

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

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

Введение

Возможности современной микроэлектроники и беспроводных сетевых технологий открывают большие перспективы для создания разнообразных сетевых комплексов с широкой областью применения. Наиболее известной и зарекомендовавшей себя в этой области является технология беспроводных сенсорных сетей (далее – БСС или сенсорные сети). Основным их отличием от классических радиосетей является использование в качестве основных узлов сети большого числа недорогих микрокомпьютеров. Эти устройства настолько самостоятельны, что могут автоматически выстраивать распределенную беспроводную сеть, передавать информацию, путём нахождения друг друга на расстоянии до нескольких километров, автоматически принимать решения, и выполнять задачи без участия человека. Как правило, с помощью сенсорных датчиков можно фиксировать изменения температуры, давления, влажности, уровня освещенности. Также они имеют интерфейсы для внешних подключений, что может расширить и без того богатые функциональные возможности этих устройств. В основном они используются как системы мониторинга и контроля. Большим преимуществом БСС является возможность их использования как внутри помещений, так и за его пределами – в окружающей среде, благодаря чему спектр их применения достаточно широк.

Рассуждая о многочисленных преимуществах сенсорных сетей, стоит упомянуть, что их концепция основана, в большей степени, на самостоятельности своих узлов, в том числе и в обеспечении электроэнергией. Поэтому, при стремлении к повышению точности и качеству информации,

получаемой функционированием таких систем, мы должны бережно относиться к уровню потребления электроэнергии.

Большое количество работ, связанных с созданием и развертыванием систем, основанных на беспроводных сенсорных сетях, свидетельствует о высокой популярности этой технологии. Направления исследований простираются от узкоспециальных вопросов, связанных с созданием отдельных компонентов и объектов сети (приемопередатчиков, микроконтроллеров, датчиков и т.д.) с низкой ценой и низким энергопотреблением, до проблем, которые возникают при эксплуатации сенсорных сетей (организация работы сети, разработка программного обеспечения, привязка месторасположения объектов сети к географическим координатам и др.).

Принципиальная возможность определения координат объектов сенсорной сети делает эти системы еще более привлекательными за счет дополнительной информационной составляющей, которая вкуче с основным параметром или комплекса параметров мониторинга, может дать исчерпывающую картину работы системы. Поэтому поиск высокоэффективного алгоритма локализации остается актуальной проблемой на сегодняшний день. Среди множества существующих подходов определения местоположения сенсоров, практически каждый метод обладает недостатками, ограничивающими его применимость в реальном мире. Например, методики, основанные на акустическом ранжировании, требуют применения дополнительного акустического приемопередатчика, который увеличивает стоимость и размеры платформы.

В данной статье рассматривается новый подход к решению задачи локализации элементов

БСС, основанный на комбинировании методов определения расстояний по уровню силы принимаемого сигнала RSSI и по времени двустороннего прохождения сигнала TWTT. Использование комбинированного метода позволяет производить более точный и энергоэффективный процесс локализации на всем диапазоне действия радиосредств сенсорной сети, чем при использовании каждого метода в отдельности.

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 P_{rx} 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 истинно-

му. 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 электроэнергетики, что объясняет популярность этого технического приема.

Метод локализации по времени двустороннего прохождения сигнала (TWTT)

Метод, работающий на основе времени двусторонней передачи сигнала TWTT был впервые предложен в 60-х годах для обеспечения максимально точной синхронизации по времени между наземными станциями, использующими спутниковые линии связи [6]. Схематичное представление работы данного метода представлено на рис. 1.

Метод используется для сравнения двух локальных часов или осцилляторов в порядке уменьшения фазового сдвига (в часовых циклах) и, следовательно, синхронизации устройств. Узлы A и B работают с независимыми системными часами, которые не синхронизированы и имеют некоторое фазовое смещение. При разрешении ранжирующих вычислений метод опирается на локальные часы узла A .

Фазовый сдвиг и время передачи TOF между узлами A и B получаются из системы уравнений:

$$t_{A \rightarrow B} = t_{A\text{-transmit}} + t_{TOF} + t_{B\text{-offset}};$$

$$t_{B \rightarrow A} = t_{B\text{-transmit}} + t_{TOF} + t_{B\text{-offset}};$$

$$t_{TOF} = \frac{1}{2} [(t_{A \rightarrow B} + t_{B \rightarrow A}) - (t_{A\text{-transmit}} + t_{B\text{-transmit}})];$$

$$t_{offset} = \frac{1}{2} [(t_{A \rightarrow B} - t_{B \rightarrow A}) - (t_{A\text{-transmit}} - t_{B\text{-transmit}})],$$

где $t_{B\text{-transmit}}$ – время отправки сигнала, $t_{A \rightarrow B}$ и $t_{B \rightarrow A}$ – время получения сигнала, t_{TOF} – время прохождения сигнала и $t_{B\text{-offset}}$ – фазовый сдвиг часов узла B относительно часов узла A . Несинхронизированные TWTT измерения включают фазовый сдвиг как дополнительную составляющую

