

УДК 621.396.96

Ю.Б. ГИМПИЛЕВИЧ, д-р техн. наук, Э.А. ЛЕВИН, канд. техн. наук, Д.А. САВОЧКИН

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Введение

Во многих сферах человеческой деятельности существует потребность в определении местоположения объектов внутри помещений, например товаров на складах и в магазинах, книг в библиотеках, работников на предприятиях, пациентов в больницах и др. Глобальные системы позиционирования на базе спутниковых и сотовых технологий непригодны для решения такой задачи, поскольку их применение в этом случае требует больших материальных затрат. Кроме того, такие системы не позволяют добиться достаточной точности определения местоположения при локализации внутри помещений с высокой степенью экранирования.

Перспективным направлением пространственной локализации объектов в закрытых помещениях является применение технологий радиочастотной идентификации (*RFID*). В этом случае на объектах локализации устанавливаются специальные устройства (*RFID*-метки), местоположение которых может быть определено с помощью *RFID*-системы. В зависимости от характера задачи локализации используются активные или пассивные *RFID*-метки. Пассивные метки не требуют внутреннего источника питания и обладают малой стоимостью [1]. В настоящее время они находят все большее применение при реализации широкого круга приложений, требующих высокой точности локализации при относительно малой стоимости системы. Особенно часто пассивные метки используются в тех случаях, когда необходима локализация множества объектов малых размеров.

Для проведения пространственной локализации используются различные методы и алгоритмы. В литературе [2 – 6] рассмотрены некоторые подходы по их классификации, однако эти работы не охватывают все значимые методы.

Цель настоящей работы – проведение как можно более полного анализа современного состояния методов пространственной локализации объектов внутри помещений на основе *RFID*-технологий, разработка классификации этих методов и выявление путей их дальнейшего совершенствования.

Структура *RFID*-системы пространственной локализации

Под технологией *RFID* обычно понимают процесс бесконтактного радиочастотного получения идентификационной информации от *RFID*-меток [1, 7]. Типовая *RFID*-система пространственной локализации (рис. 1) состоит из устройства считывания (считывателя), устройства обработки информации и набора из M *RFID*-меток ($M_1 – M_M$). Считыватель включает в себя блок приема, передачи и коммутации (БППК) и набор из N антенн ($A_1 – A_N$). Устройство обработки информации включает в себя блок взаимодействия и обработки (БВО), блок локализации (БЛ) и блок хранения данных (БХД).

БВО принимает запрос пользователя (П) о начале работы системы и посылает команду поиска *RFID*-меток считывателю. По этой команде БППК с помощью антенн выполняет инициализацию сеансов связи с *RFID*-метками, после чего ожидает ответные сигналы. Если уровень инициализирующего сигнала в месте размещения *RFID*-меток превышает некоторое пороговое значение, то эти метки излучают ответные сигналы, в которых с помощью процесса модуляции заложена информация об их идентификаторах [7]. При этом пассивные

метки в качестве источника питания используют накопитель энергии электромагнитного поля сигналов инициализации. Ответные сигналы от меток принимаются антеннами считывателя и через БППК поступают в БВО. БВО идентифицирует ответившие метки и передает полученную измерительную информацию в БХД. После этого БВО посылает команду о запуске процесса локализации ответивших меток в БЛ. БЛ получает измерительную информацию каждой метки из БХД и выполняет алгоритм локализации, результатом которого является оценка местоположения меток. Эта оценка через БВО передается пользователю.

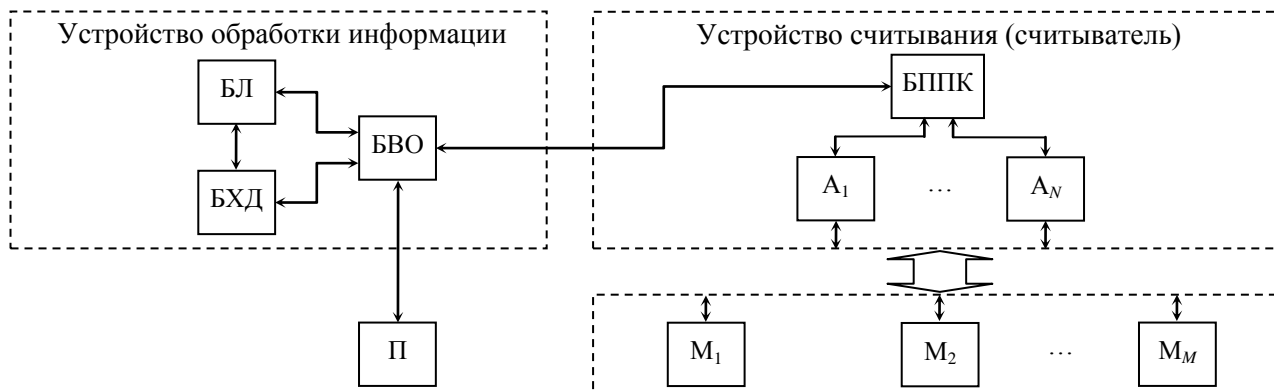


Рис. 1

Виды измерительной информации

Рассмотрим различные виды измерительной информации, при обработке которой выполняется оценка местоположения меток в пространстве.

Факт наличия ответа. Факт наличия ответа от метки является измерительной информацией двоичного характера. Используя эту информацию, можно считать, что метка находится в пространстве вблизи антенны считывателя, получившей данный ответ [8 – 11].

