

viceAnywhere не является особо эффективным. При $A = 3$ значительной эффективности можно достичь при $\mu \rightarrow 0$ и $K \rightarrow N$, т.е. уменьшая время анализа результатов и увеличивая количество автоматизированных тестов.

Таким образом, задача по построению эффективных процедур автоматизации тестирования ПО для МПК сводится к разработке методологии, которая позволила бы:

- Сместить акценты в процессе автоматизации с «интеграции в существующие средства тестирования Desktop-приложений» в сторону автоматизации на целевом устройстве (МПК).
- Разрабатывать тестовые скрипты платформи-независимо.
- Уменьшить время проверки результатов тестирования.

При этом необходимо последовательное выполнение следующих шагов:

- Исследование существующих операционных систем, поддерживаемых МП комплексами.
- Нахождение параметров разработки инструмента

автоматизации, достаточных для устранения рассмотренных недостатков.

- Оценка параметров разработанного инструмента в сравнении с уже существующими решениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канер К., Фолк Д., Нгуен Енг Кек Тестирование программного обеспечения. Фундаментальные концепции менеджмента бизнес-приложений. – М.: ДиаСофт, 2001. 544 с. (ISBN 966-7393-87-9, 1-85032-847-1).
2. Сеницын С.В., Налютин Н.Ю. Верификация программного обеспечения. – М.: МИФИ, 2006. 157 с.

Хатько Евгений Евгеньевич
аспирант, Московский Физико-Технический институт

Evgeniy.khatko@gmail.com

Филиппов Владимир Александрович,
канд. техн. наук, профессор МИЭМ, МФТИ.
filbob@infoline.su

А.С. Восков, Р.О. Курпатов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Рассмотрены различные методы определения расстояния между узлами беспроводных сенсорных сетей (IEEE 802.15.4), использующие радиочастотные каналы для передачи сигнала. Исследованы алгоритмы обработки и анализа радиосигналов для каждого метода. Произведен сравнительный анализ методов локализации по ключевым характеристикам: точность, уровень энергопотребления, шумовая характеристика.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, локализация

L.S. Voskov, O.R. Kurpatov

COMPARATIVE ANALYSIS OF LOCALIZATION METHODS FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

In this paper considered different ranging methods for localization purpose in Wireless Sensor Networks (IEEE 802.15.4). Researched signal processing and analysis algorithms for each localization method. A comparative analysis of methods carried out on key characteristics: accuracy, energy consumption, noise performance.

Keywords: wireless sensor network, localization

Введение

Сенсорные сети основаны на современных сетевых технологиях и являются продуктом эволюционного развития беспроводных сетей. Их основные элементы – сенсорные микрокомпьютеры, – являясь полностью автономными, умеют автоматически выстраивать распределенную беспроводную сеть и передавать различную информацию от сенсоров путём нахождения друг друга на

расстоянии до нескольких километров. На данный момент большинство производимых сенсоров имеют встроенные акселерометры, датчики температуры, освещенности и влажности. Также они имеют интерфейсы для внешних подключений, что может расширить и без того богатые функциональные возможности этих устройств.

Обладая высоким функциональным потенциалом, сенсорные сети находят все более широкое при-

менение в различных областях жизнедеятельности: в медицине, автопромышленности, при создании интеллектуальных зданий, для мониторинга окружающей среды и т.д. Но вне зависимости от того, для каких целей используется технология сенсорных сетей, помимо основных величин, снимаемых встроенными датчиками, требуется предоставлять пользователю информацию о местоположении самих сенсоров в пространстве (локализация сенсоров). Это очень важно, например, при эксплуатации различных систем безопасности или систем контроля боевых действий, когда необходимо установить взаимосвязь между событием, которое зафиксировал сенсорный датчик, и местом, где это событие произошло. После обработки этой информации и предоставления ее в графическом виде, пользователь данной системы может принимать важные решения.

Существует множество методов для решения проблемы локализации в сенсорных сетях. Многие из них с увеличением количества дополнительных аппаратных средств и изощренности используемых технологий повышают точность поиска истинного положения сенсоров, но усложняют этот процесс в целом и приводят к увеличению потребления электроэнергии встроенных источников питания, а также приводят к дополнительным финансовым затратам.

