

# Сравнение LoRaWAN, SNBWAN

и других технологий для «Интернета вещей»

**В статье выполнено сравнение LPWAN-технологий: протокола LoRaWAN, часто рассматриваемого как претендента на применение в спутниковом «Интернете вещей», нового, пока проприетарного, но имеющего все шансы стать стандартным протокола SNBWAN, эффективно использующего выделенный частотно-временной ресурс, и других протоколов.**

**Анатолий Сартаков, к. т. н.**  
kb-mars@yandex.ru

Дорожной картой развития «сквозной» цифровой технологии «Технологии беспроводной связи», разработанной в качестве стратегического инструмента государственной политики развития этих технологий в Российской Федерации, предусмотрено, в частности, развитие субтехнологий LPWAN (рис. 1) — технологий энергоэффективных

сетей дальнего радиуса действия, нацеленных на обеспечение работы устройств в решениях IoT, и спутниковых технологий связи, использующих спутники в качестве ретрансляторов. Фонд содействия инновациям объявил о конкурсе «Развитие НТИ-2020», в том числе по тематическим направлениям дорожной карты «Аэронет»: «Наземный малогабаритный автономный терминал обмена короткими сообщениями через спутники, с характеристиками перспективных LoRa-терминалов, имеющий низкое энергопотребление. Бортовая аппаратура ретрансляции сообщений на наземные станции сопряжения» и «Платформа средств связи и беспроводной передачи данных — помехозащищенные системы связи; системы связи, способные устойчиво работать в арктических широтах; беспроводные коммуникационные модули для построения помехозащищенных беспроводных сенсорных сетей, проприетарные протоколы передачи данных для беспроводных сенсорных сетей».

## Сравнение протоколов связи

Важнейшей характеристикой системы сигналов является ее помехоустойчивость — пороговое отношение сигнал/шум в канале с аддитивным белым гауссовским шумом. Если в SNBWAN используются традиционные узкополосные сигналы: в восходящей радиолинии с модуляцией 4FSK, в нисходящей — DBPSK, то в LoRa — сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и циклическим M-позиционным временным сдвигом для передачи k бит данных одним символом ЛЧМ ( $M = 2^k$ ). Системы сигналов LoRa и SNBWAN различаются размером ансамблей элементарных символов и различимостью этих символов, которая количественно характеризуется коэффициентами взаимной корреляции. В вопрос оценки помехоустойчивости сигналов

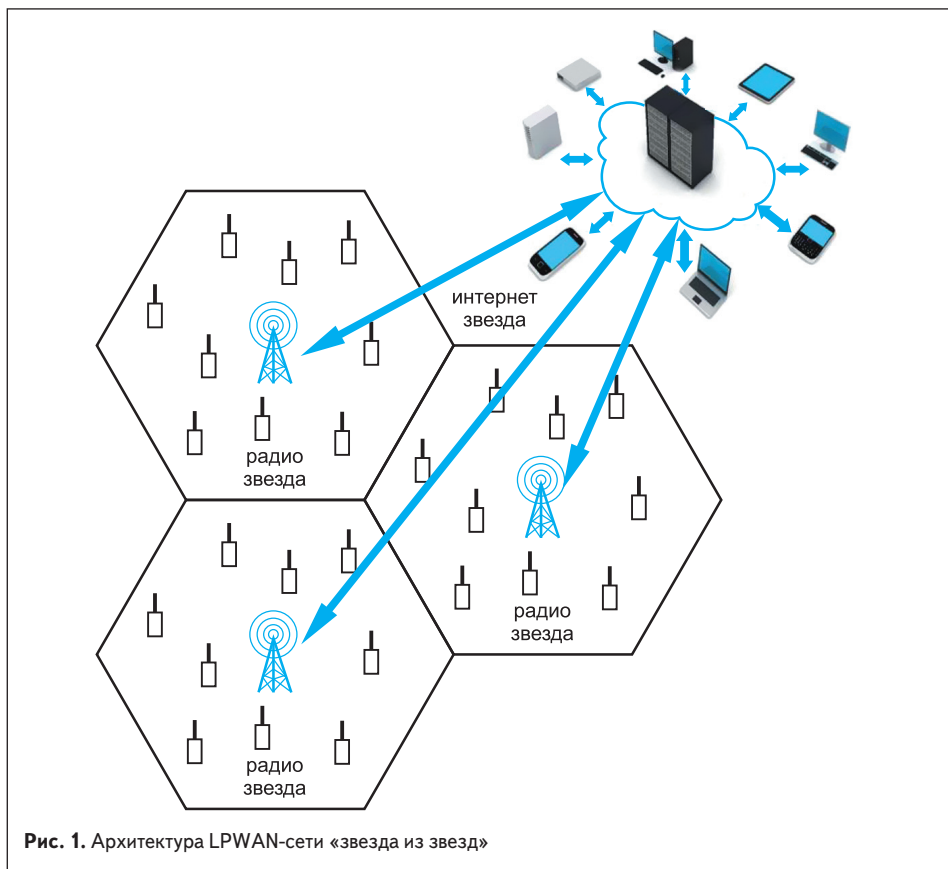


Рис. 1. Архитектура LPWAN-сети «звезда из звезд»

LoRa умышленно внесли путаницу фирма Semtech и альянс LoRaWAN. Из маркетинговых соображений во всех документах они приводят пороговое отношение сигнал/шум C/N (125 кГц) в полосе частот ЛЧМ-сигнала 125 кГц, которое значительно ниже отношения сигнал/шум C/N (B) в информационной полосе частот B, численно равной скорости передачи данных (1/T) бит/с, хотя показателем энергетической эффективности системы сигналов является именно отношение C/N (B). Это отношение преобразуется следующим образом:

$$C/N(B) = P_c/P_N = P_c \times T / (P_N/B) = E_b/N_0,$$

где  $P_c$  — мощность сигнала, Вт;  $P_N$  — мощность шума в полосе частот  $B = 1/T$ , Вт;  $T$  — длительность бита, с;  $E_b$  — энергия сигнала на бит, Дж;  $N_0$  — спектральная плотность мощности шума, Вт/Гц.

