, действующую в другом частотном диапазоне. У системы SNB запас пропускной способности в 32,5 раза выше, поэтому она выгодна операторам сетей, а благодаря снижению стоимости обслуживания на один абонентский модем — выгодна и потребителям услуг «Интернета вещей».

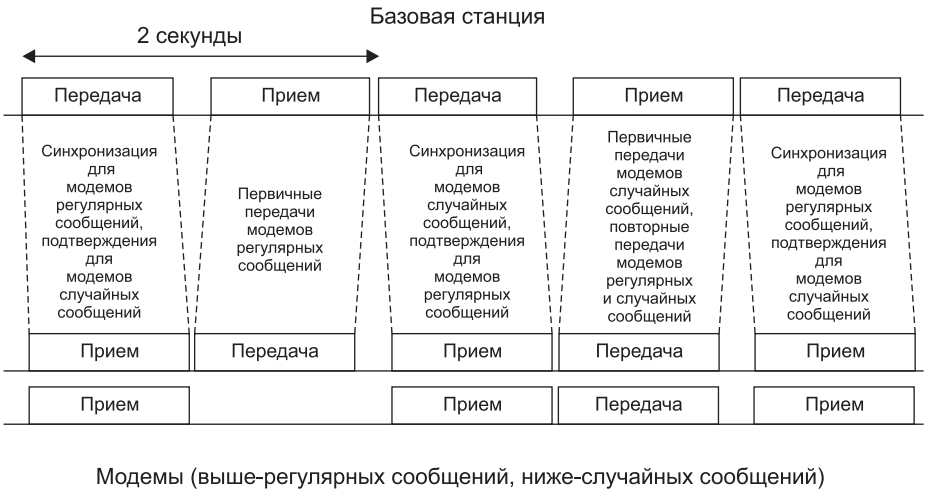


РИС. 3. Циклограмма синхронной сетевой работы системы SNB

РИС. 4. ▲ Сложность обработки сигналов в несинхронных системах

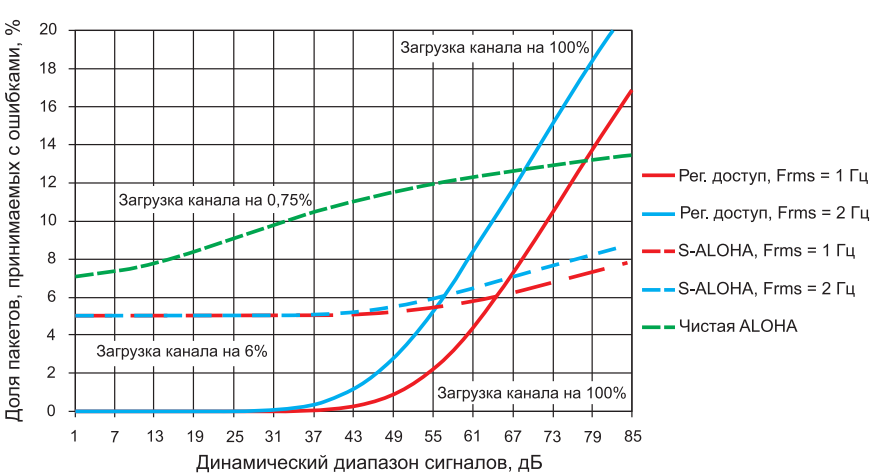
СРАВНЕНИЕ КПД МОДЕМОВ И СЛОЖНОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В БС

Наряду с низкой пропускной способностью несинхронные узкополосные системы «Стриж», «Вэйвиот» в сравнении с SNB имеют и другие недостатки, обусловленные тем, что используют доступ с непрерывными случайными значениями частоты и времени передачи пакетов. Причем в приемнике БС нет возможности согласовать время накопления отсчетов принимаемых сигналов при посимвольном преобразовании Фурье с символьным интервалом каждого из модемов. Поэтому длительность символов модемов увеличивают вдвое по отношению к времени накопления отсчетов (рис. 4), что приводит к двукратному увеличению времени передачи сообщения и вдвое ускоряет разряд элементов питания модемов. У модемов SNB энергетический КПД выше минимум в два раза.

