



**SNB – новая LPWAN технология Интернета вещей
с непревзойдённой пропускной способностью**

**Зверев Борис Васильевич, научный руководитель проекта
Сартаков Анатолий Леонидович, к. т. н., директор**



ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПНСТ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Информационные технологии
ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ
Протокол обмена для интернета вещей
в узкополосном спектре (NB-Fi)

Настоящий проект стандарта не подлежит применению до его утверждения

Москва
Стандартинформ
201

К настоящему времени в России нашли практическое применение LPWAN технологии беспроводного доступа для Интернета вещей с протоколами LoRaWAN, XNB и NB-Fi, разработанными компаниями «Семтек», «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)». Мы считаем, что этот протокол, как, впрочем, и другие ранее упомянутые – неудачный выбор для стандарта и сейчас я это покажу.

Иллюстрация непрерывного случайного доступа по частоте в несинхронной системе SigFox

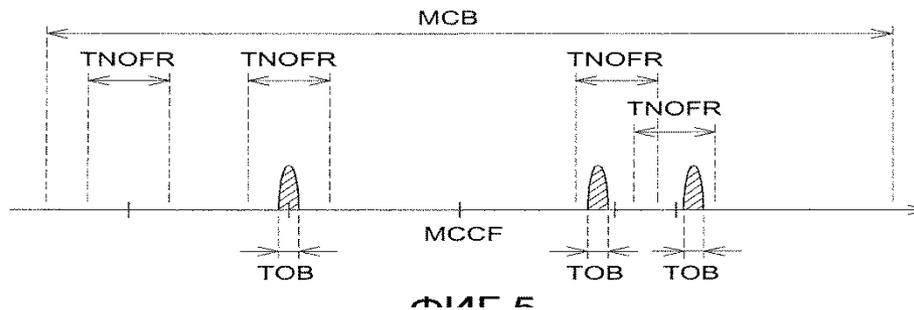
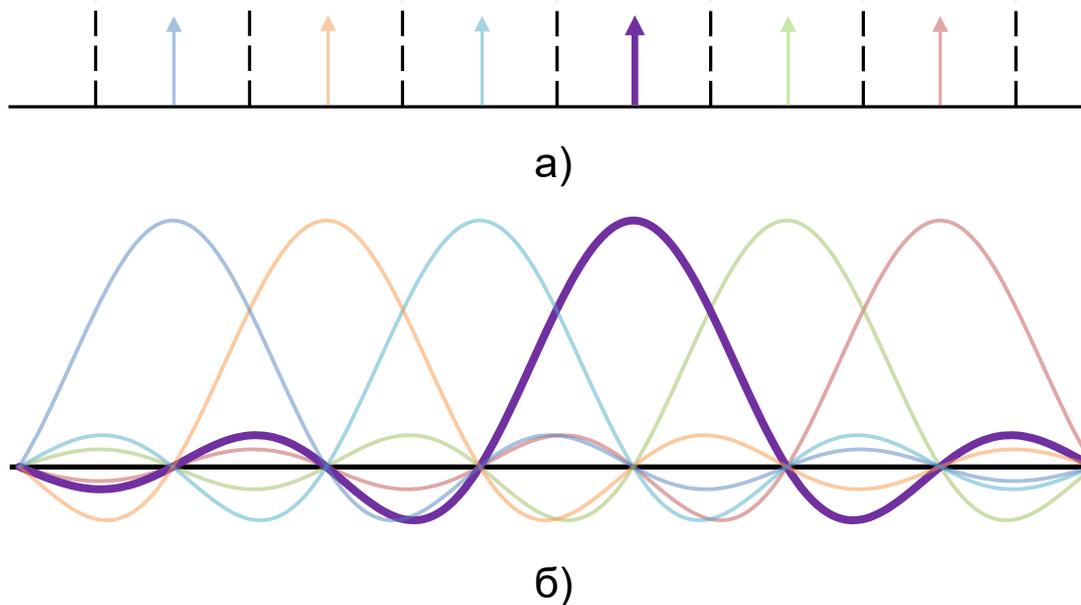


