

Особенности архитектуры сетей подвижной связи 6G для безопасного использования на железнодорожном транспорте

П. А. Плеханов

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I

pavelplekhanov@gmail.com

Д. Н. Роенков

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I

roenkov_dmitry@mail.ru

Аннотация. Дана характеристика техническим возможностям сетей подвижной связи 6G. Рассмотрены вопросы множественного доступа, модуляции, канального кодирования и антенных технологий. Представлена предполагаемая функциональная архитектура сети 6G и описан новый используемый протокол с учетом применения на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: подвижная связь, 6G, цифровая связь, функциональная архитектура, протоколы

I. ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ 6G

В сетях 6G [1] предполагается использование усовершенствованных имеющихся и инновационных технологий преобразования и передачи сигналов в соответствии с типовыми процессами системы цифровой связи (рис. 1) [2–4].

Существующие сети 4G и 5G [5–8] в диапазоне частот ниже 6 ГГц сталкиваются с проблемой замирания сигналов из-за их многолучевого распространения. Для борьбы с этим явлением и его следствием в виде межсимвольной интерференции используется метод множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), когда передаваемый символ «расщепляется» и передается по частям при помощи ортогонально разнесенных поднесущих частот. Однако, для данного метода характерно значительное отношение максимальной мощности сигнала к средней за определенный промежуток времени («пик-фактор»), что приводит к повышенному энергопотреблению, в частности, подвижных станций. В целях его снижения, в восходящей линии применяется метод множественного доступа с частотным разделением каналов с одной несущей частотой SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access), позволяющий передавать сигналы не одновременно на поднесущих частотах, а последовательно. Наряду с этим, эффективными для сетей 5G и 6G являются следующие два метода:

- передача со многими несущими и гребенчатой фильтрацией FBMC (Filter Bank Multi-Carrier), когда каждая поднесущая частота сигнала OFDMA фильтруется отдельно, что снижает уровень внеполосных излучений и повышает устойчивость сигнала к интерференции между поднесущими;

- передача со многими несущими и универсальной фильтрацией UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier), при которой фильтруются не каждая поднесущая частота в отдельности, а группы нескольких соседних поднесущих, что также приводит к уменьшению внеполосных излучений, но без существенного увеличения длины символа и, как следствие, без увеличения задержек при передаче.

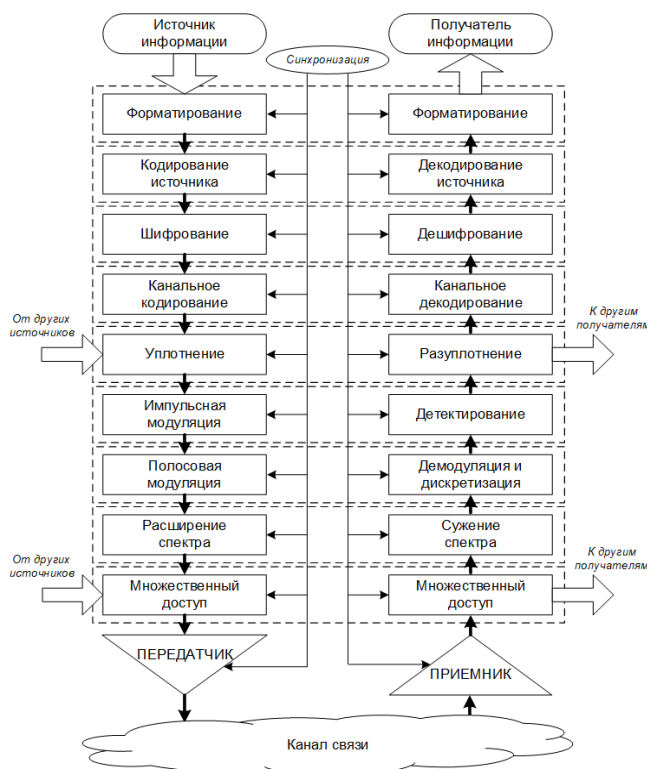


Рис. 1. Типовые процессы системы цифровой связи

Также перспективной технологией является метод неортогонального множественного доступа NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), предполагающий, что в одно и то же время на одних и тех же частотах с применением одних и тех же методов расширения спектра и кодирования может быть организован множественный доступ на основе распределения мощностей сигналов. При этом каждому пользователю может быть предоставлена вся пропускная способность канала в течение всего сеанса связи.

