

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ, РАДІОЛОКАЦІЯ, РАДІОНАВІГАЦІЯ ТА ЕЛЕКТРОАКУСТИКА

УДК 621.396.96

ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ТРИЛАТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ RFID-МЕТОК НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ РАССТОЯНИЕ-МОЩНОСТЬ

*Гимпилевич Ю. Б., д.т.н., профессор; Савочкин Д. А., аспирант
Севастопольский национальный технический университет,
Севастополь, Украина*

ELLIPTICAL MODIFICATION OF TRILATERATION METHOD BASED ON LINEAR
MODEL OF DISTANCE VS POWER RATIO FOR RFID TAGS SPATIAL LOCALIZATION

*Gimpilevich Yu. B., Doctor of Science (Technics);
Savochkin D. A., Postgraduate Student
Sevastopol National Technical University, Sevastopol, Ukraine*

Введение

Актуальной задачей настоящего времени является бесконтактная пространственная двумерная локализация объектов в закрытых помещениях. Для решения такой задачи могут применяться системы радиочастотной идентификации (*RFID*-системы). *RFID*-системы позволяют определять местоположение специальных устройств (активных или пассивных *RFID*-меток), расположенных на объектах локализации [1]. При этом для вычисления оценок местоположения объектов выполняется обработка измерительной информации, получаемой от меток. В качестве измерительной информации обычно используются уровни мощности ответных сигналов, излучаемых метками в ответ на запросные сигналы антенн системы.

Одним из известных методов пространственной локализации является трилатерационный (дальномерный) метод [2]. В ходе его реализации для каждой *RFID*-метки строятся окружности положения по результатам измерений и находится пересечение этих окружностей, которое принимается оценкой местоположения метки. Важным с точки зрения обеспечения приемлемого уровня точности является вопрос выбора модели зависимости расстояния между антенной и меткой от уровня ответного сигнала метки. Существуют различные подходы к построению такой модели, среди которых выделим следующие: электродинамическое моделирование [3]; проведение предварительного этапа сбора измерительной информации от *RFID*-меток в зоне локализации [3]; размещение дополнительных меток-

маяков в зоне локализации [4]. Недостатком первого подхода является его низкая точность для случаев локализации объектов в закрытых помещениях, характеризующихся существенной многолучевостью в распространении сигналов. Второй подход позволяет повысить точность модели в связи с учетом реальных особенностей в распространении сигналов в различных областях зоны локализации, однако требует выполнения достаточно трудоемкого процесса сбора данных. Третий подход позволяет исключить предварительный сбор данных и выполнять автоматическое уточнение модели на базе анализа измерительной информации от меток-маяков, расположенных в известных позициях, однако его недостатком является увеличение числа необходимых *RFID*-меток, что приводит к росту стоимости всей системы.

Для устранения недостатков вышеперечисленных подходов необходимо разработать такую модель зависимости расстояние-мощность, которая сможет использоваться в *RFID*-системах, предназначенных к работе в закрытых помещениях, без необходимости ее уточнения и будет обладать приемлемой точностью. Помимо этого разрабатываемая модель должна учитывать эффект использования направленных антенн, который заключается в искажении фигур положения объектов локализации к эллиптической форме. Мы полагаем, что при локализации *RFID*-меток с малой дальностью действия (единицы метров) разрабатываемая модель может быть принята линейной без существенного ухудшения в точности, а эффект применения направленных антенн может быть учтен с помощью использования эллиптических коэффициентов.

В связи с вышесказанным целью настоящей работы является разработка эллиптической модификации трилатерационного метода на основе линейной модели зависимости расстояние-мощность для применения в *RFID*-системах, а также экспериментальное сравнение разработанного метода в плане обеспечиваемой точности локализации с классическим вариантом, основанным на модели, формируемой путем анализа предварительно собранной измерительной информации от *RFID*-меток.

