

УДК 004.94:621.396.96

*Д.О. Маркин*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

*Представлено исследование эффективности известных алгоритмов определения местоположения мобильных устройств внутри помещений на основе имитационного моделирования. Исследованы алгоритмы определения местоположения на основе методов трилатерации (триангуляции), метода ближайших соседей и метода на основе скрытых марковских моделей. Определены оптимальные параметры алгоритмов для заданных исходных условий. Проведен ряд экспериментов с использованием имитационного моделирования.*

**Ключевые слова:** *определение местоположения, трилатерация, скрытые марковские модели, имитационное моделирование, метод ближайших соседей.*

**Введение.** Различные системы навигации и определения местоположения известны уже достаточно давно, однако в последнее время активно проводятся исследования способов определения местоположения в помещениях внутри зданий. В отличие от определения местоположения на открытой местности, внутри зданий и помещений нет возможности использовать спутниковую навигацию из-за очень слабого сигнала. Кроме этого, требования приложений, использующих данные о местоположении субъекта внутри здания, зачастую требуют высокой точности, соизмеримой с точностью определения местоположения, достигаемой в спутниковых системах навигации.

**Целью** данной работы является исследование эффективности известных алгоритмов определения местоположения мобильных устройств (МУ) внутри помещений для выявления оптимальных параметров, позволяющих достичь наибольшей точности оценки местоположения МУ внутри здания.

### **Сравнение известных алгоритмов.**

К базовым принципам [1], на которых основываются все способы определения местоположения МУ, относятся:

1) триангуляция и трилатерация [2]. Использует измерения таких параметров сигнала, как RSS (Received Signal Strength) – уровень мощности принимаемого сигнала; TOA (Time of Arrival) – время распространения (прибытия) сигнала; TDOA (Time Difference of Arrival) – разница во времени прибытия; RTOF (Roundtrip

Time of Flight) – время распространения сигнала туда и обратно; RSP (Received Signal Phase Method) – метод измерения фазы принимаемого сигнала (POA – Phase of Arrival);

2) анализ карты измерений – оценка местоположения на основе карты точек измерений параметров сигнала. Данный метод предполагает предварительное составление "карты" уровней сигналов либо других параметров в помещениях, в которых предполагается использование этого способа. Для определения местоположения используются методы интеллектуального анализа данных такие, как вероятностные методы [3], метод  $k$ -ближайших соседей, в т.ч. взвешенный [4], нейронные сети [5], метод опорных векторов [6], марковские модели [7], байесовский подход [8], нечеткая логика [9], метод наименьших квадратов и др.;

3) анализ близости – оценка местоположения по близости к приемнику сигнала относительно других;

4) анализ динамики движения. Данный метод использует данные о движении объекта, получаемые на основе датчиков движения, таких как альтиметр, гироскоп или 3Д-акселерометр. Применяется в системах инерциальной навигации [10].

Особый интерес представляют беспроводные сети передачи данных, предоставляющие одновременно как возможность информационного взаимодействия пользователей МУ с удаленными информационными сервисами, так и данные об измерениях уровня радиосигнала МУ, с исполь-

зованием которого можно определить его местоположение в помещениях внутри здания.

Сравнительная характеристика и оценка некоторых известных систем и алгоритмов опреде-

ления местоположения, использующих беспроводные сети передачи данных, по различным показателям качества представлена в таблице 1.

**Таблица 1 – Сравнение систем и технических решений определения местоположения**

№ п/п	Система / Тех.реш.	Беспроводная технология / Алгоритм	Точн.	Погрешность	Сложн.	Масшт. / Разреш.	Стоим.
1	Microsoft RADAR [4]	Wi-Fi / метод k-ближайших соседей, алгоритм Витерби	3-5 м	50 % при 2,5 м, 90 % при 5,9 м	Ср.	Хор. / 2D, 3D	Низ.
2	Horus	Wi-Fi / вероятностный метод	2 м	90 % при 2.1 м	Ср.	Хор. / 2D	Низ
3	DIT	Wi-Fi / 1) нейронные сети 2) метод опорных векторов	3 м	90 % при 5,12 м 90 % при 5,4 м	Ср.	Хор. / 2D, 3D	Низ
4	EkaHau [3]	Wi-Fi / вероятностный метод (отслеживание)	1 м	50 % при 2 м	Ср.	Хор. / 2D	Низ
5	Robot-based [8]	Wi-Fi / байесовский подход	1,5 м	50 % при 1,5 м	Ср.	Хор. / 2D	Ср.
6	MultiLoc	Wi-Fi / SMP (Symmetric Multiprocessing)	2,7 м	50 % при 2,7 м	Низ.	Хор. / 2D	Ср.
7	TIX [11]	Wi-Fi / TIX (Triangular Interpolation and eXtrapolation)	5,4 м	50 % при 5,4 м	Низ.	Хор. / 2D	Ср.
8	FLIPS	Wi-Fi / Триангуляция и нечеткая логика	2 м	50 % при 2 м	Ср.	Хор. / 2D	Ср.