В этой статье рассматриваются различные методы оценки расстояний между сенсорными узлами, использующие радиочастотные (RF) измерения. Это наиболее эффективные методы локализации элементов сенсорных сетей, которые не требуют вспомогательного оборудования и обходятся встроенными радиопередающими средствами. Другие методы позиционирования (ультразвуковой, звуковой, световой), на наш взгляд, нецелесообразно рассматривать ввиду больших накладных расходов и трудности их внедрения в сенсорных сетях.

Локализация по уровню силы сигнала (RSSI)

Радиочастотный метод определения расстояния между объектами по силе сигнала RSSI используется во многих системах как суррогат процесса позиционирования. В открытом пространстве мощность радиочастотного сигнала может быть рассчитана с помощью формулы Фриса:

$$P_{rx} = \frac{P_{tx}}{(4\pi d/\lambda)^2}$$

Соответственно, зная мощность полученного радиосигнала, вычисляемую из показателя уровня силы сигнала, можно вычислить расстояние между объектами

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{tx}}{P_{rx}}}$$

где $\lambda = c / \beta_f$ – скорость света (3×10^8 м/с), β_f – частота радиоканала.

Мощность полученного сигнала убывает с увеличением дальности в квадратичной зависимости – это основная связь между RSSI и расстоянием. При попытке локализации объектов в среде многолучевого распространения можно столкнуться с конструктивной и деструктивной интерференцией, что в данном случае приведет к тому, что позиция объекта не будет совпадать с соответствующей мощностью сигнала [4]. Этот эффект также зависит от частоты, так что при различных несущих частотах может появиться несоответствие результата. Ошибка при подсчете расстояния обычно пропорциональна самому расстоянию, так что на маленьких расстояниях погрешности могут быть в пределах метра.

Большинство радиопередатчиков дают возможность работы с индикатором силы полученного сигнала RSSI, и эта величина доступна пользователю без требования дополнительных аппаратных средств или издержек электроэнергии, что объясняет популярность этого технического приема.

Некоторые системы позиционирования на основе силы сигнала используют так называемую технику «фингерпринтинга» (метод «отпечатков пальцев»), отличающуюся от обычного определения местоположения объекта по RSSI повышенной точностью. Этот метод основан на регистрации RSSI во время развертывания сети на различных несущих частотах в область вероятностного местонахождения объекта, похожую на отпечаток пальца. В обычном режиме сеть пытается провести соответствие измеренной силы сигнала мобильного узла и карты «фингерпринтинга», которую она хранит для оценки реальной позиции объекта. Точность таких методов может лежать в пределе метра, но изменение среды функционирования сенсорной сети (например, открытая дверь в помещении была закрыта) может привести к погрешностям процесса локализации [7].

Глобальная система навигации GPS

Наиболее распространенной схемой радиочастотной локализации является глобальная система навигации GPS. Система, как минимум, состоящая из 24 орбитальных спутников, в режиме реального времени обслуживает клиентов по всему миру. Приемник получает четыре или более сигналов и использует их для относительного подсчета позиции объекта. GPS использует код грубой оценки получаемого сигнала

С/А, который используется в гражданской среде, а также используется для получения более точного Р-кода, используемого военными. Р-код зашифрован для предотвращения несанкционированного использования. При использовании С/А-кода точность локализации объекта достигает 10 метров на поверхности Земли. Могут присутствовать незначительные дополнительные погрешности при перемещении объекта в вертикальном направлении при условии безоблачности. Поскольку гражданский С/А-код занимает полосу в 2 МГц на единственной несущей частоте, многолучевое распространение может серьезно снизить точность локализации. Мощность получаемого сигнала на земле чрезвычайно низка, что может помешать получению сигнала при пасмурной погоде, когда небо затянуто облаками [5]. GPS приемники в последние годы стали более экономичными в плане потребления электроэнергии, но все равно потребляют десятки мДж. Если учесть, что большинство выполняемых сенсорными сетями задач требуют обновления информации о местоположении объекта намного меньше принятого для GPS 1 Гц, то потребление электроэнергии GPS-оборудованием имеет совсем другие масштабы. Тем более GPS-аппаратура дорога для использования в БСС из-за сложности процессов сбора и обработки данных.

