

УДК 004.94

DOI 10.17513/snt.40042

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ЭФФЕКТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

<sup>1,2</sup>Ку Дык Тоан, <sup>1</sup>Ахметшин Д.А., <sup>1</sup>Нурiev Н.К., <sup>1</sup>Печеный Е.А.,

<sup>2</sup>До Као Минь, <sup>2</sup>Фам Тхи Тхуи, <sup>2</sup>Ле Ван Дьеп, <sup>2</sup>Дао Минь Шанг

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,

Казань, e-mail: toancdit@gmail.com, nurievnk@mail.ru;

<sup>2</sup>Промышленный университет Вьетчи, Вьетнам,

e-mail: toancd@vui.edu.vn, minhchc.it@gmail.com, thuypt101@gmail.com

Проектирование беспроводных сетей в текущих условиях является достаточно актуальным направлением в телекоммуникациях. При проектировании должны учитываться различные факторы, среди которых – наличие препятствий, мешающих нормальной работе радиосигнала беспроводной точки доступа. Препятствия, мешающие нормальной работе радиосигнала беспроводной точки доступа, различны и могут быть как статичными, так и движущимися. Наличие конкретных препятствий зависит от задач, стоящих перед беспроводным соединением и местом нахождения беспроводного соединения. Так, если речь идет об уличных беспроводных соединениях, то препятствия, мешающие нормальной работе беспроводных соединений, могут быть как движущиеся (транспортные средства), так и статичные (здания, деревья и пр.). Внутри зданий практически все препятствия статичны. В исследовании анализируется проблематика преодоления типичных статичных препятствий внутри зданий. Когда речь идет о моделировании сети внутри здания, то основными видами препятствий являются статические препятствия (окна, стены, беспроводные точки доступа и пр.). Такие препятствия могут иметь различные размеры, пропускающую способность и способ воздействия на беспроводные точки доступа. Предлагаемая в исследовании модель распространения радиосигнала для обработки препятствий ориентирована на учет статических препятствий в реальном здании и подойдет для генерации радиосигналов беспроводных точек доступа с дифракцией, преломлением, отражением и затуханием, с учетом задержки радиосигнала и его длины.

**Ключевые слова:** препятствия для радиосигнала, беспроводная точка доступа, преодоление препятствий, стохастические модели, статические препятствия

## MATHEMATICAL MODEL AND ALGORITHM OF RADIO SIGNALS PROPAGATION TO SUPPORT THE EFFICIENT DESIGN FOR WIRELESS NETWORKS

<sup>1,2</sup>Cu Duc Toan, <sup>1</sup>Akhmetshin D.A., <sup>1</sup>Nuriev N.K., <sup>1</sup>Pecheny E.A.,

<sup>2</sup>Do Cao Minh, <sup>2</sup>Pham Thi Thuy, <sup>2</sup>Le Van Diep, <sup>2</sup>Dao Minh Sang

<sup>1</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan,

e-mail: toancdit@gmail.com, nurievnk@mail.ru;

<sup>2</sup>Viet Tri University of Industry, Vietnam,

e-mail: toancd@vui.edu.vn, minhchc.it@gmail.com, thuypt101@gmail.com

The design of wireless networks in the current conditions is a fairly relevant area in telecommunications. Various factors are taken into account when designing such networks. Among these factors are the presence of obstacles that interfere with the normal operation of the wireless access point's radio signal. The obstacles that interfere with the normal operation of the wireless access point's radio signal are different, and can be both static and moving. The presence of specific obstacles depends on the tasks facing the wireless connection and the location of the wireless connection. So, if we are talking about outdoor wireless connections, then obstacles that interfere with the normal operation of wireless connections can be both moving (vehicles) and static (buildings, trees, etc.). Inside buildings, almost all obstacles are static. The study analyzes the problems of overcoming typical static obstacles inside buildings. When it comes to modeling a network inside a building, the main types of obstacles are static obstacles (windows, walls, wireless access points, etc.). Such obstacles can have different sizes, bandwidth and the way they affect wireless access points. The radio signal propagation model proposed in the study for obstacle processing is focused on taking into account static obstacles in a real building and is suitable for generating radio signals from wireless access points with diffraction, refraction, reflection and attenuation, taking into account the delay of the radio signal and its length.

**Keywords:** obstacles to the radio signal, wireless access point, overcoming obstacles, stochastic models, static obstacles

Беспроводные сети используют для решения различных задач, так как они играют важную роль в поддержке коммуникаций, в том числе в помещениях. Однако на эф-

фективность работы беспроводного сигнала могут влиять различные препятствия [1]. В данной связи весьма актуальной задачей видится выработка оптимального решения,

минимизирующего влияние препятствий на работу радиоканала.