Иллюстрация дискретного доступа по частоте в синхронной системе SNB



В критикуемых технологиях канал доступа двумерный с переменными частотой и временем. Непрерывность времени в отсутствии временной синхронизации очевидна, а как проявляется непрерывность частоты в отсутствии частотной синхронизации проиллюстрировано на верхнем рисунке слайда. Из-за большой нестабильности частоты модемов, превышающей ширину спектра их сигналов, частота несущей по множеству модемов принимает непрерывный ряд значений. Мы применили синхронизацию модемов от базовой станции. Синхронизация позволила реализовать дискретный доступ, как по времени, так и по частоте, что проиллюстрировано на нижнем рисунке слайда. Для удобства будем обобщённо называть все критикуемые системы несинхронными. Несинхронные системы используют случайный доступ модемов к базовой станции, как по времени, так и по частоте, с непрерывными по множеству модемов значениями этих параметров.

Такой тип случайного доступа известен как алгоритм «чистая» ALOHA. 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. В несинхронных системах оба параметра частота и время непрерывные, что соответствует двумерному обобщению алгоритма «чистая» ALOHA, характеристики которого описываются формулами, приведёнными на следующем слайде.

Для несинхронных систем (случайный доступ по алгоритму «чистая» ALOHA)

В **одномерном** канале (время или частота) для алгоритма «чистая» ALOHA

$$G_{1ч} = - \ln(Ps_1)/2, \text{ где}$$

G_1 – загрузка одномерного канала (пропускная способность при заданном Ps_1)

Ps_1 – вероятность успешной доставки пакета в одномерном канале (вероятность ошибки)

Вероятность недоставки пакета в одномерном канале

$$Po_1 = 1 - Ps_1$$

В **двумерном** канале (время и частота) для алгоритма «чистая» ALOHA

$$G_2 = G_1^2, \text{ где}$$

G_2 – загрузка двумерного канала (пропускная способность при заданном Ps_2)

Ps_2 – вероятность успешной доставки пакета в двумерном канале

$$Ps_2 = 1 - Po_2, \text{ где}$$

Po_2 – вероятность недоставки пакета в двумерном канале (вероятность ошибки)

