

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЛОКАЛЬНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

И.М. Аверин⁽¹⁾, В.Ю. Семенов⁽²⁾

⁽¹⁾ООО «Мера-НН»

ilya.averin@gmail.com

*⁽²⁾Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского
vuyusemenov@rambler.ru*

В работе предложены алгоритмы определения местоположения пользователей внутри помещения с развернутой Wi-Fi сетью. В качестве единственного источника информации о местонахождении пользователя выступает мощность сигнала, принимаемого точками доступа Wi-Fi сети. Представлены результаты моделирования, характеризующие точность позиционирования при использовании предложенных алгоритмов в зависимости от таких параметров как количество точек доступа и полоса частот сигнала.

Введение. В настоящее время наблюдается рост интереса к возможности получения информации о местоположении того или иного объекта. Информация о местоположении позволяет значительно повысить качество и расширить перечень сервисов, предоставляемых пользователям.

Местоположение объекта может быть определено в терминах как глобальных, так и локальных координат. Глобальные координаты имеют планетарный масштаб и определяются с помощью систем глобального позиционирования. Среди них, как наиболее функциональные, можно выделить системы GPS и ГЛОНАСС. При использовании указанных систем, точность позиционирования составляет порядка 5-10 м в практически любой точке земного шара. Локальные координаты имеют меньшие масштабы применимости и используются в задачах более узкой направленности, например, навигация пользователей в протяженных сооружениях, таких как аэропорты или станции метро [1]. Можно также упомянуть задачи отслеживания машин на парковках, перемещения товаров и грузов на складах и т.д.

Системы глобального позиционирования могут применяться и в рамках решения задач локальной навигации. Следует отметить, однако, что наилучшая точность при использовании систем глобального позиционирования достигается в условиях открытой местности, а внутри зданий точность определения местоположения значительно ухудшается. Достаточно часто местоположение не может быть определено совсем. Это связано, в первую очередь с сильным ослаблением сигнала в стенах и перекрытиях зданий. Кроме того, навигационный приемник окружен большим количеством рассеивателей, то есть в значительной мере проявляется эффект многолучевого распространения радиосигналов.

Таким образом, использование систем глобального позиционирования не может гарантировать надежную навигацию внутри зданий. Другим аспектом, выступающим против использования глобальной навигации для решения подобных задач, является увеличение стоимости оборудования за счет интеграции, например, GPS-приемника. В связи с этим является актуальной задача разработки способов позиционирования внутри помещений без использования систем глобальной навигации.

С учетом изложенных ограничений, для локального позиционирования может быть предложен подход, основанный на использовании существующей инфраструктуры локальных беспроводных сетей (WLAN). Такие сети в настоящее время нашли широкое применение и распространены повсеместно. В состав WLAN входят так называемые точки доступа и оборудование пользователей. Точки доступа выступают в роли координатора сети и шлюза выхода в другие сети. С точки зрения задач навигации, важным моментом является то, что точки доступа размещаются стационарно в точках с известными координатами и являются приемниками, принимающими сигнал в некоторой полосе частот. Оборудование пользователя (объекта, положение которого необходимо определить), является передатчиком и излучает

сигнал в некоторой полосе частот. Характеристики сигнала принятого совокупностью точек доступа, могут использоваться для оценки неизвестного положения пользователя.

В настоящей работе рассматриваются методы определения местоположения пользователей внутри помещения с использованием инфраструктуры WLAN семейства Wi-Fi (стандарт IEEE 802.11). Такой выбор мотивирован тем, что указанный тип WLAN наиболее широко распространен на сегодняшний момент. В качестве метрики, применяемой для решения задачи позиционирования, используется мощность сигнала, принимаемого совокупностью точек доступа. Выбор метрики обусловлен требованием к простоте реализации, так как измерение мощности возможно в рамках текущей реализации аппаратуры точек доступа и задача позиционирования может быть решена на программном уровне.

