

# Новые возможности беспроводных сетей ZigBee: измерение координат и скоростей узлов

*Беспроводные сети ZigBee используются для сбора показаний различных датчиков. В некоторых задачах местоположение датчиков заранее неизвестно либо может изменяться и требуется определять координаты и скорости узлов. Рассматриваются методы определения местоположения узлов беспроводных сетей ZigBee без использования дополнительных технических средств типа GPS только на основе измерений мощности (RSSI) и задержки (ToF) сигналов. Показано, что при расстояниях между узлами порядка десятков и сотен метров практическое значение имеет метод на основе измерения времени пролета сигнала между узлами (ToF). Отмечается, что этот метод аппаратно поддерживается только в беспроводных микроконтроллерах JN5148.*

Александр Еркин , к.т.н.  
AlexErk@macroteam.ru

Беспроводные сети ZigBee малого радиуса действия с низким потреблением энергии часто используются для сбора информации от множества датчиков, размещенных в здании или на открытой территории. В некоторых приложениях требуется знать координаты датчика, от которого поступил определенный сигнал. Это становится непростой задачей, если при установке датчиков не было возможности точно измерить их координаты либо датчики устанавливались на подвижных объектах. В таких случаях возникает задача оперативного определения координат узла. Конечно, каждый узел может быть снабжен датчиком координат на основе GPS, однако такое стандартное решение сильно усложняет и удорожает систему. Вполне естественно было попытаться реализовать измерения средствами самой сети. В результате для сетей ZigBee были разработаны два метода измерения координат – метод RSSI, основанный на измерении мощности принятого сигнала, и метод ToF, основанный на измерении времени прохождения сигнала между узлами. Рассмотрим эти методы подробнее.

## Метод RSSI

Наиболее простым методом определения дальности до узла является измерение мощности принятого сигнала – метод RSSI (Received Strength Signal Indication – индикация уровня принятого сигнала). Любой беспроводной канал по стандарту IEEE 802.15.4 имеет протокольную функцию оценки качества связи (Link Quality Indicator), действие которой сводится к измерению мощности принятого сигнала. Результат этого измерения можно вывести, откалибровать по известному расстоянию и оценить дальность до источника. Измерение расстояния производится следующим образом. Приемник с логарифмической амплитудной характеристикой принимает сигналы, по которым встроенный индикатор RSSI формирует 8-разрядный код RSSIVAL. Этот код получается в результате усреднения по 8 периодам (128мкс) принятого сигнала, и снабжается битом состояния, указывающим, когда RSSIVAL является валидным (т.е. приемник имел возможность принять, по крайней мере, 8 периодов). Мощность принятого сигнала  $P$  вычисляется по формуле

$$P = \text{RSSIVAL} + \text{RSSIOFFSET} [\text{dBm}],$$

где  $\text{RSSIOFFSET}$  – эмпирически подбираемая постоянная (порядка -45dBm). Поскольку в идеальных условиях мощность обратно пропорциональна квадрату расстояния, то логарифм мощности просто пропорционален расстоянию с некоторым коэффициентом пропорциональности, которых устанавливается также эмпирически.

Данный метод реализован в микроконтроллерах ZigBee фирмы TI серии CC2431 [3].

Однако этому методу присущ ряд существенных ограничений, поскольку уровень сигнала является весьма изменчивым параметром из-за влияния таких факторов, как:

-быстрые и медленные замирания сигналов на трассе из-за изменения условий распространения радиоволн,  
-многолучевое распространение вследствие отражений от различных металлических предметов.

- разброс выходной мощности передатчиков и чувствительности приемников,  
- влияние ориентации антенн из-за неравномерности диаграммы направленности.

Из-за действия указанных факторов реальная зависимость мощности от расстояния оказывается нелинейной и непостоянной во времени, вследствие чего точность измерений быстро падает с ростом расстояния. Как показано ниже, практическая применимость этого метода измерения расстояний в ZigBee ограничена дистанциями примерно до 10м, при этом расстояние измеряется с точностью около 3м.