Вопросы преодоления препятствий являются особенно сложными, поскольку [2, 3] радиосигналам мешают различные препятствия, как статические, так и движущиеся. С учетом ограниченной дальности связи антенн, используемых в Wi-Fi, сигнал может ослабляться еще и препятствиями.

Цель исследования – разработка математической модели с учетом влияния на распространение радиосигналов дифракции, ослабления, преломления и отражения, а также пересечений между препятствиями. В настоящем исследовании анализируется проблематика преодоления типичных статических препятствий внутри зданий. Когда речь идет о моделировании сети внутри здания, то основными видами препятствий являются статические препятствия (окна, стены, беспроводные точки доступа и пр.). Такие препятствия могут иметь различные размеры, пропускающую способность и способ воздействия на беспроводные точки доступа.

#### Материалы и методы исследования

В телекоммуникациях стохастические модели геометрии беспроводных сетей относятся к математическим моделям на основе стохастической геометрии, которые предназначены для представления аспектов беспроводных сетей. Наиболее широко используемые стохастические модели распространения радиосигнала – это модель свободного пространства [4], двухлучевая модель отражения от земли [5], затухание по Рэлю [6], модель Лонгли – Райса (прогнозирование затухания), различные модели затенения [7], модель потерь на логарифмическом расстоянии, смешанные стохастические модели [7, 8]. Так, одни модели не учитывают размеры препятствий, другие, например модель затухания по Рэлю, не учитывают работу беспроводных каналов с компонентом LOS (Line of Sight, LOS).

В научных работах рассматривались математические модели распространения радиосигналов внутри зданий. В [9] было показано, что канал распространения радиосигнала внутри зданий является сложным, поскольку препятствия с различными физическими свойствами могут по-разному влиять на распространение сигнала, поверхностное отражение, рассеяние, засорение и потери при проникновении в материал могут привести к серьезным затуханиям принимаемого сигнала, особенно на частоте 2,4 ГГц, а также представлено сравнение потерь на трассе в свободном пространстве, полученных в диапазонах

2,4 и 5 ГГц, которые в основном используются для сетей Wi-Fi внутри зданий, и в диапазоне 60 ГГц. В статье рассмотрены вопросы проектирования беспроводных сетей внутри здания. Основной проблемой автора при проектировании беспроводных сетей является необходимость учета статических препятствий, которые ухудшают качество передаваемого сигнала. Также на величину отношения сигнал/помеха-шум на входе приемного устройства оказывает влияние среда распространения, которая поглощает мощность радиоволн. Кроме того, на снижение качества принятого сигнала влияют другие источники радиоволн. Отмеченные выше негативные воздействия на беспроводные сети были учтены авторами при разработке математической модели распространения радиосигнала внутри помещений. Данная модель была представлена в виде блок-схемы. Также авторы представили математические выражения используемых математических моделей: распространения сигнала в свободном пространстве, потерь на логарифмическом расстоянии, стохастические модели для вычисления отношения сигнал/помеха-шум SINR (Signal-to-Interference Noise Ratio, SINR). Научная новизна в статье определяется разработкой новой математической модели, позволяющей проектировать беспроводные сети внутри здания с учетом препятствий на пути распространения радиосигнала и негативного влияния других точек доступа.

Работа системы, позволяющей справляться со статическими препятствиями, может быть описана следующим образом. Чтобы знать, с какими устройствами (включая беспроводные точки доступа) и устройствами, находящимися в соседних помещениях, конкретная беспроводная точка может взаимодействовать, авторы разработали следующий протокол: беспроводная точка доступа отправляет сигнал только тем устройствам, которые находятся в зоне действия ее радиосвязи.

Наиболее оптимальным видится использование сигналов радиомаяка для передачи сообщений всем устройствам (включая беспроводные точки доступа), включая устройства, находящиеся в соседних помещениях. При этом используются такие методы подачи сигнала, как ранний протокол произвольного доступа «ALOHA» (Advocates of Linux Open-source Hawaii Association, ALOHA) и периодическая подача сигнала. В указанных методах авторы выбирали подход «помеченный пользователь» для того, чтобы проанализировать сигнал ALOHA с конечным пользователем.

### Результаты исследования и их обсуждение

После передачи сигнала беспроводная точка выполняет предложенный авторами алгоритм модели распространения радиосигнала. Алгоритм определяет, к какому устройству (включая беспроводные точки доступа) или устройству, находящемуся в соседних помещениях, лучше всего подключаться (они будут отмечены как «соседи»), и отправляет сигнал всем выбранным соседям. Эти шаги показаны на рис. 1.