Пороговое отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности мощности шума  $E_b/N_0$  позволяет объективно сравнить различные системы сигналов по помехоустойчивости. Это сравнение приведено в таблице. Для спутникового IoT по технологии LoRaWAN признаны рациональными параметры режима DR3, у которого пороговое значение  $E_b/N_0$  равно +6 дБ.

Определим пороговое отношение  $E_b/N_0$  для SNBWAN. В нисходящей линии SNBWAN используется сигнально-кодовая конструкция (ССК) с DBPSK-модуляцией и сверточным кодированием с  $R = 1/2, k = 3 (v = 2)$ . Размер пакета нисходящей линии равен 88 информационных бит (входных бит кодера — выходных бит декодера), включая CRC (рис. 2). Для пороговой вероятности ошибки пакета 0,1 вероятность ошибки информационного бита должна быть  $P_b = 1 - (1 - 0,1)^{1/88} = 1,2 \times 10^{-3}$ , а вероятность ошибки двухбитного (4-позиционного) кодового символа [4]  $P_s = P_b(M - 1)/(M/2) = 1,2 \times 10^{-3} \times 3/2 = 1,8 \times 10^{-3}$ . По кривой для  $v = 2$  на рис. 6–16 в [9] определим, что при DBPSK, для которой кривые должны быть сдвинуты по оси абсцисс на 3 дБ влево,  $E_b/N_0 = +6,25$  дБ. Таким образом, нисходящая линия SNBWAN уступает в помехоустойчивости LoRaWAN в режиме DR3 всего 0,25 дБ.

В восходящей линии SNBWAN используется ССК с 4FSK-модуляцией и тем же кодированием. Размер пакета восходящей линии равен 108 информационных бит, включая CRC. Для пороговой вероятности ошибки пакета 0,1 вероятность ошибки информационного бита должна быть  $P_b = 1 - (1 - 0,1)^{1/108} = 9,75 \times 10^{-4}$ , а вероятность ошибки 4-позиционного кодового символа [4]  $P_s = P_b(M - 1)/(M/2) = 9,75 \times 10^{-4} \times 3/2 = 1,5 \times 10^{-3}$ . Пунктирная кривая на рис. 6–16 в [9], соответствующая передаче без кодирования, отражает форму зависимостей вероятностей ошибки на символ M-позиционных ортогональных сигналов при некогерентном приеме, совмещенных с зависимостью вероятности ошибки двоичных ортогональных сигналов, путем сдвига по оси абсцисс на  $10 \lg(\log_2 M)$  вправо. Аналогично сдвинуты вправо и кривые для передачи с кодированием. Поэтому, чтобы найти фактическое значение  $E_b/N_0$ , необходимо, так же как при DBPSK, сдвинуть графики на  $10 \lg(\log_2 M)$  дБ влево. Для  $M = 4$  сдвиг равен

Таблица. Сравнение систем сигналов по помехоустойчивости

Система режим	SF/полоса частот	M = 2 <sup>k</sup>	B — скорость ПД, бит/с	C/N(125 кГц), дБ	C/N(Гц) = E <sub>b</sub> /N <sub>0</sub> , дБ
LoRa/DR0	12/125 кГц	4096	250	-20	+7
LoRa/DR1	11/125 кГц	2048	440	-17,5	+7
LoRa/DR2	10/125 кГц	1024	980	-15	+6,1
LoRa/DR3	9/125 кГц	512	1760	-12,5	+6
LoRa/DR4	8/125 кГц	256	3125	-10	+6
LoRa/DR5	7/125 кГц	128	5470	-7,5	+6,1
SNBWAN/нисходящая линия	DBPSK	2	122, 244, 488, 976, 1953, 3906, 7812, 15625, 31250, 62500		+6,25 (для всех скоростей)
SNBWAN/восходящая линия	4FSK	4	122, 244, 488, 976, 1953, 3906, 7812, 15625, 31250, 62500		+6,3 (для всех скоростей)

3 дБ, а для  $v = 2 E_b/N_0 = +6,3$  дБ. Сравнение с LoRaWAN показывает, что нисходящая линия SNBWAN уступает в пороговом отношении  $E_b/N_0$  режиму DR3 LoRaWAN только 0,3 дБ.

Как видно из таблицы, пороговое отношение  $E_b/N_0$  у SNBWAN и LoRaWAN в режиме DR3 практически одинаково. Если бы в LoRaWAN использовалась M-позиционная система ортогональных сигналов, то при значениях M 128–4096 она имела бы превосходство в помехоустойчивости 3–4 дБ. Но ЛЧМ-сигналы при выбранных параметрах далеко не ортогональны, поэтому LoRaWAN либо проигрывает в помехоустойчивости SNBWAN, либо обеспечивает ничтожный выигрыш, что развеивает миф о превосходстве широкополосной модуляции LoRa в энергетике радиолинии над узкополосными методами модуляции, если только узкополосная модуляция — это не 2FSK с приемом по мгновенной частоте.