Модель комнаты. Будем считать, пользователь может находиться в произвольной точке прямоугольной комнаты размером axb . Для упрощения рассуждений рассмотрим двумерный случай (плоская комната), а также будем считать, что комната симметрична, и в ней отсутствуют всевозможные перегородки и окна.

Пусть в точке П с координатами $(x_{\text{П}}; y_{\text{П}})$ находится пользователь, излучающий сигнал. Для того чтобы найти величину поля в некоторой точке К с координатами $(x_{\text{К}}; y_{\text{К}})$ используем лучевую модель распространения электромагнитных волн внутри комнаты [2]. Такая модель является детерминистической и основана на законах геометрической оптики.

Согласно лучевой трактовке сигнал, пришедший от источника в точку К, может быть представлен как суперпозиция сигнала от источника, находящегося в точке П и сигналов от мнимых источников. Мнимые источники образуются зеркальным отражением точки П от стен комнаты. В дальнейшем ограничимся учетом влияния только первичных и вторичных мнимых источников. Заметим, что в общем случае положения некоторых мнимых источников могут совпадать.

Можно показать, что комплексная амплитуда сигнала в точке К на некоторой частоте f при отсутствии шума описывается выражением

$$S(f) = \frac{A}{r_0} e^{-j\frac{2\pi f}{c}r_0} + \sum_{i=1}^4 \frac{A\Phi}{r_i} e^{-j\frac{2\pi f}{c}r_i} + \sum_{i=1}^{12} \frac{A\Phi^2}{r_i} e^{-j\frac{2\pi f}{c}r_i}, \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала в точке П, c – скорость света, Φ - коэффициент отражения сигнала от стен комнаты, r_0 – расстояние между точками П и К, r_i – расстояние от i -го мнимого источника до точки К.

Алгоритмы определения местоположения. В рамках предложенного подхода рассмотрим несколько возможных алгоритмов позиционирования. Во всех случаях будем считать, что положение точек доступа известно идеально точно, а комплексная амплитуда сигнала, принимаемого точкой доступа, определяется выражением (1). Задачей является оценка местоположения пользователя на основании мощности сигналов, принимаемых точками доступа.

Отметим, что для всех предлагаемых алгоритмов мощность сигнала, излученного пользователем и принимаемого в месте нахождения точки доступа, является единственным источником информации о положении пользователя. Это контрастирует с подходом, основанным на дифференциации пространственных сигнатур сигнала (fingerprinting) [3]. Хотя подход fingerprinting позволяет получить приемлемую точность позиционирования, его практическая реализация сложна по нескольким причинам. Во-первых, данный подход требует создания и поддержания актуальной базы данных с информацией о характеристиках (сигнатур) сигнала в узлах некоторой сетки (с известными координатами узлов). Во-вторых, как правило, он имеет значительную вычислительную сложность и чувствителен к нерегулярности сетки.

Для определения реалистичных границ (верхней и нижней) ошибок позиционирования введем в рассмотрение два специальных случая. Первый случай определяет верхнюю границу ошибки и соответствует алгоритму, когда в качестве оценки местоположения пользователя случайно выбирается произвольная точка комнаты. Назовем такой алгоритм «случайным». Второй случай определяет нижнюю границу ошибки и достигается при использовании «идеального» алгоритма: комната разбивается сеткой с известными координатами узлов; в качестве оценки местоположения пользователя выбираются координаты наиболее близкого к

нему узла сетки. Точность «идеального» алгоритма возрастает с уменьшением размеров ячейки сетки. Из геометрических соображений можно получить, что плотность вероятности ошибки позиционирования $w(\rho)$ для «идеального» алгоритма при размере ячейки сетки Δ описывается выражением:

$$w(\rho) = \begin{cases} \frac{2\pi\rho}{\Delta^2}, & 0 \leq \rho < \frac{\Delta}{2} \\ \frac{2\rho}{\Delta^2} \left[\pi - 4 \arccos\left(\frac{\Delta}{2\rho}\right) \right], & \frac{\Delta}{2} \leq \rho < \frac{\Delta}{2}\sqrt{2}. \\ 0, & \rho \geq \frac{\Delta}{2}\sqrt{2} \end{cases} \quad (2)$$

Алгоритм 1. Пользователю приписываются координаты той точки доступа, которая принимает сигнал наибольшей мощности [4]. Этот алгоритм можно считать наиболее простым с вычислительной точки зрения. Так, если в комнате находится четыре точки доступа AP_1 - AP_4 (см. рис. 1), и сигнал наибольшей мощности P_{10} принят от AP_1 , тогда пользователю приписываются координаты AP_1 .