Из таблицы 1 видно, что точность способов определения местоположения МУ на базе беспроводных технологий в диапазоне частот 2,4 ГГц варьируется от 1 м до 5,4 м. А погрешность (ошибка определения местоположения) не превышает 10 % практически у всех методов при точности примерно в 5 м. Данный факт свидетельствует о том, что существующие способы определения местоположения на базе беспроводных технологий в диапазоне частот 2,4 ГГц способны со сравнительно высокой точностью – до 90 % – определять помещение, в котором находится пользователь МУ.

Анализ работ [2-9] показал, что в процессе проведения натурных экспериментов исследовались лишь отдельные параметры алгоритмов определения местоположения. Как правило, за рамками исследований оставались такие параметры, как:

- расположение базовых станций беспроводной сети передачи данных;
- количество базовых станций;
- расположение точек измерения на карте помещений (структура "сигнального пространства" карты измерений) и другие.

Исследование оптимальных значений представленных параметров затруднено при проведении натурных экспериментов в связи с технической сложностью и жесткой привязкой к конкретному помещению или зданию. По этой причине данную проблему целесообразно решать с использованием универсального инструмента в виде имитационного моделирования.

**Постановка задачи.** Формальная постановка задачи: на основе имитационного моделирования исследовать эффективность известных алгоритмов определения местоположения МУ

внутри помещений с целью определения оптимальных параметров, позволяющих достичь наивысшей точности определения местоположения МУ внутри здания.

В качестве исследуемых технологий и методов были выбраны следующие: метод трилатерации (аналог – система TIX[11]), метод ближайших соседей (аналог – система Microsoft RADAR [4]), байесовский подход (аналог – системы Robot-based [8] и EkaHau [3]). Выбор основан на существенном различии точности данных систем и ресурсов, необходимых для их реализации.

*Исходные данные:*

1) технические характеристики приемопередающих устройств, использующих беспроводную сеть доступа:

- частота передатчика МУ  $f_t$ ;
- мощность передатчика МУ  $P_t$ ;
- коэффициент усиления передатчика  $G_t$  и приемника  $G_r$  беспроводного сигнала;

2) расположение точек доступа беспроводной сети  $AP = \{AP_j = (x_j, y_j)\}$ ,  $j = \overline{1, N_{AP}}$ , где  $(x_j, y_j)$  – координаты точек доступа,  $N_{AP}$  – количество точек доступа.

*Требуется:* исследовать параметры алгоритмов на основе

- метода трилатерации (триангуляции):

$$(\tilde{x}_{tr}, \tilde{y}_{tr}) = F_{tr}(AP, f_t, P_t, G_t, G_r); \quad (1)$$

- метода k-ближайших соседей:

$$(\tilde{x}_{kNN}, \tilde{y}_{kNN}) = F_{kNN}(MAP_{kNN}, AP, f_t, P_t, G_t, G_r), \quad (2)$$

основанном на использовании карты уровней сигнала передатчика МУ, измеренного точками доступа беспроводной сети в различных место-

положениях МУ в здании

$$MAP_{kNN} = \left\{ measure_i = (P_i, (x_i, y_i)) \right\}, \quad (3)$$

где  $i = \overline{1, N_{kNN}}$ ,  $P_i$  – уровень сигнала МУ в  $i$ -й точке карты измерений с известными координатами  $(x_i, y_i)$ ,  $N_{kNN}$  – количество точек измерений;

– аппарата скрытых марковских моделей:

$$(\tilde{x}_{HMM}, \tilde{y}_{HMM}) = F_{HMM}(MAP_{HMM}, AP, f_i, P_i, G_t, G_r), \quad (4)$$

основанного на использовании карты статистики измерений уровней сигнала передатчика МУ, измеренного точками доступа беспроводной сети в различных местоположениях МУ:

$$MAP_{HMM} = \{P_r[\lambda_i / (x_i, y_i)]\}, \quad i = \overline{1, N_{HMM}}, \quad (5)$$

где  $P_r[\lambda_i / (x_i, y_i)]$  – условная вероятность получения измерений сигнала передатчика МУ со статистическим распределением  $\lambda_i$  в точке с координатами  $(x_i, y_i)$ ,  $N_{HMM}$  – количество точек измерений.