Модель работает следующим образом: сначала осуществляется процесс распространения сигнала, в котором беспроводные точки доступа передают данные на все устройства в помещении. Далее рассчитывается отношение сигнал/помеха плюс шум

SINR и проверяется, превышает ли это отношение заданное пороговое значение или равно ему. Для поставленной задачи берем стандартизированные модели (шаг 1).

Модель распространения в свободном пространстве будет использоваться для того, чтобы спрогнозировать уровень принимаемого сигнала. Модель затенения будет использоваться для выражения препятствий в среде их распространения, которая определяется рядом физических значений. Модель затухания используем для совместного представления эффектов, создаваемых препятствиями. Сначала используем значения для расчета SINR на стороне конкретной точки доступа, затем идентифицируем статичные препятствия (стены, устройства). Затем препятствия идентифицируются и моделируются в виде различных форм (шаг 2) (рис. 2).

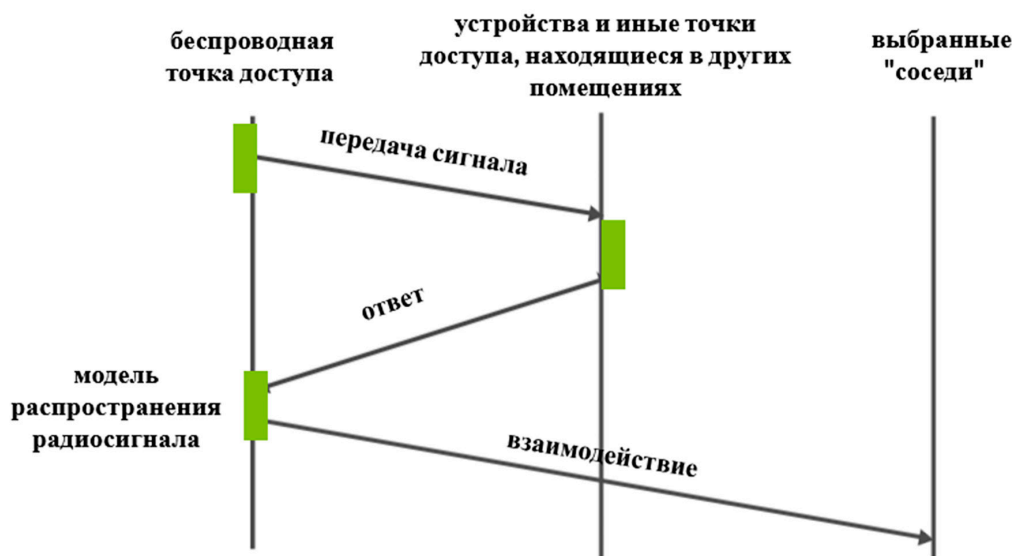


Рис. 1. Поток сигналов системного протокола

Обозначения, используемые в модели распространения радиосигнала для обработки препятствий

Наименование обозначения	Расшифровка обозначения	Наименование обозначения	Расшифровка обозначения
$U$	Порог ослабления, необходимый для успешного приема	$G_t$	Усиление антенны передатчика
$T_i$	Количество беспроводных точек доступа	$G_r$	Усиление антенны приемника
$MT_i$	Набор беспроводных точек доступа	$\lambda$	Длина волны
$L_i$	Местонахождение беспроводной точки доступа $i$	$d_{ij}$	Расстояние между узлом $i$ и узлом $j$
$r$	Диапазон радиосвязи для каждой беспроводной точки	$O_k$	Препятствие
$P_i$	Мощность передаваемого сигнала	$D_k^{ij}$	Набор линейных сегментов
$N_0$	Уровень шума		

