

УДК004.056.53

Применение точек доступа Wi-Fi для регистрации движения на объекте*

И.Л. РЕВА¹, А.А. БОГДАНОВ², Е.А. МАЛАХОВА³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук. E-mail: rain100@yandex.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант. E-mail: 15.02.95@mail.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант. E-mail: kate.lion@mail.ru

В работе рассматривается шесть способов позиционирования в Wi-Fi сетях. По собранной о каждом из них информации проводится анализ этих способов, целью которого является аргументированность использования каждого из этих методов в зависимости от множества факторов: цены, точности позиционирования, сложности развертывания и других. Поскольку существует теоретическая зависимость уровня Wi-Fi сигнала от расстояния до источника, было принято решение практически удостовериться в точности данной формулы, проведя серию экспериментов и предоставив аналитику результатов, направленную на прослеживание тенденции угасания Wi-Fi сигнала как в открытом пространстве, так и в помещении, имеющем преграды в виде инженерных конструкций из разных материалов, чаще всего встречающихся в наше время. Результатом аналитических действий стал выбор одного из шести способов позиционирования, моделирование которого было проведено в рамках данной работы.

Приводится рассмотрение алгоритмов позиционирования, проведена их доработка, которая позволяет использовать алгоритмы на объекте, зная уровень Wi-Fi сигнала. В работе представлены два теоретических алгоритма и две математических модели, способные осуществлять позиционирование на основе полученных экспериментально данных. Разработана собственная математическая модель, описывающая алгоритмы определения координат: первый – алгоритм триангуляционного позиционирования, основанный на пересечении окружностей, радиусами которых является показатель уровня сигнала на объекте наблюдения; второй – алгоритм триангуляционного позиционирования, основанный на направляющих векторах, берущих начало из источников сигнала и пересекающихся в точке предполагаемого места нахождения объекта наблюдения. На основе всех рассмотренных данных для реализации в работе производится выбор алгоритма позиционирования. Таким образом можно применять Wi-Fi сети в системах охраны и системах контроля доступа на объект.

Ключевые слова: позиционирование, Wi-Fi сети, триангуляция, ангуляция, математическая модель, анализ данных, нейронная сеть, Wi-Fi метки, система охраны, контроль доступа

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-3-104-125

* Статья получена 28 апреля 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире все большую популярность набирают способы позиционирования объектов как внутри помещения, так и на открытом пространстве. Самым популярным на сегодняшний день способом определения координат на открытом пространстве является GPS. В нем реализуются алгоритмы определения координат объектов, основанные на данных, полученных со спутников. Точность данного способа очень высока, когда речь идет именно об открытых площадях, но обеспечить должное качество позиционирования, необходимое для системы регистрации движения на объекте, он не способен в силу того, что инженерные конструкции не позволяют спутникам точно определять координаты.

Но вопрос о регистрации движения на объекте сохраняет свою актуальность, и поэтому появляются разного рода решения данной задачи, способные с необходимой для заказчика точностью определить местоположение объекта внутри организации.

Одно из таких решений будет рассмотрено в данной работе, целью которой является разработка алгоритма позиционирования на объекте с использованием Wi-Fi канала передачи данных. В данной работе будут рассмотрены существующие на сегодняшний день способы использования Wi-Fi канала для определения координат клиента в замкнутом помещении, а также собственная математическая модель, описывающая алгоритм определения координат на основе показателя уровня принимаемого сигнала.

Также в данной работе по эмпирически полученным данным будет проведен анализ потерь мощности сигнала при прохождении им препятствий из разных материалов разной толщины. И, как результат, определена зависимость потерь мощности сигнала от материала инженерной конструкции, через которую он проходит.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В WI-FI СЕТЯХ

Одним из методов позиционирования является метод распознавания шаблона. Суть метода заключается в том, что сканирующее устройство в каждой точке помещения видит уникальную радиокартину. Для реализации данного метода необходимо активное устройство, способное сканировать радиообстановку в помещении [1]. Информация, которую оно получает, а именно название точек доступа и уровень сигнала от них, сверяется с набором шаблонов, и благодаря этому определяется координата устройства в пространстве. Для того чтобы устройство работало как можно более корректно, необходимо проводить регулярные его калибровки, потому что радиокартинка помещения регулярно меняется под действием множества факторов. Главным и, возможно, единственным преимуществом данного метода позиционирования является стоимость его развертывания, так как для этого необходимо всего одно устройство, но стоимость владения таким решением будет высокой, потому что ему необходимы регулярные калибровки, которые зачастую способны производить только специалисты. Точность позиционирования, которую способен гарантировать данный метод, невысока вследствие того, что на

нее влияет множество факторов, а также определение местоположения, основываясь всего лишь на одной опорной точке, не может иметь высокую точность [2].

Способ позиционирования по точке доступа, к которой присоединен клиент, выгодно отличается простотой своей реализации, но точность страдает. При условии, что некоторые производители оценивают радиус действия своего оборудования в 50 метров и более, мы можем определить местоположение устройства с погрешностью, равной заявленному радиусу его действия [3]. Можно сделать вывод, что такой способ свидетельствует скорее о наличии устройства на объекте, чем о возможности его позиционирования [4].

Метод триангуляции состоит в том, что на основе полученных сигналов от объекта с трех-четырех устройств определить его возможное местоположение. Этот способ имеет очень хорошую информативность при правильной разработке алгоритма позиционирования [5].

При правильном способе размещения точек доступа, а в данном случае подразумевается, что в каждой точке периметра объекта клиентское устройство находится в области действия трех-четырех роутеров, можно получить довольно четкое позиционирование с возможной погрешностью 5...7 метров. Препятствия на пути прохождения сигнала будут существенно снижать точность определения координат объекта [6]. Статические препятствия необходимо моделировать и учитывать их в алгоритме позиционирования, а динамические будут неизбежно снижать точность позиционирования [7].

Для повышения точности данного метода необходимо как можно чаще развешивать Wi-Fi роутеры, так как известно, что расстояние пагубно влияет на уровень сигнала, а значит, и на точность позиционирования. В рассматриваемой ситуации угасание сигнала и расстояние от точки доступа имеют экспоненциальную зависимость. Это значит, что при незначительном отдалении от точки доступа уровень сигнала снижается существенно, а в отдаленных областях радиуса действия роутера, при удалении – снижение уровня сигнала на единицу расстояния меньше, и поэтому определить местоположение становится сложнее [8].