Оптимальные параметры алгоритмов определения местоположения должны обеспечивать выполнение условия:

$$e_L \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $e_L = \sqrt{(x - \tilde{x})^2 + (y - \tilde{y})^2}$  – ошибка определения местоположения;  $(x, y)$  – координаты МУ;  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  – вычисленные координаты МУ.

**Теоретические исследования. Метод трилатерации (триангуляции)** сигнала МУ, принимаемого несколькими точками доступа беспроводной сети [2,12], базируется на принципах радиолокации. Для его реализации необходимо не менее трех разнесенных в пространстве измерителей уровня сигнала беспроводного модуля МУ. При наличии достаточного количества измерителей, для определения местоположения МУ необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = R_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = R_2^2 \\ \dots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = R_n^2 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $(x, y)$  – координаты мобильного устройства;  $(x_i, y_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$  – координаты точек доступа беспроводной сети, а  $n$  – их количество;  $R_i$  – оценки расстояния от точек доступа до мобильного устройства.

Для вычисления расстояния до МУ допустимо использовать формулу потерь в свободном пространстве для идеальной изотропной антенны [13]:

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi R)^2}{\lambda^2}, \quad (8)$$

где  $P_t$  – мощность сигнала передающей антенны;  $P_r$  – мощность сигнала, поступающего на антенну приемника;  $\lambda$  – длина волны несущей, определяемой выражением  $\lambda = \frac{c}{f}$ , где  $c$  – скорость света, а  $f$  – центральная частота несущей;  $R$  – расстояние, пройденное сигналом между двумя антеннами.

Для других типов антенн необходимо учитывать коэффициент усиления, тогда уравнение для потерь мощности сигнала в свободном пространстве примет вид [12]:

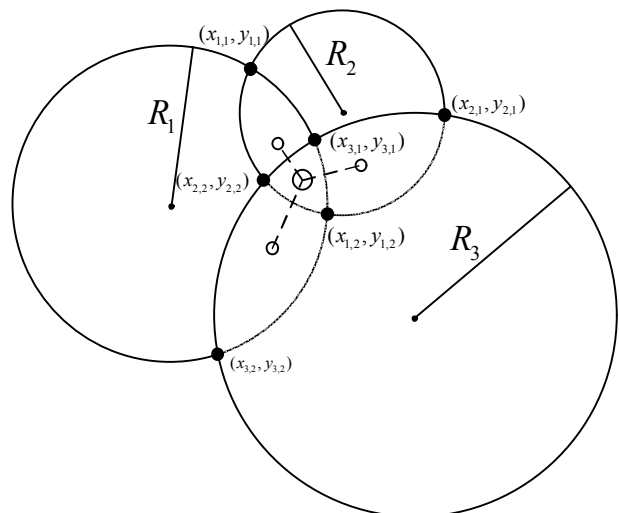
$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi R)^2}{G_t G_r \lambda^2}, \quad (9)$$

где  $G_t$  и  $G_r$  – коэффициенты передающей и принимающих антенн соответственно.

Очевидно, что выражения (8), (9) являются значительно упрощенными моделями распространения радиосигналов внутри помещений, не учитывающими такие факторы, как:

- отражение от стен и полов;
- дифракция, рассеяние и поглощение радиоволн материалами стен, дверей, перегородок и других структурных элементов строения;
- многолучевой прием сигнала;
- помеховая обстановка.

Геометрическая интерпретация метода трилатерации представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация метода трилатерации**

Выражение для искомой точки  $(\tilde{x}_{tr}, \tilde{y}_{tr})$  вычисляемого местоположения пользователя МУ:

$$\tilde{x}_{tr} = \frac{1}{2 \cdot N_{AP}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{AP}} \sum_{j=1}^2 x_{i,j}, \quad \tilde{y}_{tr} = \frac{1}{2 \cdot N_{AP}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{AP}} \sum_{j=1}^2 y_{i,j}. \quad (10)$$

**Метод  $k$ -ближайших соседей** по определению местоположения пользователя МУ является одним из методов интеллектуального анализа данных с предварительным обучением. Сначала необходимо составить карту измерений уровней сигнала (карта сигнального пространства) в разных точках здания с известными координатами, а также, возможно, известной ориентацией передающего устройства.

Обучающая выборка для такой карты сигнального пространства имеет вид:

$$X^{N_{kNN}} = \left\langle \left\{ (x_i, y_i), \nu_i \right\}, P_{r_i}^{RSS} \right\rangle, \quad (11)$$

где  $(x_i, y_i)$  – координаты  $i$ -й точки карты сигнального пространства;  $\nu_i$  – угол ориентации в пространстве МУ;  $P_{r_i}^{RSS}$  – уровень мощности принимаемого сигнала от МУ;  $i = \overline{1, N_{kNN}}$  – индекс точки измерений карты сигнального пространства, а  $N_{kNN}$  – их количество.