Уровень принятого сигнала. Уровень принятого от метки сигнала, известный в литературе как *received signal strength (RSS)*, является наиболее широко применяемым видом измерительной информации, используемым практически во всех коммерческих реализациях считывателей [8]. Под *RSS* обычно понимается уровень мощности полученного от метки сигнала. В идеальных условиях величина *RSS* однозначно определяет расстояние от антенны считывателя до метки.

Временная задержка принятого сигнала. Существует два подвида временной измерительной информации [12 – 14]. Первый подвид, называемый в литературе *time of arrival (TOA)*, определяется временной задержкой между моментом начала излучения ответного сигнала меткой и моментом его получения антенной считывателя. Измерительная информация *TOA* используется для вычисления расстояния от антенны считывателя до метки. При этом для определения момента начала передачи сигнала необходима временная синхронизация меток, что увеличивает стоимость системы [14]. Вторым подвидом измерительной информации, называемый в литературе *time difference of arrival (TDOA)*, определяется временными задержками между моментами получения сигнала от метки несколькими антеннами считывателя. Измерительная информация *TDOA* используется для вычисления разности расстояний между меткой и антеннами системы. При этом отсутствует необходимость временной синхронизации меток [14].

Фазовый сдвиг принятого сигнала. Измерительная информация, которая определяется фазовыми сдвигами в сигналах, поступивших от метки, известна в литературе как *phase of arrival (POA)* [13, 15]. В работах [13, 16] отмечено, что для получения измерительной информации *POA* можно выполнять отправку серии запросов метке на различных частотах с последующим измерением начальных фаз ответных сигналов. Использование *POA* позво-

ляет определить расстояние от антенны считывателя до метки в пределах некоторого диапазона дальности.

Угловая координата метки. Угловая координата метки является видом измерительной информации, известным в литературе как *angle of arrival (AOA)* [12, 13, 17]. Для получения измерительной информации *AOA* обычно применяют специальные антенные системы [12]. Использование *AOA* позволяет определить, в каком направлении от антенны считывателя находится метка.

Отношение числа принятых ответов к общему числу запросов. При многократном проведении сеансов связи считывателя с метками формируется измерительная информация, определяемая отношением числа принятых и корректно распознанных ответов каждой метки к числу посланных каждой антенной считывателя запросов. Такая измерительная информация при достаточно большом числе запросов позволяет оценить расстояние от антенны до метки [18].

В настоящее время практически все доступные коммерческие реализации считывателей позволяют выполнять измерение таких видов измерительной информации, как факт наличия ответа, уровень принятого сигнала и отношение числа принятых ответов к общему числу запросов. Другие виды измерительной информации обычно требуют конструирования считывателя под конкретную задачу, что повышает расходы на разработку системы.

Методы пространственной *RFID*-локализации

Метод пространственной локализации определяется видом используемой измерительной информации, поступающей в блок локализации *RFID*-системы из блока хранения данных, и алгоритмом ее обработки. Для дальнейшего описания дадим следующие определения [11].

Рабочая зона локализации – это область пространства, в которой необходимо обеспечить обнаружение и локализацию *RFID*-меток.

Зона действия антенны считывателя – это область пространства, при расположении в которой *RFID*-меток их ответные сигналы будут приняты антенной, а при расположении вне этой области – не будут. Форма зоны действия антенны в первую очередь зависит от конструкции антенны. Обычно в *RFID*-системах используются слабонаправленные антенны, которые размещаются над рабочей зоной локализации. В таких условиях форма зоны действия антенны в плоскости двумерной рабочей зоны является приближенно круговой [9], причем радиус круга определяется мощностью излучения антенны.

Рассмотрим методы локализации, использующиеся в *RFID*-системах. При этом основное внимание уделим локализации в двумерном пространстве.

Зонный метод. Зонный метод локализации использует измерительную информацию в виде фактов наличия ответов от меток [8, 17]. Его принцип состоит в нахождении области пересечения зон действия антенн, принявших сигналы от метки, с последующим исключением области объединения зон действия антенн, не принявших сигналы от метки [11]. Исходя из сказанного, используя теорию множеств, запишем оценку координат метки (\hat{x}, \hat{y}) как [11]:

$$(\hat{x}, \hat{y}) \in \bigcap_{b \in B} C_b \setminus \bigcup_{c \in A \setminus B} C_c, \quad (1)$$

где $A = \{A_1 \dots A_N\}$ – множество всех антенн считывателя; $B \subset A$ – подмножество антенн, принявших сигнал от метки; C_b, C_c – зоны действия b -й и c -й антенн соответственно.

В качестве примера рассмотрим систему *RFID*-локализации, состоящую из пяти антенн $A = \{A_1 \dots A_5\}$. На рис. 2, a точками указаны места расположения этих антенн, а кругами –

их зоны действия. При этом формируется 16 зон потенциального местоположения меток, отмеченных на рис. 2, а числами от 1 до 16.