Теоретическая часть

При реализации процедуры трилатерации для вычисления оценки (\hat{x}, \hat{y}) местоположения некоторой *RFID*-метки в двумерной зоне локализации используется метод наименьших квадратов. В качестве оценки (\hat{x}, \hat{y}) местоположения принимается такая точка в зоне локализации, для которой функция ошибки минимальна [5]:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \min_{x, y} \sum_{i \in A} [d_i - d_i'(p_i)]^2, \quad (1)$$

где A — множество номеров антенн, принявших сигналы от метки; d_i — расстояние между i -й антенной и точкой (x, y) текущей итерации цикла

вычисления оценки; $d_i'(p_i)$ — зависимость расстояния между i -й антенной и меткой от уровня p_i мощности сигнала метки, полученного с помощью i -й антенны.

При этом расстояние d_i описывается следующим выражением:

$$d_i = \sqrt{(a_{i,x} - x)^2 + (a_{i,y} - y)^2}, \quad (2)$$

где $(a_{i,x}, a_{i,y})$ — двумерные координаты точки размещения i -й антенны.

Для задания зависимостей $d_i'(p_i)$ обычно используются различные нелинейные модели, однако, мы полагаем, что при локализации пассивных *RFID*-меток, предназначенных к работе на малых дистанциях, существенная нелинейность не проявляется. Поэтому будем использовать линейную аппроксимацию зависимостей $d_i'(p_i)$. Помимо этого будем выполнять сдвиг результатов измерений на некоторую величину p_{\max} , имеющую смысл максимально возможного уровня мощности ответных сигналов от *RFID*-меток. Также будем проводить нормирование сдвинутых результатов измерений относительно сдвинутых результатов некоторой опорной антенны, с помощью которой от локализующейся в текущий момент времени метки получен максимальный уровень p_0 ответных сигналов. При этом номер опорной антенны будем обозначать в виде A_0 . С учетом сказанного перепишем выражение (1) для оценки (\hat{x}, \hat{y}) местоположения некоторой *RFID*-метки следующим образом:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \min_{x,y} \sum_{i \in A \setminus A_0} \left(d_i - d_0 \frac{p_{\max} - p_i}{p_{\max} - p_0} \right)^2, \quad (3)$$

где d_0 — расстояние между опорной антенной и точкой (x, y) .

Отметим, что выражение (3) получено в предположении использования ненаправленных антенн, формирующих круговые фигуры положения (рис. 1, а). Однако в ряде случаев в *RFID*-системах могут применяться более направленные антенны, при использовании которых форма фигур положения может принимать эллиптический характер (рис. 1, б). Учесть такой эффект можно введя в выражение (3) поправочные эллиптические коэффициенты:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \min_{x,y} \sum_{i \in A \setminus A_0} \left[d_i - d_0 \frac{p_{\max} - p_i}{p_{\max} - p_0} \frac{k(\varphi_1)}{k(\varphi_0)} \right]^2, \quad (4)$$

где $k(\varphi_i)$ — эллиптический коэффициент для азимута φ_i на точку (x, y) от точки размещения i -й антенны; $k(\varphi_0)$ — эллиптический коэффициент для азимута φ_0 на точку (x, y) от точки размещения опорной антенны.

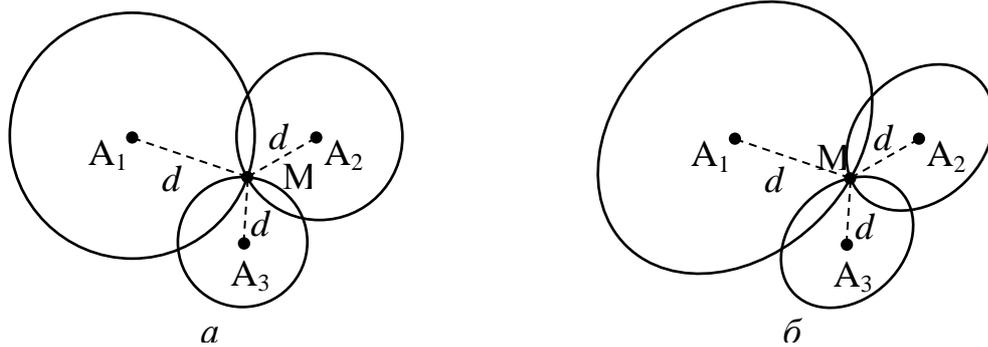


Рис. 1. Пример расположения трех антенн (A_1, A_2, A_3) и $RFID$ -метки (M): ненаправленные антенны и окружности положения (а); слабонаправленные антенны и эллипсы положения (б)

Эллиптический коэффициент $k(\varphi)$ для азимута φ следует рассчитывать по формуле

$$k(\varphi) = \frac{h\sqrt{2}}{\sqrt{(1-h^2)\cos(2\varphi-2\psi)+h^2+1}}, \quad (5)$$

где h — отношение большой и малой полуосей эллипсов положения; ψ — угол поворота эллипсов.