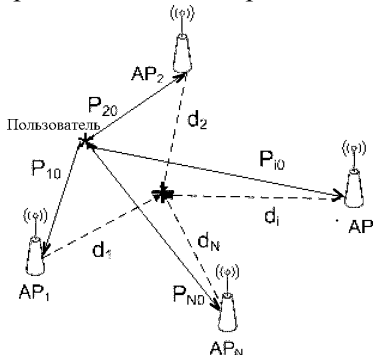


Рис. 1

Алгоритм 2. Координаты пользователя вычисляются как линейная комбинация координат точек доступа по формулам («весовой» алгоритм):

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i X_{APi}, & \hat{y}_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i Y_{APi}, \\ \mu_i = \left[P_{i0}^2 \sum_{i=1}^N \frac{1}{P_{i0}^2} \right]^{-1}, \end{cases} \quad (3)$$

где (X_{APi}, Y_{APi}) – декартовы координаты i -й точки доступа, P_{i0} – мощность сигнала, принятого i -й точкой доступа, N – количество точек доступа.

Алгоритм 3. Координаты пользователя вычисляются через минимизацию функционала, ядром которого является отношение затуханий сигнала от 1 и i -й точек доступа до произвольной точки с координатами (x, y) . Будем считать, что коэффициент затухания сигнала, выраженный в децибелах, соответствует формуле

$$L(d) = L_0 - n \, 10 \lg d, \quad (4)$$

где L_0 и n – неизвестные параметры. Для того, чтобы избавиться от этих неопределенных параметров, будем оценивать положение пользователя через минимизацию следующего функционала

$$\begin{cases} \{\hat{x}_0, \hat{y}_0\} = \arg \min_{x_0, y_0} \{\gamma(x, y)\}, \\ \gamma(x, y) = \sum_{i=2}^N \left| \frac{L_i}{L_1} - \frac{\lg[d_i(x, y)]}{\lg[d_1(x, y)]} \right|^2, \end{cases} \quad (5)$$

где L_1 и L_i – это мощность сигнала в децибелах принятая соответственно 1 и i -й точкой доступа, d_1 и d_i – расстояния соответственно от 1 и i -й точки доступа до текущей точки с координатами (x, y) .

Алгоритм 4. Координаты пользователя также вычисляются через минимизацию функционала, ядром которого является отношение затуханий сигнала от 1 и i -й точек доступа. Однако перед этим происходит оценка параметров в законе затухания сигнала (4) путем минимизации среднеквадратической ошибки. Пусть точки доступа образуют T уникальных пар. Тогда на основании измерений можно составить T равенств

$$\begin{cases} L_i = L_0 - nD_i, \\ D_i = 10 \lg d_i, \quad i = 1..T \end{cases} \quad (6)$$

Введем в рассмотрение функционал

$$\xi = \sum_{i=1}^T (L_i - (L_0 - nD_i))^2 \quad (7)$$

Выражение (7) можно записать в матричном виде

$$\xi = (\mathbf{L} - \mathbf{MG})^T (\mathbf{L} - \mathbf{MG}), \quad (8)$$

где

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -10 \lg d_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -10 \lg d_T \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_K \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} L_0 \\ n \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Применяя процедуру поиска минимума функции с использованием производной [5] из выражения (8) можно получить вектор оценок искомых параметров.

$$\begin{bmatrix} L_0 \\ n \end{bmatrix} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{L}. \quad (10)$$