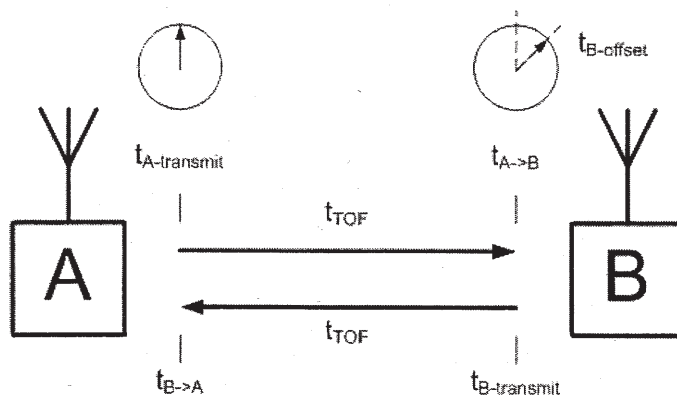


Рис. 1. Схематичное представление работы TWTT-метода

прямой передачи, и вычитаемую составляющую при обратной передаче относительно часов узла *A*. Дополнительный фазовый сдвиг можно исключить усредненным значением многократных двусторонних передач и получить более точный TOF-период. TOF можно извлечь из счетчика временных интервалов (ТИС) или автономного таймера.

Принцип расчета расстояния по времени двустороннего прохождения сигнала достаточно прост:

1) Получение откалиброванного замкнутого двунаправленного периода передачи сигнала вычитанием минимального замкнутого периода (когда расстояние $AB \rightarrow 0$) из усредненного значения времени передачи.

2) Получение одностороннего TOF периода делением откалиброванного замкнутого периода на два.

3) Использование выражения $s = c \cdot \Delta t$ для конвертирования TOF в расстояние (c – скорость света [м/с]).

Комбинированный метод локализации

Комбинированный подход к локализации в БСС позволяет учесть преимущества каждого из используемых методов и, в свою очередь, уменьшить влияние ошибок и искажений, свойственных для данных методов, и ограничивающих возможность их применения на всем диапазоне действия радиопередающих средств.

Рассмотрим преимущества и недостатки используемых методов.

RSSI-метод

Преимущества:

– Не требуются дополнительные аппаратные средства;

– Информационный пакет IEEE 802.15.4 содержит информацию об уровне силы принимаемого радиосигнала;

– Низкий уровень энергопотребления.

Недостатки:

– Высокая чувствительность к среде распространения сигнала («эффект многолучевого распространения сигнала»);

– Ошибка при определении расстояния возрастает в квадратичной зависимости, пропорционально самому расстоянию между узлами.

TWTT-метод

Преимущества:

– Высокий уровень точности;

– Не требуются дополнительные аппаратные средства;

– Простота реализации в БСС.

Недостатки:

– Ограниченная разрешающая способность из-за частоты коррелятора (32 МГц);

– Повышенный уровень энергопотребления.

Очевидно, что RSSI-метод оптимально использовать на более коротких дистанциях между узлами, т.к. величина ошибок, пропорциональных расстоянию между объектами локализации, возрастает в квадратичной зависимости. В то же время, метод TWTT из-за ограниченной дискретизации коррелятора при выборке, может привести на коротких дистанциях к слишком большим отклонениям в процентном соотношении. Поэтому основной задачей является определение наиболее подходящего момента задействования TWTT-метода в контексте комбинированного метода локализации, как с точки зрения максимального уровня точности, так и для максимального уровня энергоэффективности. Для этого необходимо оп-

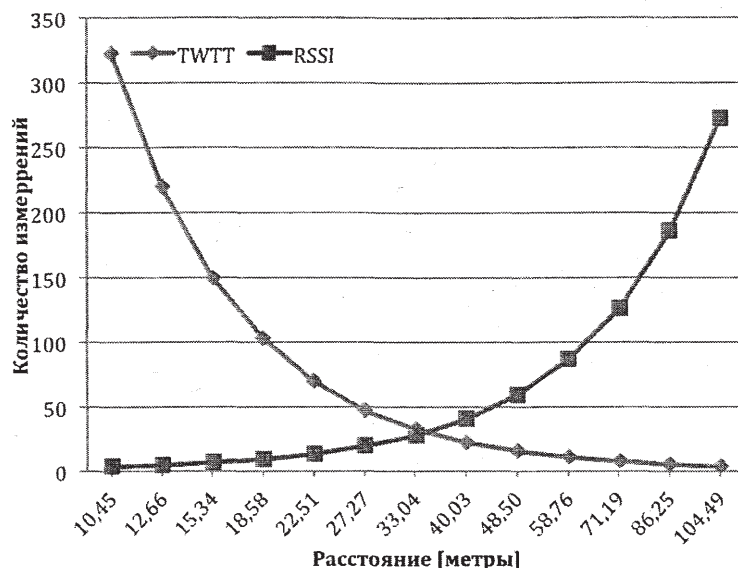


Рис. 2. Сравнительная характеристика зависимости количества ранжирующих транзакций от расстояния между узлами для RSSI-метода и TWTT-метода

ределить дисперсию и нижние пределы Cramer-Rao (границы минимальной среднеквадратичной ошибки) для методов локализации.

