

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Л. С. Восков, Р. О. Курпатов

Рассмотрена возможность комбинирования методов определения расстояния между узлами беспроводных сенсорных сетей (IEEE 802.15.4), использующих радиочастотные каналы для передачи сигнала. Исследованы алгоритмы обработки и анализа радиосигналов для каждого метода. Произведен анализ точности и энергоэффективности разработанного метода.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, локализация, комбинированный метод.

ВВЕДЕНИЕ

Возможности современной микроэлектроники и беспроводных сетевых технологий открывают большие перспективы для создания разнообразных сетевых комплексов в широких областях 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 путем 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, что значительно расширяет спектр их применения.

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, следует внимательно 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, возникающих 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 благодаря дополнительной информационной составляющей, которая вкупе 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 имеет недостатки, ограничивающие его применимость в реальном мире.

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 TWTТ. Применение 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

Радиочастотный метод определения расстояния между объектами по силе сигнала (RSSI) ис-

пользуется во многих системах как универсальный алгоритм процесса позиционирования. В открытом пространстве мощность радиочастотного сигнала может быть рассчитана с помощью формулы Фриса

$$P_{rx} = \frac{P_{tx}}{(4\pi d/\lambda)^2}, \quad (1)$$

где P_{rx} — мощность полученного сигнала; P_{tx} — мощность передачи при отправке сигнала; $\lambda = c/\beta_f$; c — скорость света; β_f — частота радиоканала.

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

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

Из формулы (1) видно, что 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, поэтому при различных несущих частотах может появиться несоответствие полученного результата истинному. Так как ошибка при подсчете расстояния обычно пропорциональна самому расстоянию, то на более маленьких расстояниях между узлами БСС погрешности могут быть в пределах метра.

Большинство радиопередатчиков позволяют работать 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.

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ПО ВРЕМЕНИ ДВУСТОРОННЕГО ПРОХОЖДЕНИЯ СИГНАЛА

Метод, работающий на основе времени двусторонней передачи сигнала (TWTT), был впервые предложен в 1960-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 умень-

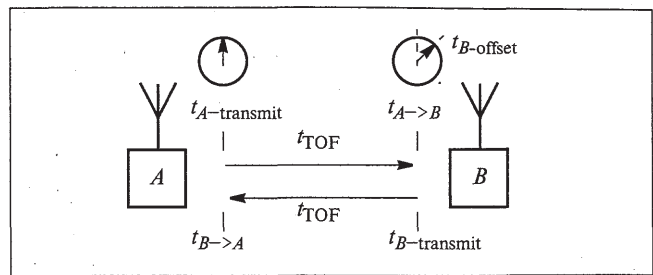


Рис. 1. Схематичное представление работы TWTT-метода

шения 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 вытекают из решения системы уравнений:

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

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

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

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

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

— получить откалиброванный замкнутый двусторонний период передачи сигнала вычитанием минимального замкнутого периода (когда расстояние $AB \rightarrow 0$) из усредненного значения времени передачи;

- определить односторонний *TOF*-период, поделив откалиброванный замкнутый период на два;
- применив выражение $\Delta s = c\Delta t$, конвертировать *TOF* в расстояние (c — скорость света [3×10^8 м/с]).

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ

Комбинированный подход к локализации в БСС позволяет учесть преимущества каждого из используемых методов и уменьшить влияние ошибок и искажений, свойственных этим методам, и ограничивающих возможность их применения.

Рассмотрим “плюсы” и “минусы” используемых методов.

RSSI-метод:

- достоинства: 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:

- достоинства: 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 использование *RSSI*-метода оптимально на более коротких дистанциях между узлами, так как 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 определить дисперсию и нижние пределы Cramer-Rao (границы минимальной среднеквадратичной ошибки) для методов локализации.

Нижний предел Cramer-Rao для *RSSI*-метода [8] (N — число транзакций):

$$\sqrt{\text{var}(\hat{d})} \geq \sigma d / A \sqrt{N};$$

нижний предел Cramer-Rao для *TWTT*-метода [7]:

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

где β_f [Гц] — спектральная ширина полосы полученного радиосигнала; N — количество *TOF* измерений, SNR — энергия в расчете на бит, разделенная на мощность шумов, $A = 10\alpha \cdot \log_{10} e$ (α — коэффициент путевых потерь при передаче сигнала).