В существующих сетях 4G и 5G, наряду с различными вариантами фазовой манипуляции PSK (Phase-Shift Keying), применяются стандартные схемы квадратурной амплитудной модуляции QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Последняя является разновидностью амплитудной модуляции и представляет собой сумму двух модулируемых (несущих) сигналов одной частоты, сдвинутых по фазе друг относительно друга на 90°, при том, что каждый сигнал модулирован по амплитуде своим модулирующим (информационным) сигналом. Для сетей 6G перспективными являются уже опробованные в 5G усовершенствованные схемы QAM:

- повернутая QAM – стандартная QAM с применением в отношении символов поворота по фазе;
- нерегулярная QAM – использование различных технологий оптимизации QAM, например, некоторых вариантов амплитудно-фазовой манипуляции APSK (Amplitude and Phase-Shift Keying).

Кроме этого, в 6G возможно использование таких методов модуляции, как многомерная модуляция (использование большего количества степеней свободы за счет повышения сложности сигнала) и индексная пространственная модуляция (передача информации с использованием индексов передающих антенн в дополнение к традиционным методам символьной модуляции).

Важнейшим вопросом беспроводной связи является применение эффективных методов канального кодирования. Если в сетях 2G использовались сверточные коды (кодирование последовательности является сверткой отклика кодера на входную информационную последовательность), в 3G и 4G – турбокоды (каскады параллельно соединенных систематических кодов), то для 5G и, в перспективе, для 6G для обеспечения высокой пропускной способности актуально применение полярных кодов (на основе поляризации сигнала) и кодов с малой плотностью проверок на четность LDPC (Low-Density Parity-Check code), в основе которых лежат блочные линейные коды с проверкой четности.

Одной из ключевых технологий для сетей 6G является технология антенных решеток с множеством передающих и приемных антенн MIMO («Multiple Input – Multiple Output» – «Много входов – Много выходов»), которая впервые появилась в сетях 3G и получила широкое распространение в 4G и 5G, обеспечивая физическую реализацию метода множественного доступа с пространственным разделением каналов SDMA (Space Division Multiple Access) [9]. Если в 5G применяется технология «Massive MIMO», когда базовая станция использует антенные решетки, содержащие более сотни элементов, то в 6G планируется к применению «Ultra-Massive MIMO» с решетками со сверхбольшой апертурой

ELAA (Extremely Large Aperture Array), состоящими из нескольких сотен элементов, для управления которыми используются возможности искусственного интеллекта. Кроме этого, в 6G предполагается использование реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей RIS (Reconfigurable Intelligent Surface), представляющих собой двумерные плоскости с программно-настраиваемыми антенными элементами.

II. РЕАЛИЗАЦИЯ СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ 6G С УЧЕТОМ ПРИМЕНЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Предполагаемая функциональная архитектура сети 6G, в отличие от 5G, в гораздо большей степени ориентирована на пользователя и строится на принципах программно-конфигурируемых сетей SDN (Software-Defined Network) и виртуализации сетевых функций NFV (Network Functions Virtualization). Она позволяет каждому пользовательскому устройству UE получить собственный «виртуальный экземпляр» базовой сети на основе децентрализованной структуры «виртуальных экземпляров», к которым относятся узлы обслуживания сетевого уровня NSN и уровня пользователя USN (рис. 2).

Доверенная децентрализация архитектуры может осуществляться на основе технологии блокчейна. При этом, NSN является точкой первичного подключения UE к сети через сеть радиодоступа RAN и отвечает за процедуры аутентификации и идентификации при регистрации доступа. В свою очередь, каждый из совокупности USN (которые, в соответствии с принципом NFV, могут быть полностью распределены и самоорганизованы) относится только к одному UE и реализует все функции базовой сети уровня пользователя и уровня управления. Такой подход позволяет применять для каждого UE адаптируемые политики обслуживания, в том числе, в области качества и безопасности.