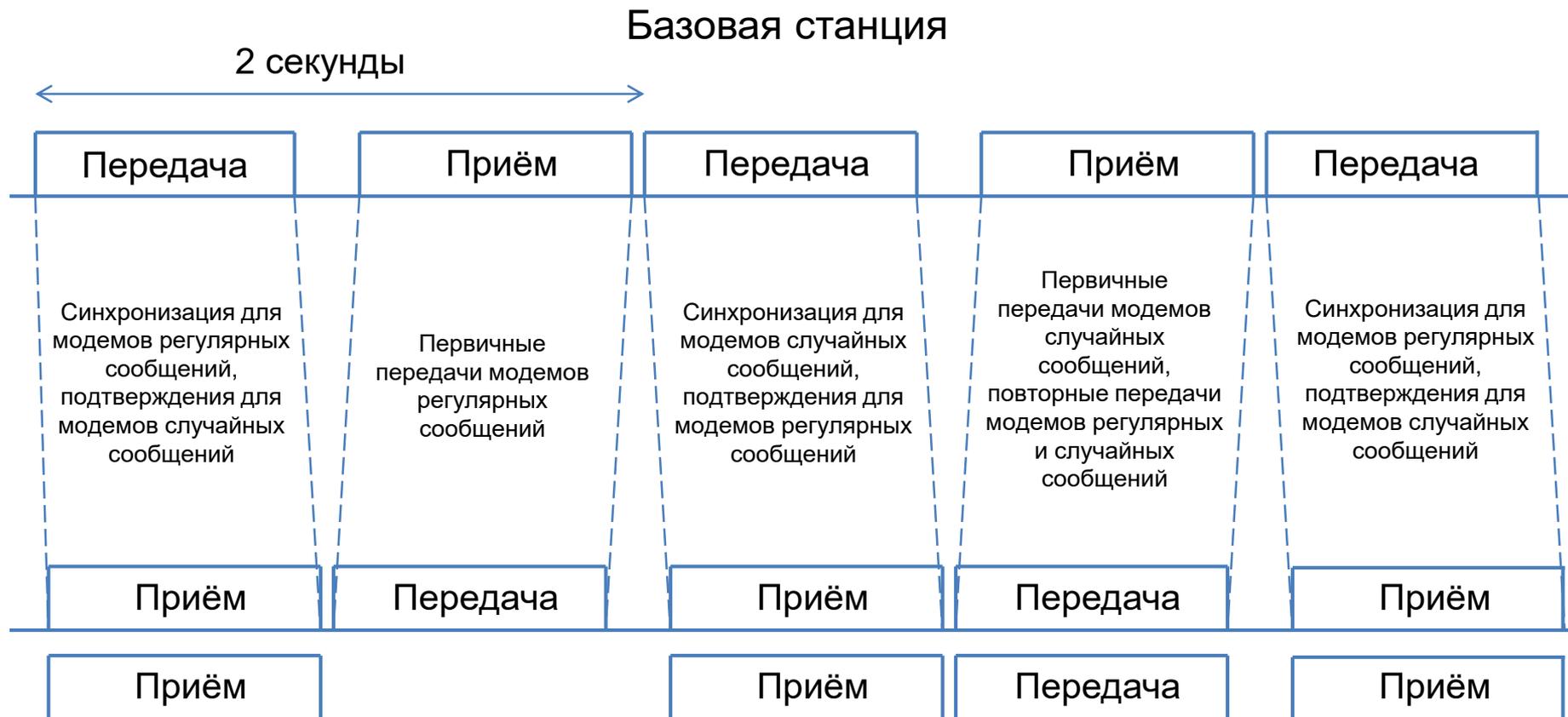
$$Po_2 = Po_1^2$$

Для **несинхронных** систем вероятность недоставки пакета $Po_2 = 0,05$ (при двукратной передаче - $Po_2^2 = 0,0025$) достигается при загрузке канала на **1,5%**,

реально – только на **0,75%**. Это и есть реальная пропускная способность **несинхронных** систем

Расчёт по формулам показал, что для получения заявленной в стандарте вероятности столкновения пакетов 5 процентов, загрузка канала должна быть только на 1,5 процента. Допустимой загрузкой канала и определяется пропускная способность доступа к базовой станции в той или иной технологии. Учитывая вдвое увеличенную длительность передаваемых модемами символов по отношению к времени их приёма на базовой станции в технологиях компаний «Стриж» и «Вэйвиот», фактическая допустимая загрузка канала, а, значит, и его пропускная способность, в 2 раза меньше, т.е., 0,75%. Такое незначительное использование невосполнимых ресурсов времени и полосы радиочастот недопустимо. Тем более, недопустимо принимать один из этих несовершенных протоколов в качестве национального стандарта Интернета вещей.

Синхронизация и методы доступа в системе SNB



Модемы (выше – регулярных сообщений, ниже – случайных сообщений)

Мы разработали для Интернета вещей новую технологию беспроводного доступа модемов к базовой станции, которую назвали Synchronous Narrow Band (SNB), и соответствующий протокол SNBWAN, лишённый главного недостатка всех ранее упомянутых протоколов – низкой пропускной способности. Для увеличения пропускной способности в технологии SNB производится синхронизация модемов с базовой станцией по частоте и времени. Для этого базовая станция перед каждой передачей по восходящей радиолинии передаёт пакет синхронизации по нисходящей радиолинии. В результате синхронизации модемы передают свои пакеты на дискретных частотах приёма базовой станции и в дискретное время, согласованное с интервалами Фурье преобразования в базовой станции.

Значительную часть передаваемых сообщений в интернете вещей составляют сообщения от счётчиков энергии или ресурсов, которые должны передавать 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%.

В отличие от счётчиков, 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 отличие от несинхронных систем, не по алгоритму «чистая» ALOHA, а по алгоритму «слотовая» ALOHA, т.е., с выделением временных интервалов и частотных каналов.