Для *TWTT*-метода полное время задержки T_{delay} является Гауссовой случайной переменной, формируемой суммированием временных погрешностей на каждом независимом компоненте. Для единственной двусторонней транзакции ранжирования полное время задержки определяется по формуле $T_{\text{delay}} = t_{1T} + t_{2R} + \Delta t_2 + t_{2\text{RES}} + t_{2T} + t_{1R}$, где t_{1T} , t_{2T} , t_{1R} , t_{2R} — время передачи и приема на инициаторе и на приемнике; Δt_2 — относительный сдвиг по фазе; $t_{2\text{RES}}$ — период ответа. Соответственно, дисперсия по *TWTT*-вычислениям может быть снижена увеличением количества транзакций:

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

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 числа необходимых дополнительных измерений от расстояния между объектами представлена на рис. 2.

Оптимальным моментом для задействования *TWTT*-метода и проведения дополнительных транзакций локализации будет точка пересечения кривых, представленных на рис. 2. В этой точке LQI (Link Quality Index — показатель качества сигнала, относительная величина) равен 88 и при $d = 35$ м представляет максимальное количество ($N = 30$) дополнительных транзакций по определению расстояния между узлами БСС с использованием только *RSSI* (LQI) показателя. После этой точки в комбинированном методе использу-

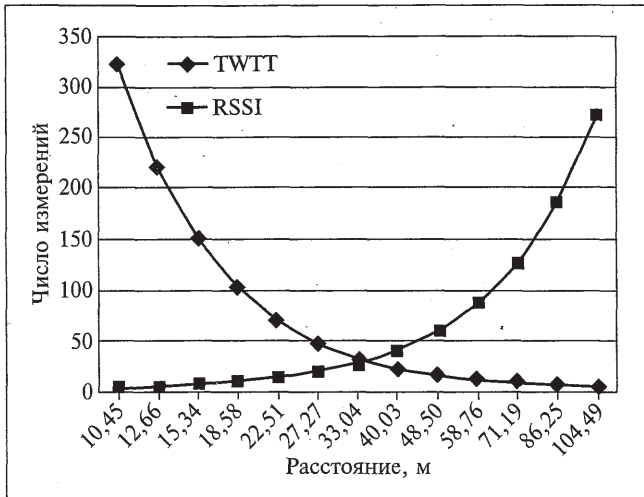


Рис. 2. Сравнительная характеристика зависимости числа ranging транзакций от расстояния между узлами для RSSI- и TWTT-методов

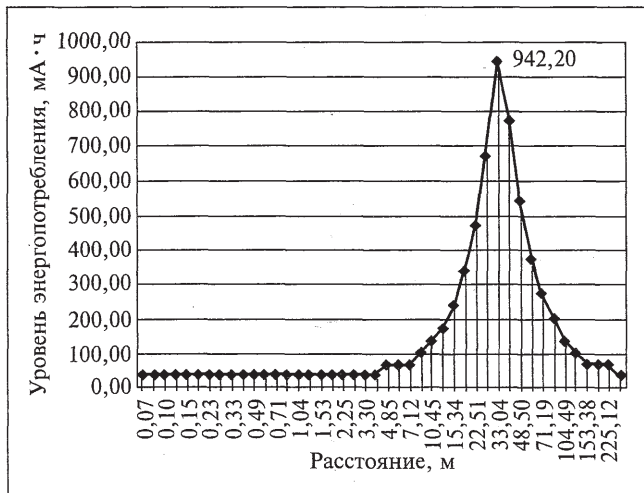


Рис. 3. Зависимость уровня энергопотребления на сенсорном узле в зависимости от расстояния между узлами (LQI) при использовании комбинированного метода локализации

ется только N -совокупность необходимых TWTT-измерений для достижения оптимального уровня плотности распределения результата. Так как объем электроэнергии, необходимый для проведения максимально точного процесса локализации пропорционален числу транзакций, то минимальное количество дополнительных транзакций будет свидетельствовать о наиболее энергоэффективном режиме. На рис. 3 представлена зависимость уровня энергопотребления разработанного комбиниро-

ванного 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 данным методам в определенных условиях.

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. Proc. of Sixth Internat. Conf. in Crete/Greece, June 02—06, 2008. — P. 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 // Proc. of the Third Internat. Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services. — 2005. — P. 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 // Proc. of the IEEE, 79(7), 1991. — P. 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. — P. 1—12.
8. Mazuelas S., Bahillo A., Lorenzo R. M., et al. Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks // IEEE Journal of selected topics in signal processing, 3, 2009. — P. 821—832.

Работа выполнена на кафедре "Вычислительные системы и сети" Московского института электроники и математики.

Леонид Сергеевич Восков — канд. техн. наук, проф. кафедры;

E-mail: voskov@narod.ru

☎ (495) 125-06-73, (910) 401-35-71

Роман Олегович Курпатов — аспирант кафедры.

E-mail: kurpatov-ro@narod.ru;

☎ (495) 590-29-33, (926) 154-40-44

□