## Метод ToF

Другой метод основан на измерении времени прохождения (пролёта) сигнала (Time of Flight). В этом методе роутер посылает запрос на другой узел, получает ответный сигнал и определяет время его задержки. Полная задержка складывается из аппаратных задержек при формировании ответного сигнала, при обработке принятого сигнала и времени распространения между узлами. Поскольку технические задержки известны с хорошей точностью, то их можно вычесть из полной задержки и оставшаяся величина будет характеризовать время пролета сигнала туда и обратно. Умножив половину времени задержки на скорость света, получим значение расстояния между узлами сети. В этом методе обеспечивается линейная связь между расстоянием и измеряемой величиной и абсолютная точность измерения не зависит от расстояния. Для повышения точности измерения используют многократные повторения процедуры измерения. Реально этот метод эффективен в полном диапазоне дальности работы сети (обычно сотни метров). На рисунке 1 приведены экспериментальные результаты измерений расстояния методами RSSI и ToF [2], полученные в сети из микроконтроллеров JN5148. Каждая точка на графике получена путем усреднения 25 измерений.

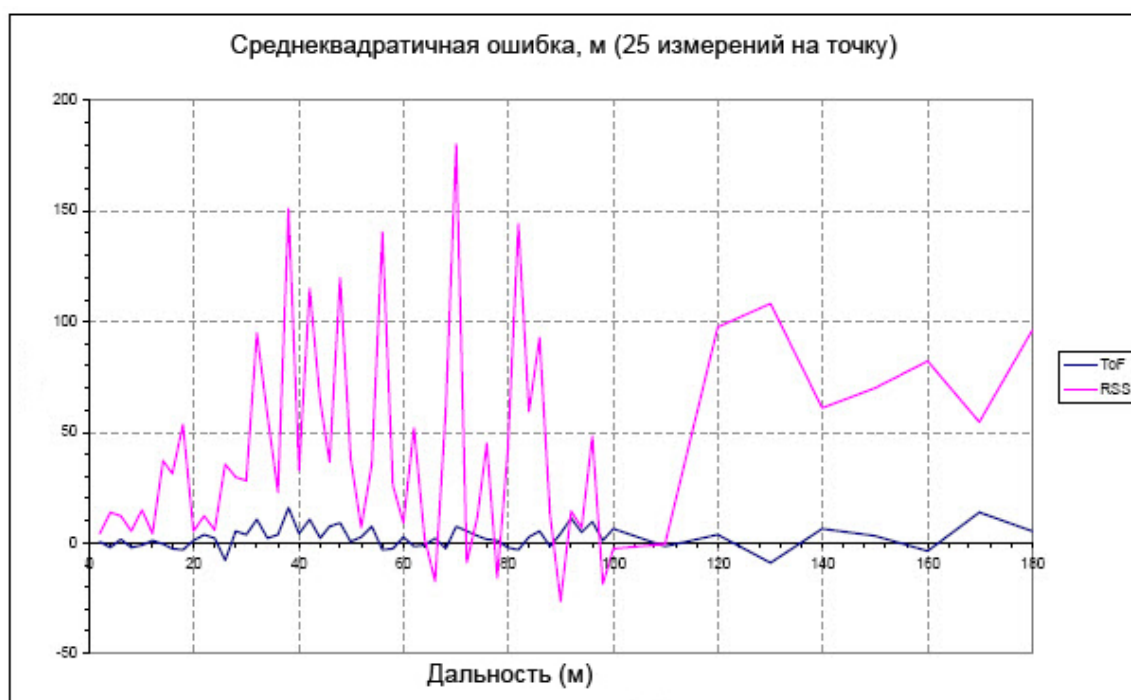


Рис. 1. Зависимости ошибок измерения расстояния методами RSSI и ToF от расстояния.

Из рисунка 1 видно, что ошибки измерений методом ToF существенно меньше, чем в методе RSSI, в котором уже на дальностях более 20м ошибки измерений превышают само значение дальности.