Другой миф сформировал ошибочное представление об исключительной устойчивости демодулятора сигналов LoRa к большой частотной ошибке. На самом деле во время поступления на вход преамбулы и синхрослова приемник LoRaWAN с высокой точностью настраивается на частоту сигнала, а возможность увеличения допустимой частотной ошибки достигается ценой использования очень длинной преамбулы. Даже для наземной связи рекомендована длительность преамбулы 19 байт (рассчитано по времени передачи «накладных расходов» 150 мс из таблицы 2 в [1], где для расчета длины преамбулы с синхрословом вычтена длительность заголовка физического уровня с его CRC и проверочными символами FEC). Для спутниковой связи, с ее большим доплеровским смещением частоты, длительность преамбулы должна быть много больше. Требование к длительности преамбулы не зависит от размера пакета полезных данных, а определяется только необходимым диапазоном подстройки приемника по частоте. Максимальная длина преамбулы 65 536 символов, или 73 728 байт данных в режиме DR3. Такой большой объем «накладных расходов» по отношению к объему полезных данных значительно снижает пропускную способность и без того низкоскоростной LPWAN-связи «Интернета вещей».

В разработке радиолобительского спутникового «Интернета вещей» по технологии LoRaWAN [2] при высоте орбиты пикоспутника (5×5×5 см) 600 км и максимальном доплеровском смещении частоты ±10 кГц на несущей частоте 169 МГц в приемопередатчике наземного терминала (НТ), чтобы не терять пропускную способность системы, пришлось использовать термокомпенсированный кварцевый генератор (ТСХО). Рассматривалось также подключение НТ к серверу, где можно было бы получать оперативную информацию о пролете спутника, его местоположении и параметрах движения относительно местоположения НТ, чтобы компенсировать доплеровское смещение частоты. Тем более это актуально для спутникового «Интернета вещей», в котором максимальное доплеровское смещение частоты равно ±20 кГц.

Подстройка приемника по частоте при приеме преамбулы необходима и при широкополосной модуляции, как у LoRa, и при узкополосной, как у SNBWAN, изменяется только вид преамбулы. При SNBWAN также требуется удлинение преамбулы при необходимости расширения диапазона подстройки по частоте, и если пытаться подстраиваться во всем диапазоне доплеровского смещения частоты ±20 кГц, то и в SNBWAN, и в LoRaWAN потребуются очень длинные преамбулы, чтобы синхронизироваться по частоте, что резко снижает пропускную способность сети для полезных данных. Поэтому для обеих технологий выходом из тупика является компенсация доплеровского смещения частоты на основе сторонних данных, позволяющих рассчитать радиальную скорость спутника относительно НТ.

В НТ SNBWAN используется ТСХО опорный генератор для стабилизации частоты несущей и тактов, но при таком большом доплеровском смещении частоты потребуется ТСХО и в НТ LoRaWAN. Ведь синхронизация в режиме LoRa гарантируется для отстроек по частоте только ±20% от полосы частот ЛЧМ-сигнала, в нашем случае это ±25 кГц. Добавка к доплеровскому смещению частоты не должна превышать ±5 кГц, что не обеспечить в НТ LoRaWAN без применения ТСХО. Таким образом, использование широкополосной

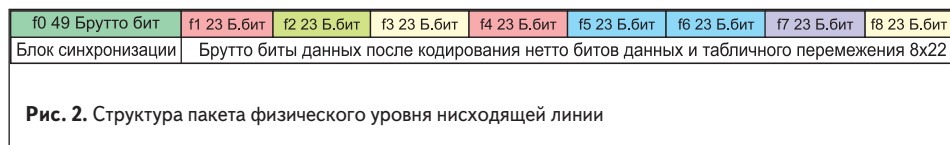
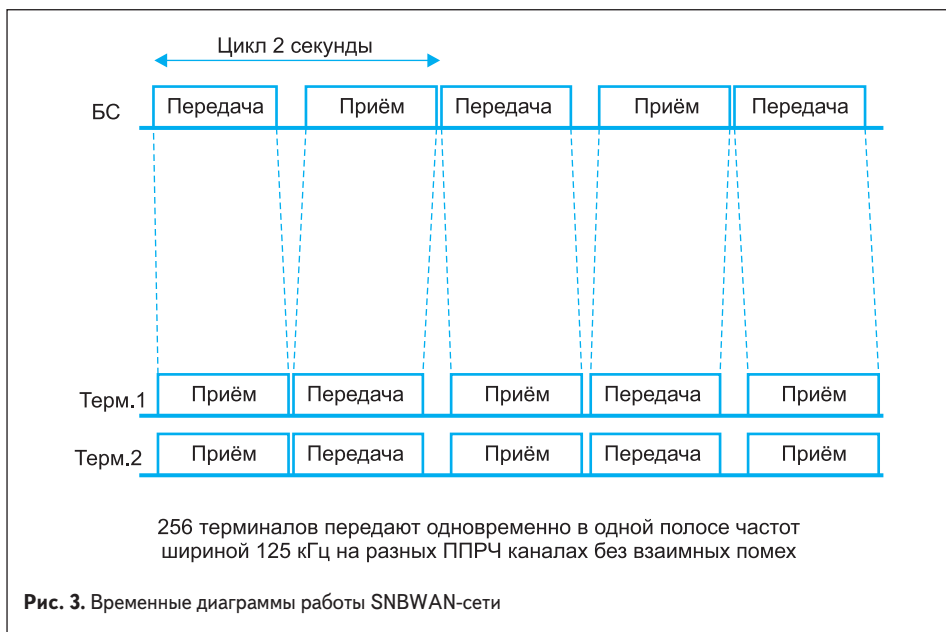
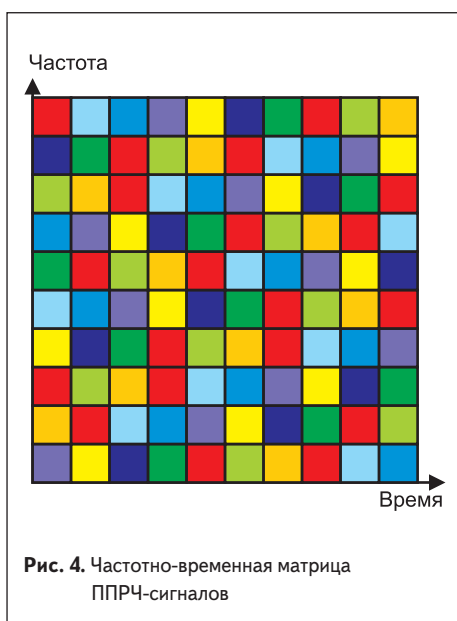


