

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Тонких Евгения Викторовича**

«Разработка и исследование методов планирования сетей связи высокой плотности»,

представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.2.15 - «Системы, сети и
устройства телекоммуникаций».

Актуальность темы работы.

Стремительный рост популярности и эффективности использования технологии Интернета Вещей уже в настоящее время к проектировщикам сетей связи пятого поколения предъявил требование, утвержденное стандартизирующими организациями, исходить из условия – плотность абонентов сети может составлять не менее 1 млн. на 1 кв. км.

Дальше – больше. В сетях связи шестого поколения плотность устройств еще более увеличивается и может достигать 100 устройств на 1 м^3 , что приводит к понятию сверхплотных сетей. Появление технологии Тактильного Интернета (для передачи тактильных ощущений) требует, чтобы в сверхплотных сетях ужесточилось требование и к круговой задержке – до 1мс, вместо 100 мс для сетей связи следующего поколения NGN.

Именно сети Интернета Вещей (включая Тактильный Интернет) определяют само появление высокоплотных сетей как таковых в сетях связи пятого поколения и сверхплотных сетей в сетях шестого поколения и сетях 2030.

Весьма перспективной для создания сетей высокой плотности оказалась технология D2D, применяемая в сетях Ad Hoc (беспроводная самоорганизующаяся сеть с соединениями «на лету»), однако «лобовое» использование этой технологии выявило серьезное взаимное влияние близко расположенных устройств, уменьшающее необходимое для нормальной работы отношение сигнал/шум, и увеличение количества транзакций по маршруту передачи сообщения, что увеличивало среднюю длину маршрута и, как следствие, увеличивалась задержка. В таких условиях тема диссертации, направленная на

разработку новых методов планирования сетей связи высокой плотности, является очень **актуальной**.

Обоснованность научных результатов, полученных в диссертации, следует из использования адекватных математических методов, которые представляют собой либо классические методы теории фрактальной геометрии, либо методы теории телетрафика. С помощью методов имитационного моделирования проверена справедливость теоретических выводов диссертационной работы. Применяемые автором условия реализуемости предлагаемых решений отвечают физическому смыслу решаемых задач.

Новизна и достоверность полученных результатов

Новые результаты, полученные в работе.

1. При разделении однородной структуры пространства вокруг устройства на область сигналов и область помех при требуемом радиусе установления связи на основе применения теоремы Эрдеша – Реньи, доказана возможность полной связности сети Ad Hoc при плотности устройств 1 млн. на 1 кв. км.

2. Для планирования сети связи высокой плотности при выявлении самоподобной (фрактальной) структуры неоднородного пространства окружения предложено использование «кривой Гильберта» как одного из геометрических фракталов, что адекватно учитывает неоднородность пространства окружения. Введение понятия «условной ширины кривой» позволяет при планировании учесть площадь, занимаемую строениями и другими препятствиями, что повышает адекватность использования данной «кривой» при планировании сети.

3. Методом статистического моделирования доказана эффективность использования кривой Гильберта при планировании сети высокой плотности в условиях неоднородной структуры пространства окружения устройства. По сравнению со случаем наличия однородной структуры в среднем в два раза уменьшается число транзитов при маршрутизации сообщений, а длина маршрута при неоднородной структуре окружения аппроксимируется β -распределением.

4. Для планирования высокоплотной сети предложен метод, использующий фрактальные геометрические фигуры (салфетки и ковер Серпинского, кривую Гильберта и др.), приведены расчеты фрактальной размерности предложенных фигур. Данный метод позволяет адекватно моделировать неоднородную структуру пространства окружения.

5. Разработана процедура выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования высокоплотной сети в условиях неоднородного пространства окружения. Процедура основана на выявлении близости параметров фрактальной и информационной размерности реального неоднородного пространства окружения сети параметрам выбранной фрактальной фигуры. Предложен алгоритм, реализующий разработанную процедуру.

На основании выполненных автором исследований представленную работу можно охарактеризовать как содержащую обоснованные технические решения, внедрение которых вносит вклад в развитие техники систем мобильной связи.

Научная ценность диссертационной работы заключается в разработанном новом подходе к планированию высокоплотных сетей при учете самоподобных характеристик окружения сети и использовании геометрических фракталов для этой цели, что объясняется естественной кластеризацией, обусловленной самоподобием. Данный подход к проектированию позволяет в два раза сократить средний маршрут передачи сообщения, что существенно уменьшает задержку передачи. Полученные результаты могут рассматриваться как определенное развитие подходов теории фрактальной геометрии применительно к проектированию сетей Ad Hoc.

Практическая значимость определяется созданием методики планирования и проектирования сети связи высокой плотности на основе методов фрактальной геометрии в условиях неоднородного пространства окружения. Разработан алгоритм выбора фрактальной фигуры на основе сравнения её фрактальной размерности с размерностью неоднородного пространства. Значимость

полученных результатов подтверждена актами их внедрения в различных проектных организациях.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, и заключения.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, приводятся научная новизна результатов и их практическая ценность, положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит анализ основных направлений развития сетей связи, здесь формулируются цели и задачи диссертационного исследования. Показывается, что структура высокоплотной сети Интернета вещей определяется в основном неоднородной городской инфраструктурой, обладающей как геометрический объект самоподобными свойствами. Предложено при планировании сети учитывать фрактальные свойства неоднородной инфраструктуры.