Теперь координаты пользователя могут быть оценены через минимизацию нового функционала

$$\begin{cases} \{\hat{x}_0, \hat{y}_0\} = \arg \min_{x_0, y_0} \{ \gamma(x, y) \}, \\ \gamma(x, y) = \sum_{i=2}^N \left| \frac{L_i}{L_1} - \frac{L_0 - n 10 \log d_i(x, y)}{L_0 - n 10 \log d_1(x, y)} \right|^2. \end{cases} \quad (11)$$

Алгоритм 5. Координаты пользователя вычисляются через минимизацию функционала, ядром которого является разность затуханий сигнала от 1 и i -й точек доступа. Этот алгоритм является модификацией алгоритма 4. Функционал для минимизации определяется следующим выражением

$$\gamma(x, y) = \sum_{i=2}^N \left| (L_i - L_1) - ((L_0 - n 10 \log d_i(x, y)) - (L_0 - n 10 \log d_1(x, y))) \right|^2. \quad (12)$$

Результаты моделирования. Для сравнения точностей позиционирования в предложенных алгоритмах было проведено компьютерное Монте-Карло моделирование. Предполагалось, что положение пользователя с равной вероятностью соответствует произвольной точке комнаты. Всего рассматривалось 10000 случайных положений («вбрасываний») пользователя. Для каждого «вбрасывания» пользователя производилась оценка его местоположения с использованием рассматриваемых алгоритмов и вычислялась ошибка позиционирования. Полученная совокупность ошибок позиционирования использовалась для построения функции распределения.

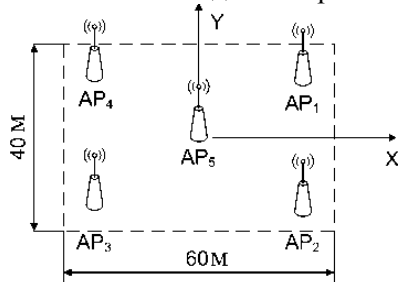


Рис. 2

Параметры комнаты полагались фиксированными: размеры $a=60\text{м}$; $b=40\text{ м}$, коэффициент отражения от стен комнаты $\Phi=-0,7$ на центральной частоте $F_0=2,4\text{ ГГц}$. В качестве параметров моделирования задавались количество N точек доступа и полоса частот ΔF сигнала. Предполагалось, что WLAN использует OFDM-сигналы, поэтому полоса частот охватывается N_{sub} дискретными поднесущими. Расположение точек доступа выбиралось в зависимости от их количества. На рис.2 показан пример для пяти точек доступа.

На рис. 3 приведены результаты моделирования для случая с пятью ($N=5$) точками доступа. При этом

предполагалось, что мощность сигнала определяется только на одной поднесущей, совпадающей с частотой F_0 . Цифрами 1 и 2 отмечены графики функций распределения ошибки позиционирования для «случайного» и «идеального» алгоритмов, соответственно. Цифрой 3 отмечена функция распределения для алгоритма 1 (самого простого из рассматриваемых алгоритмов с вычислительной точки зрения). Нетрудно видеть, что ошибка позиционирования при использовании алгоритма 1 составляет 15 м (по медианному уровню) против 25 м при использовании «случайного» алгоритма.

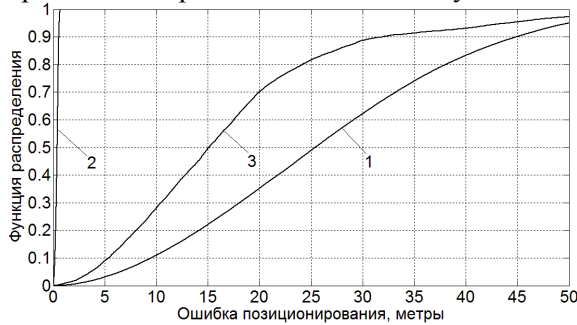


Рис. 3

распространения зависит от частоты и усреднение по частотам позволяет снизить флуктуации мощности принимаемого сигнала. Из представленных кривых также видно, что точность позиционирования может быть