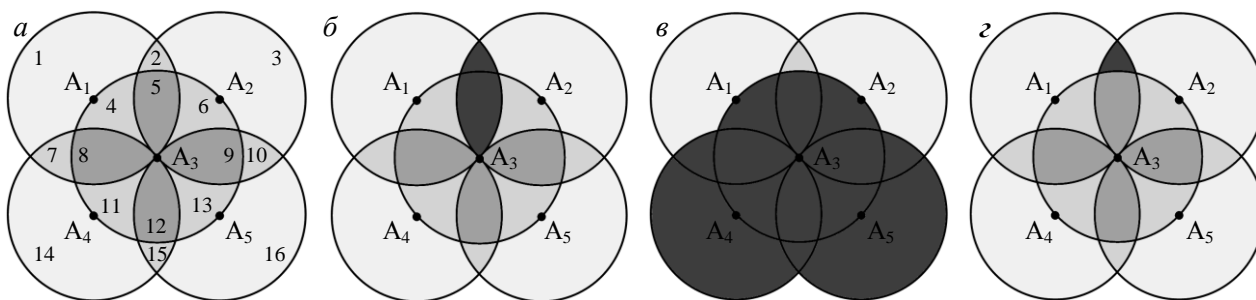


Рис. 2

Предположим, что первой и второй антеннами считывателя $B = \{A_1, A_2\}$ приняты сигналы от некоторой метки. Проведем оценку местоположения метки по формуле (1). При этом область пересечения зон действия антенн B определяется как $C_1 \cap C_2$ (отмечено черным на рис. 2, б), а область объединения зон действия антенн $\{A_3...A_5\}$, не принявших сигналы от метки, определяется как $C_3 \cup C_4 \cup C_5$ (отмечено черным на рис. 2, в). Разность области пересечения и области объединения (отмечена черным на рис. 2, г) принимается в качестве оценки местоположения метки. Таким образом, пространственная локализация метки производится с некоторой точностью, которая определяется числом антенн считывателя, характером их расположения и формой зон действия.

Классический зонный метод прост в алгоритмическом плане, поскольку оценка местоположения метки заключается в выборе одной из зон потенциального местоположения, координаты которых рассчитываются заранее и хранятся в блоке локализации в виде таблицы.

Геометрические методы. В геометрических методах локализации оценка местоположения меток осуществляется путем построения линий положения (или поверхностей положения) по результатам измерений, проведенных с помощью нескольких антенн считывателя [11]. При этом в идеальном случае возможно получение точечной оценки координат метки. Геометрические методы можно разделить на три типа: трилатерационный (дальномерный); мультитлатерационный (разностно-дальномерный); триангуляционный (угломерный) [5, 14]. Для случая двумерной локализации эти методы иллюстрируются рис. 3 – 5.

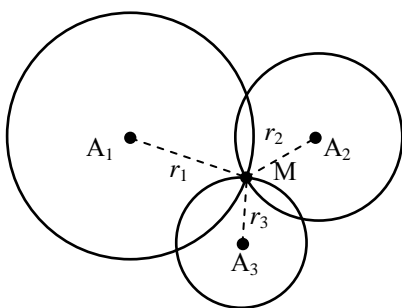


Рис. 3

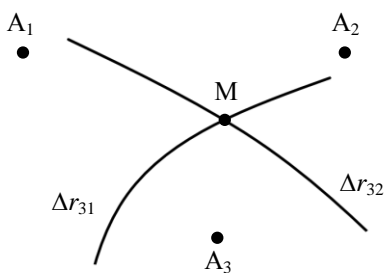


Рис. 4

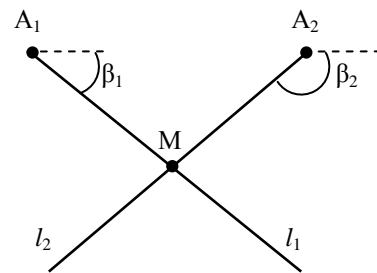


Рис. 5

Трилатерация является процессом местоопределения метки путем измерения дальностей от этой метки до нескольких антенн [5]. При этом местоположение метки определяется как точка пересечения окружностей, центры которых располагаются в точках размещения антенн, а радиусы определяются измеренными дальностями. Для двумерной локализации требуется не менее трех антенн, расположенных произвольно (рис. 3). На этом рисунке позиция метки отмечена как М, позиции антенн отмечены как A_1, A_2, A_3 , а дальности от антенн до метки отмечены как r_1, r_2, r_3 , соответственно. Для определения дальностей можно

использовать измерительную информацию в виде RSS , TOA , POA или отношения числа принятых ответов метки к общему числу запросов антенны [5, 14, 16, 18].

Мультилатерация является процессом местоопределения метки путем измерения разностей расстояний между антеннами и этой меткой [19]. При этом местоположение метки определяется как точка пересечения ветвей гипербол, фокусы которых располагаются в точках размещения антенн, а длины действительных осей определяются измеренными разностями расстояний. Для двумерной локализации требуется не менее трех антенн, из которых первая, получившая сигнал от метки, выбирается в качестве опорной (рис. 4). На этом рисунке опорной является антенна A_3 , а ветви гипербол отмечены как Δr_{31} (определяется разностью расстояний MA_3 и MA_1) и Δr_{32} (определяется разностью расстояний MA_3 и MA_2). Для определения разностей расстояний используется $TDOA$ измерительная информация [19].

Триангуляция является процессом местоопределения метки путем измерения углов между некоторым опорным направлением и лучами, выходящими из точек расположения антенн и направленными на метку [20]. При этом местоположение метки определяется как точка пересечения этих лучей. Для двумерной локализации требуется не менее двух антенн (рис. 5). На этом рисунке измеренные углы отмечены как β_1 и β_2 , а соответствующие лучи – как l_1 и l_2 . Для реализации триангуляции используется AOA измерительная информация [17].