При реализации триангуляционного метода необходимо учитывать, что помимо роутеров для позиционирования необходим центр обработки и анализа данных. То есть вся информация, получаемая с роутеров, приходит в одно место, где на основе алгоритма позиционирования производится определение местоположения клиентского устройства, а также хранение информации для дальнейшей возможности аналитики и прогнозирования [9].

Метод ангиляции или позиционирования с определением угла входящего сигнала является инновационной разработкой компании Cisco, он позволяет получить самую высокую точность позиционирования. Погрешность при реализации данного метода может составлять всего 1 метр. Данный способ основывается на показаниях CiscoAironet – внешнем модуле точечного позиционирования. На CiscoAironet установлена специальная антенна, которая является массивом из 32 антенн, каждая из которых получает сигнал под уг-

лом, отличающимся от остальных. Алгоритм, разработанный компанией Cisco, позволяет на основе собранных данных осуществить позиционирование.

Если реализовывать метод триангуляционного позиционирования, используя разработку компании Cisco, можно получить очень высокую точность определения местоположения на объекте.

Для позиционирования важна частота обновления координат. Пока объект наблюдения не подключен к сети Wi-Fi, координата может определяться по пробным сигналам, которые устройства отправляют через определенные промежутки времени. Пробные сигналы отправляются широкоэмиттерно, т. е. все устройства, в радиусе действия которых находится объект, могут его «слышать», а значит, и реализация позиционирования возможна [10].

Проблема состоит в том, что устройство способно отправлять широкоэмиттерные сигналы через 15-20-30 секунд, это зависит от настроек, заложенных производителем. В настоящее время все производители стремятся к увеличению времени ожидания между отправкой широкоэмиттерных сигналов, так как это повышает энергоэффективность устройств, но порождает проблему для позиционирования. Проблема заключается в том, что мы знаем, где находится объект в данный момент времени, и узнаем, где он будет через 20 секунд, но какими были его передвижения на протяжении этого времени, неизвестно [11].

Метод идентификации на основе нейронной сети базируется на измерении уровня сигнала от всех доступных по уровню сигнала точек доступа в некотором массиве точек, называемых опорными. Вся площадь объекта контроля разделяется на прямоугольники равной площади, таким образом мы получаем плоское координатное пространство, в котором каждому прямоугольнику присвоены свои координаты. Чем меньше будут сегменты, на которые мы делим площадь объекта, и при этом чем чаще будут расположены точки доступа, тем точнее будет позиционирование [12].

После создания программного или аппаратного решения самой искусственной нейронной сети, оптимальной расстановки роутеров и представления всей площади объекта в виде координатной плоскости необходимо приступить к самым сложным шагам данного метода – к созданию математической модели позиционирования, непосредственному «обучению» системы и созданию базы сигнатур в каждой точке [13].

Существует множество математических моделей, способных охарактеризовать зависимости между расстоянием и уровнем сигнала, при этом каждый разработчик или производитель могут выбрать любую модель, которая, по их мнению, будет точнее аналогов, или же разработать свою, в любом случае ее разработка – это область аналитической геометрии [14].

Таким образом, можно сделать вывод, что позиционирование с использованием искусственной нейронной сети может предложить очень высокую точность, но реализация и поддержание работоспособности данного метода обходится дорого. Обучение искусственной нейронной сети нужно производить при каждом изменении статической обстановки в помещении, так как значения уровня сигнала зависят от препятствий, встре-

чающихся на пути сигнала к роутеру. Данная процедура должна проходить под контролем оператора, а значит, на это будут требоваться регулярные финансовые вложения. Помимо обучения, также необходимо следующее: создание программного или аппаратного решения для самой искусственной нейронной сети, разработка алгоритма позиционирования, закупка оборудования и прочие затраты. Это значит, что использование данного способа оправдано только в условиях большой площади помещения, имеющего немного инженерных конструкций, которые практически не перемещаются, и требующего контроля, в противном случае стоит задуматься о другом методе позиционирования [15].

Позиционирование на основе Wi-Fi меток реализуется с помощью активного радиоустройства, которое может быть представлено в виде браслета на запястье.

Wi-Fi метки могут быть востребованы на предприятиях со строгим контролем доступа на территорию, а если конкретнее, то в учреждениях с запретом на использование мобильных устройств на территории. Позиционирование осуществляется любым из рассмотренных ранее способов с одним лишь условием: объектами должны быть устройства, выданные организацией.

Можно сделать вывод, что позиционирование, основанное на использовании Wi-Fi меток, интересно не тем, какая методика вычисления координат в нем используется, а возможностью интеграции с другими системами, такими как, например, системы контроля управления доступом.

Развертывание системы такого рода с финансовой точки зрения несет серьезные затраты, так как для каждого сотрудника необходимо закупить по одному экземпляру устройства, также необходимы комплекты для людей, не работающих на предприятии, но которым необходимо получить доступ на его территорию. Помимо финансовой составляющей также сложность вызовет организационный аспект, так как необходимо обучить людей работе с метками, а также организовать пропускной пункт, способный выдавать, принимать и настраивать их. Также использование Wi-Fi меток является одним из методов, с помощью которых возможна реализация контроля на предприятии за материальными активами.

2. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА

Проведем сравнительный анализ способов позиционирования, рассмотренных выше, по основным критериям, влияющим на их востребованность в наше время. Результаты для наглядности занесем в табл. 1.

На основании данных, рассмотренных выше, было принято решение разработать алгоритм позиционирования, основанный на триангуляции, так как для его реализации нет необходимости в разработке интеллектуальной нейронной сети, что является сложной и дорогой процедурой, также нет необходимости в закупке очень дорогого оборудования, как, например, в методах ангуляции с определением угла приходящего сигнала и в методе, основанном на Wi-Fi метках, но при этом метод триангуляции не сильно уступает им по точности.