Физическая реализация архитектуры сетей 6G предполагается на основе построения наземно-космической интегрированной сети STIN (Space-Terrestrial Integrated Network) с использованием, в том числе, спутников связи, а также пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов [10]. В этой связи, важной инновацией архитектуры сетей 6G является сквозное использование протокола New IP вместо стандартного протокола IP версий IPv4 и IPv6, поскольку стек протоколов TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol – Протокол управления передачей / Межсетевой протокол), который применяется сегодня в сетях наземной подвижной связи, не подходит для сетей STIN. Это связано с низкой, по сравнению с протоколами спутниковой связи, эффективностью применения стека протоколов TCP/IP вследствие наличия относительно больших задержек при передаче данных и высокой вероятности ошибки на бит.

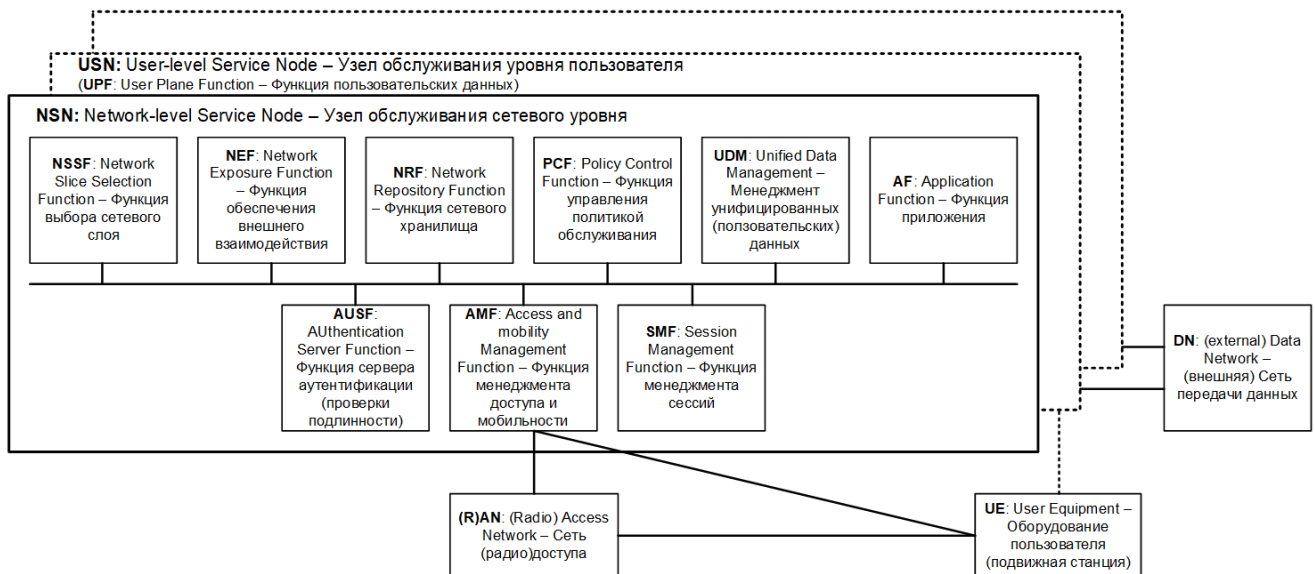


Рис. 2. Предполагаемая функциональная архитектура сети 6G

Протокол New IP предполагается использовать не только как протокол сетевого уровня взаимодействия (наподобие стандартного протокола IP), но также обеспечить с его помощью интеграцию функций канального и транспортного уровней наряду с сетевым (рис. 3).