Известной проблемой трилатерационного метода, характерной для локализации в двумерном пространстве, является его неспособность в общем случае к формированию однозначных оценок местоположения для тех $RFID$ -меток, ответные сигналы от которых получены с помощью одной или двух антенн. Для решения этой проблемы разработаны следующие эвристики.

Для случая приема ответных сигналов от $RFID$ -метки одной антенной можно выделить два варианта формирования оценки. В случае расположения антенны с краю зоны локализации оценкой местоположения метки выбирается точка на отрезке, соединяющем точку размещения антенны и точку на краю зоны локализации максимально удаленную от прочих антенн. При этом уровень мощности сигнала от метки определяет положение точки на отрезке (чем больше уровень, тем ближе оценка к точке размещения антенны). В случае расположения антенны не с краю зоны локализации оценкой местоположения метки для минимизации ошибки следует выбирать точку размещения антенны.

Для случая приема ответных сигналов от $RFID$ -метки двумя антеннами в качестве оценки ее местоположения необходимо выбирать точку на отрезке, соединяющем точки размещения этих двух антенн. При этом уровни мощности сигналов определяют положение точки на отрезке (оценка ближе к точке размещения той антенны, с помощью которой получен сигнал с большим уровнем).

Экспериментальная часть

С целью проверки эффективности предложенных модификаций трилатерационного метода пространственной локализации выполнено его экспериментальное исследование на базе изготовленной *RFID*-системы. Используемая система состояла из ридера *Mercurybe* компании *ThingMagic*, набора из 16 слабонаправленных патч-антенн линейной поляризации, предназначенных для работы в полосе частот 902...928 МГц и набора из 144 пассивных *RFID*-меток *ALN-9654* компании *Alien Technology*. Эксперимент проводился в закрытом помещении с размерами зоны локализации 5 м × 5 м. При этом антенны размещались под потолком помещения в 4 ряда по 4 штуки на высоте 2,6 м, а метки размещались на специальных подставках в 12 рядов по 12 штук. На рис. 2 представлена фотография части экспериментальной установки, а на рис. 3 — схема размещения антенн и меток в зоне локализации.



Рис. 2. Фотография части экспериментальной установки

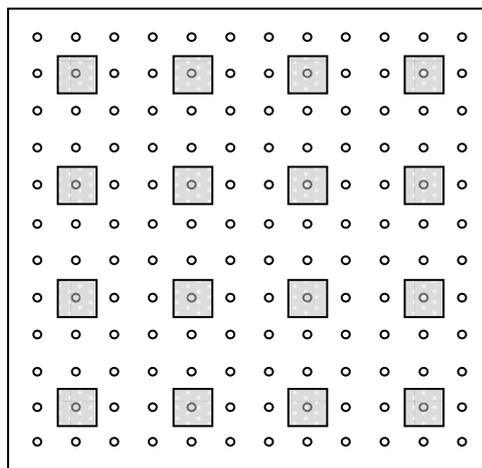


Рис. 3. Схема размещения антенн (прямоугольники) и *RFID*-меток (окружности) в зоне локализации

Исследования проводились для четырех вариантов высоты размещения меток: 0,4 м; 0,7 м; 1,0 м; 1,2 м. Также рассматривались различные варианты величины уровня мощности запросных сигналов антенн: 20 дБм; 21 дБм; 22 дБм.

В ходе предварительной калибровки системы было определено граничное значение уровней ответных сигналов от *RFID*-меток, используемое в выражении (3): $p_{\max} = -55$ дБм. Также было установлено, что отношение большой и малой полуосей эллипсов положения для выражения (5) может быть приблизительно записано как $h = 1,5$. При этом угол поворота эллипсов задавался как $\psi = 45^\circ$.