Таблица 1

Сравнение методов позиционирования

Название метода позиционирования	Основные критерии			
	Точность определения местоположения	Относительная стоимость развертывания	Сложность реализации	Дополнительные функциональные возможности
Распознавание шаблона	Невысокая	Низкая	Простая	Нет
По точке доступа, к которой присоединен клиент	Низкая	Низкая	Простая	Нет
Триангуляция	Высокая (5...7 метров)	Средняя	Средняя	Есть
Ангуляция с определением угла	Очень высокая (до одного метра)	Высокая	Средняя	Есть
Идентификация на основе искусственной нейронной сети	Очень высокая (до одного метра)	Очень высокая	Очень сложная	Есть
На основе Wi-Fi меток	Зависит от выбора алгоритма позиционирования	Высокая	Средняя	Есть

3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ТРИАНГУЛЯЦИИ

3.1. СБОР НЕОБХОДИМЫХ ДАННЫХ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Главной целью измерений было получение данных для определения тенденций угасания Wi-Fi сигналов в пространстве. Для устройств, работающих по стандартам Wi-Fi и Bluetooth 4.0, RSSI является единственным параметром, позволяющим измерить расстояние от устройства до базовой станции или маяка. Уравнение для вычисления расстояния имеет следующий вид:

$$P_d = P_0 - 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right), \quad (1)$$

где d – расстояние от устройства до передатчика, м; d_0 – расстояние от устройства до точки, на которой выполнялось измерение мощности сигнала P_0 устройства, м (выбранное единичное (калибровочное) расстояние, в нашем случае 0,2 м); \lg – десятичный логарифм; P_0 – мощность сигнала

устройства, измеренная на единичном расстоянии d_0 от устройства, дБ · м; n – коэффициент потерь мощности сигнала при распространении в среде, безразмерная величина (для воздуха $n = 2$, увеличивается при наличии препятствий); P_d – RSSI, дБ · м.

Следующим шагом в исследовании является сбор данных. В данном случае измерения проводились на шести разных расстояниях от роутеров. Все роутеры работали на частоте 2,4 ГГц. Антенны были штатными. Создавались все условия для того, чтобы эксперименты были максимально абстрагированы от названий производителей.

Эксперимент проводился для определения корректности полученных в ходе испытания значений, а именно коэффициента потерь мощности сигнала при распространении в среде, для воздуха он равен двум. Допускается доверительная погрешность измерения $\pm 0,2$. То есть результаты проведенных испытаний будут верны в случае, если значения коэффициентов потерь мощности, рассчитанные по формуле (1), будут находиться в интервале 1,8...2,2. Были выбраны расстояния: 0,2 м, 0,5 м, 1 м, 2 м, 4 м, 5 м.

Также были проведены измерения потерь уровня сигнала при прохождении его через препятствия из разных материалов. Также был проведен анализ получившихся потерь и сделаны выводы.

Значения уровней сигналов были получены при помощи программы анализирующей Wi-Fi сети, в радиус которых попадает устройство. Программа была установлена на устройство, работающее на операционной системе Android. Программа называется Wi-Fi Monitoring – «Мониторинг сетей Wi-Fi».

Снятие показаний производилось в разные дни, примерно в одно и тоже время для того, чтобы фоновое радиоизлучение примерно одинаково сказывалось на точности показаний.

Результаты измерений зависимости уровня сигнала от расстояния занесены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений зависимости уровня сигнала от расстояния

№	Роутер	Расстояние, м					
		P_d при $d_0 = 0,2$ м, дБ · м	P_d при $d_0 = 0,5$ м, дБ · м	P_d при $d_0 = 1$ м, дБ · м	P_d при $d_0 = 2$ м, дБ · м	P_d при $d_0 = 4$ м, дБ · м	P_d при $d_0 = 5$ м, дБ · м
1	ASUSRT-N66U	–28	–31	–38	–45	–52	–56
2	ASUSWL520GS	–28	–35	–37	–42	–49	–50
3	CISCO C867VAE-W-E-K9	–25	–33	–39	–45	–51	–54
4	ASUS RT-N1D	–26	–30	–35	–46	–53	–56
5	TP-LINK TL-WR942N	–31	–32	–41	–47	–53	–55
6	D-Link DIR-615	–30	–40	–51	–63	–74	–75
7	ZYXEL Keenetic III	–26	–31	–37	–43	–52	–55
8	TP-LINK TL-WR340GD	–27	–33	–36	–44	–49	–54
9	ASUS AC-56U	–28	–35	–38	–46	–51	–54

Окончание табл. 2

№	Роутер	Расстояние, м					
		P_d при $d_0 = 0,2$ м, дБ · м	P_d при $d_0 = 0,5$ м, дБ · м	P_d при $d_0 = 1$ м, дБ · м	P_d при $d_0 = 2$ м, дБ · м	P_d при $d_0 = 4$ м, дБ · м	P_d при $d_0 = 5$ м, дБ · м
10	ZYXEL Keenetic III	-26	-34	-40	-43	-50	-55
11	ASUS RT-AC51U	-30	-36	-41	-45	-49	-53
12	ASUS RT-AC68U	-29	-32	-38	-48	-52	-55
13	D-Link Dir813 Ac750	-26	-31	-36	-42	-48	-52
14	TP-LINK Archer C7	-27	-36	-39	-47	-53	-56
15	ZYXEL KeeneticExtra II	-28	-33	-40	-49	-55	-59
16	ASUS RT-AC58U	-26	-30	-37	-43	-50	-54
17	D-Link DIR-880L	-29	-34	-37	-44	-49	-53
18	TP-LINK Archer C59	-30	-37	-42	-48	-51	-55
19	ASUS WL520GS	-29	-31	-36	-43	-49	-52
20	CISCO C867VAE-W-A-K9	-25	-33	-40	-45	-51	-53

По результатам измерений можно сделать несколько выводов.

1. Одно из устройств показывает результаты, сильно отличающиеся от всех остальных. Это вызвано тем, что измерения проводились в серверном помещении предприятия, где уровень фоновых радиоизлучений гораздо выше, чем во всем остальном здании. Показания на самой ближней дистанции измерения не выделяются на фоне остальных, но с увеличением расстояния становятся заметны сильные отклонения в результатах, так как на пути сигнала коррективы вносят побочные радиоволны и инженерные конструкции, влияние которых на ближних дистанциях несущественно.

2. Определены нулевое расстояние ($d_0 = 0,2$) и наименьшее значение показателя уровня сигнала в точке ($P_0 = -25$ дБ · м), которые необходимы для

вычислений по формуле $P_d = P_0 - 10 \lg \left(\frac{d}{d_0} \right)$. Значения уровня сигнала

имеют размерность [дБ · м], которая, в отличие от размерности [дБ], показывает уровень мощности сигнала относительно опорной мощности 1 мВт. Это позволяет нам не использовать показатель мощности сигнала на входе, который для каждого устройства свой.