В качестве метрики для вычисления расстояния между текущими измерениями уровня сигнала и значениями, хранящимися в карте сигнального пространства, целесообразно использовать метрику Евклида:

$$d_{Eukl}(\tilde{P}_r^{RSS}, P_{r_i}^{RSS}) = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{AP}} (\tilde{P}_{r_j}^{RSS} - P_{r_{i,j}}^{RSS})^2}, \quad (12)$$

где  $\tilde{P}_r^{RSS} = \left\{ \tilde{P}_{r_j}^{RSS} \right\}, j = \overline{1, N_{AP}}$  – текущие измерения уровня сигнала  $N_{AP}$  точками доступа;  $P_{r_i}^{RSS} = \left\{ P_{r_{i,j}}^{RSS} \right\}, j = \overline{1, N_{AP}}, i = \overline{1, N_{kNN}}$  – измерения уровня сигнала в  $i$ -й точке карты сигнального пространства  $N_{AP}$  точками доступа;  $N_{kNN}$  – количество точек сигнального пространства.

Таким образом, каждый набор измерений  $\tilde{P}_r^{RSS}$  порождает свою нумерацию выборки. Тогда в общем виде метод  $k$ -ближайших соседей можно представить в виде:

$$a_{kNN}(u = \tilde{P}_r^{RSS}) = \arg \min_{x_i, y_i} \sum_{i=1}^{N_{kNN}} \left[ d_{Eukl}(\tilde{P}_r^{RSS}, P_{r_i}^{RSS}) \right] \cdot \omega(i, u), \quad (13)$$

где  $\omega(i, u) = [i \leq k]$  – весовая функция, оценивающая степень важности  $i$ -го соседа. Тогда координаты  $(\tilde{x}_{kNN}, \tilde{y}_{kNN})$  местоположения МУ будут определяться выражением

$$\tilde{x}_{kNN} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k x_i, \tilde{y}_{kNN} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k y_i. \quad (14)$$

В основе метода определения местоположения на базе **байесовского подхода** [8] так же, как и для метода  $k$ -ближайших соседей, лежит карта сигнального пространства. Однако отличие за-

ключается в том, что в каждой точке с известными координатами в карте сигнального пространства хранятся не данные об измерениях уровня сигнала точками доступа беспроводной сети, а статистика измерений уровней сигналов. Многочисленные исследования [1,4,8,14,15] статистики измерений уровня сигнала беспроводных сетей в диапазонах 2,4-4 ГГц показывают, что уровень сигнала является стохастической величиной, зависящей от множества факторов, поэтому можно сделать обоснованное предположение, что учет статистики распределения уровня сигнала в каждой точке с известными координатами позволит более точно определить местоположение МУ.

Для метода на основе байесовского подхода необходимо осуществить сбор статистики измерений уровня сигнала в каждой точке. Тогда обучающая выборка для такой карты сигнального пространства будет иметь вид:

$$X^{N_{HMM}} = \left\langle (x_i, y_i), P_{r_i}[\lambda_i / (x_i, y_i)] \right\rangle, i = \overline{1, N_{HMM}}, \quad (15)$$

где  $(x_i, y_i)$  – координаты  $i$ -й точки карты сигнального пространства;  $P_{r_i}[\lambda_i / (x_i, y_i)]$  – условная вероятность получения измерений сигнала передатчика МУ со статистическим распределением  $\lambda_i$  в точке с координатами  $(x_i, y_i)$ ;  $N_{HMM}$  – количество точек сигнального пространства обучающей выборки.

Для использования байесовского подхода при определении местоположения МУ сам процесс определения местоположения представляется в виде скрытой марковской модели:

$$\lambda = \{A, B, \pi\}, \quad (16)$$

где  $A = \{a_{ij}\}$  – матрица переходных вероятностей для "скрытых" состояний  $s_i, i = \overline{1, N_{HMM}}$ , где  $a_{ij}$  – вероятность перехода из  $i$ -го в  $j$ -е состояние,  $i, j = \overline{1, N_{HMM}}$ ;  $S = \{s_i\}$  – множество состояний скрытой марковской модели;  $s_i = (x_i, y_i)$  –  $i$ -е состояние скрытой марковской модели;  $(x_i, y_i)$  – координаты точки в здании;  $N_{HMM}$  – количество точек сигнального пространства с известными координатами;