Разница по времени прибытия (TDOA)

Метод, основанный на оценке разницы времени прибытия (TDOA), эффективный и наиболее используемый алгоритм для расчета местоположения мобильного устройства. Он заключается в отправке радиосигнала на несколько базовых станций, которые, в свою очередь, оценивают время прибытия, и на основе сопоставления информации между собой, вычисляют местоположение объекта. Как видно на рис. 1, разница по времени прибытия сигнала на трех базовых станциях есть функция от неизвестных расстояний. Когда будут выполнены все три измерения, то на основе системы полученных значений можно вычислить расстояния между объектами. Главное преимущество системы в том, что мобильное устройство может иметь очень простую аппаратную основу и выполнять элементарные задачи, но все сложности процесса получения и обработки соответствующей информации лежат на плечах базовых станций. Основной недостаток заключается в том, что такая синхронизация инфраструктуры повышает стоимость и сложность процесса локализации. Точность позиционирования связана не только со средой функционирования сети, но и большой плотностью базовых станций для покрытия всей сети. Применение этого алгоритма не ограничено какой-либо полосой пропу-

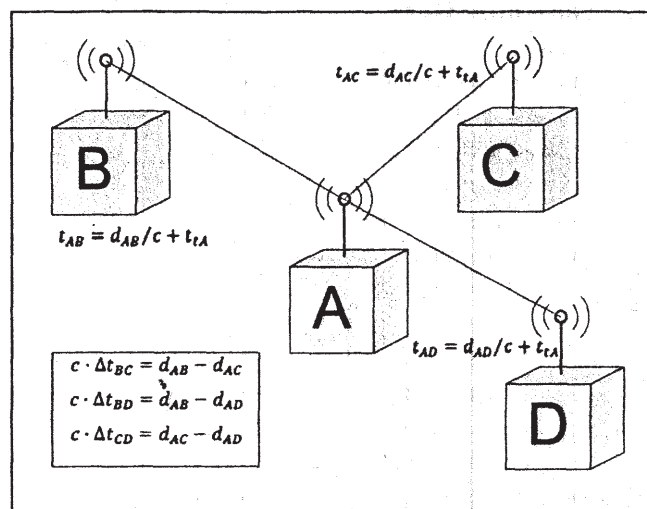


Рис. 1. Метод TDOA использует синхронизированные узлы B, C, D для одновременного замера времени прибытия сигнала, передаваемого узлом A. Поскольку время передачи сигнала t_{tA} неизвестно, то можно использовать разность по времени прибытия между узлами Δt для определения расстояний d_{AB} , d_{AC} и d_{AD} .

сказания или эффектами многолучевого распространения, метод может обеспечить высокую точность локализации в замкнутом помещении.

Метод TWTT

Метод, работающий на основе времени двусторонней передачи (TWTT) был впервые предложен в 60-х годах для обеспечения максимально точной синхронизации по времени между наземными станциями, использующими спутниковые линии связи [6]. Выполняя последовательность TWTT измерений на протяжении определенного промежутка времени, значения времени синхронизации и времени полета сигнала могут быть определены за несколько наносекунд. Возможность использования этого метода рассматривалась для сверхширокополосных систем ранжирования. Основная проблема данного метода ранжирования заключается в повышенном уровне потребления электроэнергии. Недавние исследования с применением сверхширокополосных передатчиков позволили снизить уровень потребления электроэнергии по сравнению с аналогичными методами, но получатели сигнала потребляют немалую часть энергии и взаимодействуют на расстоянии до нескольких метров. Узкополосные радиопередатчики 802.15.4 могут активировать свой передатчик, отправить полный пакет (150 байт) на десятки метров, получить подтверждение о приеме и уйти в спящий режим всего за 5 мс [10]. Радиоаппаратура потребляет за этот период приблизительно 20 мВт и примерно 100 мкДж на пакет.