Рис. 2. Структура пакета физического уровня нисходящей линии



модуляции с многопозиционной системой сигналов на основе ЛЧМ, как у LoRa, не дает никаких преимуществ по сравнению с узкополосными сигналами, как у SNBWAN, а только непроизводительно расширяет спектр сигнала и неоправданно усложняет его программную обработку на борту спутника. Создается также постоянная зависимость производства наземных терминалов для масштабирования сети от политической воли или безволия руководства стран, связанных недружественным по отношению к России альянсом, поскольку микросхемы приемопередатчиков и контроллеров LoRa производят только две западные фирмы — Semtech (США) и STMicroelectronics (Франция, Италия). Выполненный анализ позволяет сделать вывод, что LoRa — это мировая мистификация из США, задающая ложное направление развития связи для «Интернета вещей», приводящая к нерациональному расходованию ресурсов глобальными конкурентами, бездумно следующими за дорогой, но пустой «приманкой» в привлекательной «обертке».



Негативным следствием расширения спектра в режиме LoRa становится неэффективное использование выделенной полосы частот для передачи в спутниковом IoT одновременно только одного сигнала, в то время как в синхронной узкополосной системе SNBWAN в той же полосе частот при регулярном доступе на несколько большей скорости может передаваться  $125/1,953 = 64$  сигнала. С учетом неэффективного использования системой LoRaWAN потенциала пропускной способности временного ресурса, количество HT, обслуживаемых одной БС SNBWAN, при регулярном доступе — в  $64/(G_1/2) = 64/0,0256 \approx 2500$  раз, а при случайном доступе — в  $64 \times G_2/(G_1/2) = 64 \times 0,064/0,0256 \approx 160$  раз больше, чем обслуживаемых одной БС LoRaWAN, где  $(G_1/2) = -\ln(1 - P_{C1})/2 = 0,0256$  — пропускная способность одномерного канала случайного доступа по алгоритму «чистая» ALOHA;  $P_{C1}=5\%$  — допустимая вероятность коллизий в одномерном канале;  $G_2 = G_1^2 = (-\ln(1 - P_{C2}^{-2}))^2 = 0,064$  — пропускная способность двумерного канала случайного доступа по алгоритму «слотовая» ALOHA;  $P_{C2}=5\%$  — допустимая вероятность коллизий в двумерном канале.

В расчете отношений количества обслуживаемых наземных терминалов одной БС SNBWAN и одной БС LoRaWAN использованы результаты работы [3], в которой выполнен анализ пропускной способности при случайном доступе в одномерном (время или частота) и двумерном (время и частота) каналах. В той же работе определено, что количество терминалов, обслуживаемых одной БС SNBWAN, при регулярном доступе в 66 раз, а при случайном доступе в 4 раза больше, чем обслуживаемых одной БС несинхронных узкополосных систем Sigfox, XNB и NB-Fi. Это и не удивительно, поскольку технология SNBWAN практически реализует потенциальную пропускную способность частотно-временного ресурса (рис. 3). Потому ее пропускная способность превышает пропускную способность и синхронной технологии Wheightless, в которой применяется другое, чем LoRaWAN, но также непроизводительное

расширение спектра сигнала. Отсюда вывод: технология SNBWAN значительно превосходит все известные технологии LPWAN в важнейшей характеристике — пропускной способности сети, которая определяет экономическую эффективность системы связи. Ввиду использования ППРЧ (рис. 4) она превосходит все известные технологии LPWAN в помехоустойчивости, устойчивости к замиранию сигнала из-за многолучевого распространения радиоволн и в других характеристиках. Описание технологии синхронной связи SNBWAN приведено в [5].

Из дискретного ряда скоростей передачи данных (ПД) SNBWAN может быть выбрана ближайшая большая скорость 1953 бит/с, чем скорость ПД режима LoRa D3 1760 бит/с, которая в 1,096 раза выше и при которой SNBWAN будет проигрывать LoRaWAN в энергетике радиолинии на приемной стороне около 0,4 дБ. Но может быть выбрана ближайшая меньшая скорость 976 бит/с, которая в 1,8 раза меньше, чем в выбранном режиме LoRa, поэтому радиолинии SNBWAN по отношению к радиолиниям LoRa при этой скорости получают на приемной стороне энергетический выигрыш 2,6 дБ.

Снижение мгновенной скорости ПД внутри пакета SNBWAN в 1,8 раза по отношению к скорости ПД внутри пакета LoRaWAN не означает, что во столько же раз снизится скорость передачи полезных данных. Во-первых, в SNBWAN в пакетах данных восходящей радиолинии передается только полезная нагрузка, а такие «накладные расходы», как преамбула, синхрослово (во всех сообщениях), а также MAC-адрес (в регулярных сообщениях) не передается. В пакетах данных восходящей линии LoRaWAN режима DR3 передается преамбула (синхрослово) длиной более 19 бруттобайт, MAC-адрес длиной 8 бруттобайт, что при средней длине полезной нагрузки пакета 58 байт (максимальная длина полезной нагрузки пакета 115 байт в режиме DR3 [6]) снижает скорость передачи полезных данных до уровня менее 0,68 полной скорости ПД в пакете. В результате средняя скорость передачи полезных данных в пакете LoRaWAN будет только в  $0,68 \times 1,8 \approx 1,22$  раза больше, чем в SNBWAN. Во-вторых, показанное в предыдущем абзаце значительное повышение пропускной способности сети связи при замене технологии LoRaWAN на технологию SNBWAN может быть использовано не только для увеличения числа обслуживаемых HT, но и для повышения частоты передачи пакетов данных отдельными HT, что эквивалентно увеличению их средней скорости передачи данных.