Неопределенность по частоте несущей и тактам принимаемых сигналов в несинхронных системах вызывает необходимость реализации в БС трех квадратурных детекторов со смещением опорных частот на треть от шага дискретизации по частоте и по два преобразования Фурье над выходными отсчетами каждого из детекторов (рис. 4). В результате для обработки сигнала компания «Стриж» вынуждена использовать дорогой и ненадежный из-за перегрева графический ускоритель NVIDIA. А компания «Вэйвиот» пожертвовала шириной полосы частот восходящей радиолинии и общей пропускной способностью системы, чтобы снизить требование к производительности процессора, что допустимо как частное решение, но не в том случае, когда оно принимается в качестве национального стандарта.

Мы отмечали большее число обслуживаемых абонентов системой SNB в сравнении с несинхронными системами при одинаковых затратах на инфраструктуру. На самом деле и затраты на инфраструктуру в системе SNB значительно ниже, поскольку сложность и стоимость БС намного меньше. В ней достаточно одного квадратурного детектора вместо трех и одного преобразователя Фурье вместо шести.

РИС. 5. ▼ Внутрисистемные помехи в несинхронных системах и системе SNB



Загрузка канала при автоматическом запросе повторной передачи (ARQ)

ВНУТРИСИСТЕМНЫЕ ПОМЕХИ

В системе SNB предусмотрена сетка частот модемов, отвечающая условию ортогональности их сигналов на интервале Фурье-преобразования, выполняемого в приемнике БС. На рис. 2б жирной линией фиолетового цвета выделена частотная корреляционная функция дискретного выхода Фурье-преобразователя, согласованного с сигналом, центральная частота которого на рис. 2а обозначена стрелкой того же фиолетового цвета. При точной настройке других модемов на ортогональные частоты, приходящиеся на нули выделенной корреляционной функции, внутрисистемные помехи отсутствуют. Напротив, в несинхронных системах центральные частоты модемов могут быть любые и условие ортогональности не соблюдается. Поэтому несинхронные системы подвержены сильным внутрисистемным помехам.

На рис. 5 приведены полученные математическим моделированием зависимости доли пакетов, принимаемых с ошибками, от динамического диапазона сигналов для несинхронных систем и системы SNB. Результаты моделирования показывают, что по допустимому динамическому диапазону сигналов несинхронные системы (зеленая пунктирная линия) значительно уступают системе SNB (сплошные линии при регулярном доступе и пунктирные — при случайном доступе). Обратите внимание, что зависимости получены при разных значениях загрузки канала.

ВНЕСИСТЕМНЫЕ ПОМЕХИ

В несинхронных системах весь пакет данных восходящей радиолинии передается на одной частоте, и в случае поражения ее соизмеримой по мощности помехой декодер кода с исправлением ошибок не сможет

исправить весь пакет данных. В SNB используется быстрая псевдослучайная перестройка частоты, что становится возможным благодаря синхронности системы. Каждый следующий символ передается на новой частоте, поэтому сосредоточенная по частоте помеха поражает только один символ. Вызванная этим ошибка приема символа исправляется декодером сверточного кода. Влияние внесистемных помех на функционирование системы SNB значительно меньше, чем на несинхронные системы.

Рассмотрим возможность работы двух и более сетей с разными базовыми станциями системы SNB на одной территории. Как следует из сравнения устойчивости несинхронных систем и системы SNB к внутрисистемным помехам, преимущества системы SNB обусловлены ее синхронностью. Чтобы не потерять указанное преимущество, базовые станции системы SNB, работающие на одной территории, должны быть взаимно синхронизированы или синхронизированы от общего источника сигналов синхронизации. Таким источником может служить спутниковая навигационная система. При наличии синхронизма по времени и частоте модемы, приписанные к разным базовым станциям, работая даже в общем диапазоне частот, не будут создавать взаимных помех, если будут использовать разные наборы частотных каналов. Снижение потенциальной пропускной способности каждой из сетей является платой за их совместимость между собой.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ SNB