$B = \{P_r(o_j / s_i) = P_r[\lambda_j / (x_i, y_i)]\}$  – матрица функций условных распределений вероятностей наблюдения символов  $o_j$  при условии нахождения в состоянии  $s_i$ , где  $i = \overline{1, N_{HMM}}, j = \overline{1, m}$ ,  $m$  – количество допустимых наблюдений;  $o_j = \{(b_1, P_{r_1}^{RSS}), (b_2, P_{r_2}^{RSS}), \dots, (b_k, P_{r_k}^{RSS})\}$  –  $j$ -е до-

пустимое наблюдение;  $b_k$  – номер  $k$ -й точки доступа, осуществляющей измерение уровня сигнала;  $P_k^{RSS}$  – уровень сигнала  $k$ -й точки доступа беспроводной сети;  $\pi = \{\pi_i\}$ ,  $i = \overline{1, N_{HMM}}$  – начальное распределение вероятностей состояний скрытой марковской модели.

Для определения местоположения МУ – наиболее вероятного состояния скрытой марковской модели используют выражение:

$$\pi'_i = \pi_i P_r(o_j / s_i) / \sum_{k=1}^{N_{HMM}} \pi_k \cdot P_r(o_j / s_k). \quad (17)$$

Тогда координаты наиболее вероятного местоположения МУ можно получить, используя выражение:

$$(x_i, y_i) = \arg \max(\pi'_i). \quad (18)$$

Проведенные исследования показали, что точность определения местоположения можно повысить, используя для определения местоположения МУ  $k$  значений наиболее вероятных состояний, фактически используя для вычисления координат первые  $k$  значений вектора вероятностей состояний скрытой марковской модели. Тогда координаты  $(\tilde{x}_{HMM}, \tilde{y}_{HMM})$  местоположения МУ будут определяться выражением

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{HMM} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \arg \max_{x_i}(\pi'_i), \\ \tilde{y}_{HMM} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \arg \max_{y_i}(\pi'_i). \end{aligned} \quad (19)$$

**Экспериментальные исследования.** Для исследования эффективности представленных алгоритмов определения местоположения МУ внутри помещений с целью определения оптимальных параметров, позволяющих достичь наивысшей точности определения местоположения, были разработаны имитационная модель [16,17] и программное обеспечение для МУ под управлением операционной системы Android, позволяющие собирать данные о статистике использования данного устройства [18].

В качестве среды имитационного моделирования была использована среда разработки AnyLogic [19]. Данная среда основана на парадигме объектно-ориентированного программирования. Активный объект в AnyLogic – это объект с собственным функционированием, взаимодействующий с окружением. Он может включать в себя неограниченное количество экземпляров других активных объектов.

В основе функционирования модулей формирования траектории движения пользователя по территории лежит собранная статистика использования МУ с помощью разработанного

приложения [18]. Статистика содержит информацию об услугах, времени и месте использования услуг, идентификационные данные МУ.

В качестве аналитической модели для описания процесса перемещения пользователя МУ был использован аппарат марковских цепей [20].

Последовательность точек траектории движения реализована в виде цепи Маркова. Модули формирования траектории движения пользователя МУ реализованы в приложении [21]. В качестве модели распространения сигнала использована модель (8), (9).

Для имитационного моделирования процесса распространения сигнала был проведен натурный эксперимент по исследованию колебаний уровня сигнала в точке приема от нескольких источников. Целью данного эксперимента являлось определение закона формирования уровня сигнала в имитационной модели на основе полученных в натурном эксперименте наблюдений.

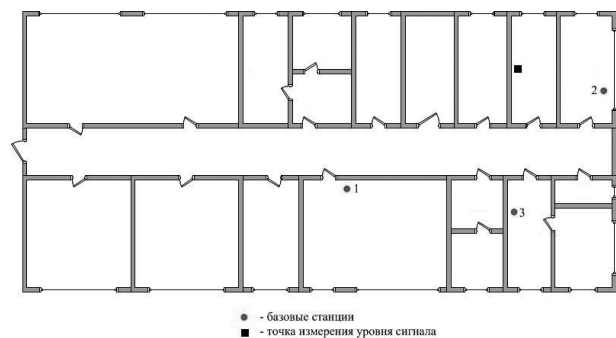
В эксперименте было использовано следующее оборудование.

1. Ноутбук с техническими характеристиками: процессор: Core i5 2300 МГц; установленная память (ОЗУ): 4,00 ГБ; тип системы: 64-разрядная ОС; ОС: Windows 7 SP 1.

2. USB-адаптеры 3Com OfficeConnect Wireless 54 Mbps 11g Compact.

3. Три точки доступа на базе трех ПЭВМ с техническими характеристиками: процессор: Dual 3.20 GHz, Intel Core i5-3470; установленная память (ОЗУ): 8,00 ГБ; тип системы: 64-разрядная ОС; ОС: Windows 7 SP 1.