Энергетику радиолинии SNBWAN можно поднять по отношению к LoRaWAN, воспользовавшись разрешением ГКРЧ излучать ЭИМ 100 мВт при рабочем цикле 10% или в режиме LBT в нелицензионной полосе частот 868,7–869,2 МГц (решение ГКРЧ от 07.05.2007 № 07-20-03-001 в редакции решения ГКРЧ от 11.09.2018 № 18-46-03-1) в дополнение к разрешенному ранее излучению с ЭИМ 25 мВт. Это дает энергетический выигрыш на передающей стороне 6 дБ. При таком энергетическом преимуществе на передающей стороне можно допустить проигрыш на приемной стороне 0,4 дБ, если выбрать скорость передачи данных

1953 бит/с, и даже 3,4 дБ, если выбрать скорость передачи данных 3906 бит/с, что позволит снизить требования к точности синхронизации по частоте несущей в спутниковом канале с большим доплеровским смещением частоты. Надо отметить, что снижение скорости передачи данных в SNBWAN, в отличие от LoRaWAN, не приводит к уменьшению пропускной способности сети ни для трафика отдельных НТ, ни для их суммарного трафика. При варьировании скорости передачи данных пропускная способность сети SNBWAN остается постоянной, а только перераспределяется по количеству уплотненных сигналов между частотной и временной областью, при этом сохраняется возможность использования потенциальной пропускной способности частотно-временного ресурса на 100%.

Применительно к сетям связи «Интернета вещей» по технологии SNBWAN, в которых используется циклическая работа с минимальным периодом цикла 2 с, требование ограничения рабочего цикла 10% выполняется автоматически, так как в структуре сигнала длительность импульсов излучения на отдельных частотах не превышает 200 мс. В сетях LoRaWAN увеличить ЭИМ передатчиков свыше 25 мВт нельзя ввиду того, что это противоречит региональным (Россия и Европа) ограничениям излучений по соответствующему стандарту. Для увеличения пропускной способности сетей LoRaWAN в [1] предлагается следующее: «Оператор, видя увеличивающееся количество соединений, увеличит плотность шлюзов, и это уравновешивает глобальное время в эфире, поскольку вследствие увеличения количества шлюзов время в эфире сокращается (так как устройства используют более высокую скорость передачи данных)». Этот способ повышения пропускной способности эфира применим только в наземных сетях IoT, хотя и приводит к удорожанию инфраструктуры сети, в чем, очевидно, технология LoRaWAN сильно проигрывает технологии SNBWAN. Он не может быть использован в спутниковой системе IoT, так как при увеличении количества спутников дальность связи существенно не уменьшается, поэтому скорость передачи данных в разы увеличить нельзя.

### Вопросы практической реализации спутникового «Интернета вещей» по технологии SNBWAN

Главный вопрос, который необходимо решить, планируя построение спутникового «Интернета вещей» по синхронной технологии SNBWAN, — это сетевая синхронизация. Ее целью является согласованное поступление сигналов наземных терминалов на антенну базовой станции, расположенную на спутнике-ретрансляторе. Согласование необходимо как по частотам несущих, так и по времени поступления пакетов данных с точностью до долей длительности символа. Для этого требуется подключение базовой станции спутника-ретранслятора и наземных терминалов к источникам высокоточного времени и высокостабильной частоты. Очевидным решением этой задачи становится применение на борту спутников и в наземных терминалах приемников сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).

Бортовой навигационный комплекс спутниковой IoT должен определять и постоянно уточнять параметры орбиты спутника-носителя по навигационным и временным сигналам, получаемым от приемника ГНСС. Совокупность параметров орбиты, называемая «альманах», передается по нисходящей фидерной линии на земную станцию сопряжения фидерных линий спутников с Интернетом. По восходящей фидерной линии на все спутники группировки IoT передаются альманахи всех спутников. В рамках системы связи SNBWAN базовые станции спутников передают циркулярные сообщения для всех НТ с параметрами орбиты всех спутников группировки IoT. НТ хранят и периодически обновляют альманахи всех спутников и рассчитывают положение в пространстве спутника, с которым поддерживается сеанс связи, в момент излучения последним пакета данных нисходящей радиолинии. С помощью навигационных приемников они определяют (рассчитывают) собственные пространственные координаты, а также радиальную скорость спутников относительно себя во время излучения принимаемого пакета данных.

Эти расчеты позволяют определить ожидаемое время прихода сигнала и ожидаемое

доплеровское смещение частоты его несущей. Допустимая точность (ошибка) оценки времени распространения сигнала равна 1%, а доплеровского смещения частоты несущей — 2,5%, что вполне достижимо. Для максимального доплеровского смещения частоты 20 кГц максимальная ошибка предсказания частоты несущей принимаемого сигнала составит 500 Гц, при которой обеспечивается быстрая синхронизация приемника НТ. Допустимая ошибка оценки смещения частоты несущей получена для скорости передачи данных 122 бит/с, при увеличении скорости ПД допустимая ошибка пропорционально увеличивается.

