

Точность определения расстояний с помощью технологии nanoLOC

Для определения местоположения передающего узла существует ряд технологий, использующих разные подходы измерения расстояний с помощью радиосигналов. Наиболее популярными считаются способы, основанные на определении мощности входного сигнала (Receive Signal Strength Indication), времени прохождения сигнала (Time of Flight), сдвига фаз радиоволн (Phase Difference) и определении угла до объекта (Angular Positioning) [1, 2]. Из-за конструктивных сложностей в организации последнего метода и относительной дороговизны предпоследнего наибольшее распространение получили методы, основанные на определении мощности принимаемого сигнала и вычислении времени прохождения сигнала.

Александр Гоголев
Дмитрий Екимов
Константин Екимов
Алексей Мощевикин
Александр Федоров
Илья Цыкунов
alexmou@lab127.ru

Введение

Важный вопрос в определении расстояния до объекта: «Кто определяет расстояние?» В системе GPS этим занимается локальное устройство, позиционирующее себя на координатную сетку, в то время как, например, RFID-технология позволяет определить расположение самого объекта со стороны; при этом сам объект не обладает возможностью локализовать себя в пространстве.

Удобна для развития технологий определения местоположения возможность использования инфраструктуры локальных беспроводных и проводных сетей. Это способствовало появлению на рынке ряда коммерческих решений на базе таких широко распространенных стандартов, как Bluetooth и Wi-Fi. Некоторые компании предлагают собственные разработки, основанные на «непопулярных» сегодня решениях, использующих в качестве средства передачи информации ультразвук, инфракрасное излучение, длинноволновое радио и различные их комбинации. Иногда это приводит к созданию специализированных систем, решающих узкий круг задач и зачастую абсолютно неприменимых в других жизненных ситуациях. В целом, следует отметить отсутствие в настоящее время массово распространенной и достаточно экономичной технологии для определения местоположения объектов, перемещающихся как на открытом пространстве, так и в закрытых помещениях.

В предыдущих публикациях в журнале «Беспроводные технологии» [3–9] была всесторонне рассмотрена технология nanoNET. Ее потомок nanoLOC, также разработанный компанией Nanotron Technologies GmbH, обладает всеми уникальными свойствами предшественника, а кроме этого позволяет автоматически определять расстояния между передающим и принимающим узлами. Разработчики заявляют точность измерения расстояний до 1 метра.

Симметричное двустороннее двухступенчатое измерение расстояний

В технологии nanoLOC применена одна из модификаций упомянутого метода Time of Flight, получившая название Symmetric Double Sided Two Way Ranging (SDS-TWR, симметричное двустороннее двухступенчатое измерение расстояний). SDS-TWR является дальнейшим усовершенствованием метода Round Trip Time (RTT).

Для измерения расстояний методом RTT между объектами А и Б объект А посылает объекту Б пакет, содержащий запрос на измерение, и фиксирует время отправки. Объект Б, получив пакет от А, отправляет объекту А подтверждение — АСК-пакет. Объект А, получив АСК-пакет, фиксирует время его получения. Метод RTT использует аппаратную генерацию АСК-пакета, где время обработки пакетов считается одинаковым для обоих объектов. Фиксация времени отправки пакета, содержащего запрос на измерение и прием АСК-пакета, происходит также аппаратно. Это позволяет заранее предсказать время обработки пакетов и вычислить время распространения сигнала t_p по формуле:

$$t_p = (T_{RTT} - T_{reply})/2,$$

где T_{RTT} — время, измеренное объектом А с момента отправки пакета объекту Б до получения АСК-пакета от объекта Б; T_{reply} — время, измеренное объектом Б с момента получения пакета от объекта А до отправки АСК-пакета.

Считая скорость распространения сигнала в среде известной и постоянной величиной, легко вычислить расстояние между объектами.

На точность измерения временных интервалов, а следовательно, и расстояний, при применении технологии nanoLOC существенное влияние оказывает стабильность частоты кристаллов, которые используются

в модулях трансиверов. Степень точности характеризуется величиной ошибки ppm (part per million), для удобства записываемой целыми числами. Значение, равное 1 ppm, соответствует ошибке 0,0001%, или 10^{-6} . Например, для кристалла с номинальной частотой 4 МГц и частотной стабильностью 1 ppm предельное отклонение частоты от номинальной составит $4\,000\,000 \times 10^{-6} = 4$ Гц. Рассмотрим влияние ppm кристалла на измерение расстояний. Предположим, что система состоит из двух объектов: А и Б, и их часы идут с одинаковой скоростью.