## Реализация алгоритма измерения

Для измерения времени пролета между узлами любой сети ZigBee можно просто использовать один из периферийных таймеров. Перед посылкой запросного пакета таймер запускается, а после приема ответа останавливается. Можно использовать таймер vAHI из оболочки API. Поскольку в большинстве сетей ZigBee отсутствует прямой доступ к регистру микроконтроллера, то следует ввести таймер vAHI в режим повторения и использовать получаемые при этом такты прерывания для получения нужного счета. В качестве варианта реализации такого метода можно использовать следующую программу на языке C:

```
PUBLIC void vTimer1ISR(uint32 u32DeviceId, uint32 u32ItemBitmap);
PUBLIC void vMeasureResponse( void );
PRIVATE uint32 u32ResponseTimeInMs = 0;
PUBLIC void vMeasureResponse( void )
{
    /* set up timer 0 for count */
    vAHI_TimerEnable(E_AHI_TIMER_1,
        0,
        FALSE,
        TRUE,
        FALSE);
    vAHI_TimerClockSelect(E_AHI_TIMER_1,
        FALSE,
        TRUE); // gate input pin active high
    vAHI_TimerStartRepeat(E_AHI_TIMER_1,
        0x0000, // null value
        16000 ); // 16000 with no prescaler is 1ms

    /* register Timer0 interrupt */
    vAHI_Timer1RegisterCallback(vTimer1ISR);
}
PUBLIC void vTimer1ISR(uint32 u32DeviceId, uint32 u32ItemBitmap)
{
    u32ResponseTimeInMs++;
}
```

Запуск этого кода обеспечивает получение задержки в 1мс, имеющийся параметр 16000 задает период следования прерываний 1мс при тактовой частоте 16МГц, при желании этот параметр можно изменить и получить другую частоту прерываний. Возможно также использование функции u16AHI\_TimerReadCount(), дающее лучшую точность при задержках менее 1мс.

Метод ToF реализован аппаратно в микроконтроллерах Jennic JN5148 и является исключительной особенностью сетей на этих МК. Функциональная схема микроконтроллера JN5148 приведена на Рис. 2. Блок <Ranging Engine> является исполнительным элементом аппаратной реализации метода ToF. Алгоритм измерения является стандартной функцией программного обеспечения протокола IEEE 802.15.4 микроконтроллеров JT5148.

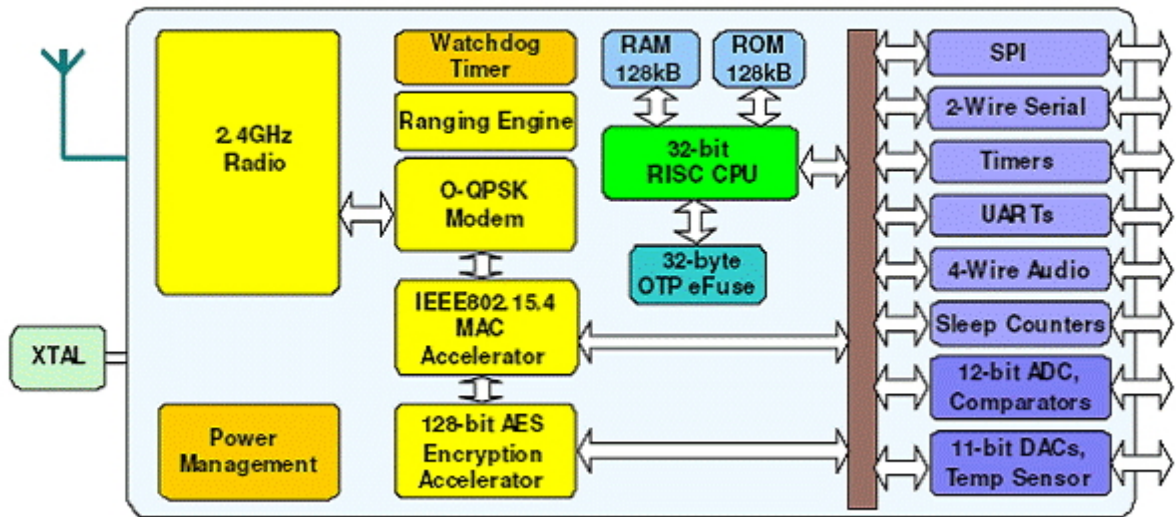


Рис. 2. Функциональная схема микроконтроллера JN5148.

Подробное описание характеристик МК JN5148 дано в [1], а также на сайте производителя [2]. Текст программы на языке C алгоритма ToF имеется в пакете JN-SW-4043, который доступен для скачивания с сайта [2] всем зарегистрированным разработчикам.