Для системы **SNB** (случайный доступ по алгоритму «слотовая» **ALOHA**)

В **одномерном** канале (время или частота) для алгоритма «слотовая» **ALOHA** пропускная способность в 2 раза выше, чем для алгоритма «чистая» **ALOHA**

$$G_{1c} = -\ln(Ps_1) = 2G_{1ч}, \text{ где}$$

G_1 – нагрузка одномерного канала (пропускная способность при заданном Ps_1)

Ps_1 – вероятность успешной доставки пакета в одномерном канале

Вероятность недоставки пакета в одномерном канале (вероятность ошибки)

$$Po_1 = 1 - Ps_1$$

В **двумерном** канале (время и частота) для алгоритма «слотовая» **ALOHA** пропускная способность в 4 раза выше, чем для алгоритма «чистая» **ALOHA**

$$G_2 = G_1^2, \text{ где}$$

G_2 – нагрузка двумерного канала (пропускная способность при заданном Ps_2)

Ps_2 – вероятность успешной доставки пакета в двумерном канале

$$Ps_2 = 1 - Po_2, \text{ где}$$

Po_2 – вероятность недоставки пакета в двумерном канале (вероятность ошибки)

$$Po_2 = Po_1^2$$

Для **синхронной** системы вероятность недоставки пакета $Po_2 = 0,05$ (при двукратной передаче – $Po_2^2 = 0,0025$) достигается при нагрузке канала на

6%, чему и равна пропускная способность системы **SNB** при случайном доступе.

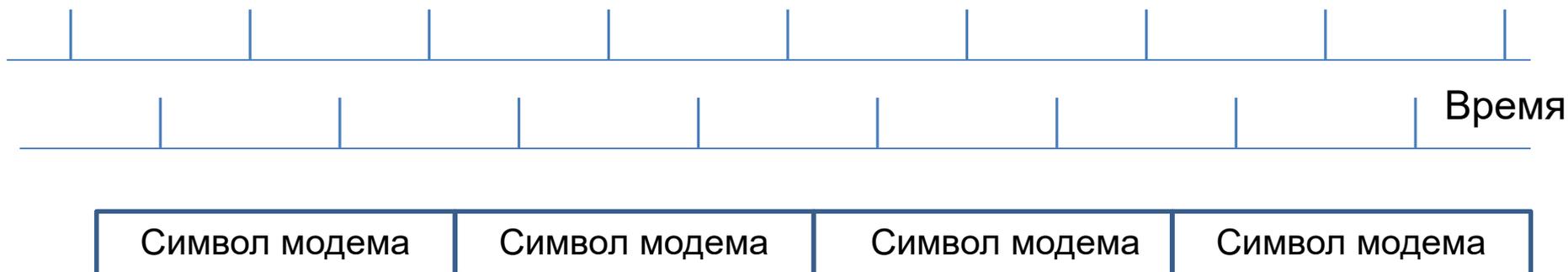
Характеристики двумерного обобщения алгоритма «слотовая» АЛОНА описываются формулами, приведёнными на текущем слайде. Теоретическая пропускная способность случайного доступа по двумерному каналу при алгоритме «слотовая» АЛОНА в 4 раза выше, чем при алгоритме «чистая» АЛОНА, а фактическая пропускная способность случайного доступа в системе SNB в 8 раз выше фактической пропускной способности всех несинхронных систем.

В системе SNB совместный временной и частотный ресурс может перераспределяться между сообщениями с регулярным и случайным доступом. Средняя пропускная способность системы SNB во много раз выше пропускной способностей несинхронных систем. Частотным, как, впрочем, и временным ресурсом, не разбрасываются, и я прошу представителей АИВ или РВК, по чьей инициативе принят предварительный национальный стандарт, обратить на это внимание.