Обычно время распространения пакета значительно меньше, как T_{RTT} , так и T_{reply} . Время t_p [с] обычно не превышает нескольких десятков наносекунд, а T_{RTT} и T_{reply} чаще всего оказываются около или более 1 мс. Например:

$$t_p = (1,000074 \times 10^{-3} - 1,000014 \times 10^{-3})/2 = 30 \times 10^{-9}.$$

Теперь рассмотрим, что произойдет, если часы объекта А и объекта Б имеют разную скорость хода, например +10 ppm и -10 ppm соответственно. Тогда:

$$t_p = (1,000074 \times 10^{-3} \times (1 + 10 \times 10^{-6}) - 1,000014 \times 10^{-3} \times (1 - 10 \times 10^{-6}))/2 = 40 \times 10^{-9}.$$

Очевидно, возникает ошибка вследствие взятия разности между большими величинами, измеренными с разной точностью. Основное усовершенствование метода SDS-TWR направлено на исключение этого эффекта, связанного с разной скоростью хода часов (clock drift) у различных объектов. Для этого измерение расстояний производят обе стороны, в результате чего рассчитывается усредненное значение.

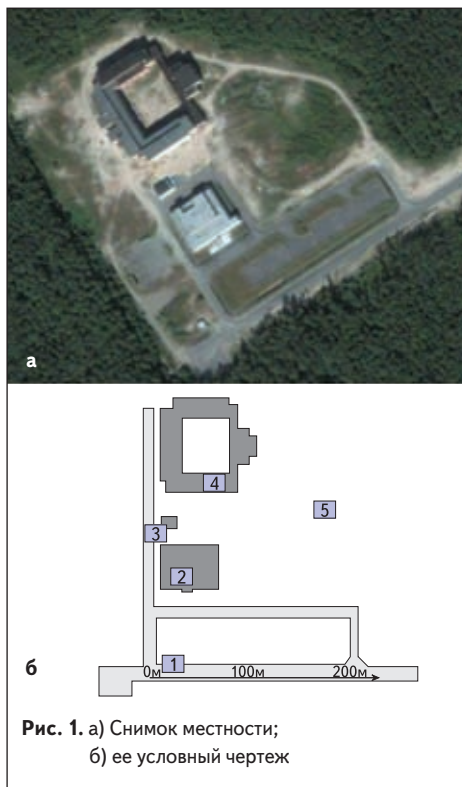


Рис. 1. а) Снимок местности; б) ее условный чертеж

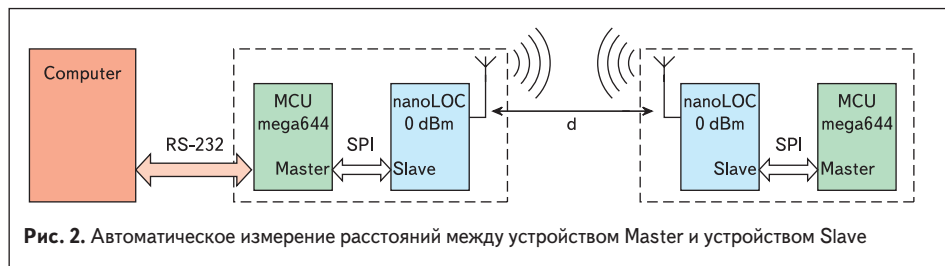


Рис. 2. Автоматическое измерение расстояний между устройством Master и устройством Slave

Предполагая, что $T_{replyA} \sim T_{replyB}$, время распространения сигнала t_p можно вычислить по формуле:

$$t_p = [(T_{RTT A} - T_{reply A}) + (T_{RTT B} - T_{reply B})]/4.$$

При анализе выражения видно, что в каждой из скобок разность берется между величинами, измеренными одинаковыми часами. Следует особо отметить, что данная формула применима, если $T_{replyA} \sim T_{replyB}$, поэтому чем больше разность между этими временами, тем выше ошибка измерения расстояний.

Таким образом, метод SDS-TWR позволяет применять менее стабильные кристаллы, что принципиально снижает стоимость используемого аппаратного обеспечения и обеспечивает при этом приемлемую точность определения расстояний. Именно эти важные предпосылки привели к появлению перспективной технологии nanoLOC.

Кроме этого, необходимо отметить, что поскольку фиксация значений всех времен осуществляется аппаратной частью приемопередатчика, то параметры и режимы работы управляющего микроконтроллера никак не влияют на точность определения расстояний.

Для того чтобы исследовать возможности технологии nanoLOC и оценить точность измерений радиометодом, коллектив авторов провел несколько серий экспериментов, описанных далее.