В геометрических методах локализации для нахождения точки пересечения линий положения составляются и решаются системы уравнений, описывающих эти линии. Однако в силу погрешности средств измерения и влияния шумов в уравнениях этих систем возникают невязки. Поэтому оценку местоположения метки можно выполнять путем решения оптимизационной задачи [14, 21]. Для этого создается целевая функция ошибки определения координат метки, аргументом которой является вектор измерений с размерностью числа антенн, получивших ответные сигналы от метки при ее расположении в некоторой позиции. В дальнейшем ищется такая позиция внутри рабочей зоны локализации, при которой достигается минимум целевой функции ошибки [14, 21]. Эта задача решается различными итерационными методами, например методами градиентного спуска, Гаусса – Ньютона и другими [22].

Геометрические методы позволяют достичь достаточно высокой точности локализации. При локализации внутри помещений обычно используется метод трилатерации. При этом часто применяется RSS измерительная информация, что позволяет добиться достаточно высокого уровня точности при относительной простоте конструктивной реализации системы. Методы мультилатерации и триангуляции используются реже метода трилатерации, несмотря на приемлемый уровень точности, который они способны обеспечить. Это происходит потому, что системы на базе этих методов обычно обходятся дороже по стоимости.

Методы на базе предварительного анализа рабочей зоны

Существует ряд методов локализации, отличительной чертой которых является проведение этапа предварительного анализа рабочей зоны локализации путем сбора измерительной информации в различных точках зоны [8, 15]. Для этого рабочая зона разбивается на L ячеек, в каждую из которых устанавливается $RFID$ -метка. После этого для каждой из N антенн считывателя проводятся многократные (C раз) измерения, в результате чего полученная измерительная информация сохраняется в блоке хранения данных. Таким образом, формируется таблица (карта) полученных данных, иногда называемых "радиоотпечатками" [23]. После формирования таблицы проводится рабочий этап, во время которого выполняется оценка координат меток.

В литературе обычно рассматриваются случаи сбора RSS измерительной информации [15, 24], поэтому далее будем описывать методы локализации именно в этом контексте.

Приведем пример структуры RSS -таблицы для случая двумерной рабочей зоны, поделенной на $L = 4$ ячейки, системой из $N = 4$ антенн при числе измерений $C = 2$ (табл.1).

В ячейках таблицы содержатся значения $RSS R_{l,n,c}$, полученные во время измерений, где $l = 1 \dots L$ – номер ячейки рабочей зоны, $n = 1 \dots N$ – номер антенны, $c = 1 \dots C$ – номер измерения.

Методы локализации на базе предварительного анализа рабочей зоны можно разделить на три типа: ближайшего соседа (БС); искусственной нейронной сети (ИНС); машины опорных векторов (МОВ).

Таблица 1

Ячейка рабочей зоны		Значения $RSS R_{l,n,c}$							
Номер l	Координаты (x, y)	Антенна $n = 1$		Антенна $n = 2$		Антенна $n = 3$		Антенна $n = 4$	
		$c = 1$	$c = 2$	$c = 1$	$c = 2$	$c = 1$	$c = 2$	$c = 1$	$c = 2$
1	(x_1, y_1)	$R_{1,1,1}$	$R_{1,1,2}$	$R_{1,2,1}$	$R_{1,2,2}$	$R_{1,3,1}$	$R_{1,3,2}$	$R_{1,4,1}$	$R_{1,4,2}$
2	(x_2, y_2)	$R_{2,1,1}$	$R_{2,1,2}$	$R_{2,2,1}$	$R_{2,2,2}$	$R_{2,3,1}$	$R_{2,3,2}$	$R_{2,4,1}$	$R_{2,4,2}$
3	(x_3, y_3)	$R_{3,1,1}$	$R_{3,1,2}$	$R_{3,2,1}$	$R_{3,2,2}$	$R_{3,3,1}$	$R_{3,3,2}$	$R_{3,4,1}$	$R_{3,4,2}$
4	(x_4, y_4)	$R_{4,1,1}$	$R_{4,1,2}$	$R_{4,2,1}$	$R_{4,2,2}$	$R_{4,3,1}$	$R_{4,3,2}$	$R_{4,4,1}$	$R_{4,4,2}$

Метод ближайшего соседа реализует следующий алгоритм [8, 14, 17]:

- 1) проводится этап предварительного анализа рабочей зоны и строится RSS -таблица;
- 2) во время рабочего этапа производится измерение значений RSS сигналов от каждой метки с помощью всех антенн системы (формируется вектор θ из N значений RSS);
- 3) вектор θ сравнивается с каждым l -м вектором R_l из RSS -таблицы, при этом ищется такая l -я строка таблицы, вектор R_l которой имеет минимальное различие с вектором θ ;
- 4) координаты найденной строки считаются оценкой координат метки (\hat{x}, \hat{y}) .