Сотовые сети GSM

Локализация по разнице времени прибытия TDOA в сотовых сетях является неотъемлемой частью стандарта GSM с 1999 года (GSM 03.71 1999 и 2001). В версии 1999 года предусмотрено, что мобильное устройство отправляет пакеты сетевого доступа, которые принимаются тремя или более базовыми станциями. Эти базовые станции вычисляют положение устройства, используя основы локализации TDOA. Версия алгоритма локализации 2001 года предусматривает, что телефон измеряет разность по времени прибытия между сигналами, отправленными с базовых станций. Точность позиционирования в основном зависит от числа базовых станций. В городских условиях обычно для связи мобильному устройству доступно более трех базовых станций, и точность лежит в пределах 100 м. Когда доступно 2 или менее базовых станций, то погрешность при расчете может быть более 100 м. Методы локализации по TDOA не работают должным образом внутри помещений потому, что GSM – узкополосная система с ограниченным разнообразием частот. Энергопотребление и стоимость радиопередатчиков в устройствах сотовой связи намного больше, чем в сенсорных сетях [9].

Радиоинтерференционная система позиционирования RIPS

В основе метода радиоинтерференционного позиционирования в БСС лежит идея использования интерференции между радиосигналами, близкими по частоте [8]. Этот алгоритм нельзя строго отнести к методам ранжирования потому, что большое количество расстояний между узлами сети вычисляется одновременно с использованием большого количества сетевых измерений. Необходимо четыре узла для реализации радиоинтерференционного измерения, показанного на рис. 2.

Два устройства передают немодулированные сигналы на несущих частотах, с небольшим отклонением в 1 кГц. Сигналы интерферируют на приемниках и порождают сигнал с определенной огибающей на различных частотах. Эта огибающая может быть вычислена с помощью силы получаемых радиосигналов, и относительного сдвига по фазе ϕ между огибающими сигналов, зарегистрированными на двух получателях. Сдвиг по фазе содержит информацию, касающуюся расстояний между четырьмя узлами, где $\lambda_{carrier}$ – несущая частота. Этот метод не нуждается в очень точной временной синхронизации или тщательного процесса обработки сигналов, но требует радиопередатчиков с точным контролем несущей частоты переданного радиосигнала. В открытом пространстве RIPS может достигать точности в несколько сантиме-

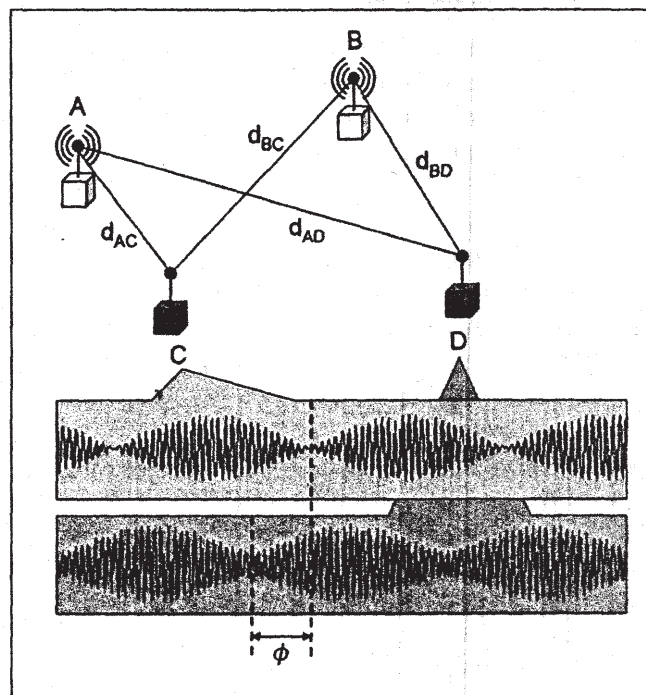


Рис. 2. Сдвиг по фазе $\phi = 2\pi (d_{AD} - d_{AC} + d_{BD} - d_{BC}) / \lambda_{carrier}$

тров при активном диапазоне в несколько десятков метров. Основной недостаток алгоритма заключается в том, что точность определения расстояний зависит от фазы несущей частоты, которая, в свою очередь, чувствительна к эффекту многолучевого распространения.