Помимо измерений, проведенных на открытом пространстве, также были проведены опыты с потерями мощности сигнала при его прохождении через инженерные конструкции из разных материалов. Это было необходимо для того, чтобы в дальнейшем возможно было моделировать прохождение сигнала через инженерные конструкции без вреда для точности позиционирования.

Для этого мной были определены материалы, из которых в настоящее время состоит большинство инженерных конструкций на предприятиях.

3.2. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Анализ данных необходим для того, чтобы проверить корректность измерений и на их основе сделать выводы. Для определения правильности показаний необходимо из формулы (1) выразить коэффициент n , который для воздуха равен двум, но в силу неизбежных отклонений при эмпирических исследованиях вводим доверительную погрешность, при которой значения считаются верными. Выражение коэффициента n из формулы (1):

$$P_d = P_0 - 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right),$$

$$P_d - P_0 = -10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right),$$

$$\frac{P_d - P_0}{-10} = n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right),$$

$$\frac{P_d - P_0}{-10 \lg \left(\frac{d}{d_0} \right)} = n.$$

Результаты сведены в табл. 3, где рассчитано среднее значение коэффициента n для пяти измерений на расстояниях: 0,5 м, 1 м, 2 м, 4 м, 5 м.

Измерения уровня сигнала на расстоянии 0,2 м не используются для анализа, так как если $d = d_0$, то под знаком десятичного логарифма получается единица, логарифм от единицы – 0, а значит, вычисления выполнить невозможно:

$$-10 \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) \neq 0,$$

$$\lg \left(\frac{d}{d_0} \right) \neq 0,$$

$$\lg \left(\frac{d}{d_0} \right) \neq \lg(1),$$

$$\frac{d}{d_0} \neq 1,$$

$$d \neq d_0.$$

Рассмотрим результаты анализа в табл. 3.

Таблица 3

**Коэффициент потерь мощности сигнала n при распространении
в среде без учета препятствий**

№	Роутер	n
1	ASUS RT-N66U	1,932
2	ASUS WL520GS	1,913
3	CISCO C867VAE-W-E-K9	2,017
4	ASUS RT-N10D	1,831
5	TP-LINK TL-WR942N	2,109
6	D-Link DIR-615	3,726
7	ZYXEL Keenetic III	1,849
8	TP-LINK TL-WR340GD	1,881
9	ASUS AC-56U	2,109
10	ZYXEL Keenetic III	2,055
11	ASUS RT-AC51U	2,180
12	ASUS RT-AC68U	2,028
13	D-Link Dir813 Ac750	1,696
14	TP-LINK Archer C7	2,267
15	ZYXEL KeeneticExtra II	2,259
16	ASUS RT-AC58U	1,754
17	D-Link DIR-880L	1,945
18	TP-LINK Archer C59	2,378
19	ASUS WL520GS	1,732
20	CISCO C867VAE-W-A-K9	2,032
Среднее значение коэффициента n для всех результатов, кроме выделенного		1,998
Среднее значение коэффициента n для всех результатов		2,085

Мы можем видеть, что среднее значение коэффициента n для всех результатов, кроме того, для которого результаты отличаются от остальных в силу спецификации помещения, где проводились опыты, равно 1,998. А среднее значение с учетом наиболее отклоняющегося равно 2,085. На основе представленных результатов можно сделать вывод, что показания сняты верно и соответствуют заявленной доверительной погрешности 0,2.

Следующим аспектом анализа будут значения коэффициента потерь мощности сигнала при распространении не в воздушной среде, а при прохождении твердых тел.

Рассмотрим результаты расчетов в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициент потерь мощности сигнала при прохождении твердых тел

№	Роутер	Материал	Толщина, м	Показания через препятствие	Приблизительные потери на препятствии, дБ · м
1	ASUS RT-N66U	Сибит	0,5	–48	17
2	ASUS WL520GS	Полая гипсокартонная стена	1,23	–43	6
3	CISCO C867VAE-W-E-K9	Сибит	0,44	–49	16
4	ASUS RT-N10D	Гипсокартон	0,38	–36	6
5	TP-LINK TL-WR942N	Кирпич	0,4	–48	16
6	D-Link DIR-615	Гипсокартон	0,35	–46	6
7	ZYXEL Keenetic III	Бетон	0,45	–47	16
8	TP-LINK TL-WR340GD	Сибит	0,4	–47	14
9	ASUS AC-56U	Кирпич	0,4	–50	15
10	ZYXEL Keenetic III	Дерево	0,4	–42	8
11	ASUS RT-AC51U	Гипсокартон	0,85	–45	4
12	ASUS RT-AC68U	Гипсокартон	0,85	–43	5
13	D-Link Dir813 Ac750	Кирпич	0,5	–50	19
14	TP-LINK Archer C7	Бетон	0,5	–55	19
15	ZYXEL KeeneticExtra II	Стекло тонированное + воздушная прослойка	0,36	–36	3
16	ASUS RT-AC58U	Железобетонное перекрытие	1	–75	38
17	D-Link DIR-880L	Гипсокартон	0,55	–42	8
18	TP-LINK Archer C59	Сибит	0,4	–51	14
19	ASUS WL520GS	Дерево	0,37	–38	7
20	CISCO C867VAE-W-A-K9	Кирпич	0,5	–54	21

Приблизительные потери на препятствии рассчитывались следующим образом:

- 1) снимались показания через препятствие с использованием той же программы, что и для замеров на открытом пространстве;
- 2) измерялась ширина препятствия;

3) брались значения показателя уровня сигнала для ближайшего расстояния при измерениях на открытом пространстве;

4) находилась разница между измерениями, сделанными на открытом пространстве, и измерениями, сделанными через препятствие, и тем самым находились потери на препятствии.

Проанализируем полученные коэффициенты потерь мощности сигнала при распространении в среде и прохождении препятствий. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

Коэффициент потерь мощности сигнала n при распространении в среде с учетом препятствия

№	Материал	Толщина, м	n
1	Сибит	0,5	2,573
2	Полая гипсокартонная стена	1,23	2,039
3	Сибит	0,44	2,615
4	Гипсокартон	0,38	2,071
5	Кирпич	0,4	2,573
6	Гипсокартон	0,35	2,490
7	Бетон	0,45	2,531
8	Сибит	0,4	2,531
9	Кирпич	0,4	2,657
10	Дерево	0,4	2,322
11	Гипсокартон	0,85	2,087
12	Гипсокартон	0,85	2,039
13	Кирпич	0,5	2,657
14	Бетон	0,5	2,867
15	Стекло тонированное + воздушная прослойка	0,36	2,071
16	Железобетонное перекрытие	1	2,802
17	Гипсокартон	0,55	2,322
18	Сибит	0,4	2,699
19	Дерево	0,37	2,155
20	Кирпич	0,5	2,825
Среднее значение коэффициента n для всех результатов			2,446

На основе представленных результатов можно сделать вывод, что в случае наличия в помещении препятствий из разных материалов усредненный коэффициент $n = 2,446$ для формулы (1), а это выходит за интервал доверительной погрешности. Но благодаря проведенным исследованиям нам удалось выяснить значения коэффициентов потерь на инженерных конструкциях, которые позволят учитывать препятствия разных материалов при разработке алгоритма позиционирования.