Таким образом, для искомой метки производится поиск ближайшего соседа в векторном пространстве RSS . Воспользовавшись [22], запишем выражение для оценки координат метки:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \text{position} \left[\arg \min_{l \in [1, L]} E(\theta, R_l) \right], \quad (2)$$

где $\text{position}(l)$ – функция получения координат ячейки рабочей зоны по ее номеру l ; $E(\theta, R_l)$ – функция различия вектора θ и вектора R_l , которая определяется как [14, 20]

$$E(\theta, R_l) = \sum_{n=1}^N \left(\theta_n - \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C R_{l,n,c} \right)^2. \quad (3)$$

Модификациями метода БС являются метод K ближайших соседей (K -БС) и метод K взвешенных ближайших соседей (K -ВБС) [8, 14, 15]. При реализации этих методов ищется не один вектор, а K векторов с минимальным различием в RSS -пространстве. После этого проводится усреднение координат ячеек, соответствующих найденным векторам. Для метода K -ВБС при усреднении также учитываются весовые коэффициенты, определяемые значениями функции различия $E(\theta, R_l)$ из выражения (3).

На рис. 6 иллюстрируется пример локализации методами БС (рис. 6, а), K -БС (рис. 6, б) и K -ВБС (рис. 6, в) для рабочей зоны, содержащей $L = 25$ ячеек. При этом для методов K -БС и K -ВБС число ближайших соседей задано равным $K = 4$. На рис. 6 звездой отмечено положение искомой метки. Окружностями отмечены центры ячеек, в которых размещаются метки на этапе предварительного анализа. Черными кругами отмечены центры ячеек, которые отобраны как ближайшие соседи в результате выполнения соответствующих алгоритмов. Крестом отмечена оценка местоположения метки.

При реализации метода БС оценкой местоположения метки считается центр ячейки-ближайшего соседа, выбранной в соответствии с выражениями (2) и (3) (рис. 6, а). При реализации метода К-БС оценкой местоположения метки считается центр масс фигуры, образованной центрами ячеек-ближайших соседей (рис. 6, б). При реализации метода К-ВБС оценка местоположения метки сдвигается от центра масс в направлении тех ячеек, для которых функция $E(\theta, R_l)$ дает наименьшие значения (рис. 6, в).

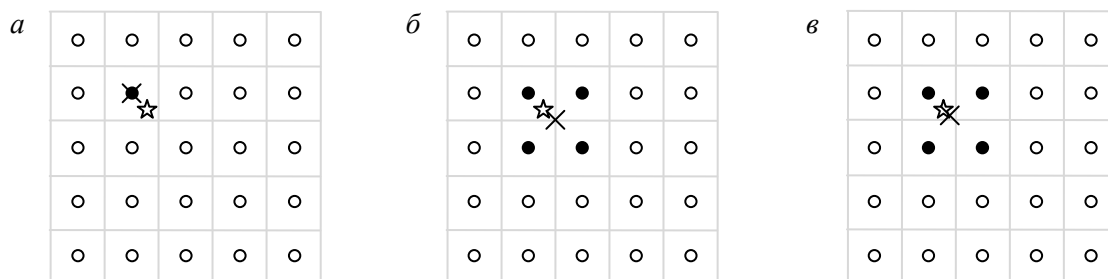


Рис. 6

Рассмотренные методы ближайших соседей основаны на детерминированной модели. Существуют варианты использования этих методов с учетом вероятностных характеристик RSS [25, 26]. В этом случае во время этапа предварительного анализа в каждой ячейке рабочей зоны проводятся измерения, число которых строго больше единицы ($C > 1$). Это позволяет учесть случайный характер измеряемых значений RSS . В дальнейшем осуществляется поиск ячейки рабочей зоны с использованием критерия максимального правдоподобия [25, 26]. Рассмотрим вероятностный метод БС, для которого оценка координат метки определяется следующим выражением [26]:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \text{position} \left[\arg \max_{l \in [1, L]} P(\theta | l) \right], \quad (4)$$

где $P(\theta | l)$ – функция правдоподобия получения вектора θ значений RSS с помощью антенн системы в l -й ячейке рабочей зоны.

В предположении статистической независимости измерений функция $P(\theta | l)$, входящая в (4), определяется как [26]

$$P(\theta | l) = \prod_{n=1}^N p(\theta_n | l, n), \quad (5)$$

где $p(\theta_n | l, n)$ – функция правдоподобия получения значения RSS θ_n с помощью n -й антенны системы в l -й ячейке рабочей зоны.

Функция правдоподобия $p(\theta_n | l, n)$ из выражения (5) может формироваться с помощью гистограммы или через сумму ядерных функций [25]. Во втором случае она задается как [25]

$$p(\theta_n | l, n) = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C k(\theta_n, R_{l,n,c}), \quad (6)$$

где $k(\theta_n, R_{l,n,c})$ – ядерная функция, в качестве которой часто используется гауссовская [25]

$$k(\theta_n, R_{l,n,c}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(\theta_n - R_{l,n,c})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (7)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение, которое обычно выбирается опытным путем по степени зашумленности измерений.

Существует также вариант использования критерия апостериорного максимума [27]. При этом оценка координат метки методом БС определяется как

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \text{position} \left[\arg \max_{l \in [1, L]} P(l | \theta) \right], \quad (8)$$

где $P(l | \theta)$ – апостериорная плотность вероятности расположения метки в l -й ячейке рабочей зоны.

Функция $P(l | \theta)$, входящая в (8), определяется по формуле Байеса:

$$P(l | \theta) = \frac{P(\theta | l)P(l)}{P(\theta)}, \quad (9)$$

где $P(l)$ – априорная плотность вероятности расположения метки в l -й ячейке рабочей зоны; $P(\theta)$ – плотность вероятности получения вектора θ значений RSS с помощью антенн системы.