Сравнительный анализ методов локализации

Ниже приведены данные для сравнительного анализа эффективности методов позиционирования по основным характеристикам, свойственным системам, построенным на основе беспроводных сенсорных сетей. Эти характеристики включают в себя, например, точность локализации, уровень потребления электроэнергии, стоимость сенсоров и требований к инфраструктуре сети. В таблице приведены наиболее известные методы позиционирования. В процессе сравнения этих систем было бы некорректно судить о точности локализации только по числовым значениям потому, что процессы вычисления расстояний чувствительны к структуре среды, в которой функционируют сенсорные сети. Также некоторые системы обладают высокими требованиями к организации сети, но обеспечивают очень точную и качественную локализацию, в том числе позволяя производить ее в реальном времени.

Заключение

Исследование эффективных методов локализации маломощных систем, таких как сенсорные сети, толь-

Таблица

Метод	Тип позиционирования	Точность в открытом пространстве	Точность в замкнутом пространстве	Шумовая х-ка	Уровень энергопотребления	Уровень стоимости сенсорного оборудования	Уровень стоимости дополнительного оборудования
RSSI некалиброванный	RSSI	5 м	10 м	средняя	низкий	низкий	-
RSSI калиброванный	RSSI	3 м	3 м	средняя	умеренный	низкий	высокий
GPS	TOA	5 м	-	хорошая	высокий	высокий	-
GSM TDOA	TDOA	20 м	> 100 м	хорошая	высокий	высокий	высокий
RIPS	Интерферометрия	< 10 см	2 м	хорошая	низкий	низкий	-
TWTT	TWTT	30 см	1 м	хорошая	высокий	умеренный	-

ко набирает обороты, и эта область открыта для новых идей. Остается существенная задача обеспечения сенсорных сетей универсальной платформой локализации, обладающей высокой точностью, нетребовательной к ресурсам и обладающей высокой гибкостью инсталляции. Тем более, некоторые существующие методы частично способны обеспечить приемлемую точность для ряда задач. Развитие позиционирования в данном направлении существенно поможет обеспечить радиочастотной локализации широкое применение в БСС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Восков Л.С. Беспроводные сенсорные сети и прикладные проекты // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2009. №2-3. С.44-49.
2. Восков Л.С., Курпатов Р.О. Задачи визуализации сенсоров в беспроводных сенсорных сетях // Information and Telecommunication Technologies in Intelligent System. Proceeding of Sixth International Conference in Crete / Greece, June 02-06, 2008. PP. 29 –34.
3. Жданов В.С. Проблемы и задачи проектирования беспроводных сенсорных сетей // Информационные, сетевые и телекоммуникационные технологии: сборник научных трудов / под ред. проф., д.т.н. В.С. Жданова – М.: МИЭМ, 2009. 311 с.
4. Cheng Y., Chawathe Y., LaMarca A., Krumm J. Accuracy Characterization for Metropolitan-scale Wi-Fi Localization // Proceedings of the Third International Conference on Mobile Systems, Applications and Services, 2005. PP. 233-245.
5. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS: Principles and Applications // Norwood, MA: Artech House Publishers, 2005.
6. Kirchner D. Two-way time transfer via communication satellites // Proceedings of the IEEE, 79(7), 1991. PP. 983-990.
7. Lorincz K., Welsh M. MoteTrack: A Robust, Decentralized Approach to RF-Based Location Tracking // Springer Personal and Ubiquitous Computing, Special Issue on Location and Context-Awareness, 2006.
8. Maroti M., Kusy B., Balogh G., Volgyesi P., Molnar K., Dora S., Ledeczi A. Radio Interferometric Positioning // Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2005.
9. Sahai P. Geolocation on Cellular Networks // In B. Sarikaya (Ed.) Geographic location in the Internet. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. PP. 13-49.
10. Thorbjornsen B., White N.M., Brown A.D., Reeve J.S. Radio frequency (RF) time-of-flight ranging for wireless sensor networks // Measurement Science and Technology, 21(3), 2010. PP. 1-12.

Восков Леонид Сергеевич,
канд. техн. наук, профессор каф. ВСуС МИЭМ,
voskov@narod.ru

Курпатов Роман Олегович,
аспирант каф. ВСуС МИЭМ,
kurpatov-ro@narod.ru