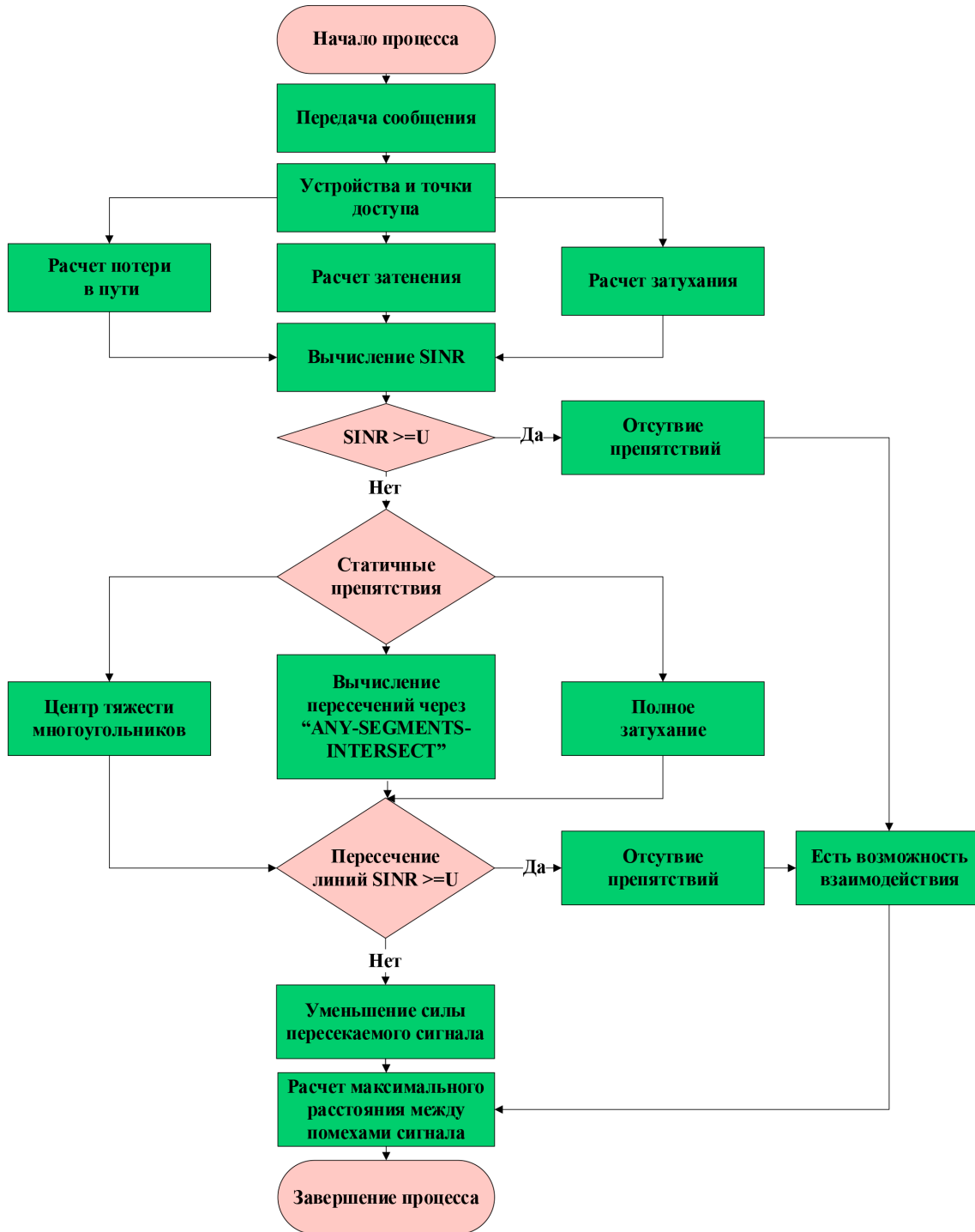


Рис. 2. Блок-схема предлагаемой модели распространения радиосигнала для обработки препятствий

Третьим шагом в модели является расчет максимального расстояния между помехами между всеми устройствами (включая беспроводные точки доступа) и устройствами, находящимися в соседних помещениях с беспроводной точкой доступа. Учет пре-

пятствий для подключения к вычислительной сети позволит подобрать оптимальные параметры построения сети и обеспечить дополнительное ослабление всех препятствий, из-за которых возникают проблемы с подключением. В таблице показаны обо-

значения, используемые в модели распространения радиосигнала для обработки препятствий.

Предположим, что беспроводная точка доступа  $i$  передает связь множеству устройств, в том числе таким же беспроводным точкам доступа  $T$  в радиодиапазоне, включая устройства, находящиеся в соседних помещениях, в которых также находятся точки доступа (назовем их «соседями»). Набор «соседей» для беспроводной точки доступа  $i$  можно описать следующим выражением:

$$MT_i = \{j \mid \text{раст}(i, j) < r\}, i, j = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, n \} \quad (1)$$

где  $\text{раст}(i, j)$  – расстояние между беспроводной точкой доступа  $i$  и беспроводными точками доступа  $j$  и другими принимающими устройствами. Выражение (1) описывает, что если беспроводная точка доступа  $j$  находится в радиусе действия  $i$ , то  $j$  является соседом  $i$ . Также предполагается, что беспроводная точка доступа  $i$  может поддерживать связь с соседними беспроводными точками доступа  $j$  из их соответствующих местоположений, и с другими устройствами, находящимися в зоне распространения сигнала  $j$ , если SINR больше или равен определенному пороговому значению  $U$ , которое требуется для успешного приема. Значение порогового значения  $U$  устанавливается в соответствии с модуляцией, используемой в системе. Значение SINR для передачи от беспроводной точки доступа  $i$  к устройствам в зоне доступа  $j$  и  $j$  вычисляется как

$$\text{if}(\text{SINR}(i, j) \geq U). \quad (2)$$

Пороговое значение  $U$  устанавливается в соответствии с той модуляцией, которая используется в системе. Значение SINR для передачи от беспроводной точки  $i$  к  $j$  вычисляется как

$$\text{SINR}(i, j) = \frac{P_i f(i, j)}{N_0 + \sum_{k \neq i} P_k f(k, j)}. \quad (3)$$