Схема расположения помещений с точками доступа и измерителем колебаний уровня сигнала представлена на рисунке 2.

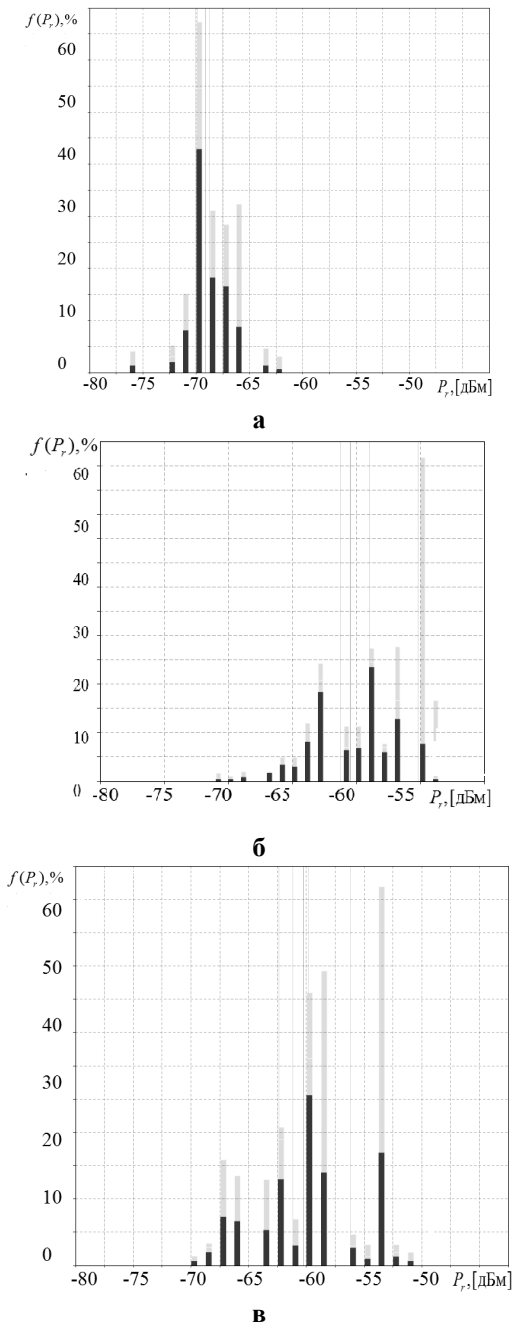


**Рисунок 2 – Схема расположения точек доступа и измерителя уровня сигнала МУ**

В эксперименте использовались широкополосные пакеты от базовых станций, а также периодически производилась запись уровня мощности сигнала базовых станций в точке приема. Измерение уровня мощности сигнала осуществлялась в четырех разных положениях

ноутбука, выполняющего роль точки приема.

На рисунках 3, а – в представлены функции плотности распределения вероятностей уровней мощности сигнала беспроводных точек доступа в точке приема.



**Рисунок 3 – Функции плотности распределения вероятностей уровней мощности сигнала беспроводных точек доступа в точке приема: а) № 1, б) № 2, в) № 3**

Уровень значимости  $\alpha$  при проверке с помощью критерия типа  $\chi^2$  гипотезы о принадлежности выборки нормальному закону не превышает значения 0,1.

Проведенный эксперимент также показал, что ошибка измерения уровня мощности сигнала в среднем составляет 2,188 дБм со среднеквад-

ратическим отклонением (СКО), равным 1,039 дБм при доверительном интервале для выборочного среднего – 0,654 дБм.

Для метода трилатерации исследовано влияние количества используемых точек доступа беспроводной сети и их расположения в здании на точность определения местоположения.

Эксперименты, проведенные в аналогичных условиях для методов  $k$ -ближайших соседей и байесовского подхода, показали, что наибольшая точность определения местоположения достигается при аналогичном расположении точек доступа как и для метода трилатерации.

В таблице 2 представлены результаты экспериментов, в которых исследовалась зависимость точности определения местоположения для метода  $k$ -ближайших соседей в зависимости от числа  $k$ .