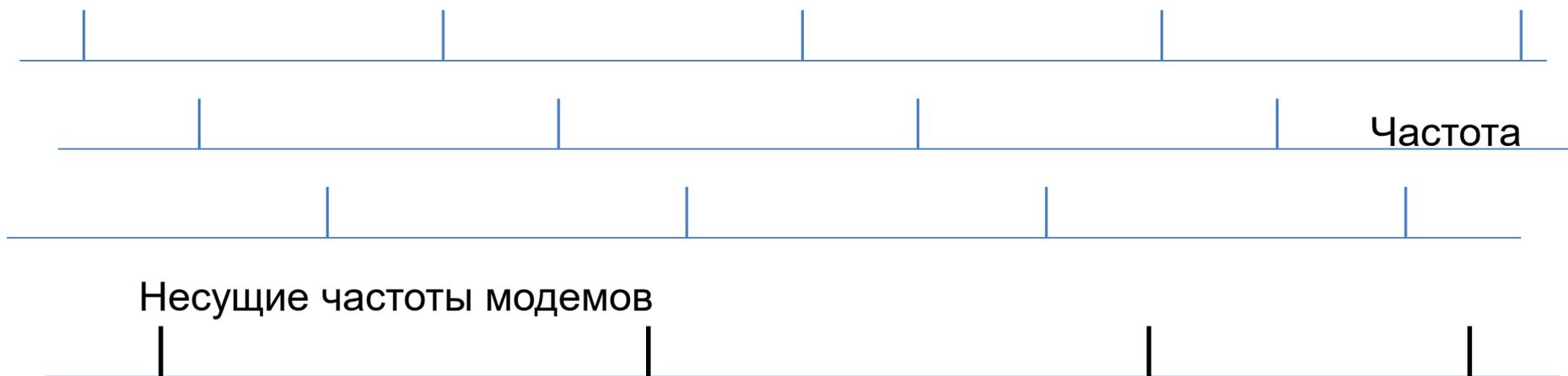
Прямым следствием преимущества технологии SNB в пропускной способности является экономическая выгода от её использования. Больше пропускная способность – больше число обслуживаемых абонентских модемов при одинаковых затратах на инфраструктуру сети.