В выражении (1.3)  $f$  – коэффициент усиления на пути от точки доступа  $i$  к принимаемому устройству  $j$ ; а  $P$  – мощность, которая передается беспроводной точкой доступа  $i$ . Все соседние точки доступа, отличные от  $i$ , создают помехи, если они передают радиосвязь одновременно, способствуя уровню шума  $N_0$ .

Для прогнозирования уровня принимаемого сигнала от точки доступа  $i$  к точке доступа и устройствам  $j$  используем модель распространения в свободном пространстве. Для описания того, как сигнал, пере-

даваемый от беспроводной точки доступа  $i$  к принимающим устройствам  $j$ , затухает на расстоянии  $d$  в свободном пространстве, будем использовать уравнение Харольда Фрииса.

$$f_{PL}(i, j) = \frac{P_i G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{ij}^2 L}, \quad (4)$$

где  $G_t$  и  $G_r$  – коэффициенты усиления антенны передатчика и приемника;  $\lambda$  – длина волны; а  $L$  – показывает потери в цепи.

Для выражения препятствия на пути распространения радиосигнала воспользуемся стохастической моделью затенения. Для описания уровня изменений сигнала в модели используется распределение Гаусса – Лапласа (логарифмически нормальное распределение):

$$f_{SH}(i, j) = 20 \log\left(\frac{4\pi d_{ij}}{L}\right) + 10n \log\left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right) + M_\sigma, \quad (5)$$

где  $d_0$  – расстояние опорное приблизительное, определяемое по итогу измерений вблизи точки доступа;  $n$  – показатель потерь в пути, отражающий скорость увеличения потери с увеличением расстояния;  $M_\sigma$  – случайная величина гауссовского распределения с нулевым средним значением, измеряемая в децибелах.

В условиях многолучевого распространения небольшие изменения в местоположении хоста могут привести к резким колебаниям уровня принимаемого сигнала. Это вызвано конструктивной и деструктивной интерференцией сигналов, принимаемых по нескольким трактам, при этом их фазовые сдвиги случайны. Аналогичным образом использовались режимы затухания с помощью термина  $f_{FD}(i, j)$ , которые были предложены в сочетании с моделью препятствий в [10], для совместного представления крупномасштабных и мелкомасштабных эффектов. В основе затухающей модели используется метод [11], объединяющий вышеприведенные стохастические модели для вычисления SINR на стороне беспроводной точки доступа:

$$f(i, j) = f_{PL}(i, j) f_{SH}(i, j) f_{FD}(i, j). \quad (6)$$

Теперь акцентируем внимание на моделировании препятствий. С учетом того факта, что беспроводная сеть находится в здании, основные типы препятствий будут статическими. Любое статическое препятствие может оказывать влияние на передачу радиосигнала, если какая-либо граница препятствия пересекается с радиосигналом передающего устройства.