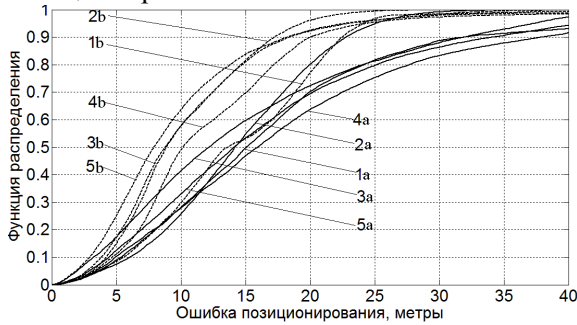


Рис. 4

точек доступа и усреднению по 64 частотам метров. При более реалистичном зна-

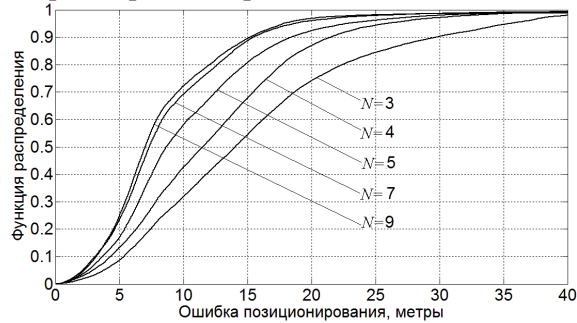


Рис. 5

Рис. 4 позволяет сравнить эффективность предложенных алгоритмов с учетом количества поднесущих при $N=5$. Кривые, помеченные 1a – 5a, соответствуют алгоритмам 1 – 5 при $N_{sub}=1$, кривые 1b – 5b – при $N_{sub}=64$. В последнем случае мощность сигнала определялась усреднением мощности по поднесущим. Как следует из рис. 4, точность позиционирования возрастает с расширением полосы частот. Это объясняется тем, что коэффициент передачи канала

улучшена по сравнению с результатами применения алгоритма 1.

На рис. 5 представлены функции распределения ошибки позиционирования для алгоритма 3 (как наиболее эффективного), при различном числе точек доступа N . Моделирование проводилось в предположении $N_{sub}=64$. Нетрудно видеть, что с увеличением количества точек доступа точность позиционирования пользователя увеличивается. Так, при использовании 9

точек доступа и усреднению по 64 частотам ошибка по медианному уровню составляет 7

метров. При более реалистичном значении $N=5$ ошибка равна 8,5 м.

Выводы. В настоящей работе рассмотрена задача позиционирования пользователей с помощью аппаратуры локальных сетей беспроводной передачи данных. Предложен ряд алгоритмов позиционирования, основанных на измерении мощности сигнала, приходящего от пользователя. Получены численные оценки точности позиционирования. Показано, что наилучшую точность среди предложенных дают алгоритмы, использующие оценку параметров закона распространения сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. K. L. Miu. Design and Implementation of an Indoor Mobile Navigation System. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 2002.
2. K. Pahlavan, X. Li, and J. Makela, Indoor geolocation science and technology. IEEE Commun. Mag., vol. 40, no. 2, pp. 112–118, Feb. 2002.

3. A. Hatami, B. Alavi, K. Pahlavan and M. Kanaan, A Comparative Performance Evaluation of Indoor Geolocation Technologies. *Interdisciplinary Inf. Sciences*, vol. 12, no. 2, pp. 133–146, 2006.
4. Merrill I. S. *Introduction to Radar Systems*. McGraw-Hill, New York, NY, third edition, December 2002.
5. B. Ottersten, M. Viberg, P. Stoica, and A. Nehorai, Exact and large sample ML techniques for parameter estimation and detection in array processing. In *Radar Array Processing*, S. S. Haykin, J. Litva, and T. J. Shepherd, Eds. New York: Springer-Verlag, pp. 99–151, 1993.