Используя точное время, свои координаты и уточненное по времени прихода сигнала расстояние до спутника в момент излучения им сигнала, НТ рассчитывает необходимое опережение момента излучения собственного сигнала для того, чтобы он поступил на спутник в расчетное время с учетом изменившихся к данному моменту координат спутника. Применяя результаты измерения частоты несущей принятого сигнала, НТ вносит поправку по частоте несущей передаваемого сигнала для компенсации доплеровского смещения частоты при приеме этого сигнала на спутнике. На интервале длительности сигнала отслеживается динамика изменения доплеровского смещения частоты из-за изменения радиальной скорости спутника относительно наземного терминала.

Все описанные вычисления вполне реалистичны, поскольку не сложнее тех, что выполняются в навигационных приемниках при решении обратной задачи определения собственных пространственных координат по задержкам распространения сигналов от спутников.

Для снижения инфраструктурных издержек приемниками ГНСС могут оснащаться не все НТ, а только те из них, которые абсолютно автономны и не находятся в зоне действия (радиусом до 50 км) наземной БС. Такие наземные БС могут быть как подключены к Интернету по широкополосным каналам связи, так и не подключены, то есть автономны (рис. 5, 6). Все наземные БС системы SNBWAN имеют в своем составе приемник ГНСС. Для поддержки работы наземных терминалов в спутниковой сети SNBWAN базовые станции наземной сети SNBWAN используют

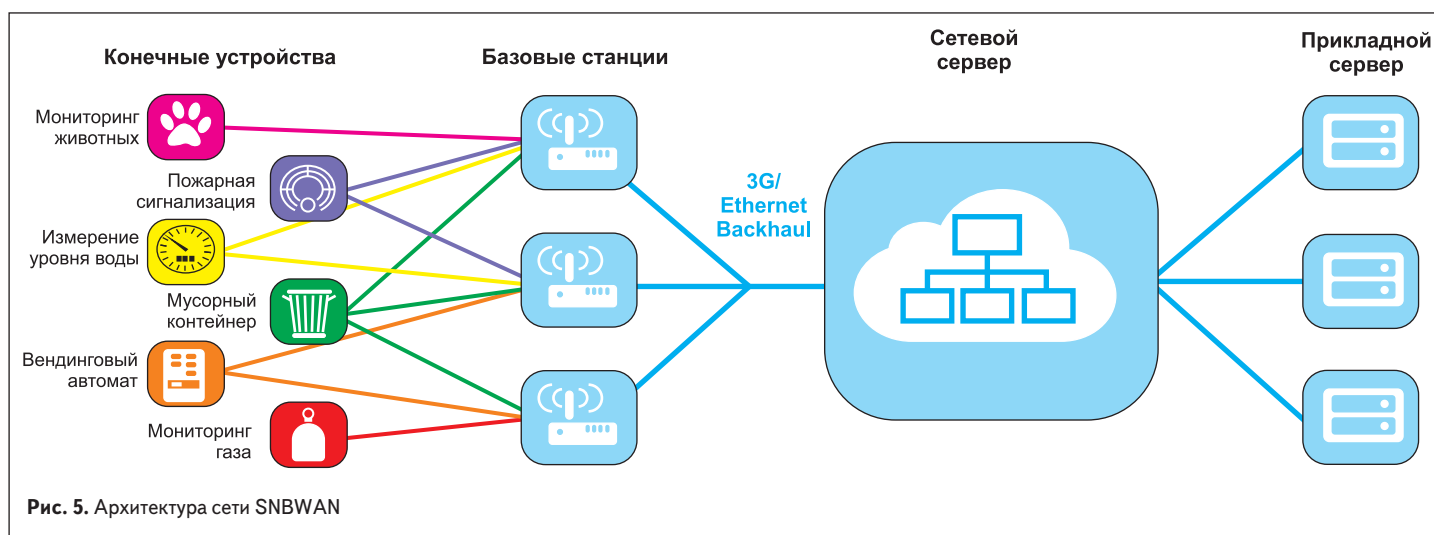


Рис. 5. Архитектура сети SNBWAN

соответствующее программное обеспечение, позволяющее получать от наземного сетевого сервера (если БС подключена к Интернету) или от спутниковых базовых станций параметры орбит всех спутников IoT. При приеме сообщений от спутниковых БС автономные наземные БС работают как приемники наземных терминалов. Наземные БС посылают циркулярные сообщения с альманахами всех спутников группировки IoT всем наземным терминалам, которые способны принять их сигнал.

Увеличение ЭИМ сигналов, передаваемых наземными терминалами, до 100 мВт может быть достигнуто без повышения мощности SNBWAN-передатчиков НТ и без увеличения мощности потребления НТ, а за счет применения направленных вверх антенн НТ с усилением 6 дБ. Преимущество такого решения еще и в том, что антенна усилит и принимаемые от спутников сигналы. Применение outdoor-направленных антенн SNBWAN наземных терминалов вполне сочетается с тем, что должны использоваться outdoor-антенны и у навигационных приемников наземных терминалов.

Стоимость микросхемы приемопередатчика у НТ SNBWAN на \$2,63 меньше, чем у НТ LoRaWAN (AX5043-1-TW3 — \$1,18; SX1261 — \$3,81). В НТ SNBWAN применен массовый (используемый в навигационных приемниках) TCXO 26 МГц 0,5 ppm NT2016SA-26 MHz-END4165B по цене \$0,5, что только на \$0,26 меньше, чем у TCXO 32 МГц 2,5 ppm ECS-TXO-2016-33-320-TR по цене \$0,76 для приемопередатчика LoRaWAN. И лишь некоторые НТ SNBWAN должны оснащаться навигационным приемником, стоимость которого около \$4. Как показано ранее, для того чтобы поддерживать пропускную способность спутникового IoT технологии LoRAWAN на уровне наземного IoT той же технологии, требуется отказаться от использования длинных преамбул, а это