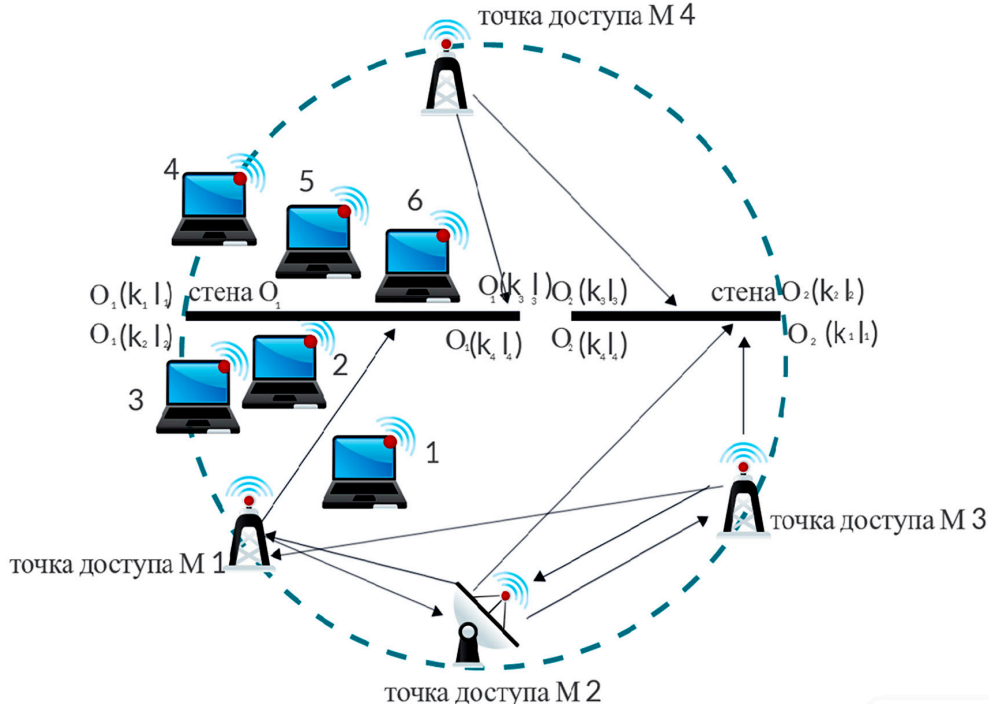


Рис. 3. Статические препятствия

С учетом того факта, что препятствия будут статическими, для моделирования препятствий необходимо вычислить отрезки линий и центра тяжести каждого препятствия. Центр тяжести  $O_k(K_c, L_c)$  каждого препятствия будет определяться с использованием следующих уравнений:

$$M = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{F-1} (k_i l_{i+1} - k_{i+1} l_i), \quad (7)$$

$$K_c = \frac{1}{FM} \sum_{i=0}^{F-1} (k_i + k_{i+1})(k_i l_{i+1} - k_{i+1} l_i), \quad (8)$$

$$L_c = \frac{1}{FM} \sum_{i=0}^{F-1} (l_i + l_{i+1})(k_i l_{i+1} - k_{i+1} l_i), \quad (9)$$

где  $M$  – площадь;  $k_i, l_i, k_{i+1}, l_{i+1}$  – координаты соответствующих вершин препятствия;  $F$  – количество вершин препятствия  $O_k$ .

На рис. 3 показаны статические препятствия (стены). Для проверки того, как радиосигнал пересекает препятствие, необходимо использовать алгоритм ANY-

SEGMENTS-INTERSECT (любые сегменты пересекаются), с учетом всех возможных угловых точек:

$$D_k^{ij} = \{ \overline{T_i M_j} \cap \overline{O_k(k_e, l_e) O_k(k_{e+1}, l_{e+1})} : 1 \leq e \leq n \}, \quad (10)$$

где  $n$  – количество точек статических препятствий.

Теперь опишем сценарий, представленный на рис. 3. Точка доступа М1 первоначально передает сообщение всем устройствам в пределах одного и того же помещения (1, 2, 3) и эти устройства могут легко подключиться к точке доступа. Однако устройства, находящиеся за стеной (4, 5, 6), заблокированы статическим препятствием – стеной. Общее затухание, вызванное всеми препятствиями в пределах диапазона связи точки доступа  $i$ , может быть рассчитано как

$$f_{OB}(i, j) = \prod_{O_k \in O} f_k^{g_k^{ij}}, \quad (11)$$

где  $g_k^{ij}$  – индикатор, указывающий на наличие препятствий и пересечений с ними и рассчитываемый из следующего выражения:

$$g_k^{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если ANY-SEGMENTS-INTERSECT } D_k^{ij} \text{ это истина} \\ 0, & \text{если не пересекаются, то иначе} \end{cases} \quad (12)$$

Таким образом [12–14], можно осуществлять расчет SINR на стороне устройства, подключаемого к беспроводной точке доступа, введя значение  $f_{об}(i, j)$  ОБ в уравнение (3) и проверять выполнение условий через уравнение (2) при наличии большого количества препятствий на пути радиосигнала.

Ранее в научных работах похожий подход был предложен для проектирования радиотрасс для группы транспортных средств с учетом того факта, что в службах интеллектуальной транспортной системы на дорогах для установления сквозного соединения между транспортными средствами и сети «транспортное средство – инфраструктура» широко используются многочисленные беспроводные устройства. В работе [15] специфика моделирования радиосигнала основана на том, что радиотрассы для транспортных средств зависимы от статических и движущихся препятствий, которые могут блокировать радиосигналы в системах связи транспортных средств. В отличие от работы [15] в настоящем исследовании моделирование радиосигнала осуществлялось без учета движущихся препятствий, расчет модели ориентирован на то, что модель применима для статических препятствий в помещениях, включая такие препятствия, как иные беспроводные точки доступа, находящиеся в помещении.