Также в ходе работы были проанализированы усредненные показатели по каждому расстоянию измерения для практически полученных результатов и результатов, рассчитанных по формуле (1).

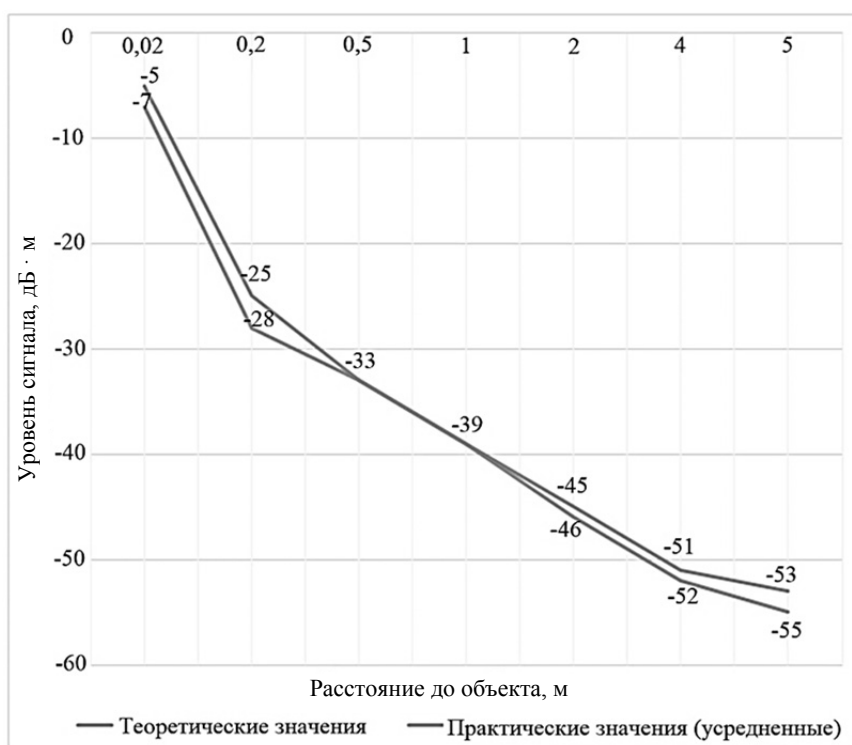


Рис. 1. Анализ показателей, рассчитанных по формуле и полученных практически

Можно сделать вывод, что показатели, полученные эмпирическим способом и рассчитанные по формуле (рис. 1), являются близкими друг к другу по значениям, а следовательно, в ходе опытов нами были получены данные, способные служить платформой для дальнейших исследований, направленных на повышение точности позиционирования через Wi-Fi сети.

4. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

4.1. АЛГОРИТМ, ОСНОВАННЫЙ НА ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ ОКРУЖНОСТЕЙ

Разработаем алгоритм триангуляционного позиционирования. Для этого будем считать, что в каждой точке площади объекта наблюдения устройство, регистрация движения которого происходит, находится в радиусе действия как минимум трех роутеров. Нам известны следующие данные:

- уровни сигналов, которые доходят до объекта от роутеров, а следовательно, расстояние от каждого роутера до объекта;
- координаты всех роутеров.

Графическое представление данного метода.

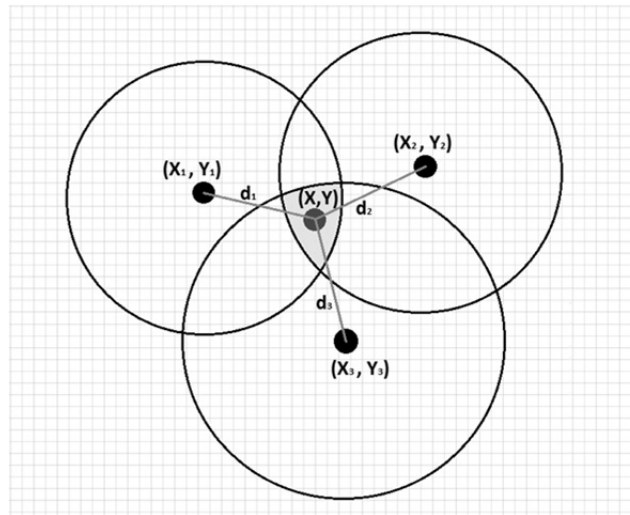


Рис. 2. Графическое представление триангуляционного метода

В нашем случае роутеры имеют координаты (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_3, y_3) , а объект – (x, y) . Расстояния от роутеров до объекта равны d_1 , d_2 , d_3 соответственно. Зная начальные координаты роутеров и расстояние от каждого роутера до объекта, можно составить три уравнения, составить из них систему и найти координаты объекта. Рассмотрим алгоритм решения:

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} d_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} d_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Выполним преобразования уравнения (2):

$$d_1^2 + 2xx_1 + 2yy_1 - x_1^2 - y_1^2 = x^2 + y^2. \quad (5)$$

Осуществим преобразование уравнения (3) аналогично первому:

$$d_2^2 + 2xx_2 + 2yy_2 - x_2^2 - y_2^2 = x^2 + y^2. \quad (6)$$

Преобразуем уравнения (5) и (6), выполнив перенос правой части в левую. Так как правые части уравнений равны, то приравняем уравнения:

$$d_1^2 + 2xx_1 + 2yy_1 - x_1^2 - y_1^2 = d_2^2 + 2xx_2 + 2yy_2 - x_2^2 - y_2^2,$$

$$d_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - d_2^2 + x_2^2 + y_2^2 = 2xx_2 + 2yy_2 - 2xx_1 - 2yy_1.$$