Во второй главе рассмотрена модель сети высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения. Приведены правила формирования области сигналов и области помех. Получены выражения для зависимости мощности помехи сигналов от расстояния. Показано, что для полносвязной сети Ad Hoc при размещении сети из 1 млн. устройств в круге с плотностью 1 устройство на 1 кв.м среднее расстояние от центра зоны до узла составит 423,1м, а число транзитов при радиусе области сигналов $R = 10$ м будет равно 42. Уменьшить число транзитов можно введением кластеров, которые могут самообразоваться за счет неоднородности пространства окружения.

В третьей главе предложен метод планирования сети связи высокой плотности, учитывающий самоподобную структуру неоднородного пространства окружения, использующий в качестве геометрического фрактала кривую Гильберта. Вводится понятие условной ширины кривой, которое позволяет моделировать расположение препятствий в неоднородной среде. Проведено имитационное моделирование высокоплотной сети с использованием фрактальной кривой Гильберта, подтвердившее уменьшение в 2 раза числа транзитов в неоднородной

среде по отношению к неоднородной. Показано, что распределение длины маршрута может моделироваться в данных условиях эксперимента β - распределением. Предложенный метод планирования предполагает, например, использование плана городской застройки в котором фрактальная кривая (с условной шириной) моделирует препятствия, вызывающие естественную кластеризацию устройств сети.

В четвертой главе рассмотрены примеры использования различных фрактальных фигур для представления пространства окружения высокоплотной сети. Выбор фрактальной фигуры для моделирования планируемого пространства окружения сети осуществляется сравнением их фрактальной и информационной размерности, при этом целесообразно учитывать долю площади пространства окружения, характеризующую строения и прочие препятствия. Разработана методика выбора фрактальной фигуры, реализованная соответствующим алгоритмом.

Диссертационная работа выглядит как логично сформированное и завершенное научное исследование. Автореферат правильно отражает основной материал диссертационной работы.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1) Модель сети, предлагаемая в разделе 2.4.1, представляется слабо обоснованной.

Так, например, рассматривается зависимость затухания сигнала, измеряемое в дБ, от расстояния. В данной зависимости используются некоторые константы α, β, γ , численные значения которых не объяснены. Отсутствует ссылка на источник, из которого они заимствованы и не приведены характеристики сигналов и каналов, для которых эти значения справедливы.

В этом же разделе рассматривается имитационное моделирование распределения уровня мощности помехи в произвольной точке области обслуживания. Без моделирования ясно, что при числе $N \geq 6$ однородных источников помех распределение будет усеченно – нормальным, и

моделирование, естественно, этот факт подтвердило. Но исходные данные для реализации моделирования не приведены.

2) Аналитическая модель формирования сигнала помехи в разделе 2.4.3 также слабо обоснована. Не объяснено происхождение формул (2.9), (2.10) и (2.11). Полученные результаты для расчета мощности помех в заданной точке области сигналов предполагают, что помехи, влияющие на сигнал, могут располагаться на расстоянии до 500м, что не характерно для городской застройки.

Отличное совпадение кривых на рис.2.5 на взгляд рецензента объясняется тем, что статистическому моделированию был подвергнут не реальный физический процесс формирования поля помех, а проверка полученного аналитического выражения.

3) Формула (2.13) для вероятности связности узла приведена без вывода и ссылки.

4) Требуется пояснения утверждение на стр.94, что пуассоновское поле подразумевает равномерное распределение узлов по всей территории.

5) В формулах на стр. 112 очевидна путаница параметров q и g и их значений.

Указанные замечания не снижают общего весьма положительного впечатления, которое производит диссертация Е.В. Тонких.

Заключение по работе

Основные результаты исследования в достаточно полном объеме отражены в 8 публикациях автора из них: 4 публикации в журналах из Перечня ВАК, 3 публикации, индексируемые в наукометрической базе Scopus, одна из которых относится к Q1, другая – к Q2, 1 публикация в журнале из базы РИНЦ. Работа прошла апробацию на Международных и Российских конференциях.

На основании вышеизложенного можно заключить, что представленная диссертация Тонких Евгения Викторовича «Разработка и исследование методов планирования сетей связи высокой плотности» является законченной научно-квалификационной работой, содержит новые **оригинальные** научные результаты, которые могут определить новое направление исследования методов

проектирования высокоплотных сетей Интернета Вещей с использованием фрактальной геометрии. Диссертация полностью соответствует критериям установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», п.9 (в ред. Постановления Правительства РФ от 21.04.2016 N 335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», а ее автор, Тонких Евгений Викторович, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по этой специальности.

Официальный оппонент
доктор технических наук, профессор

18.11.21



Вячеслав Григорьевич Карташевский

Сведения об оппоненте:

Карташевский Вячеслав Григорьевич, гражданин Российской Федерации, Заслуженный работник связи РФ, доктор технических наук по специальности 05.12.02 – «Системы и устройства передачи информации по каналам связи» (1995г.), профессор по кафедре «Автоматической электросвязи» (1997г.), заведующий кафедрой Информационной безопасности Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ).

Адрес: ул. Льва Толстого, д. 23, Самара, 443010.

Телефон: (927) 794-12-48, E-mail: kartash@psuti.ru

Подпись профессора В.Г. Карташевского удостоверяю

Ученый секретарь Совета ПГУТИ

к.э.н. доцент



О.В. Витевская