Таким образом, согласно выражениям (8) и (9), при оценке апостериорного максимума необходимо вычислять функцию правдоподобия $P(\theta | l)$ и априорную плотность вероятности $P(l)$. Плотность вероятности $P(\theta)$ при максимизации можно не рассчитывать, поскольку она не зависит от l . Функция $P(\theta | l)$ определяется по выражениям (5) – (7) с использованием данных из RSS-таблицы. Для определения функции $P(l)$ при использовании итерационной модели могут применяться рекурсивные фильтры. При этом функция $P(l)$ на некоторой итерации t принимается равной функции $P(l | \theta)$ на итерации $t - 1$. На самой первой итерации функция $P(l)$ может быть задана равномерным законом распределения.

В качестве рекурсивных фильтров могут применяться различные модификации фильтра Калмана и фильтра частиц, которые позволяют достигать высокой точности, особенно при локализации меток, расположенных на подвижных объектах [4, 28].

Метод искусственной нейронной сети заключается в обучении сети на достаточно большой выборке значений RSS, полученных на этапе предварительного анализа [15, 29]. После этого, в случае успешного обучения, ИНС сможет выполнять оценку местоположения меток. Обобщенный алгоритм работы системы локализации на базе ИНС выглядит следующим образом [29, 30]:

- 1) проводится этап предварительного анализа рабочей зоны и строится RSS-таблица, которая делится на две подтаблицы из L_1 и L_2 строк соответственно, причем $L_1 + L_2 = L$;
- 2) выбирается структура ИНС и алгоритм обучения ИНС;
- 3) проводится обучение ИНС на основе данных из первой подтаблицы;
- 4) проводится тестирование обученной ИНС с помощью данных из второй подтаблицы, проверяется адекватность результирующих оценок, которые выдает сеть;
- 5) в случае неудовлетворительного соответствия оценок истинным значениям меняется структура ИНС или алгоритм обучения (пункт 2), после чего повторяются пункты 3 и 4;
- б) в случае удовлетворительного соответствия оценок истинным значениям ИНС считается сформированной и начинается рабочий этап процесса локализации, в ходе которого ИНС, при поступлении на ее входы вектора θ значений RSS, формирует на выходах оценку координат метки (\hat{x}, \hat{y}) .

Обычно в качестве ИНС для пространственной локализации используются многослойные перцептроны с одним внутренним слоем, состоящим из 8 – 16 нейронов, причем число входных нейронов пропорционально числу антенн в системе, а число выходных нейронов

равно размерности пространства [14, 29, 30]. В качестве алгоритма обучения ИНС часто используется алгоритм обратного распространения ошибки [14, 29].

Метод машины опорных векторов обычно реализуется с помощью классификационного алгоритма [24, 31]. Суть классификационного метода МОВ состоит в поиске нескольких гиперплоскостей, каждая из которых делит N -мерное пространство измерений Θ векторов измерений θ на две части. При этом каждой из частей пространства измерений Θ ставится в соответствие некоторая область рабочей зоны.

В дальнейшем, если классифицирующие гиперплоскости найдены, то при получении вектора измерений θ от некоторой метки с помощью N антенн системы можно последовательно провести его классификацию в пространстве Θ с помощью каждой из гиперплоскостей. Вследствие соответствия частей пространства Θ областям рабочей зоны, при классификации будет найдена результирующая область рабочей зоны, которая принимается в качестве оценки местоположения метки.

Обобщенный алгоритм метода МОВ выглядит следующим образом [24, 31]:

- 1) рабочая зона делится на несколько областей;
- 2) проводится этап предварительного анализа рабочей зоны и строится *RSS*-таблица, причем каждой позиции, в которой проводились измерения, ставится в соответствие одна из областей рабочей зоны;
- 3) проводится обучение МОВ путем анализа *RSS*-таблицы (определяется необходимое число гиперплоскостей и формируются их параметры, определяющие расположение в пространстве измерений Θ);
- 4) во время рабочего этапа при локализации некоторой метки производится измерение вектора θ значений *RSS* с помощью всех антенн системы;
- 5) проводится классификация вектора θ в пространстве измерений Θ с помощью сформированных гиперплоскостей, после чего определяется соответствующая область рабочей зоны, которая принимается в качестве оценки координат метки (\hat{x}, \hat{y}) .

Рассмотренные методы на базе предварительного анализа рабочей зоны позволяют достичь достаточно высокой точности локализации. Точность при этом главным образом зависит от объема *RSS*-таблицы. Для метода ИНС точность также определяется структурой сети, а для метода МОВ – алгоритмом обучения. Однако построение достаточно большой *RSS*-таблицы с целью повышения точности локализации требует значительных затрат времени. К тому же, собранная информация может быстро устареть из-за изменения обстановки в рабочей зоне. Поэтому для устранения указанных недостатков используются метки-маяки.

Методы на базе меток-маяков

Метки-маяки представляют собой *RFID*-метки, расположенные в заранее известных позициях. Методы локализации на базе меток-маяков можно разделить на два типа: ближайших соседей; интерференции.