возможно только при компенсации доплеровского смещения частоты на основе данных о радиальной скорости спутника относительно НТ, полученных с помощью приемника сигналов ГНСС. Для спутниковой системы IoT стоимость инфраструктуры при ее построении по технологиям SNBWAN и LoRaWAN будет примерно одинаковой, стоимость наземных терминалов SNBWAN меньше на \$2,89, а удельная стоимость инфраструктуры на один наземный терминал при технологии SNBWAN будет много меньше, чем при технологии LoRaWAN, ввиду значительно большего числа наземных терминалов, обслуживаемых одной БС по технологии SNBWAN. Последнее обстоятельство особенно значимо для спутникового «Интернета вещей» из-за высокой стоимости космического сегмента инфраструктуры. Технология SNBWAN позволяет построить сеть «Интернета вещей» операторского класса, в то время как технология LoRaWAN годится лишь для частных локальных сетей и радиолюбительских экспериментов со спутниковым «Интернетом вещей». Для операторской деятельности очень важна рентабельность вложений, и построение сетей «Интернета вещей» по технологии SNBWAN значительно выгодней для операторов и пользователей как спутниковой, так и наземных IoT-сетей.

Для подтверждения собственного вывода приведем две цитаты.

«Важность надежности промышленного уровня, особенно в критически важных приложениях, невозможно переоценить. Высокая скорость получения и минимальные потери пакетов исключают необходимость повторной отправки сообщений даже в неблагоприятных условиях. Это обеспечивает быстрое поступление важных данных при одновременном снижении энергопотребления из-за многократных передач. Для технологий LPWAN, работающих

во все более перегруженном, нелицензионном спектре, устойчивость к помехам является необходимым условием для обеспечения высокой надежности. Техническая разработка сети LPWAN определяет ее способность исключать помехи при высоком трафике, что улучшает общую скорость приема. Надежная технология сочетает в себе ряд универсальных подходов, таких как использование сигнала с узким спектром, краткое время занятия эфира, ПППЧ и кодирование для минимизации вероятности конфликта... Большая пропускная способность сети позволяет вам ее масштабировать в соответствии с растущими потребностями в точках сбора данных без ущерба для качества обслуживания. Поскольку радиус действия радиосвязи в технологиях LPWAN практически одинаков, пропускная способность сети становится важной характеристикой инфраструктуры. Чем больше конечных устройств и ежедневных сообщений может поддерживать одна базовая станция, тем меньше инфраструктуры вам понадобится. Эффективное использование ограниченного радиоспектра важно для достижения большой пропускной способности сети. Ультразвокополосный подход с минимальной шириной полосы частот обеспечит очень высокую спектральную эффективность, позволяя большому количеству сообщений помещаться в выделенную полосу частот, не перекрывая друг друга» [7].

«Случайный доступ относительно неэффективен. Существует вероятность того, что несколько пользователей пытаются получить доступ к сетевому ресурсу одновременно и конфликтуют. Когда это случается часто, вся связь пропадает, и пользователи должны повторить свои передачи, надеясь, что второй раз столкновения не будет... Эта проблема может не проявиться во время пробного периода, когда пропускная способность еще не огра-