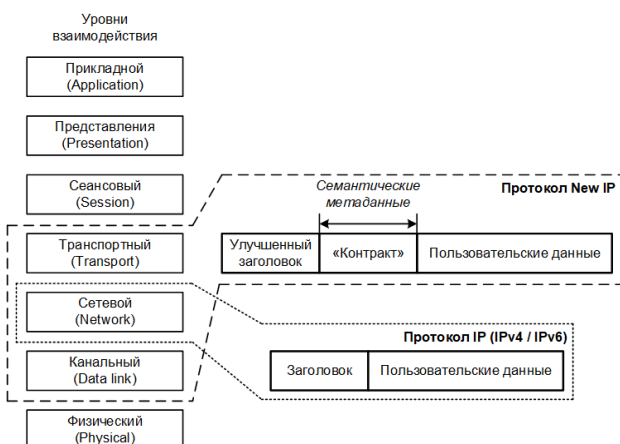


Рис. 3. Протоколы IP (IPv4/IPv6) и New IP

Пакеты, в соответствии с протоколом New IP, будут разделены на три компонента:

- улучшенный (по сравнению с протоколом IP) заголовок для поддержки большого количества схем адресации с различной адресной структурой, семантикой и длиной, а также для исправления связанных с безопасностью параметров существующих заголовков IP-адресов (например, неаутентифицированные исходные адреса, способствующие возможности возникновения разнообразных атак);
- «контракт» («contract») – новый компонент, который позволяет включать в пакеты семантические метаданные (например, директивы по обработке пакетов, данные измерений

параметров передаваемых пакетов и др.), используемые для установления гарантий уровня обслуживания и упрощения процедур обслуживания в целом;

- пользовательские данные, позволяющие, в том числе, приложениям структурировать полезную нагрузку и дифференцированно ее обрабатывать для облегчения использования усовершенствованных схем сетевого кодирования без ущерба для конфиденциальности.

При этом одной из критических характеристик протокола New IP является его обратная совместимость для обеспечения возможности работы в составе существующего стека протоколов TCP/IP.

Таким образом, применение инноваций в области преобразования и передачи сигналов, полное использование возможностей искусственного интеллекта, программная конфигурация и виртуализации сетевых функций делают сети 6G по-настоящему новым этапом на пути развития беспроводной связи. Возможности 6G могут быть успешно использованы для повышения качества и безопасности работы железных дорог [11–15], включая решения вопросов автоматизации движения поездов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Плеханов П.А., Роевков Д.Н. Перспективная подвижная связь // Автоматика, связь, информатика. 2024. № 1. С. 16-20.
- Плеханов П.А. Беспроводные инфокоммуникационные сети на железнодорожном транспорте. СПб.: ПГУПС, 2014. 55 с.
- Плеханов П.А., Роевков Д.Н. Цифровые системы подвижной связи на железнодорожном транспорте. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. 41 с.
- Роевков Д.Н., Плеханов П.А. Системы мобильной связи. Коротковолновая и спутниковая связь. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023. 31 с.
- Плеханов П.А., Роевков Д.Н. Подвижная связь 5G // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 5. С. 8-12.

- [6] Роенков Д.Н., Плеханов П.А. Мобильные сети поколения 5G: перспективы применения // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 10. С. 2-7.
- [7] Плеханов П.А., Роенков Д.Н. Стандартизация требований для систем беспроводной связи // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 4. С. 38-42.
- [8] Плеханов П.А., Роенков Д.Н. Переход к будущей железнодорожной системе подвижной связи // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 5. С. 6-11.
- [9] Роенков Д.Н., Плеханов П.А. Технология ММО для подвижной связи 5G // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 8. С. 21-25.
- [10] Плеханов П.А., Роенков Д.Н. БПЛА на службе железнодорожного транспорта // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 9. С. 13-16.
- [11] Роенков Д.Н., Плеханов П.А. Беспроводная связь для высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 12. С. 11-13.
- [12] Радиосвязь для высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург // Транспорт Российской Федерации. 2024. № 1. С. 58-61.
- [13] Лапунов С.И., Роенков Д.Н., Плеханов П.А. Коротковолновая ионосферная радиосвязь и возможности ее применения // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 7. С. 14-19.
- [14] Лапунов С.И., Роенков Д.Н., Плеханов П.А., Глухов И.А. Применение систем коротковолновой радиосвязи на малоинтенсивных железнодорожных участках // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 9. С. 4-8.
- [15] Лапунов С.И., Роенков Д.Н., Плеханов П.А., Глухов И.А. Радиосвязь на малоинтенсивных железнодорожных участках // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 11. С. 2-7.