КПД модемов и сложность обработки сигналов в базовой станции

Интервалы Фурье преобразований в базовой станции



Смещённые частоты Фурье преобразований выходов 3-х квадратурных детекторов

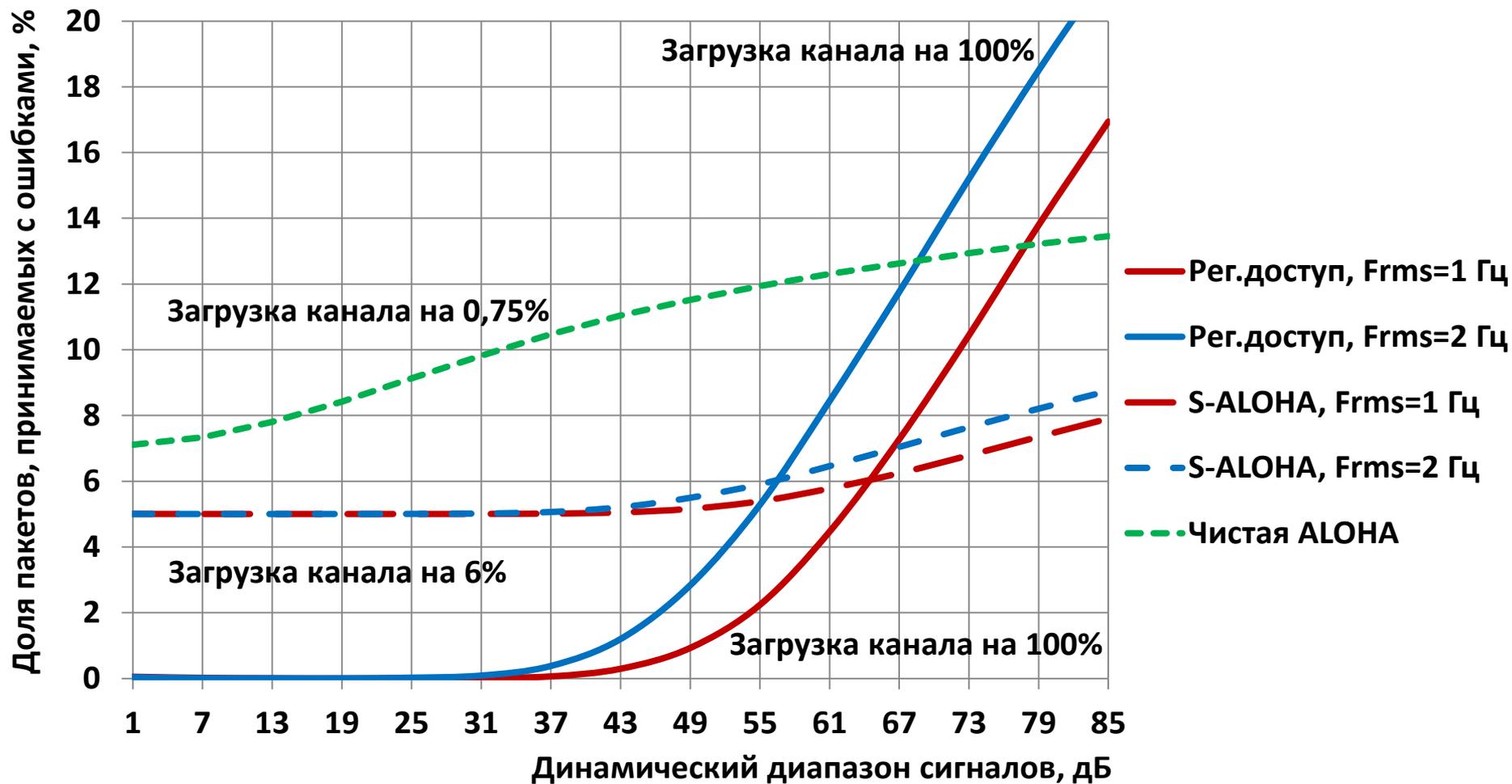


Несинхронные узкополосные системы «Стриж», «Вэйвиот» в сравнении с SNB, наряду с низкой пропускной способностью, имеют и другие недостатки, обусловленные тем, что работают с непрерывным по распределением частоты и времени передачи пакетов. При этом в приёмнике базовой станции нет возможности согласовать время накопления отсчётов принимаемых сигналов при посимвольном Фурье преобразовании с символьным интервалом каждого из модемов. Поэтому длительность символов модемов увеличивают вдвое по отношению к времени накопления отсчётов, что приводит к двукратному увеличению времени передачи сообщения и вдвое ускоряет разряд элементов питания модемов. У модемов SNB энергетический КПД выше минимум в 2 раза.

Неопределённость по частоте несущей и тактам принимаемых сигналов в несинхронных системах вызывает необходимость реализации в базовой станции трёх квадратурных детекторов и по два Фурье преобразования над выходными отсчётами каждого из детекторов. В результате «Стриж» вынужден использовать для обработки сигнала дорогой и ненадёжный из-за перегрева графический ускоритель NVIDIA, а «Вэйвиот» пожертвовал шириной полосы частот восходящей радиолинии и общей пропускной способностью системы, чтобы снизить требование к производительности процессора, что являлось бы их частным делом, но не том случае, когда разработанный ими протокол принимается в качестве национального стандарта.

Мы говорили о большем числе обслуживаемых абонентов системой SNB при одинаковых затратах на инфраструктуру. На самом деле и затраты на инфраструктуру в системе SNB значительно меньше, поскольку много меньше сложность и стоимость базовой станции. В ней достаточно одного квадратурного детектора вместо трёх и одного преобразователя Фурье вместо шести.

