

РАДИОЧАСТОТНЫЕ МЕТОДЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Чл.-корр. РАРАН В.В. Бетанов, Л.С. Восков, Р.О. Курпатов

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 применение в различных областях жизнедеятельности: в телемедицине, автопромышленности, для создания интеллектуальных зданий, мониторинга окружающей среды, управлении сложными космическими системами, для контроля боевых действий и т.д. Но вне зависимости от того, для каких целей используется технология сенсорных сетей, помимо основных величин, снимаемых встроенными датчиками, требуется предоставлять пользователю визуальную информацию о местоположении самих сенсоров в пространстве (локализация сенсоров). Это очень важно, например, при эксплуатации различных систем безопасности или 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 универсальный алгоритм процесса позиционирования. В открытом пространстве мощность радиочастотного сигнала может быть рассчитана с помощью формулы Фриса

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

где P_{rx} – мощность полученного сигнала, P_{tx} – мощность передачи при отправке сигнала, $\lambda = c/\beta_f$, c – скорость света (3×10^8 м/с), β_f – частота радиоканала.

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

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

Мощность полученного сигнала убывает с увеличением дальности d 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 полученного результата истинному. Ошибка при подсчете расстояния, обычно пропорциональна самому расстоянию, так что на более маленьких расстояниях между узлами БСС 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.

Часть систем позиционирования на основе силы сигнала используют так называемую технику «фингерпринтинга» (метод «отпечатков пальцев»), отличающийся от обычно 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 силе сигнала мобильного узла и карты «фингерпринтинга», которую она хранит для оценки реальной позиции объек-

та. Точность таких методов может лежать в пределе метра, но изменения среды функционирования сенсорной сети (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 C/A (модуляция BPSK (1)), который используется в гражданской среде, а также используется для получения более точного модулированного помехоустойчивого и криптоустойчивого P(Y) кода (модуляция BPSK (10)), используемого военными. P-код зашифрован для предотвращения несанкционированного использования. Начиная с аппаратов ИР-М, введенных в эксплуатацию с 2005 по 2009 год, используется новый M-код (модуляция BOC (15, 10)). Данный сигнал обладает повышенной помехоустойчивостью, и его достаточно для определения точных координат (в случае с P-кодом необходимо получение и кода C/A). При использовании C/A-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 C/A-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.

Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС)

Одна из двух функционирующих систем глобальной спутниковой навигации наряду с GPS. Основой системы должны являться 24 спутника, движущихся над поверхностью Земли в трёх орбитальных плоскостях с наклоном орбитальных плоскостей $64,8^\circ$ и высотой 19 100 км. В системе GPS 6 орбитальных плоскостей, на каждую из которых предполагается минимум по 4 спутника. В системе ГЛОНАСС функционирует по 8 спутников на 3 плоскостях.

Основное отличие систем – это сигнал и его структура. В системе GPS используется кодовое разделение каналов, в системе ГЛОНАСС – частотное. Также для описания движения спутников по орбите используются принципиально разные математические модели. У GPS – это модель в оскулирующих элементах, подразумевающая, что траектория движения спутника разбивается на участки, на которых движения описывается кеплеровской моделью, параметры которой меняются во времени. В системе ГЛОНАСС используется дифференциальная модель движения.

В остальном ГЛОНАСС, также как и GPS, сходна в уровне потребления электроэнергии, и дорога для применения в БСС из-за сложности процессов сбора и обработки данных. Применение данной системы оправдано в случае связывания локальной схемы расположения узлов сенсорной сети с глобальными координатами.

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 фун-

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

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 се-

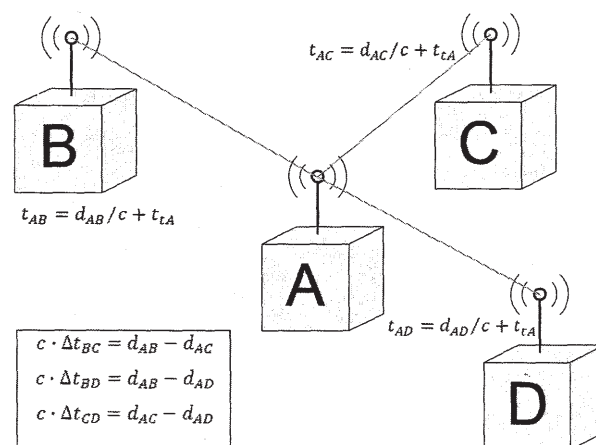


Рис. 1. Метод TDOA использует синхронизированные узлы B, C, D для одновременного замера времени прибытия сигнала, передаваемого узлом A. Поскольку время передачи сигнала t_{TA} неизвестно, то можно использовать разность по времени прибытия между узлами Δt для определения расстояний

тевого 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, отправленных 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.