Получим

$$x = \frac{d_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - d_2^2 + x_2^2 + y_2^2 - 2yy_2 + 2yy_1}{2(x_2 - x_1)} \quad \text{для уравнений (1) и (2);}$$

$$x = \frac{d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 - d_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - 2yy_3 + 2yy_2}{2(x_3 - x_2)} \quad \text{для уравнений (2) и (3);}$$

$$x = \frac{d_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - d_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - 2yy_3 + 2yy_1}{2(x_3 - x_1)} \quad \text{для уравнений (1) и (3).}$$

Из выраженных значений x можно сделать вывод об области допустимых значений:

$$\begin{cases} 2(x_2 - x_1) \neq 0, \\ x_2 - x_1 \neq 0, \end{cases} \quad x_2 \neq x_1; \quad (7)$$

$$\begin{cases} 2(x_3 - x_2) \neq 0, \\ x_3 - x_2 \neq 0, \end{cases} \quad x_3 \neq x_2; \quad (8)$$

$$\begin{cases} 2(x_3 - x_1) \neq 0, \\ x_3 - x_1 \neq 0, \end{cases} \quad x_3 \neq x_1. \quad (9)$$

Рассмотрим накладываемые этими неравенствами ограничения:

- если не выполняется неравенство (7), то мы не можем найти область пересечения окружностей в центрах с точками (x_1, y_1) и (x_2, y_2) ;
- если не выполняется неравенство (8), то мы не можем найти область пересечения окружностей в центрах с точками (x_3, y_3) и (x_2, y_2) ;
- если не выполняется неравенство (9), то мы не можем найти область пересечения окружностей в центрах с точками (x_3, y_3) и (x_1, y_1) .

На практике данные ограничения означают, что при установке роутеров необходимо расположить их таким образом, чтобы они не находились на одной вертикальной прямой, иначе позиционирование необходимо будет осуществлять, используя другой алгоритм.

Для нахождения значений y , соответствующих каждому из трех выраженных x , необходимо подставить их в любое из двух уравнений, для кото-

рых оно найдено. После этого у нас будут найдены значения u , их в каждом случае будет два, так как необходимо будет решить квадратное уравнение. На выходе мы имеем шесть пар значений (x, y) , которые соответствуют точкам пересечения трех окружностей.

Далее необходимо из шести точек выбрать три точки, расположенные ближе всего друг к другу. Это позволит нам локализовать выделенную на рисунке область пересечения всех трех окружностей. Последний этап – определение точных координат точки, находящейся в этом сегменте, для этого опишем вокруг него прямоугольник и определим координаты объекта наблюдения как точку пересечения диагоналей прямоугольника, в который вписан получившийся сегмент.

4.2. АЛГОРИТМ, ОСНОВАННЫЙ НА НАПРАВЛЯЮЩИХ ВЕКТОРАХ

Второй алгоритм актуален как раз для случая, при котором в первом накладываются ограничения, а именно при расположении роутеров на одной вертикальной прямой. Он также работоспособен для всех остальных случаев, но его реализация значительно сложнее первого. Рассмотрим, каким способом производится позиционирование согласно этому алгоритму.

Графическое представление данного метода.

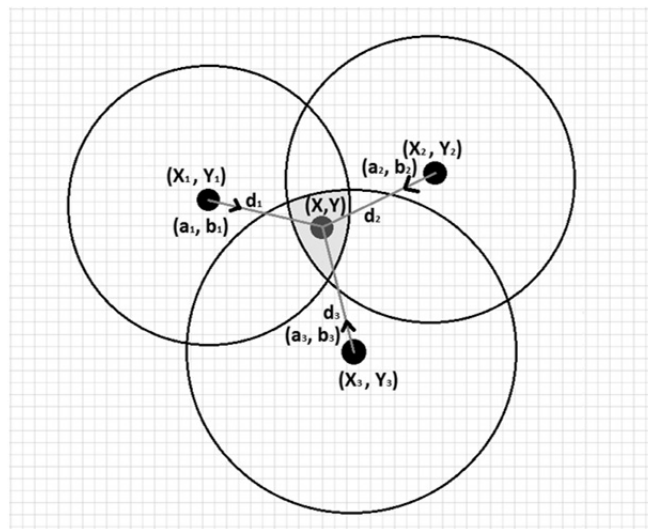


Рис. 3. Графическое представление данного алгоритма

Нам известны расстояния от роутеров до объекта. Также известно, что объект находится под действием всех трех роутеров, но для определения точного местоположения необходимо знать угловой коэффициент, под которым выходят прямые d_1 , d_2 и d_3 соответственно из точек (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_3, y_3) , чтобы пересечься в одной точке, в которой мы предполагаем местонахождение объекта.

Введем предположение, что прямые d_1 , d_2 , d_3 точно пересекаются в одной точке, а также на этих прямых лежат направляющие векторы (a_1, b_1) ,

(a_2, b_2) и (a_3, b_3) , которые определяют угловой коэффициент. Учитывая все эти аспекты, составим равенство

$$(x_1, y_1) + d_1(a_1, b_1) = (x_2, y_2) + d_2(a_2, b_2) = (x_3, y_3) + d_3(a_3, b_3). \quad (10)$$

Данное равенство верно, так как мы считаем, что у нас нет погрешности, и все прямые выходящие под определенным углом из роутеров, пересекутся в одной точке, где находится объект, регистрация движения которого происходит. Исходя из равенства (10) составим систему уравнений:

$$\begin{cases} x_1 + d_1 a_1 = x_2 + d_2 a_2, \\ x_2 + d_2 a_2 = x_3 + d_3 a_3, \\ x_1 + d_1 a_1 = x_3 + d_3 a_3, \\ y_1 + d_1 b_1 = y_2 + d_2 b_2, \\ y_2 + d_2 b_2 = y_3 + d_3 b_3, \\ y_1 + d_1 b_1 = y_3 + d_3 b_3. \end{cases}$$

К данной системе уравнений добавим систему уравнений, составленных из основного тригонометрического равенства:

$$\begin{cases} \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = 1, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \sqrt{a_2^2 + b_2^2} = 1, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \sqrt{a_3^2 + b_3^2} = 1. \end{cases} \quad (13)$$

Векторы (a_1, b_1) , (a_2, b_2) и (a_3, b_3) являются направляющими, т. е. они характеризуют угол, который можно наглядно представить при помощи тригонометрического круга.