Внутрисистемные помехи



Загрузка канала при автоматическом запросе повторной передачи (ARQ)

В системе SNB используется сетка частот модемов отвечающая условию ортогональности их сигналов на интервале Фурье преобразования, выполняемого базовой станцией. При точной настройке модемов на ортогональные частоты внутрисистемные помехи отсутствуют и проявляются только в большом динамическом диапазоне сигналов при наличии ошибки подстройки частоты модемов. В несинхронных системах частоты модемов распределены равномерно и об ортогональности сигналов говорить не приходится, поэтому несинхронные системы подвержены внутрисистемным помехам не только от прямых столкновений но и от сильной взаимной корреляции между сигналами. На рисунке приведены полученные математическим моделированием зависимости доли пакетов, принимаемых с ошибками, от динамического диапазона сигналов для несинхронных систем и системы SNB. Автор модели мой содокладчик Зверев Борис Васильевич. Результаты моделирования подтверждают ожидания: по допустимому динамическому диапазону сигналов несинхронные системы (зелёная пунктирная линия) значительно уступают системе SNB (красная и синяя сплошные линии при регулярном доступе и пунктирные тех же цветов – при случайном доступе).

Возможно, у кого-то возникнет вопрос относительно адекватности модели. Мы используем математическое моделирование цифровой радиосвязи на низком уровне (на языке СИ++) более четверти века. Результаты моделирования подтверждаются как теоретическими данными, так и практическими испытаниями радиомодемов, которые производит наша компания. Модель позволяет исследовать работу радиомодемов и систем связи в самых разных условиях: в аддитивном шуме, при погрешностях синхронизации частоты несущей и тактов данных, оценить влияние джиттера тактовой частоты отсчётов аналого-цифрового преобразования, определить уровень внутрисистемных помех в динамическом диапазоне сигналов, влияние внесистемных помех и многое другое.

Внесистемные помехи

Влияние внесистемных помех на функционирование системы SNB значительно меньше, чем на несинхронные системы. В несинхронных системах весь пакет данных восходящей радиолинии передаётся на одной частоте и, в случае поражения её соизмеримой по мощности помехой, декодер кода с исправлением ошибок не сможет исправить весь пакет данных. В SNB используется быстрая псевдослучайная перестройка частоты, что возможно благодаря синхронности системы. Каждый следующий символ передаётся на новой частоте, поэтому сосредоточенная по частоте помеха поражает только один символ. Вызванная этим ошибка приёма символа исправляется декодером свёрточного кода, использующим мягкие решения по символам. Если поражено несколько символов подряд и декодер не исправил все ошибки, то по нисходящей радиолинии для этого модема передаётся отрицательное подтверждение и пакет передаётся вновь. Повторные передачи пакетов производятся так, чтобы не помешать первичным передачам пакетов, т.е. в тех частях частотно-временного ресурса, которые используются для случайного доступа, но в отличие от первичных передач пакетов случайного доступа повторные передачи пакетов регулярного и случайного доступа выполняются с резервированием канала. Поэтому успешной доставке повторно передаваемых пакетов не могут помешать прямым столкновением первичные передачи пакетов случайного доступа.

Основные характеристики системы SNB

1. Диапазон частот, мощность передатчика:

- восходящей линии 868,7-869,2 МГц, полоса частот 200 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)

2. Скорость передачи данных:

- восходящей линии 200, 400, 3200, 25600, 102400 бит/с
- нисходящей линии 200, 500, 5000, 57600, 102400 бит/с

3. Кодирование:

- восходящей линии свёрточный код, $R=1/2$
- нисходящей линии расширенный код Хэмминга (32, 26)

4. Метод модуляции:

- восходящей линии 4FSK
- нисходящей линии 2FSK

Заключение

В заключении хотелось бы обратить Ваше внимание на то, что принятый 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 базовая станция опробована также на российской элементной базе. Модемы выполнены на недорогих микросхемах приёмопередатчиков со встроенным микроконтроллером AX8052F143. Предлагаю срочно заменить содержательную часть предварительного национального стандарта радиодоступа для интернета вещей на протокол SNBWAN, преимущества которого очевидны и неоспоримы для любых применений интернета вещей: в ЖКХ, в Умном городе, на транспорте, в промышленности, в сельском хозяйстве и в задачах МЧС.

Спасибо за внимание