Практическая цель проводимого исследования заключается в том, чтобы понять, с помощью каких моделей и алгоритмов распространения радиосигналов, позволяющих справляться со статическими препятствиями различного размера, будет обеспечен наиболее эффективный подход к проектированию беспроводных сетей. Так, например, в работе [16] разработан оптимальный подход к модели и алгоритмам распространения радиосигналов в неудовлетворительных погодных условиях (сильный дождь и град), вызывающих значительное ослабление частот выше 10 ГГц, поскольку дождевые капли имеют почти тот же размер, что и длины радиоволн.

Восприимчивость радиоволн к атмосферным воздействиям и эффектам затенения исследовалась в работе [17]. Эффект затухания в сочетании с высокими потерями в тракте исследовались в работе [18], в которой доказывается, что такое сочетание обеспечивает пространственное повторное использование частот, позволяя различным каналам связи работать одновременно на одной частоте, не создавая помех друг другу, что увеличивает общую пропускную способность сети. Однако такой подход адаптирован только для помещений, где зона покрытия может быть ограничена одной комнатой.

Однако канал распространения радиосигнала внутри помещений является настолько сложным из-за того, что препятствия с различными физическими свойствами могут по-разному влиять на распространение сигнала. Так, например, в работе [9] отмечается, что отражение от поверхности, рассеяние, закурорка и потери при проникновении материала могут серьезно ухудшать принимаемый сигнал, особенно на частоте 60 ГГц. Отсюда все вышеперечисленные явления распространения должны быть тщательно проанализированы для моделирования каналов радиоволн с учетом разных частот.

Теперь акцентируем внимание на таком факторе, как влияние на радиосигнал одной точки доступа иных точек доступа, находящихся в помещении. В зарубежных источниках отмечается, что сигнал, посылаемый одной точкой доступа, будет неизбежно влиять на все точки доступа в радиусе действия.

Чем дальше отдалены друг от друга точки доступа, тем меньше влияние их друг на друга в части препятствий для радиосигнала. По указанной причине при моделировании беспроводной сети доступа необходимо осуществление эффективного расчета максимального расстояния между точками доступа (помехами). Расчет в данном случае оптимально проводить по уравнению Харриса Фрисса:

$$d_I = \sqrt[\alpha]{\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2}, \quad (13)$$

где  $P_{\min}$  – минимальная мощность на точке доступа, необходимая для создания помех;  $P_{\max}$  – максимальная передаваемая мощность.

При моделировании сети беспроводного доступа учет наличия препятствий в виде других точек доступа позволяет защитить сеть от взаимных помех. Дополнительное затухание, которое создается препятствиями, в вышеназванном случае будет оказывать влияние на максимальное расстояние между точками доступа (помехами). При этом так называемый эффект экранирования от препятствия может привести к отключению беспроводных точек доступа или привести к иным скрытым проблемам. Отсюда можно сделать вывод о необходимости учета эффекта экранирования при вычислении максимального расстояния между точками доступа (помехами). Расчет данного эффекта позволит минимизировать скрытые проблемы. При осуществлении расчета необходимо учитывать  $P_{\max}$  пропорциональное дополнительному ослаблению, которое

может создаваться всеми препятствиями радиоволнам. Отсюда оптимальным видится следующее уравнение:

$$d_i^{i,j} = \alpha \sqrt{f_{OB}(i,j) \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2}. \quad (14)$$

Подводя итог, отметим, что при моделировании сетей беспроводного доступа наиболее актуальной является проблема преодоления препятствий различных свойств и размеров радиосигналам. Когда речь идет о моделировании сети внутри здания, то основными видами препятствий являются статические препятствия (окна, стены, беспроводные точки доступа и пр.). Такие препятствия могут иметь различные размеры, пропускающую способность и способ воздействия на беспроводные точки доступа.

### Заключение

Согласно способу разработанная математическая модель распространения радиосигнала для обработки препятствий ориентирована на учет статических препятствий в реальном здании и подойдет для генерации радиосигналов беспроводных точек доступа с дифракцией, преломлением, отражением и затуханием, с учетом задержки радиосигнала и его длины.

Фактически было показано, что модель распространения радиосигнала, предложенная автором для описания крупномасштабных эффектов экранирования, сочетается со стохастическими моделями, описывающими меньшие масштабы. В работе описываются как крупномасштабные, так и мелкомасштабные эффекты, при этом сохраняется достаточная сложность для моделирования больших сетей за приемлемый промежуток времени. Данная проблема будет исследована и реализована автором в следующих работах.