Этот метод не нуждается в очень точной временной синхронизации или тщательного процесса обработки сигналов, но требует радиопередатчики с точным контролем несущей частоты

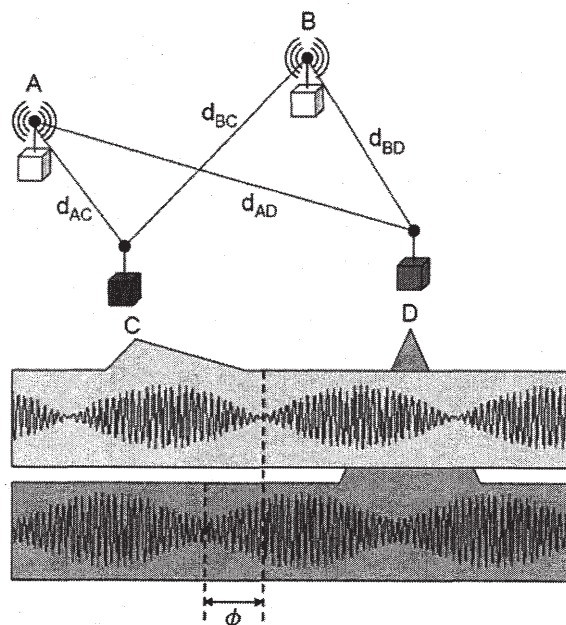


Рис. 2. Сдвиг по фазе

переданного радиосигнала. В открытом пространстве RIPS может достигать точности в несколько сантиметров при активном диапазоне в несколько десятков метров. Основным недостатком алгоритма заключается в том, что точность определения расстояний зависит от фазы несущей частоты, которая, в свою очередь, чувствительна к эффекту многолучевого распространения.

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 сделаны 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 приемопередатчиков, позволили снизить уровень потребления электроэнергии по сравнению с аналогич-

ными 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.

Сравнительный анализ методов локализации

В этой главе мы проведем сравнительный анализ эффективности методов позиционирования по основным характеристикам, свойственных 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 табл. 1 приведены наиболее известные методы локализации. В процессе сравнения этих систем и определения оптимального метода локализации в БСС необходимо учитывать множество факторов. Такой метод должен обладать минимальным уровнем энергопотребления на всем диапазоне действия радиосредств сенсорных узлов без ущерба для точности. Также необходимо учитывать влияние среды распространения сигнала на работу рассматриваемого метода и требования наличия дополнительных аппаратных средств (для удобства развертывания сети, мобильности, энергоэффективности).

Методы глобальной навигации GPS и ГЛОНАСС оптимально подходят для связывания локальной картины местоположения сенсорных узлов с глобальными координатами, и могут использоваться для систем контроля войск и техники при ведении боевых действий. Оборудовать каждый сенсорный узел таким приемником было бы неэффективно с точки зрения высокого уровня энергопотребления, плохого приема в условиях поме-

Таблица 1

Сравнение основных характеристик методов локализации

Метод	Тип позиционирования	Точность в открытом пространстве	Точность в замкнутом пространстве	Шумовая характеристика	Уровень энергопотребления	Уровень стоимости дополнительного оборудования
RSSI некалиброванный	RSSI	5 м	6 м	средний	низкий	—
RSSI калиброванный	RSSI	3 м	3 м	средний	средний	высокий
GPS	TOA	5 м	—	хорошая	высокий	—
ГЛОНАСС	TOA	6 м	—	хорошая	высокий	—
GSM TDOA	TDOA	20 м	> 100 м	хорошая	высокий	высокий
RIPS	Интерферометрия	< 10 см	8 м	средний	низкий	—
TWTT	TWTT	30 см	1 м	хорошая	высокий	—

щений и, конечно, высокой стоимости конечной системы.

Метод локализации по уровню силы принимаемого сигнала RSSI чувствителен к среде распространения сигнала. Оптимально подходит для использования на небольшой дистанции между узлами БСС, т.к. ошибка при подсчете расстояния увеличивается в квадратичной зависимости от самого расстояния. Для данного метода не требуются дополнительные аппаратные средства – вся информация содержится в пакете данных. Радиointерференционный метод RIPS обладает высокой точностью в условиях линии прямой видимости между узлами, энергоэффективный, не требует дополнительных аппаратных средств, но очень чувствителен к многолучевой среде распространения сигнала, что ограничивает его применение в закрытых помещениях. Основная проблема TWTТ метода определения расстояния по времени двустороннего прохождения сигнала заключается в повышенном уровне потребления энергии на небольших дистанциях между узлами сети. Так как сенсорные микрокомпьютеры ограничены в производительности частотой процессора в 32 МГц, то это затрудняет дискретизацию временных промежутков. Для получения более точного периода прохождения сигнала, пропорционального расстоянию между узлами, приходится производить многократные транзакции локализации, что и ведет к увеличению объема потребляемой электроэнергии. Этот метод обладает высокой точностью и устойчивостью к среде распространения сигнала.

Заключение

Все рассмотренные методы данной статье обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение для решения реальных задач. Исследование эффективных методов локализации в маломощных системах таких, как сенсорные сети, только 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 высокой гибкостью инсталляции. Тем более некоторые существующие методы частично способны обеспечить приемлемую точность для ряда задач. Развитие исследований в данном направ-

лении 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 №2–3. Отраслевой научно-производственный журнал. – М.: 2009 г. – 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. Жданова В.С. – 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, Karoly 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.