Допустим, что начало координат – это роутер, а прямая, выходящая из начала координат под углом α , – это d , тогда направляющий вектор лежит на этой прямой. Следовательно, если применить основное тригонометрическое тождество (14) и провести преобразования, получим

$$\cos^2(\alpha) + \sin^2(\alpha) = 1, \quad (14)$$

где $\cos(\alpha)$ – координата x направляющего вектора; $\sin(\alpha)$ – координата y направляющего вектора; $a_1^2 + b_1^2 = 1$ – основное тригонометрическое равенство для роутера с координатами в точке (x_1, y_1) . Извлечем корень из обеих частей уравнения:

$$\sqrt{a_1^2 + b_1^2} = 1.$$

Аналогично для роутеров, находящихся в точках (x_2, y_2) и (x_3, y_3) . Таким образом, становится понятно, откуда в системе появляются уравнения (11), (12) и (13).

Остается только решить данную систему уравнений. Решением будут являться пары чисел a и b , из получившихся пар выбираем подходящие для наших условий. Таким образом, у нас будут известны координаты направляющих для каждого роутера векторов, а также координаты точки, в которой находится объект наблюдения.

5. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ C#

Для реализации был выбран алгоритм, основанный на пересечении окружностей, так как этот алгоритм достаточен для эффективного определения местоположения.

Средой разработки для реализации модели была выбрана программа Unity, так как в ней очень широкий спектр возможностей для работы с графикой.

При запуске программы открывается окно с загруженным планом помещения и объектом на нем. Снизу слева на рис. 4 мы видим координаты объекта реальные и рядом – координаты объекта, рассчитанные посредством разработанной математической модели. Сразу можно обратить внимание на то, что координаты разнятся между собой, это возникает вследствие погрешности в расчетах, так как для создания модели использовались практически полученные данные.

Также можно видеть расстояние от каждого роутера до объекта наблюдения и уровень сигнала, доходящего до объекта, от каждого роутера.

Передвижение объекта на плане слева экрана осуществляется при помощи стрелок клавиатуры, а справа мы видим, как определяется его местоположение при помощи расчетов, и можем наглядно увидеть погрешность в позиционировании. Объект справа находится в области пересечения окружностей, соответствующих определенному уровню сигнала.



Рис. 4. Определение местоположения объекта в программе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выборе алгоритма позиционирования необходимо найти оптимальное решение согласно критериям: стоимости, точности определения координат и сложности реализации. Исходя из этого был выбран метод триангуляционного позиционирования. Анализ заключался в получении объективных показателей угасания Wi-Fi сигналов при работе в закрытом помещении и прохождении ими инженерных конструкций.

Была выбрана математическая модель, способная описать способ позиционирования в Wi-Fi сетях. Для ее создания применялись приемы аналитической геометрии. В результате было два алгоритма позиционирования, отличающиеся между собой сложностью и точностью реализации, а также областью допустимых значений. Один из получившихся методов был реализован на языке программирования C#.

Данная модель способна обеспечивать позиционирование сотрудников и материальных активов на предприятии с определенной точностью, ее можно применять как систему охраны или контроля и управления доступом. Совместно с системами охраны рекомендуется применять комплекс мероприятий по защите объектов [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Le Dortz N., Gain F., Zetterberg P.* WiFi fingerprint indoor positioning system using probability distribution comparison // 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP): Proceedings. – Kyoto, Japan, 2012. – P. 2301–2304.
2. *Сулейманов Д.Ф.* Метод определения координат мобильных устройств по радиосигналу Wi-Fi точек // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2007. – № 41. – С. 40–43.
3. *Новиков А.М., Волков М.М.* Оценка расстояния между двумя устройствами, соединенными через Wi-Fi // Телекоммуникации и информационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 102–103.
4. *Александров Д.В., Салех Х.М.* Радиолокация с использованием Wi-Fi точек доступа беспроводных сетей внутри помещений // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – № 7. – С. 29–36.
5. *Щекотов М.С.* Анализ подходов к позиционированию внутри помещений с использованием трилатерации сигналов Wi-Fi // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 5. – С. 206–214.
6. *Indoor Wi-Fi positioning: techniques and systems / F. Lassabe, P. Canalda, P. Chatonnay, F. Spies // Annales Des Télécommunications-Annals of Telecommunications.* – 2009. – Vol. 64, N 9–10. – P. 651–664.
7. *Скворцов А.В., Мирза Н.С.* Алгоритмы построения и анализа триангуляции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 168 с.
8. *Genchev S.* Cooperative localization by Time-Of-Flight trilateration – fast, robust or optimal // Journal of Information Technologies and Control. – 2008. – Vol. 2. – P. 29–39.
9. *Дудяк Е.В.* Методы определения координат сотрудников и техники предприятия с использованием технологии Wi-Fi // Техника радиосвязи. – 2015. – № 1 (24). – С. 67–77.
10. *Овчинников С.В.* Системы позиционирования и мониторинга // Технологии и средства связи. – 2014. – № 2. – С. 18–22.
11. *Шубин В.И., Красильникова О.С.* Беспроводные сети передачи данных. – М.: Вузская книга, 2013. – 104 с.
12. *Haykin S.* Neural networks and learning machines. – 3rd ed. – New York: Prentice Hall, 2008. – 936 p.

13. Беспроводные сети Wi-Fi / Интернет-Университет Информационных Технологий. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 216 с.
14. Волков А.Н., Сиверс М.А., Сухов В.А. Позиционирование в сетях Wi-Fi // Вестник связи. – 2010. – № 11. – С. 28–33.
15. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. – 362 с.
16. Development of Optical Transceivers SFF standard with support for cryptographic kernel / I.A. Kashirin, D.R. Usmanov, I.L. Reva, K.V. Zaharov // 13th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016): Proceedings, Novosibirsk, 3–6 October 2016. – Novosibirsk, 2016. – Vol. 1, pt. 2. – P. 159–162.