С целью сравнения разработанного метода с классическим была сформирована аппроксимирующая функция для зависимостей $d_i'(p_i)$. Аналогично работе [6] мы воспользовались моделью полиномиальной регрессии.

Однако в отличие от авторов этой работы, выполнявших построение регрессионной модели для каждой из осей x и y отдельно с целью учета эллиптичности фигур положения, мы ввели переменную азимута φ_i на точку (x, y) от точки размещения i -й антенны в функцию $d'_i(p_i)$:

$$d'_i(p_i, \varphi_i) = a_0 + a_1 p_i + a_2 p_i^2 + a_3 p_i^3 + a_4 p_i k(\varphi_i), \quad (6)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 — коэффициенты регрессии.

После сбора измерительной информации от *RFID*-меток в различных точках зоны локализации были вычислены коэффициенты регрессии (для этого использовалась программная библиотека *Statsample* [7]): $a_0 = 4308,2$, $a_1 = 189,30$, $a_2 = 2,6498$, $a_3 = 0,011657$, $a_4 = -0,81375$. При этом уровни мощности p_i выражались в дБм, а расстояния d'_i в сантиметрах. Коэффициент корреляции реальных расстояний и рассчитанных по формуле (6) значений составил величину $K = 0,65$ (без учета эллиптичности фигур положения — $K = 0,60$).

После этого для каждой *RFID*-метки для каждого варианта высоты размещения меток и уровня мощности запросных сигналов антенн системы были рассчитаны четыре оценки местоположения:

- на базе нелинейной модели без учета эллиптичности фигур положения;
- на базе нелинейной модели с учетом эллиптичности фигур положения;
- на базе линейной модели без учета эллиптичности фигур положения;
- на базе линейной модели с учетом эллиптичности фигур положения.

После вычисления оценок местоположения меток были рассчитаны ошибки локализации в виде расстояний между полученными оценками и истинными значениями местоположения. Основные параметры распределения ошибки локализации *RFID*-меток (среднее и максимальное значения) для всех вариантов высоты размещения меток и уровня мощности запросных сигналов антенн сведены в таблицу 1.

Анализируя результаты, представленные в таблице 1, можно отметить, что разработанная линейная модель зависимостей расстояние-мощность позволила добиться точности локализации, сравнимой с классическим подходом (средняя ошибка локализации увеличивается в среднем на 1,6 см, а максимальная ошибка локализации увеличивается в среднем на 7,6 см). При этом учет эллиптичности фигур положения позволил уменьшить среднюю ошибку локализации для 18 из 24 случаев высот размещения меток и уровней мощности запросных сигналов.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об успешности разработанной модификации трилатерационного метода, приводящей к неко-

тому ухудшенню в точності, но дозволяючій виключити попередній етап збору вимірної інформації від *RFID*-меток.

Таблиця 1

Основні параметри розподілу помилки локалізації *RFID*-меток

Уровень мощности запросных сигналов, дБм	Модель зависимости расстояния-мощность	Фигуры положения	Высота размещения <i>RFID</i> -меток, м									
			0,4	0,7	1,0	1,2	среднее	0,4	0,7	1,0	1,2	среднее
			Средняя ошибка локализации, см					Максимальная ошибка локализации, см				
20	нелинейная	окружности	34,1	68,2	41,3	44,8	47,1	126,5	178,9	116,6	125,2	136,8
		эллипсы	34,3	67,7	40,4	44,7	46,8	126,5	178,9	116,6	120,5	135,6
	линейная	окружности	33,5	69,8	43,4	46,0	48,2	126,5	178,9	116,6	137,9	140,0
		эллипсы	33,1	68,6	41,9	44,8	47,1	126,5	178,9	116,6	137,9	140,0
21	нелинейная	окружности	37,1	63,2	44,8	50,7	49,0	179,8	164,9	136,0	147,5	157,1
		эллипсы	37,8	63,1	42,6	49,9	48,4	157,5	164,9	137,9	141,8	150,5
	линейная	окружности	35,2	67,1	48,8	51,9	50,8	153,1	164,9	139,8	157,2	153,8
		эллипсы	35,2	66,3	45,5	49,9	49,2	162,0	164,9	109,3	157,2	148,4
22	нелинейная	окружности	37,7	65,2	42,3	49,9	48,8	193,1	191,2	105,4	125,1	153,7
		эллипсы	38,4	65,3	40,8	48,1	48,2	162,0	199,2	115,6	121,1	149,5
	линейная	окружности	37,4	68,3	48,5	53,6	52,0	162,0	239,2	132,0	145,6	169,7
		эллипсы	37,5	68,2	45,7	51,5	50,7	166,4	262,9	132,0	145,6	176,7

