

Перколяционный анализ связности сотовых сетей с учетом диаграмм направленности антенн и SINR-критерия

С.Ш. Рехвиашвили, Институт прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра РАН (ИПМА КБНЦ РАН), заведующий отделом теоретической и математической физики, д.ф.-м.н.; rsergo@mail.ru
О.С. Ольховик, ИПМА КБНЦ РАН, младший научный сотрудник; os_vaytanets_86@mail.ru

УДК 001.891.573; 004.942

DOI: 10.34832/ELSV.2025.70.8.006

Аннотация. В работе исследуется связность сотовых сетей путем их моделирования как совокупностей перколяционных кластеров. В отличие от традиционных подходов, использующих упрощенные модели покрытия, принимаются во внимание диаграммы направленности антенн мобильных устройств и базовых станций (БС), а также учитывается отношение сигнала к помехам и шуму (Signal to Interference + Noise Ratio, SINR) как критерий для установления соединения. В рамках метода Монте-Карло анализируется формирование связных кластеров и исследуется влияние плотности станций, мощности передатчиков и порогов SINR на процент подключенных пользователей и размер наибольшего перколяционного кластера. Полученные результаты демонстрируют, как моделирование физического слоя влияет на общие характеристики связности сети, предоставляя более точное понимание поведения сотовых сетей в реальных условиях взаимных помех.

Ключевые слова: моделирование, метод Монте-Карло, беспроводные сети, базовая станция, мобильное устройство, секторная антенна, всенаправленная антенна, распространение радиоволн, затухание сигнала.

Для цитирования: Рехвиашвили, С.Ш. Перколяционный анализ связности сотовых сетей с учетом диаграмм направленности антенн и SINR-критерия / С.Ш. Рехвиашвили, О.С. Ольховик // Электросвязь. – 2025. – № 8. – С. 52-59.

ВВЕДЕНИЕ

Современные сотовые сети, начиная от внедрений стандарта пятого поколения (5G) и заканчивая перспективными разработками шестого поколения (6G), составляют основу современной цифровой инфраструктуры. Эти сети обеспечивают широкий охват пользователей высокоскоростным доступом к данным, поддерживают функционирование жизненно важных сервисов и обеспечивают развитие передовых технологий, включая интернет вещей, дорожную навигацию, беспилотные транспортные системы и технологии расширенной реальности. Для обеспечения стабильной работы и высокого уровня производительности сотовых сетей необходима детальная оценка их характеристик связи и способности обеспечивать устойчивое покрытие в реальных эксплуатационных условиях.

В городских средах пользователи постоянно перемещаются, а БС располагаются с высокой плотностью. Качество связи для абонента определяется не только расстоянием до ближайшей БС, но и сложным взаимодействием множества факторов. Основным из них является межсотовая интерференция, которая возникает от соседних передатчиков и значительно ухудшает показатель SINR на принимающей стороне [1–4]. Упрощенные модели покрытия, часто используемые в исследованиях, не в полной мере учитывают этот фактор, а также диаграммы направленности антенн БС, которые формируют сложный и неоднородный ландшафт радиопокрытия. Это приводит к

неточным оценкам связности и образованию зон недостаточного покрытия, где мобильные устройства (МУ) не могут установить стабильное соединение, несмотря на наличие БС поблизости. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки более точных моделей для оценки связности и надежности современных сотовых сетей [5–7], в том числе и в условиях доминирования интерференции.

Адекватный математический аппарат для решения вышеуказанной проблемы предлагает теория перколяции [8, 9]. Данная теория позволяет анализировать связность случайных графов и определять порог перколяции как критическое значение параметра, при котором возникает кластер связных узлов. Применительно к сотовым сетям такой кластер может соответствовать области непрерывного и устойчивого сервиса. Существующие работы по перколяции в беспроводных сетях [10–15] опираются, как правило, на упрощенные модели, такие как двумерные графы или критерии связности, основанные исключительно на уровне принимаемого сигнала или расстоянии. Эти подходы игнорируют критическую роль взаимных помех и направленности антенн, что существенно ограничивает их применимость к практическим сценариям.

Целью настоящей статьи является разработка и анализ перколяционной модели сотовой сети, которая интегрирует различные физико-технические характеристики для более точной оценки связности