В сетях на JN5148 имеются уникальные управляющие пакеты для проведения измерений по методу ToF, в частности, модуль AppApiToF.h на языке C в составе пакета JN-SW-4043. Специальные MAC-патчи для стека позволяют распознать эти пакеты. Цикл измерений занимает не более 10мс, для измерения используется посылка с частотой импульсов 16МГц. Процесс измерения иллюстрируется на Рис. 3. Сначала посылается первичный запрос и получают ответ, идентифицирующий узел. Затем посылается запрос с частотой импульсов 16МГц и запускается счетчик для фиксации времени посылки, после получения счетчик останавливается, фиксируя ответ. Время пролета вычисляется как половина разности показаний счетчика. Все вычисления с измеренными задержками целесообразно проводить с единиц времени (микросекундах) и только при окончательном выводе пересчитывать в дальность в метрах умножением на скорость света (300 м/мкс).

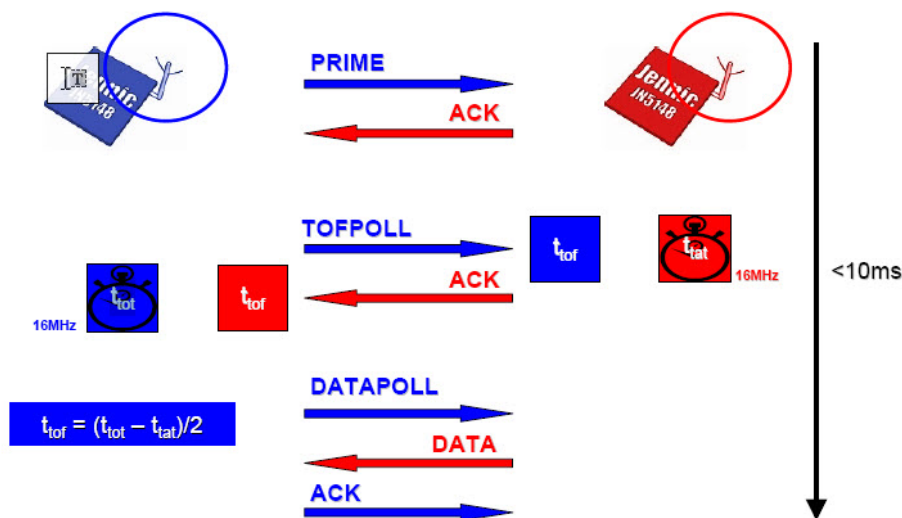


Рис. 3. Последовательность операций по измерению времени пролета сигнала.

## Точность измерений в методе ToF

Точность измерений определяется рядом факторов:

- стабильностью частоты задающих генераторов,
- задержками фронтов импульсов при приеме и излучении,
- отношением сигнал/шум,
- ошибками из-за многолучевого распространения.

Если использовать простейшую обработку без предварительной фильтрации сигналов, то ошибки могут быть весьма большими в первую очередь из-за многолучевого распространения сигналов. Такие условия чаще всего возникают при работе в помещениях или вблизи любых строений. Например, при работе в здании на расстоянии 24м были получены следующие результаты [3]:

- измерения дальности путем передачи сигналов по кабелю дали точность 0.75м (при ошибках измерения задержек 5нс),
- средняя точность измерения дальности по воздуху составила 5.6м, при этом максимальные ошибки в 90% случаев не превышали 12.1м,
- точность определения координат на основе попарных измерений дальности составила 3.5м с максимальной ошибкой в 90% случаев более 6.2м.

При измерениях на местности с той же аппаратурой на дальности 180м были получены следующие результаты:

- средняя ошибка измерения дальности составила 3.9м при максимальной ошибке в 90% случаев до 9.1м,
- ошибка определения координат узлов в пределах участка 20м x 35м составила 2.2м при максимальной ошибке в 90% случаев до 4.6м.

Отсюда следует, что простейшая фильтрация аномально больших отклонений, вызываемых многолучевым распространением, могла бы в несколько раз повысить точность измерений.