Выводы

Разработана модификация трилатерационного метода пространственной локализации на основе линейной модели зависимости расстояние-мощность для применения в *RFID*-системах. При разработке модели учтен эффект использования направленных антенн, заключающийся в искажении окружностей положения к эллиптической форме.

Проведено экспериментальное сравнение разработанного метода в плане обеспечиваемой точности локализации с классическим вариантом, основанным на модели, формируемой путем анализа предварительно собранной измерительной информации от *RFID*-меток. В результате сравнения отмечено, что средняя ошибка локализации разработанного метода превышает ошибку, полученную при реализации классического подхода, на 1,6 см. Полученные результаты позволяют сделать вывод об успешности разработанного метода, позволяющего исключить трудоемкий этап сбора данных, и приводящего к достаточно малому ухудшению в точности.

Литература

1. Sanpechuda T. A review of RFID localization: Applications and techniques / T. Sanpechuda, L. Kovavisaruch // ECTI-CON 2008 ; 5th International Conference. — 2008. — Vol. 2. — P. 769—772. [\[CrossRef\]](#)
2. Roxin A. Survey of wireless geolocation techniques / A. Roxin, J. Gaber, M. Wack, A. Nait-Sidi-Moh // Globecom Workshops. — 2007. — P. 1—9. [\[CrossRef\]](#)
3. Zekavat R. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances / R. Zekavat, R. M. Buehrer. — New York : Wiley, 2011. — 1264 p. — ISBN 047-094-342-4.

4. Barsocchi P. A novel approach to indoor RSSI localization by automatic calibration of the wireless propagation model / P. Barsocchi, S. Lenzi, S. Chessa, G. Giunta // Vehicular Technology Conference. — 2009. — P. 1—5. [[CrossRef](#)]

5. Vu H.L. A simple method for positioning and tracking in wireless sensor networks / H.L. Vu, T.T. Tran, M. De Luca // Control, Automation, Robotics and Vision ; 10th International Conference. — 2008. — P. 229—233. [[CrossRef](#)]

6. Fortin-Simard D. Accurate passive RFID localization system for smart homes / D. Fortin-Simard, K. Bouchard, S. Gaboury, B. Bouchard, A. Bouzouane // Networked Embedded Systems for Every Application (NESEA) ; IEEE 3rd International Conference. — 2012. — P. 1—8. [[CrossRef](#)]

7. Statsample: Statistic Library for Ruby [Электронный ресурс] / Claudio Bustos — Режим доступу: <http://ruby-statsample.rubyforge.org>. — Название с экрана.

References

1. Sanpechuda T., Kovavisaruch L. (2008) A review of RFID localization: Applications and techniques. *ECTI-CON 2008*, Vol. 2, pp. 769–772. doi:[10.1109/ECTICON.2008.4600544](https://doi.org/10.1109/ECTICON.2008.4600544)

2. Roxin A., Gaber J., Wack M., Nait-Sidi-Moh A. (2007) Survey of wireless geolocation techniques. *Globecom Workshops*, pp. 1-9. doi: [10.1109/GLOCOMW.2007.4437809](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2007.4437809)

3. Zekavat R., Buehrer R. M. (2011) *Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances*, New York, Wiley, 1264 p.