Рева Иван Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследования достоверности оценки защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам, информационная безопасность. Имеет 40 публикаций. E-mail: reva@corp.nstu.ru

Богданов Алексей Александрович, студент магистратуры АВТФ Новосибирского государственного технического университета. E-mail: 15.02.95@mail.ru

Малахова Екатерина Андреевна, студент магистратуры АВТФ Новосибирского государственного технического университета. Имеет три публикации. E-mail: kate.lion@mail.ru

Application of Wi-Fi-access points to record object movements^{*}

I.L. REVA¹, A.A. BOGDANOV², E.A. MALAKHOVA³

¹ 630073, Russian Federation, Novosibirsk, K. Marx Prospekt, 20, Novosibirsk State Technical University, PhD (Eng.). E-mail: rain100@yandex.ru

² 630073, Russian Federation, Novosibirsk, K. Marx Prospekt, 20, Novosibirsk State Technical University, graduate student. E-mail: 15.02.95@mail.ru

³ 630073, Russian Federation, Novosibirsk, K. Marx Prospekt, 20, Novosibirsk State Technical University, graduate student. E-mail: kate.lion@mail.ru

The paper describes a series of experiments on measuring the level of a signal at different distances from a source which were carried out at an enterprise which revealed a general tendency for a signal to fade. After obtaining empirical data an analysis of compliance of real values with the calculated values was made and conclusions were drawn. In addition, fading of a Wi-Fi signal when it passes through engineering structures made from different materials of different density and thickness was also considered.

On the basis of experimentally obtained data a model describing movements of an object indoors where it is under the influence of three routers in each point of space was developed. This model allows us to visualize results of the work which is done during carrying out final qualification work in the program in the C# programming language.

Six ways of positioning in Wi-Fi networks are considered in the paper. Based on the information collected on each of them, an analysis of these ways is made. Its purpose is to validate the use of each of these methods depending on a set of factors such as prices, accuracy of positioning, complexity of expansion and some others. As there is a theoretical dependence of a Wi-Fi signal level on a distance to a source, it was decided to practically check the accuracy of this formula by carrying out a series of experiments and making an analysis of the results aimed

^{*} Received 28 April 2017.

at tracing a tendency of fading of a Wi-Fi signal both in open space and indoors with engineering structures made from the different materials now in wide use. As a result of this analysis one of the 6 ways of positioning whose modeling was carried out within this work was chosen.

The next stage after obtaining results and data analysis was scrutinizing algorithms of positioning and their modification, which makes it possible to use them at the facility when the Wi-Fi signal level is known. In the paper work two theoretical algorithms and two mathematical models capable of carry out positioning on the basis of data obtained experimentally are presented. The first one is the algorithm of triangulation positioning based on crossing circles whose radii are presented by the signal level indicator on the object of observation. The second one is the algorithm of triangulation positioning based on the directing vectors originating from signal sources and which are crossed at a point of the supposed location of the object of observation. On the basis of all considered data the first algorithm of positioning to be implemented in practice has been chosen.

Keywords: positioning; Wi-Fi network; triangulation; angulation; mathematical model; data analysis; neural network; Wi-Fi tags

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-3-104-125

REFERENCES

1. Le Dortz N., Gain F., Zetterberg P. WiFi fingerprint indoor positioning system using probability distribution comparison. *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*: Proceedings, Kyoto, Japan, 2012, pp. 2301–2304.
2. Suleimanov D.F. Metod opredeleniya koordinat mobil'nykh ustroystv po radiosignalu Wi-Fi tochek [A method of determination of coordinates of mobile devices on a radio signal of Wi-fi of points]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki – Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*, 2007, no. 41, pp. 40–43.
3. Novikov A.M., Volkov M.M. Otsenka rasstoyaniya mezhdv dvumya ustroystvami, soedinenymi cherez Wi-Fi [Distance assessment between two devices connected through Wi-Fi]. *Telekommunikatsii i informatsionnye tekhnologii – Telecommunications and information technologies*, 2016, no. 1, pp. 102–103.
4. Aleksandrov D.V., Salekh Kh.M. Radiolokatsiya s ispol'zovaniem Wi-Fi tochek dostupa besprovodnykh setei vnutri pomeshchenii [Radiolocation with use of Wi-fi of points of access of wireless networks in rooms]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy – Information-measuring and Control Systems*, 2012, no. 7, pp. 29–36.
5. Shchekotov M.S. Analiz podkhodov k pozitsionirovaniyu vnutri pomeshchenii s ispol'zovaniem trilateratsii signalov Wi-Fi [The analysis of approaches to positioning in rooms with use of trilateration of signals of Wi-fi]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2014, iss. 5, pp. 206–214.
6. Lassabe F., Canalda P., Chatonnay P., Spies F. Indoor Wi-Fi positioning: techniques and systems. *Annales Des Télécommunications-Annals of Telecommunications*, 2009. vol. 64, no. 9–10, pp. 651–664.
7. Skvortsov A.V., Mirza N.S. *Algoritmy postroeniya i analiza triangulyatsii* [Algorithms of construction and analysis of a triangulation]. Tomsk, TSU Publ., 2006. 168 p.
8. Genchev S. Cooperative localization by Time-Of-Flight trilateration – fast, robust or optimal. *Journal of Information Technologies and Control*, 2008, vol. 2, pp. 29–39.
9. Dudyak E.V. Metody opredeleniya koordinat sotrudnikov i tekhniki predpriyatiya s ispol'zovaniem tekhnologii Wi-Fi [Methods of determination of coordinates of employees and the equipment of the enterprise with use of Wi-fi]. *Tekhnika radiosvyazi – Technology of radiocommunication*, 2015, no. 1 (24), pp. 67–77.
10. Ovchinnikov S.V. Sistemy pozitsionirovaniya i monitoringa [Systems of positioning and monitoring]. *Tekhnologii i sredstva svyazi – Communication Technologies & Equipment*, 2014, no. 2, pp. 18–22.

11. Shubin V.I., Krasil'nikova O.S. *Besprovodnye seti peredachi dannykh* [Wireless networks of data transfer]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2013. 104 p.
12. Haykin S. *Neural networks and learning machines*. 3rd ed. New York, Prentice Hall, 2008. 936 p.
13. *Besprovodnye seti Wi-Fi* [Wireless networks Wi-Fi]. Internet-Universitet Informatsonnykh Tekhnologii. Moscow, Binom. Laboratoriya znanii Publ., 2013. 216 p.
14. Volkov A.N., Sivers M.A., Sukhov V.A. Pozitsionirovanie v setyakh Wi-Fi [Positioning in Wi-fi]. *Vestnik svyazi*, 2010, no. 11, pp. 28–33.
15. Zhdanov A.A. *Avtonomnyi iskusstvennyi intellekt* [Autonomous artificial intelligence]. Moscow, Binom. Laboratoriya znanii Publ., 2012. 362 p.
16. Kashirin I.A., Usmanov D.R., Reva I.L., Zaharov K.V. Development of Optical Transceivers SFF standard with support for cryptographic kernel. *13th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016)*: Proceedings, Novosibirsk, 3–6 October 2016, vol. 1, pt. 2, pp. 159–162.