

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ 6G

В работе рассмотрены основные направления развития систем беспроводной связи. Целью работы является поиск эффективных методов, позволяющих обеспечить повышение пропускной способности существующих систем беспроводной связи. В результате исследования были решены следующие задачи: описаны основные показатели эффективности систем беспроводной связи; проведен сравнительный анализ технологий 5G и 6G; предложены методы повышения эффективности систем беспроводной связи.

Технологии связи, беспроводная связь, показатели эффективности систем связи, пропускная способность.

Khelfaoui Abderaouf, Pilipenko Alexandr Mikhaylovich

KEY FEATURES AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF 6G WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

The work discusses the main directions of development of wireless communication systems. The goal of this work is to find effective methods for increasing the channel capacity of wireless communication systems. As a result of the research, the following tasks were solved: the main performance indicators of wireless communication systems were described; a comparative analysis of 5G and 6G technologies was carried out; methods for increasing the efficiency of wireless communication systems have been proposed.

Communication technologies, wireless communications, performance indicators of communication systems, channel capacity.

Введение

С начала 80-х годов прошлого века произошло несколько прорывов в развитии систем мобильной связи: от поколения 1G до поколения 4G.

Основными направлениями развития систем мобильной связи являются увеличение пропускной способности, повышение скорости передачи данных и уменьшение времени задержки.

К технологиям связи следующего поколения предъявляются такие требования, которые существующие системы 4G не могут обеспечить. В настоящее время развивается поколение систем связи 5G, которое обеспечивает более высокую скорость передачи данных и позволяет повысить эффективность использования спектра чем 4G. В свою очередь, ожидается, что системы связи следующего поколения 6G будут обслуживать новый набор приложений, таких как тактильные ощущения, телемедицина, интерфейсы «мозг-машина», смешанная реальность, виртуальная реальность, дополненная реальность. Эти услуги требуют одновременного достижения высокой спектральной эффективности и малого времени задержки при высокой надежности и низкой сложности системы связи. Кроме того, ключевой целью технологии 6G является повышение пропускной способности канала связи от 100 Гбит/с до 1 Тбит/с [1]. Именно пропускная способность является ключевым показателем эффективности (Key Performance Indicator, KPI) для систем 6G. Данное требование к пропускной способности создает серьезные проблемы, как с точки зрения занимаемого диапазона радиочастот, так и с точки зрения основной полосы частот.

1. Сравнительный анализ технологий 5G и 6G

Для того чтобы проиллюстрировать показатели эффективности систем связи 6G, можно использовать подход, предложенный в работе [2], в соответствии с которым в табл. 1 представлены определения и значения данных показателей для систем связи 5G и 6G.

Таблица 1

Сравнение показателей эффективности систем связи 5G и 6G

Показатель эффективности	Определение	Значение показателя для 5G	Значение показателя для 6G
Пиковая скорость передачи данных (пропускная способность)	Максимальная скорость передачи данных, достижимая для каждого пользователя/устройства в идеальных условиях	20 Гбит/с	> 100 Гбит/с

Пользовательская скорость передачи данных	Достижимая скорости передачи данных для мобильных пользователей/устройств в целевой зоне покрытия	0,1 – 1 Гбит/с	>1 Гбит/с
Задержка связи	Промежуток времени от отправки пакетов источником до их получения в пункте назначения	1×10^{-3} с	$0,1 \times 10^{-3}$ с
Пропускная способность зоны трафика	Общая пропускная способность трафика на единицу площади	10 Мбит/с/м ²	1 Гбит/с/м ²
Плотность подключения	Общее количество подключенных и/или доступных устройств на единицу площади.	1/м ²	(10 – 100)/м ²
Мобильность	Максимальная относительная скорость между передатчиком и приемником	500 км/ч	1000 км/ч
Надежность	Вероятность успешной передачи пакета фиксированного размера в течение указанного максимального времени	0,99999	0,9999999
Точность синхронизации	Точность синхронизации времени между устройствами	~ мкс	~ нс

Для поддержки расширенного перечня услуг систем 6G (голографическое телеприсутствие, интеллектуальное взаимодействие, иммерсивная расширенная реальность (XR), удаленное управление в реальном времени и интеллектуальное подключение всех «вещей») показатели эффективности систем 6G, включающие в себя скорость передачи данных (пиковая скорость передачи данных и скорость взаимодействия с пользователем), задержка связи, пропускная способность зоны трафика, и ряд других показателей эффективности должны быть в несколько раз, а то и на порядок выше, чем у систем 5G.

Разработка эффективных систем цифровой связи представляет собой сложную задачу, на которую влияет ряд факторов, таких как доступная технология, характеристики канала, тип целевой услуги (например, данные, речь, видео, изображения, факсимильная связь и т. д.), новые идеи в исследованиях и приемлемая стоимость системы. Движущей силой этой

сегодняшней задачи для будущих систем цифровой связи является потребность в более высоких скоростях передачи данных и системах, способных поддерживать множество различных типов услуг с низкой вероятностью битовых ошибок, а также с появлением новых приложений (например, расширенной реальности), которые требуют одновременного обслуживания не только с низкой задержкой и достаточной надежностью, но и с высокой спектральной эффективностью, которая определяется отношением скорости передачи данных к полосе частот канала связи. Сети следующего поколения 6G должны быть способны удовлетворить этот спрос за счет внедрения новых эффективных схем передачи.