4. Barsocchi P., Lenzi S., Chessa S., Giunta G. (2009) A novel approach to indoor RSSI localization by automatic calibration of the wireless propagation model. *Vehicular Technology Conference*, pp. 1–5. doi: [10.1109/VETECS.2009.5073315](https://doi.org/10.1109/VETECS.2009.5073315)

5. Vu H.L., Vu H.L., Tran T.T., De Luca M. (2008) A simple method for positioning and tracking in wireless sensor networks. *Control, Automation, Robotics and Vision – 10th International Conference*, pp. 229–233. doi: [10.1109/ICARCV.2008.4795523](https://doi.org/10.1109/ICARCV.2008.4795523)

6. Fortin-Simard D., Bouchard K., Gaboury S., Bouchard B., Bouzouane A. (2012) Accurate passive RFID localization system for smart homes. *Networked Embedded Systems for Every Application (NESEA)*, pp. 1–8. doi: [10.1109/NESEA.2012.6474010](https://doi.org/10.1109/NESEA.2012.6474010)

7. Bustos C. Statsample: Statistic Library for Ruby. Available at: <http://ruby-statsample.rubyforge.org>. (Accessed 01 Dec 2013)

Гімнілевич Ю. Б., Савочкін Д. О. Еліптична модифікація трилатераційного методу просторової локалізації RFID-міток на основі лінійної моделі залежності відстань-потужність. Представлена еліптична модифікація трилатераційного методу просторової локалізації RFID-міток на основі лінійної моделі залежності відстань-потужність. Проведено експериментальне дослідження розробленого методу. Визначено, що запропонований метод характеризується дещо більшою порівняно з класичним варіантом середньою помилкою локалізації, однак дозволяє виключити попередній етап збору вимірювальної інформації від RFID-міток.

Ключові слова: RFID, просторова локалізація, позиціонування, еліптична трилатерація, далекомірний метод.

Гимпиевич Ю. Б., Савочкин Д. А. Эллиптическая модификация трилатерационного метода пространственной локализации RFID-меток на основе линейной модели зависимости расстояние-мощность. Представлена эллиптическая модификация трилатерационного метода пространственной локализации RFID-меток на основе линейной модели зависимости расстояние-мощность. Проведено экспериментальное исследование разработанного метода. Определено, что предложенный метод характеризуется несколько большей по сравнению с классическим вариантом средней

ошибкой локализации, однако позволяет исключить предварительный этап сбора измерительной информации от RFID-меток.

Ключевые слова: RFID, пространственная локализация, позиционирование, эллиптическая трилатерация, дальномерный метод.

Gimpilevich Yu. B., Savochkin D. A. **Elliptical modification of trilateration method based on linear model of distance vs power ratio for RFID tags spatial localization.**

Introduction. Radio-frequency identification (RFID) systems can be applied for a 2D spatial localization of objects in indoor spaces. Implementing the known localization method of trilateration one needs to build a model of ratio of distance between antenna and RFID tag versus power level of tag response signal. To maximize the accuracy of the model, one needs to collect measurement data from RFID tags placed at known positions. Due to the labor intensity of this process we aim to develop an alternative modification of elliptical trilateration method resulting in elimination of the preliminary data collecting stage.

Theory part. We propose to use a linear model of distance vs power ratio for localization of passive RFID tags with small read ranges. Additionally, our model takes into account the possible ellipticity of position figures which happens because of antennas directivity. Also we propose some heuristics for solving the estimates ambiguity problem. It arises when response signals from RFID tags are received by one or two antennas.

Experimental part. We carried out the experimental analysis of the proposed trilateration variant using the previously developed RFID system in the 5 m × 5 m localization field. During the experiment, we compared our variant with a classical trilateration which was based on the polynomial model of distance vs power ratio formed by analyzing preliminarily gathered measurement data from RFID tags. The comparison indicated that our variant had a bigger by 1.6 cm mean localization error. Furthermore, taking into account ellipticity of position figures resulted in decrease of localization error for 18 of the 24 analyzed cases.

Conclusions. It was determined that the proposed trilateration modification produced a slightly bigger mean localization error compared to the classical variant of trilateration. However, our approach allows one to eliminate the preliminary labor-intensive stage of collecting measurement data from RFID tags.

Keywords: RFID, spatial localization, positioning, elliptical trilateration.