Нижний предел Cramer-Rao для RSSI-метода [8] (N – количество транзакций):

$$\sqrt{\text{var}(\hat{d})} \geq \frac{\alpha d}{A\sqrt{N}}.$$

Нижний предел Cramer-Rao для TWTT-метода [7]:

$$\sigma_{TOF}^2 \geq \frac{c^2}{8\pi^2 \beta_f^2 \cdot SNR \cdot N},$$

где β_f [Гц] – спектральная ширина полосы полученного радиосигнала, N – количество TOF измерений, SNR – энергия в расчете на бит, разделенная на мощность шумов, (α – коэффициент путевых потерь при передаче сигнала).

Для TWTT-метода полное время задержки является Гауссовой случайной переменной, формируемой суммированием временных погрешностей на каждом независимом компоненте. Для единственной двусторонней транзакции ранжирования полное время задержки определяется по формуле, где t_{2T} , t_{1R} , t_{2R} – время передачи и приема на инициаторе и на приемнике, Δt_2 – относительный сдвиг по фазе и t_{2RES} – период ответа. Соответственно, дисперсия по TWTT-вычислениям может быть снижена увеличением количества транзакций:

$$\sigma_{TOF} = \frac{1}{\sqrt{N}} (\sigma_{1T} + \sigma_{2R} + \sigma_{\Delta t_2} + \sigma_{t_{2RES}} + \sigma_{2T} + \sigma_{1R}).$$

Экспериментальная проверка эффективности применения комбинированного метода проводилась на устройствах из комплекта разработчика NXP Jennic 5148.

Согласно приведенным ранее выражениям, при разбросе значений для RSSI-метода не более 1 м, и дисперсии значений в пределах 5% от истинного значения дистанции между объектами для TWTT-метода, зависимость количества необходимых дополнительных измерений от расстояния между объектами представлена на рис. 2.

Соответственно, оптимальным моментом для задействования TWTT-метода и проведения дополнительных транзакций локализации, будет точка пересечения кривых, представленных на рис. 2. Эта точка (LQI = 88 [Link Quality Index – показатель качества сигнала, относительная величина], $d = 35$ м) представляет максимальное количество ($N = 30$) дополнительных транзакций по определению расстояния между узлами БСС с использованием только RSSI (LQI) показателя. После данной точки метод использует только N -совокупность необходимых TWTT-измерений для достижения оптимального уровня плотности распределения результата. Так как объем электроэнергии, необходимый для проведения максимально точного процесса локализа-

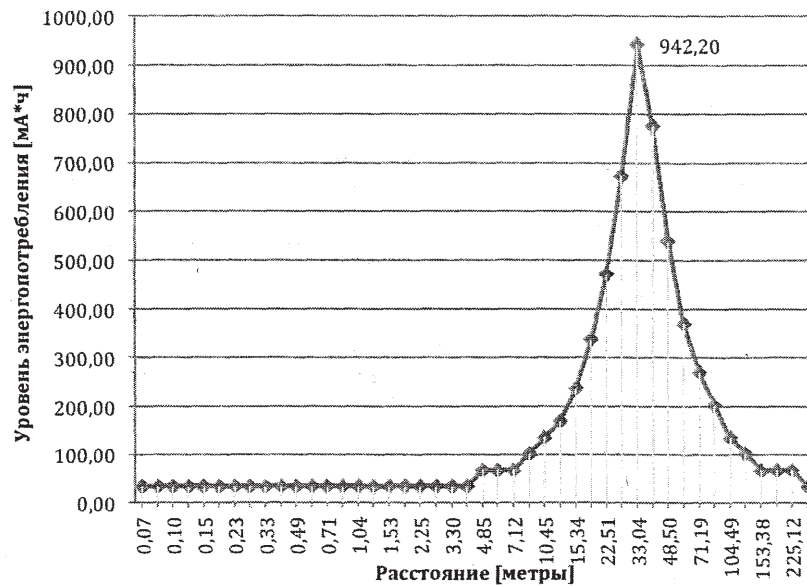


Рис. 3. Зависимость уровня энергопотребления на сенсорном узле в зависимости от расстояния между узлами (LQI) при использовании комбинированного метода локализации

ции пропорционален количеству транзакций, то минимальное количество дополнительных транзакций будет свидетельствовать о наиболее энергоэффективном режиме. На рис. 3 представлена зависимость уровня энергопотребления разработанного комбинированного метода локализации от расстояния между объектами.

Заключение

Разработанный комбинированный метод локализации позволяет эффективно использовать энергоресурсы элементов БСС, достигая при этом высокой точности на всем диапазоне действия радиосредств. Данный подход позволяет использовать все преимущества используемых методов определения расстояний, а также уменьшить возможные погрешности, свойственные для данных методов в определенных условиях.

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. 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.

8. Santiago Mazuelas, Alfonso Bahillo, Ruben M. Lorenzo, Patricia Fernandez, Francisco A. Lago Eduardo Garcia, Juan Blas and Evaristo J. Abril. Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks // IEEE Journal of selected topics in signal processing, 3, 2009. pp. 821–832.