- Диапазон частот, мощность передатчика:
  - восходящей линии: 868,7–869,2 МГц, полоса частот 204,8 кГц, ЭИМ = 25 мВт (нелицензионное использование);
  - нисходящей линии: 868,7–869,2 МГц, полоса частот 500 кГц, ЭИМ = 100 мВт, скважность менее 10% (нелицензионное использование).
- Скорость передачи данных:
  - восходящей линии: 200, 400, 3200, 25600, 102400 бит/с;
  - нисходящей линии: 100, 500, 5000, 57600, 102400 бит/с.
- Кодирование:
  - восходящей линии: сверточный код, R = 1/2;
  - нисходящей линии: сверточный код, R = 1/2.
- Метод модуляции:
  - восходящей линии: 4FSK;
  - нисходящей линии: 2FSK.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо отметить, что принятый предварительный национальный стандарт радиодоступа «Интернета вещей» основывается на технологиях десятилетней давности. С тех пор элементная база шагнула далеко вперед. Стандарт должен соответствовать уровню развития технологий ближайшего будущего и учитывать перспективу хотя бы на 10 лет. Технология SNB реализована нами на самой современной элементной базе западного производства, а БС опробована и на российской элементной базе. Модемы выполнены на недорогих микросхемах приемопередатчиков со встроенным микроконтроллером AX8052F143. Предлагаем срочно заменить содержательную часть предварительного национального стандарта радиодоступа «Интернета вещей» на протокол SNBWAN, преимущества которого над несинхронными протоколами, в том числе над NB-Fi, очевидны и неоспоримы для любых применений «Интернета вещей»: в ЖКХ, в «умном городе», на транспорте, в промышленности, в сельском хозяйстве и в задачах МЧС. ⬢

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНСТ 354-2019.
2. Фурте К. (FR), Байель Т. (FR). Способ использования ресурса совместно используемой частоты, способ изготовления терминалов, терминалы и телекоммуникационная система. Патент РФ № 2559834 МПК H04J1/12. 2011 г.
3. Сартаков А. Л. Способ использования частотного ресурса, система связи и терминал. Патент РФ № 2627685 МПК H04J1/12. 2016 г.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.

ПРИЛОЖЕНИЕ. СЛУЧАЙНЫЙ ДОСТУП В ОДНОМЕРНОМ И ДВУМЕРНОМ КАНАЛАХ

В одномерном канале (время или частота):

- для алгоритма «чистая» ALOHA
  $G_1 = -\ln(Ps_1)/2$;
- для алгоритма «слотовая» ALOHA
  $G_1 = -\ln(Ps_1)$,

где: G_1 — загрузка одномерного канала (пропускная способность при заданном Ps_1); Ps_1 — вероятность успешной доставки пакета в одномерном канале.

Вероятность недоставки пакета в одномерном канале (вероятность коллизий): $Pc_1 = 1 - Ps_1$.

Пусть относительная загрузка канала по времени равна G_{1T}, а по частоте — G_{1F}. Тогда загрузка двумерного канала (время и частота), то есть пропускная способность при заданной вероятности успешной доставки пакета в двумерном канале Ps_2, равна: $G_2 = G_{1T} \times G_{1F}$.

Вероятность недоставки пакета в двумерном канале, $Pc_2 = 1 - Ps_2$, равна вероятности коллизий в двумерном канале: $Pc_2 = Pc_{1T} \times Pc_{1F}$,

где Pc_{1T} — вероятность совпадения времени передачи пакетов; Pc_{1F} — вероятность совпадения частоты передачи пакетов.

Если относительные загрузки по двум координатам в двумерном канале одинаковы и равны G_1, то загрузка двумерного канала:

$G_2 = G_1^2$, а вероятность недоставки пакета в двумерном канале составит: $Pc_2 = Pc_1^2$.

При использовании защиты от ошибок в полудуплексном канале методом автоматического запроса повторных передач (ARQ) последние увеличивают загрузку канала в $(1 + Pc_2)$ раз. С учетом повторных передач загрузка канала первичными передачами пакетов: $Gp_{ARQ} = G_2/(1+Pc_2)$.

При использовании защиты от ошибок в симплексном канале методом N-кратных повторных передач последние увеличивают загрузку канала в N раз. С учетом повторных передач загрузка канала первичными передачами пакетов: $Gp_N = G_2/N$.