Дальнейший путь повышения точности измерений в сетях ZigBee (более чем на порядок) возможен путем усложнения алгоритма обработки. Такой подход был практически реализован и описан в материалах конференции [4]. Для получения высокой точности даже в условиях многолучевого распространения использовался синтез когерентных сигналов в нескольких каналах и применялся специальный метод оценки фазы сигнала, при этом полоса спектра сигнала была расширена до 80МГц. Использовались стандартные посылки пачек импульсов. Согласно полученным в [4] экспериментальным результатам, при использовании обычных кварцевых генераторов в сети с несущей частотой 2.4ГГц максимальные ошибки измерения не превышали 16см, а среднеквадратичная точность определения координат узлов составила 3см. При замене на высокостабильный термокомпенсированный кварцевый генератор максимальная ошибка и среднеквадратичная точность составили соответственно 9см и 1см.

Определение расстояния – это только первая часть задачи локализации узла. Для нахождения координат необходимо измерить расстояние из двух разнесенных точек с известным местоположением (Рис. 4).

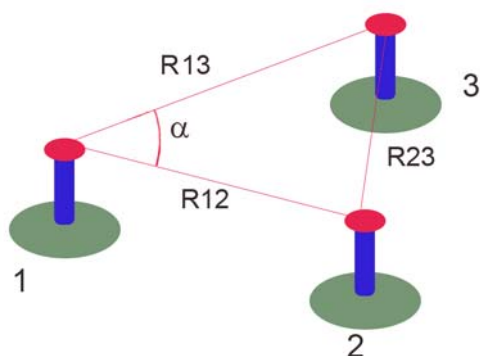


Рис. 4. Геометрия расчета дальности до узла 3 по известным координатам узлов 1 и 2.

Если при измерениях из двух узлов 1 и 2 расстояния до узла 3 были получены значения  $R_{12}$ ,  $R_{13}$  и  $R_{23}$  между ними, то угол направления  $\alpha$  на узел 3 относительно базовой линии 1-2 можно найти по формуле

$$\cos \alpha = (R_{12}^2 + R_{13}^2 - R_{23}^2) / (2 R_{12} R_{13})$$

Для повышения точности измерений следует повторить многократно процедуру измерений и усреднить результат.

Измерение расстояний – не единственная возможность сетей ZigBee. При использовании высокоточных алгоритмов измерения можно также определять скорость перемещения узла. Оценку скорости можно делать по изменению расстояния при нескольких последовательных измерениях. По измерениям из двух точек можно найти только проекцию скорости на направление за известный узел. Если же измерять дальность из трех или более точек, то можно определить проекции скорости на направление на эти узлы и по ним уже найти полный вектор (величину и направление) скорости. Цикл измерения расстояния в сетях Jennic не превышает 10мс при работе со смежным узлом, поэтому можно делать измерения десятки раз в секунду. При времени измерения 1с можно определить скорость с точностью около 2-3 м/с, а в системе с высокоточным алгоритмом – на порядок точнее.

Выводы:

1. Метод определения расстояния между узлами на основе RSSI пригоден для измерений на небольших расстояниях до 10м.
2. Метод ToF обладает рядом преимуществ перед RSSI, особенно при измерениях на больших расстояниях порядка сотен метров.
3. При использовании метода ToF возможно определение координат и вектора скорости движения узлов сети ZigBee.
4. Серия беспроводных микроконтроллеров JN5140 обладает уникальными встроенными возможностями определения расстояния между узлами сети ZigBee.
5. Для разработчиков сети ZigBee на микропроцессорах Jennic имеются готовые системные функции ToF API на языке C.

Получить консультацию по рассмотренным в статье вопросам и приобрести беспроводные модули Jennic Вы можете в ООО «Макро Тим», тел. +7 495 306 0026, +7 495 306 0026, почта [sales@macroteam.ru](mailto:sales@macroteam.ru),

Источники информации:

1. А.Н. Еркин. Особенности проектирования беспроводных ZigBee -сетей на базе микроконтроллеров фирмы Jennic – «Беспроводные технологии» №8, 2010
2. Сайт Jennic <http://www.jennic.com>
3. Описание микроконтроллера CC2431 - <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2431.html>
4. Материалы конференции 22-24 января 2008г (доступны только по подписке): [Radio and Wireless Symposium, 2008 IEEE](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?reload=true&punumber=4456902)  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?reload=true&punumber=4456902>