Метод ближайших соседей реализуется согласно принципам, описанным ранее, с тем отличием, что в качестве постоянных источников информации для *RSS*-таблицы применяются метки-маяки, равномерно размещаемые в рабочей зоне [3, 6, 32]. При этом этап предварительного анализа исключается, что серьезно снижает временные затраты. При реализации такого подхода точность локализации главным образом определяется числом меток-маяков и характером их размещения в рабочей зоне. Недостатком этого подхода можно считать увеличение времени локализации, вследствие необходимости получения результатов измерений не только от меток на объектах, но и от меток-маяков [32].

Метод интерференции заключается в оценке местоположения объектов локализации путем анализа изменчивости измеренных сигналов от меток-маяков [6]. При этом с помощью антенн системы производится непрерывный мониторинг измерительной информации (например, *RSS*) меток-маяков. Если состояние рабочей зоны остается статичным, то *RSS* сигналов от меток также остаются неизменными [6]. При внесении в рабочую зону локализа-

ции некоторого объекта, значения *RSS* меняются, причем наибольшие изменения происходят в сигналах от тех меток-маяков, которые расположены в непосредственной близости от внесенного объекта. Измерив отличия в *RSS* сигналов от меток до внесения объекта и после и найдя те метки, изменения в *RSS* сигналов которых максимальны, можно определить местоположение этого объекта [6]. Такой метод успешно работает только в случае локализации небольшого числа объектов и не позволяет достигнуть высокой точности. Однако преимущество этого метода заключается в том, что объект локализации может не иметь установленной на него метки, поскольку оценка его местоположения выполняется на основе анализа сигналов от меток-маяков [6].

Сравнительный анализ методов и перспективы их развития

При разработке систем пространственной локализации важной является задача выбора вида измерительной информации и метода локализации, исходя из требований по точности и сложности реализации, а также других характеристик, определяемых предполагаемой областью применения.

В табл. 2 приведены основные характеристики рассмотренных методов локализации объектов внутри помещений на основе *RFID*-технологий. Из анализа таблицы можно сделать вывод, что наибольшую точность локализации обеспечивают методы трилатерации, триангуляции, ближайших соседей, искусственной нейронной сети и машины опорных векторов. Поэтому следует ожидать повышения интереса к этим методам в связи с созданием специализированных *RFID*-систем высокоточной локализации, позволяющих выполнять поиск множества малых объектов внутри помещений.

Наиболее простыми по конструктивной и программной реализации являются зонный метод, метод трилатерации (при использовании *RSS* измерительной информации) и метод интерференции. Эти методы особенно перспективны при решении тех задач, когда высокая точность не требуется, что может возникать, например, при локализации объектов в зданиях с точностью до помещения.

Таблица 2

Группа	Метод	Измерительная информация	Характеристики
зонные	зонный	факт наличия ответа	точность локализации: от низкой до высокой (определяется характером расположения антенн); сложность реализации: низкая
геометрические	трилатерации	<i>RSS</i> , <i>TOA</i> , <i>POA</i> , отношение числа принятых ответов к общему числу запросов	точность локализации: средняя или высокая; сложность реализации: низкая (при использовании <i>RSS</i>)
	мультилатерации	<i>TDOA</i>	точность локализации: средняя; сложность реализации: средняя (требуется временная синхронизация считывателей)
	триангуляции	<i>AOA</i>	точность локализации: средняя или высокая; сложность реализации: высокая (требуется специальные антенные системы)
предварительный анализ рабочей зоны	ближайших соседей	обычно <i>RSS</i>	точность локализации: средняя или высокая; сложность реализации: средняя; особенности: требуется предварительный анализ рабочей зоны
	ИНС		
	МОВ		
метки-маяки	ближайших соседей		точность локализации: средняя или высокая; сложность реализации: средняя
	интерференции		

Дальнейшим развитием высокоточных методов пространственной *RFID*-локализации видится использование нескольких видов измерительной информации с дальнейшей ее обработкой на основе различных алгоритмов. При этом результирующая оценка местоположения объектов может находиться как среднее значение оценок, полученных в ходе реализации соответствующих алгоритмов. При усреднении могут использоваться весовые коэффициенты для учета степени достоверности результатов каждого из алгоритмов.

Выводы

Проведена классификация видов измерительной информации, при обработке которой осуществляется пространственная локализация *RFID*-меток. Выполнен аналитический обзор и классификация методов пространственной локализации, при этом основное внимание уделено двумерной локализации. Проведено сравнение методов локализации с позиций сложности реализации и обеспечиваемой ими точности. Для увеличения точности локализации предлагается использовать комбинированные методы, использующие несколько видов измерительной информации, и, реализующие различные алгоритмы обработки с последующим усреднением результатов.

