

# Введение

В последние годы усилия многих тысяч ученых и инженеров большинства стран мира сосредоточены на разработке различных новых технологий связи, необходимых для дальнейшего совершенствования существующих систем связи 5G, а также для разработки будущих систем связи 6G. Разумеется, российские специалисты в области связи не остаются в стороне от этих усилий мирового сообщества.

Во всем мире ежегодно выходят десятки тысяч научных статей и сотни монографий, посвященных различным технологиям, рассматриваемым для использования в будущих системах 6G. Одна монография переведена на русский язык\* [285], что нельзя признать достаточным.

Однако на русском языке в настоящее время отсутствуют книги, в которых с достаточной полнотой охватывались бы основные технологии, которые могут быть использованы при разработке систем 6G. Имеются только немногочисленные статьи и доклады на научных конференциях, посвященные отдельным вопросам. В то же время, на взгляд авторов, необходимо издание книги, после прочтения которой у русскоязычного читателя сложилось бы представление об основных технологиях, развиваемых в рамках исследований по 6G. Настоящая монография является примером попытки устранить указанный пробел.

Книга имеет следующую структуру.

В первой главе приводятся общие сведения о системах мобильной связи 6G. Приведены основные требования к системам 6G и кратко описаны планируемые к использованию в этих системах технологии. В частности, рассмотрены технологии спутниковой связи, подводной связи и квантовой связи. Уделено также

---

\* Вэнь Тонг, Пейин Чжу. Сети 6G. Путь от 5G к 6G глазами разработчиков. От подключенных людей и вещей к подключенному интеллекту / пер. с англ. В.С. Яценкова. — М.: ДМК Пресс, 2022. — 624 с.

внимание вопросам электромагнитной безопасности систем связи 6G. Кроме того, описан такой перспективный подход к повышению спектральной эффективности систем связи, как полный дуплекс.

**Вторая глава** посвящена применению методов машинного обучения в системах мобильной связи. Кратко рассмотрены методы обучения с учителем и обучения без учителя, включая методы линейной и нелинейной классификации данных. Приведены примеры использования машинного обучения для адаптивного выбора методов модуляции и кодирования при изменении условий распространения сигнала в канале связи. Рассмотрена задача демодуляции в системах MIMO в условиях использования высокоскоростных АЦП. В данной главе также описаны и проанализированы возможности применения методов машинного обучения и искусственного интеллекта в системах 5G и 6G.

В **третьей главе** проведен анализ важной проблемы организации связи в терагерцовом диапазоне частот. Приведены сведения о распространении радиоволн, а также общие сведения о моделях каналов связи в этом диапазоне частот. Обозначены направления исследований, направленных на реализацию в будущем систем связи терагерцового диапазона частот.

В **четвертой главе** описаны технологии атмосферной оптической связи и возможность их применения в системах 6G. Приведены сведения о моделях каналов связи, методах модуляции и неортогонального множественного доступа в системах атмосферной оптической связи. Описаны возможности совместного использования технологий радиосвязи и атмосферной оптической связи. Обозначены различные сферы применения технологий атмосферной оптической связи.

В **пятой главе** рассмотрена проблема определения местоположения (локализации) объектов в системах мобильной связи. Рассмотрены задачи локализации в системах миллиметрового, субмиллиметрового и терагерцового диапазонов. Дано описание постановки задачи и возможных подходов к решению задачи слежения за изменяющимся местоположением абонентских устройств с использованием сигналов радиосвязи.

В **шестой главе** даны описание и сравнительный анализ ряда новых технологий обработки сигналов в системах со многими несущими. Рассмотрены различные способы снижения пик-фактора излучаемого сигнала в таких системах.

В **седьмой** главе даны общие сведения о различных методах неортогонального множественного доступа NOMA. Дан сравнительный анализ спектральной эффективности систем с неортогональным и ортогональным множественным доступом. Дано описание систем NOMA с разделением по мощности и с кодовым разделением. Рассмотрена проблема совмещения в одной системе связи технологий NOMA и MIMO.

В **Приложении** для удобства читателя приведены минимально необходимые сведения о матрицах, а также о комплексных случайных величинах, векторах и матрицах.

Авторы надеются, что книга будет полезна инженерам и научным работникам, аспирантам и студентам, которые занимаются исследованиями и разработками современных и перспективных систем связи.

В.В. Крейнделин благодарит свою супругу Светлану за неоценимую поддержку в написании этой книги.

Д.Ю. Панкратов благодарит свою супругу Евгению и детей за поддержку в написании книги.