**Таблица 2 – Статистические параметры ошибки определения местоположения для метода  $k$ -ближайших соседей в зависимости от числа  $k$**

$k$	Выб. ср., м	Выб. СКО, м	Макс., м	Мин., м	Довер. инт. для ср.
1	4,225	2,848	30,415	0,024	0,078
2	3,529	2,387	22,187	0,04	0,065
3	3,617	2,561	30,47	0,007	0,069
4	3,254	2,128	22,169	0,079	0,057
5	3,261	2,164	19,499	0,01	0,054
6	3,185	1,994	19,923	0,098	0,055
7	3,221	2,283	21,627	0,055	0,061
8	3,289	2,284	21,931	0,011	0,062
9	3,147	2,028	19,336	0,009	0,054
10	4,477	2,565	21,428	0,034	0,067

Для значений числа учитываемых ближайших "соседей"  $k=6$  и  $k=9$  были проведены эксперименты с целью исследования влияния расположения точек измерений уровня сигнала на карте сигнального пространства. Расположение точек измерений в имитационной модели выбиралось в виде сетки квадратов или прямоугольников, стороны которых определялись шагом сетки по горизонтали и вертикали. Например, шаг сетки карты сигнального пространства  $h=1,5 \times 1,5$  означает ширину и длину прямоугольника сетки, равные 1,5 м.

Наибольшая точность определения местоположения для метода  $k$ -ближайших соседей достигается при значениях шага сетки измерений карты сигнального пространства, равного  $h=1,5 \times 1,5$  м и  $h=2,0 \times 2,0$  м, как при  $k=6$ , так и  $k=9$ .

Наименьшие значения статистических пара-

метров ошибки определения местоположения в проведенных экспериментах были достигнуты при значениях  $k = 9$  и  $h = 1,5 \times 1,5$  м.

Для исследования эффективности подсистемы определения местоположения на основе *байесовского подхода* были проведены эксперименты с целью выбора оптимальных параметров:

– для числа "соседей" – количества наиболее вероятных состояний, учитываемых при вычислении местоположения;

– расположения точек измерений на карте сигнального пространства;

– количества измерений в каждой точке карты измерений при формировании статистики распределения вероятностей уровней мощности сигнала МУ.

В таблице 3 представлены результаты эксперимента, в котором исследовалась зависимость статистических параметров ошибки определения местоположения от числа "соседей" – количества наиболее вероятных состояний, учитываемых при вычислении местоположения, для метода на основе байесовского подхода.

**Таблица 3 – Статистические параметры ошибки определения местоположения для метода на основе байесовского подхода в зависимости от числа "соседей"**

$k$	Выб. ср., м	Выб. СКО, м	Макс., м	Мин., м	Довер. инт. для ср.
1	3,86	2,309	16,367	0,124	0,063
2	3,376	2,076	13,538	0,082	0,056
3	2,445	1,448	9,764	0,024	0,039
4	2,512	1,616	11,514	0,07	0,043
5	2,466	1,705	11,458	0,033	0,042
6	2,689	1,769	12,948	0,039	0,047
7	2,641	1,84	11,8	0,018	0,05
8	3,195	2,084	10,996	0,034	0,056
9	2,62	1,809	11,17	0,02	0,041
10	2,651	1,812	11,246	0,01	0,049

Из анализа таблицы видно, что наибольшая точность определения местоположения для метода на основе байесовского подхода достигается при значении  $k = 3$ .

Исследовалась зависимость статистических параметров ошибки определения местоположения от шага сетки карты сигнального пространства для метода на основе байесовского подхода.

Наибольшая точность определения местоположения для метода на основе байесовского подхода достигается при значениях шага сетки измерений карты сигнального пространства, равного  $h = 1,5 \times 1,5$  м и  $h = 2,0 \times 2,0$  м. Таким об-

разом, результаты анализа для данного метода совпадают с аналогичным экспериментом для метода  $k$ -ближайших соседей.

**Выводы.** На основе представленных исходных данных и проведенных экспериментов были получены следующие результаты.

1. Обоснованы оптимальные параметры подсистем определения местоположения для заданной карты помещений охраняемого объекта:

1) метод трилатерации:

– оптимальное количество точек доступа – 5;

2) метод  $k$ -ближайших соседей:

– число учитываемых ближайших соседей  $k = 6$  или  $k = 9$ ;

– шаг сетки карты сигнального пространства  $h = 1,5 \times 1,5$ ;

– количество точек доступа – 5;

3) метод на основе байесовского подхода:

– число учитываемых ближайших соседей  $k = 3$ ;

– шаг сетки карты сигнального пространства  $h = 1,5 \times 1,5$ ;

– количество точек доступа – 5;

2. Наиболее точным методом определения местоположения является метод, основанный на байесовском подходе.

Таким образом, имитационное моделирование позволяет снять ряд проблем по исследованию эффективности алгоритмов определения местоположения, характерных для натуральных экспериментов. А также заблаговременно определить оптимальные параметры для заданной схемы расположения помещений и технических характеристик приемо-передающих устройств.

Для совершенствования точности полученных результатов необходимо использовать более точные модели распространения сигнала в помещениях, учитывающие материал стен и перегородок, конфигурацию и расположение помещений, а также особенности тех или иных сигналов и используемых видов модуляции.