Список литературы: 1. *Banks J., Hanny D., Pachano M.A., Thompson L.G.* RFID applied. Hoboken, NJ, USA : Wiley, 2007. – 528 p. 2. *Razavi S.N. et al.* Models for Locating RFID Nodes // Research Opportunities in Radio Frequency Identification Transportation Applications. – 2006. – P. 43-52. 3. *Sanpechuda T., Kovavisaruch L.* A review of RFID localization: Applications and techniques // ECTI-CON 2008. 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. – 2008. – Vol.2. – P. 769-772. 4. *Zhou J., Shi J.* RFID localization algorithms and applications—a review // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2009. – Vol.20. – No 6. – P. 695-707. 5. *Roxin A., Gaber J., Wack M., Nait-sidi-moh A.* Survey of wireless geolocation techniques // Globecom Workshops, 2007 IEEE. – 2007. – P. 1-9. 6. *Ni L.M., Zhang D., Souryal M.R.* RFID-based localization and tracking technologies // Wireless Communications, IEEE. – 2011. – Vol.18. – No 2. – P. 45-51. 7. *Финкенцеллер К.* RFID-технологии. Справочное пособие; пер. с нем. Н.М. Союнханова. – М. : Додэка-XXI, 2010. – 496 с. 8. *Wu J.* Three-dimensional indoor RFID localization system : dissert. ... Doctor of Philosophy in Engineering. – The Graduate College at the University of Nebraska, 2012. – 199 p. 9. *Khedo K.K. et al.* Overlapping Zone Partitioning Localisation Technique for RFID // International Journal of UbiComp. – 2010. – Vol.1. – No 2. – P. 20-32. 10. *Bouet M., Pujolle G.* A range-free 3-D localization method for RFID tags based on virtual landmarks // PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. – 2008. – P. 1-5. 11. *Валеев М.А.* Городская система позиционирования, мониторинга и диспетчеризации подвижных объектов на основе метода перекрывающихся зон : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.04. – Казань, 2002. – 161 с. 12. *Miles S.B., Sarma S.E., Williams J.R.* RFID technology and applications. – New York, USA : Cambridge University Press, 2008. – 242 p. 13. *Bolic M., Simplot-Ryl D., Stojmenovic I.* RFID Systems: Research Trends and Challenges. – Chichester : Wiley, 2010. – 576 p. 14. *Zekavat R., Buehrer R.M.* Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances. – Hoboken, NJ, USA : Wiley, 2012. – 1264 p. 15. *Liu H., Darabi H., Banerjee P., Liu J.* Survey of wireless indoor positioning techniques and systems // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews. – 2007. – Vol.37. – No 6. – P. 1067-1080. 16. *Nikitin P.V. et al.* Phase based spatial identification of UHF RFID tags // IEEE International Conference on RFID, 2010. – 2010. – P. 102-109. 17. *Choi J.S.* Accurate and cost efficient object localization using passive UHF RFID : dissert. ... Doctor of Philosophy in Electrical Engineering. – The University of Texas at Arlington, 2011. – 134 p. 18. *Zhao Y., Cheung S., Ni L.M.* LocaToR: Locating Passive RFID Tags with the Relative Neighborhood Graph // 2010 IEEE/IFIP 8th International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing. – 2010. – P. 154-161. 19. *Huang Y., Brennan P.V., Seeds A.* Active RFID location system based on time-difference measurement using a linear FM chirp tag signal // PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. – 2008. – P. 1-5. 20. *Bouet M., Santos Aldri L. dos.* RFID tags: Positioning principles and localization techniques // Wireless Days, 2008. WD'08. 1st IFIP. – 2008. – P. 1-5. 21. *Chen Y., Francisco J.-A., Trappe W., Martin R.P.* A practical approach to landmark deployment for indoor localization // 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. – 2006. – Vol.1. – P. 365-373. 22. *Gustafsson F., Gunnarsson F.* Mobile positioning using wireless networks: possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measure-

ments // Signal Processing Magazine, IEEE. – 2005. – Vol.22. – No 4. – P. 41-53. 23. *Быбка А.И., Дерев А.В., Зеленин А.Н.* Особенности позиционирования абонентов в сети GSM // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Т. 6/2. – № 42. – С. 61-63. 24. *Brunato M., Battiti R.* Statistical learning theory for location fingerprinting in wireless LANs // Computer Networks. – 2005. – Vol.47. – No 6. – P. 825-845. 25. *Roos T. et al.* A probabilistic approach to WLAN user location estimation // International Journal of Wireless Information Networks. – 2002. – Vol.9. – No 3. – P. 155-164. 26. *Youssef M., Agrawala A.* The Horus WLAN location determination system // Wireless Networks. – 2008. – Vol.14. – No 3. – P. 357-374. 27. *Chan M., Zhang X.* Leveled Indoor Localization Algorithms Based on Passive RFID // In Proc. of The 2012 Int'l Conf. on Wireless Networks (ICWN'12), Las Vegas, July 16-19, 2012. – 2012. – P. 275-281. 28. *Yang P., Wu W., Moniri M., Chibelushi C.C.* SLAM algorithm for 2D object trajectory tracking based on RFID passive tags // 2008 IEEE International Conference on RFID. – 2008. – P. 165-172. 29. *Caceres M., Sottile F., Spirito M.A.* WLAN-based real time vehicle locating system // Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th. – 2009. – P. 2165-2169. 30. *Fang S.-H., Lin T.-N.* Indoor location system based on discriminant-adaptive neural network in IEEE 802.11 environments // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2008. – Vol.19. – No 11. – P. 1973-1978. 31. *Zhen Z.-N., Jia Q.-S., Song C., Guan X.* An indoor localization algorithm for lighting control using RFID // Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE. – 2008. – P. 1-6. 32. *Xue J.-B., Wang W.-H., Zhang T.* An Active RFID Indoor Positioning System Mechanism Based on Sleep Mode // Proceedings of the International Conference on Information Engineering and Applications 2012. – 2013. – P. 733-740.

*Севастопольский национальный
технический университет*

Поступила в редколлегию 12.02.2013