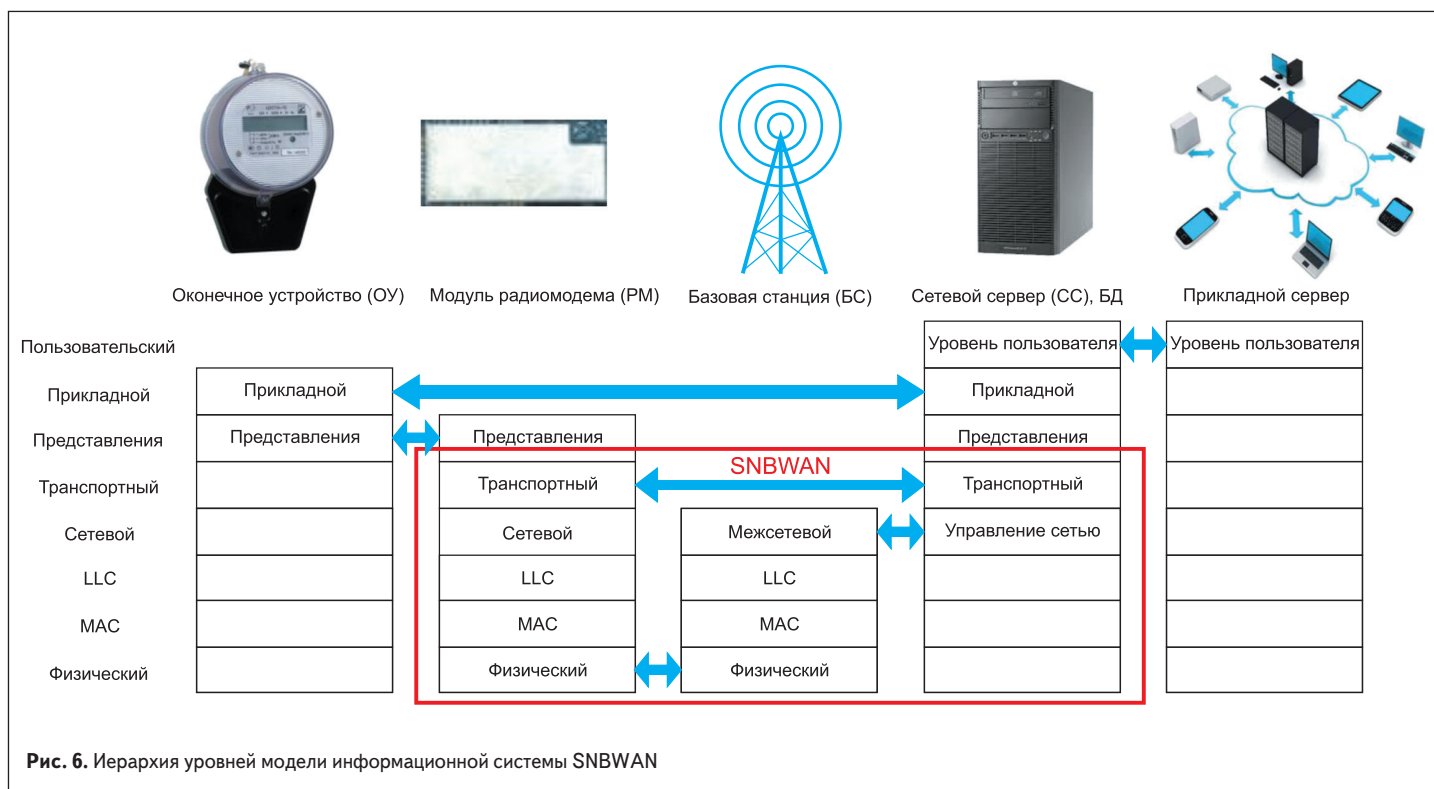


Рис. 6. Иерархия уровней модели информационной системы SNBWAN

ничивает нагрузку на сеть, и возникает только при развертывании десятков тысяч устройств. На таком этапе изменение технологии очень дорого... Если бы IoT-устройства были похожи на телефоны, которые заменяются каждые два года, это, может, не имело бы значения, но с некоторыми развертываниями на 10–20 лет получить высокую пропускную способность сети прямо сейчас критически важно. Когда рассматриваются технологии IoT-подключений, потребители справедливо оценивают такие параметры, как стоимость, срок службы батареи и дальность связи, но легко могут не учесть важность пропускной способности сети. А в отсутствие эмпирических данных реальных развертываний сети мы можем поддасться искушению принять решение по неправильно смоделированным сценариям, игнорирующим критические параметры, ограничивающие пропускную способность сети. Пропускная способность сети — это не только о количестве одновременно подключенных узлов, это и о средней длине пакета данных, времени передачи, частоте передач и подавлении помех» [8].

### Заключение

Технология SNBWAN удовлетворяет всем перечисленным в цитатах желательным свойствам технологии LPWAN и значительно превосходит все используемые в России технологии LoRaWAN, XNB, NB-Fi по всем характеристикам. Нет такой области приложения «Интернета вещей», в которой какая-либо другая технология LPWAN имела преимущество

над технологией SNBWAN. Применение технологии LoRaWAN в спутниковом «Интернете вещей» не даст преимущества над зарубежными спутниковыми IoT, использующими ту же технологию связи, в то же время применение SNBWAN предоставит ощутимые преимущества в количестве обслуживаемых наземных терминалов, в том числе и зарубежных пользователей, а дешевизна терминала и услуги спутникового IoT создадут благоприятные условия для экспансии на зарубежные рынки и со своими терминалами, и со своей услугой. Протокол SNBWAN, будучи в настоящее время проприетарным, при поддержке государственных структур имеет все основания быть принятым в качестве стандартного LPWAN-протокола, и не только российского, но и международного. И это шанс для России стать первым мировым поставщиком оборудования IoT второго поколения (IoT-G2), как Китай стал первым мировым поставщиком оборудования сотовой связи пятого поколения (G5). Технология SNBWAN во много раз превышает все другие LPWAN-технологии в пропускной способности и, как следствие, в экономике жизненного цикла систем, построенных на ее основе, но она не упомянута ни в одном из документов, определяющих государственную стратегию развития коммуникационных технологий в Российской Федерации. Более того, рабочая группа НТИ «Технет» пытается дискредитировать эту передовую технологию промышленного Интернета. Чиновники, ау! ■

### Литература

1. ETSI TR 103 526 V1.1.1 (2018-04). System Reference document (SRdoc); Technical characteristics for Low Power Wide Area Networks Chirp Spread Spectrum (LPWAN-CSS) operating in the UHF spectrum below 1 GHz. [www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/103500\\_103599/103526/01.01.01\\_60/tr\\_103526v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103526/01.01.01_60/tr_103526v010101p.pdf)
2. [www.thethingsnetwork.org/forum/t/lora-tx-at-low-bandwidth/17259/9/](http://www.thethingsnetwork.org/forum/t/lora-tx-at-low-bandwidth/17259/9/)
3. Зверев Б., Сартаков А. SNB — новая LPWAN-технология «Интернета вещей» с высокой пропускной способностью // Control Engineering Россия IoT. 2019. Июнь. [www.controlengrussia.com/internet-veshhej/snb/](http://www.controlengrussia.com/internet-veshhej/snb/)
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е. Пер. с англ. М.: Вильямс, 2003.
5. Патент № RU 2627685 С1. Способ использования частотного ресурса, система связи и терминал.
6. LoRaWAN Specification V1.0. [www.3mbang.com/p-4540667.html](http://www.3mbang.com/p-4540667.html).
7. [www.iotforall.com/lpwan-101-network-requirements-iotdeployment/](http://www.iotforall.com/lpwan-101-network-requirements-iotdeployment/)
8. [www.weightless.org/membership/lpwan-technologyfeatures-document-update/NTZjMC9MUfDfBTiBUZWNobm9sb2d2d5IERlY2lzYW9uc192MS4xLnBkZg==](http://www.weightless.org/membership/lpwan-technologyfeatures-document-update/NTZjMC9MUfDfBTiBUZWNobm9sb2d2d5IERlY2lzYW9uc192MS4xLnBkZg==)
9. Clark Jr. G. C., Cain J. B. Error-Correction Coding for Digital Communications. New York, Plenum, 1988.