#### **Библиографический список**

1. *Klathem Al Nuaimi* A Survey of Indoor Positioning Systems and Algorithms // International Conference on Innovations in Informational Technology. 2011. Vol.11. P.185-190.

2. *Atia M., Noureldin A., Korenberg M.* Dynamic Propagation Modeling for Mobile Users' Position and Heading Estimation in Wireless Local Area Networks // IEEE Wireless Communication Letters, 2012. Vol. PP (99), P.1-4.

3. *Inc. Ekahau* Real Time Location System RFID-over-Wi-Fi Technology. <http://www.ekahau.com/real-time-location-system/technology>, 2015.

4. *Bahl P., Padmanabhan V.N.* RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system // Proc. IEEE INFOCOM 2000, Mar. 2000. Vol. 2. P. 775–784.
5. *Gu Y., Lo A., Niemegeers I.* A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks // IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2009. Vol. 11. No. 1. P. 13–32.
6. *Zirari S., Canalda P., Mabed H., Spiess F.* Wi-Fi Access Point Placement within Stand-alone, Hybrid and Combined Wireless Positioning Systems // Proc. of the 4th Int. Conference on Communications and Electronics (ICCE '12), 2012. P. 279-284
7. *Koyuncu H., Yang S.H.* A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 2010. Vol. 10. No.5. P. 121-128.
8. *Ladd A.M., Bekris K.E., Rudys A., Marceau G., Kavradi L.E., Wallach D.S.* Robotics-based location sensing using wireless Ethernet // Proc. of The Eighth ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), Atlanta, GA, Sept. 2002. P.189-204.
9. *Chih-Yung Chen, Jen-Pin Yang, Guang-Jeng Tseng, Yi-Huan Wu, Rey-Chue Hwang* An Indoor Positioning Technique Based on Fuzzy Logic // IMECS : Proc. of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (17-19 March, 2010, Hong Kong). Hong Kong, 2010. Vol. 2.
10. *Кузовков Н.Т., Сальчев О.С.* Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982.
11. *Gwon Y., Jain R.* Error characteristic and calibration-free techniques for wireless LAN-based location estimation // Proc. MobiWac'04, Philadelphia, PA, Oct. 1, 2004. P. 2–9.
12. *Вишнякова О.А., Лавров Д.Н., Лаврова С.Ю.* Математическая модель обнаружения точки беспроводного доступа по измерениям мощности излучения разнесенными наблюдателями // Математические структуры и моделирование. 2013. № 2(28). С.49-59.
13. *Пролетарский А.В., Баскаков И.В., Федотов Р.А., Бойков А.В., Чирков Д.Н., Платонов В.А.* Организация беспроводных сетей / под ред. К.А. Пупкова. М.: Техносфера. 2011. 181 с.
14. *Голдсмит А.* Беспроводные коммуникации. Москва : Техносфера. 2011. 904 с.
15. *Маркин Д.О., Комашинский В.В.* Модель определения местоположения пользователей мобильных устройств внутри помещений на основе сигналов беспроводной сети доступа // Труды Международной научно-технической конференции "Перспективные информационные технологии" под ред. С.А. Прохорова. 2015. Т. 2. С. 305-309.
16. *Маркин Д.О., Саморцев Л.К.* Автоматизированная система оценки защищенности удаленного доступа на основе данных о местоположении // Материалы VI Межрегиональной научно-практической конференции "Информационная безопасность и защита персональных данных: Проблемы и пути их решения" под ред. О.М. Голембиовской. Брянск: БГТУ, 2014. С. 81–85.
17. *Маркин Д.О., Биркун Н.И., Зозуля А.О.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615631 Российская Федерация. Автоматизированная система определения местоположения пользователей мобильных устройств внутри здания на основе сигналов беспроводной сети / заявл. 24.03.2015; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21.05.2015 г.
18. *Маркин Д.О., Шекишев С.В., Комашинский В.В.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618388 Российская Федерация. Анализатор контекста доступа мобильного устройства / заявл. 19.07.2013; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.09.2013 г.
19. *The AnyLogic Company* Инструмент имитационного моделирования AnyLogic. <http://www.anylogic.ru/overview>.
20. *Майн Х., Осаки С.* Марковские процессы принятия решений. М.: Наука. 1977. – 176 с.
21. *Маркин Д.О., Саморцев Л.К., Смыкалов А.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617119 Российская Федерация. Автоматизированная система оценки параметров защищенности удаленного доступа к услугам защищенной корпоративной сети пользователя мобильного устройства / заявл. 21.05.2014; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.07.2014 г.