Практическая значимость представленной в статье исследовательской работы заключается в том, что разработанная математическая модель может быть использована специалистами, занимающимися проектированием беспроводных сетей внутри сооружений.

### Список литературы

1. Ахметшин Д.А., Ку Дык Тоан, Нуриев Н.К., Печеный Е.А. Постановка математической задачи организации беспроводной сети по технологии WiFi с фильтрацией контента // *Современные наукоемкие технологии*. 2019. № 11-1. С. 15–23.
2. Печеный Е.А., Нуриев Н.К., Старыгина С.Д. Самоорганизующаяся кластеризация потока больших данных // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2020. № 1 (49). С. 10–20.
3. Думов М.И., Хабаров С.П. Моделирование беспроводных сетей в среде OMNET++ с использованием INET frame-

work // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19, № 6. С. 1151–1161.

4. Абилов А.В. Распространение радиоволн в сетях подвижной связи: теоретический материал и задачи для практических занятий. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2001. 24 с.

5. Clarke R.H. A statistical theory of mobile radio reception // *Bell Systems Technical Journal*. July-August 1968. Vol. 47, Is. 6. P. 957–1000.

6. Geraschenko V.S., Grishin A.S., Gartung N.I. Approaches for the calculation of rayleigh damping coefficients for a time-history analysis // *Transactions on The Built Environment, WIT Press* 2018. Vol. 180. P. 227–237.

7. Грязнова И.Ю., Курин В.В., Лабутина М.С., Харчев В.А. Исследование влияния эффектов затенения на рассеяние акустических сигналов на дискретных случайных неоднородностях // *Вестник ННГУ*. 2011. № 5–3. С. 30–37.

8. Ляндрес В.З. Компонентная модель фединга // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 5 (90). С. 113–115.

9. Leticia Carneiro de Souza, Celso Henrique de Souza Lopes, Rita de Cassia Carletti dos Santos, Arismar Cerqueira Sodr  Junior, Luciano Leonel Mendes. A Study on Propagation Models for 60 GHz Signals in Indoor Environments // *Frontiers in Communications and Networks*. January 2022. Sec. Wireless Communications. Vol. 2. P. 1–14. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frcmn.2021.757842/full> (дата обращения: 19.03.2024). DOI: 10.3389/frcmn.2021.757842.

10. Мамченко М.В., Зорин В.А., Романова М.А. Эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для беспилотных транспортных средств // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2022. Вып. 1. С. 59–73.

11. Польщиков К.А., Лазарев С.А., Киселева Е.Д., Киселев В.Е. Математические модели для оценки использования радиоканалов при передаче потоков реального времени в беспроводной самоорганизующейся сети // *Инфокоммуникационные технологии*. 2019. Т. 17, № 3. С. 336–341

12. Cu Duc Toan, Viktoriya V. Ling, Olga V. Ledneva, Sergey A. Kochkin, Gulnara A. Saparbekova. Mathematical Models for wireless Access Networks // *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. June 2019. Vol. 8, Is. 5. P. 2383–2387.

13. Gureev A.V., Shtern Yu.I., Shtern M.Y., Thurain Tun, Karavaev I.S. Mathematical Simulation of Indoor Wireless Networks // *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 12, Is. 5. P. 4001–4010.

14. Маркова Е.В., Гольская А.А., Дзантиев И.Л., Гудкова И.А., Шоргин С.Я. Сравнительный анализ показателей эффективности модели беспроводной сети межмашинного взаимодействия, работающей в рамках двух политик разделения радиоресурсов // *Информатика и ее применения*. 2019. Т. 13, № 1. С. 108–116.

15. Muhammad Ahsan Qureshi, Rafidah Md Noor, Shahabuddin Shamsirband, Sharmin Parveen, Muhammad Shiraz, Abdullah Gan. A Survey on Obstacle Modeling Patterns in Radio Propagation Models for Vehicular Ad Hoc Networks // *Arabian Journal for Science and Engineering*. February 2015. Vol. 40. P. 1385–1407.

16. Zhouyue Pi and Farooq Khan. Introduction to mobile broadband systems in the millimeter range // *IEEE Communications Magazine*. June 2011. Is. 6. P. 101–107. DOI: 10.1109/mcom.2011.5783993.

17. Rappaport T.S., Xing Y., MacCartney G.R., Molisch A.F., Mellios E., Zhang J. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a focus on Propagation Models // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017. P. 6213–6230. DOI: 10.1109/TAP.2017.2734243.

18. Yilmaz T., Faydel E., Akan O.B. Employing 60 GHz ISM Band for 5G Wireless Communications // *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*. 2014. P. 77–82. DOI: 10.1109/blackseacom.2014.6849009.