2. Методы повышения эффективности систем беспроводной связи

Для обеспечения беспроводной передачи данных с высокой спектральной эффективностью, малой задержкой и невысокой сложности системы связи при решении задач «Интернета вещей» (Internet of Things или IoT) и «Интернета всего» (Internet of Everything или IoE) был предложен новый метод модуляции, называемый мультиплексированием с ортогональным частотным разделением и модуляцией мощности поднесущей (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing with Subcarrier Power Modulation – OFDM-SPM) [3]. Метод OFDM-SPM обеспечивает передачу дополнительных информационных битов с помощью изменения мощности поднесущих в блоках OFDM одновременно снижая сложность и задержку по сравнению с традиционными схемами.

В работе [3] показано, что применение метода OFDM-SPM позволяет повысить спектральную эффективность системы связи в два раза, при этом система усложняется незначительно, не происходит увеличения ошибок, уменьшается задержка при передаче данных и снижается мощность передатчика. Таким образом, повышается эффективность коммуникационного оборудования с точки зрения энергопотребления и снижается стоимость беспроводных услуг (для провайдеров и пользователей).

В настоящее время большое значение для разработки приемопередатчиков современных систем связи имеют адаптивные методы, которые обеспечивают высокую производительность и высокой скоростью передачи данных. В данной работе предлагается использовать метод OFDM-SPM в сочетании с различными методами цифровой M-арной модуляции, пространственно-временным блочным кодированием (Space-Time Block Coding – STBC) и кодированием канала для обнаружения и исправления ошибок. Для метода OFDM-SPM рекомендуется использовать пространственно-

временное блочное кодирование по схеме Аламути в системе с несколькими входами и одним выходом (Multiple Input Single Output – MISO) [4].

Для оценки эффективности метода OFDM-SPM-STBC по сравнению классическим OFDM в будущих исследованиях планируется провести анализ следующих характеристик:

- коэффициент битовых ошибок (Bit Error Rate – BER) – количество битовых ошибок, деленное на общее количество переданных бит за исследуемый интервал времени;

- пропускная способность (Channel Capacity) – максимальная скорость передачи данных, достижимая для каждого пользователя/устройства в идеальных условиях в заданной полосе частот.

Выводы

В работе описаны требования к системам беспроводной связи следующего поколения 6G. Предложено применение метода мультиплексирования с ортогональным частотным разделением сигналов и модуляцией мощности поднесущей (OFDM-SPM) совместно с методами цифровой M-арной модуляции и пространственно-временным блочным кодированием (STBC) для повышения эффективности использования спектра.

Для доказательства эффективности предлагаемых алгоритмов OFDM-SPM-STBC в дальнейших исследованиях планируется провести сравнительный анализ известных алгоритмов OFDM и предлагаемых алгоритмов при различных параметрах модуляции и отношениях сигнал/шум.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Pärssinen A., Alouini M., Berg M., Kuerner T., Kyösti P., Leinonen, M. E., Matinnikko-Blue M., McCune E., Pfeiffer U., Wambacq P.* White Paper on RF Enabling 6G – Opportunities and Challenges from Technology to Spectrum // 6G Research Visions, No. 13. University of Oulu 2020. URL: <https://oulurepo.oulu.fi/handle/10024/36613> (дата обращения: 27.05.2024).
2. 6G Services, Capabilities and Enabling Technologies // Vivo Communication Research Institute, July 2022. URL: <https://asia-exstatic-vivofs.vivo.com/PSee2150xoirPK7y/1658819482440/17ac53a732038c48803a045e8498978b.pdf> (дата обращения: 27.05.2024).
3. *Hamamreh J. M., Hajar A.* The Generalization of Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Subcarrier Power Modulation to Quadrature Signal Constellations // RS Open Journal on Innovative Communication Technologies,

Vol. 1. Issue 1. 2020. URL.: <https://doi.org/10.21428/03d8ffbd.4948e89e> (дата обращения: 27.05.2024).

4. *Abuqamar A., J. Hamamreh, Mohamedou Abewa.* STBC-assisted OFDM with Subcarrier Power Modulation // RS Open Journal on Innovative Communication Technologies, Vol. 2, Issue 4. 2021. URL.: <https://doi.org/10.46470/03d8ffbd.275ae770> (дата обращения: 27.05.2024).

Хельфаун Абдерауф, аспирант кафедры теоретических основ радиотехники, Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-32, e-mail: khelfaui@sfnedu.ru

Пилипенко Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники, Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-32, e-mail: ampilipenko@sfnedu.ru

Khelfaoui Abderaouf, postgraduate student, Department of Fundamentals of Radio Engineering, Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskiy lane, 347922, phone: +7(8634)37-16-32, e-mail: khelfaui@sfnedu.ru

Pilipenko Alexandr Mikhaylovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Fundamentals of Radio Engineering, Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskiy lane, 347922, phone: +7(8634)37-16-32, e-mail: ampilipenko@sfnedu.ru