Общие условия проведения экспериментов

Все эксперименты проводились в зеленой зоне на расстоянии около одного километра от населенной части города, в университетском городке Петрозаводского государственного университета. Снимок местности и ее условный чертеж представлен на рис. 1.

Основное количество экспериментов, упомянутых в этой статье, проводилось в точках 1, 4 и 5, обозначенных в прямоугольниках на условном чертеже местности. Большинство экспериментов происходило в дневное время.

Во всех экспериментах использовались радиомодули, состоящие из трансивера nanoLOC и управляющего микроконтроллера ATmega644 (рис. 2). Микроконтроллер выступал как ведущее устройство на шине SPI, приемопередатчик — как ведомое.

Master-модуль был подключен к компьютеру по интерфейсу RS-232 (рис. 2) со специально написанной программой для автоматизированного протоколирования результатов измерений, которые поступали в большинстве экспериментов раз в секунду. В файл протокола сохранялись номер эксперимента, номер измерения, текущие дата и время, реальное расстояние, измеренное

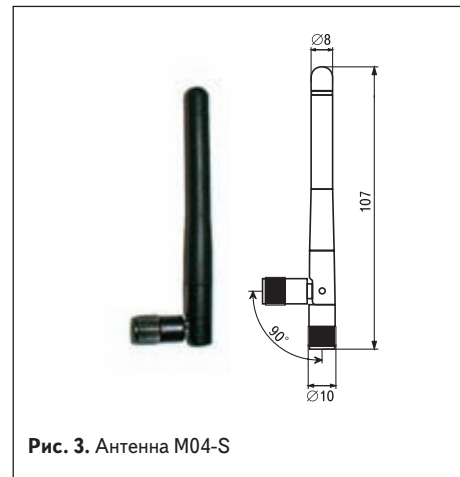


Рис. 3. Антенна M04-S

с помощью рулетки или лазерного дальномера, а также результат измерения расстояния с помощью технологии nanoLOC. Выходная мощность радиосигнала составляла 1 мВт.

Стационарный радиомодуль (Master) чаще всего закреплялся на деревянной подставке высотой 0,8 м, а мобильный (Slave) — на деревянном шесте длиной 1,8 м. Трансиверы были снабжены стандартными антеннами типа M04-S (1/2-волновый диполь, КСВ ≤ 2 , поляризация линейная, коэффициент усиления 2,0 дБи) (рис. 3).

Эксперимент 1.

Измерения на открытой местности

Первый эксперимент состоял в измерении расстояний на открытом пространстве вблизи дорожного покрытия вдоль дороги с асфальтовым покрытием. Оба модуля были закреплены на шестах на высоте 1,5 м от поверхности дороги в прямой видимости друг друга.

Стационарный модуль (Master) был подключен к компьютеру. Второй модуль (Slave) переносил вдоль дороги один из участников эксперимента. На рис. 4 можно видеть кривые, полученные путем усреднения результатов по 10 измерениям.

На горизонтальной оси отмечено реальное расстояние в метрах, а на вертикальной — разница между измеренным с помощью nanoLOC и реальным (также в метрах): измеренное расстояние всегда превышает реальное вследствие применяемой технологии засечек времени распространения пакета. Каждая точка измерения дополнена 90%-ым доверительным интервалом для среднего значения. Первые три кривых были получены в разные дни для одной и той же пары модулей (Master — 1, Slave — 2), на остальных кривых модуль Slave менялись.

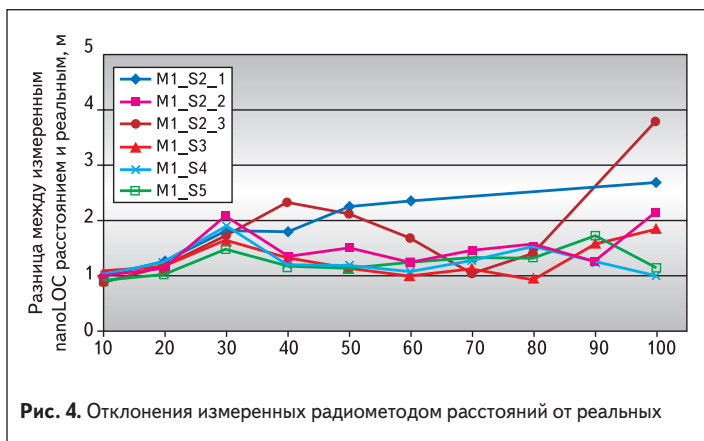


Рис. 4. Отклонения измеренных радиометодом расстояний от реальных

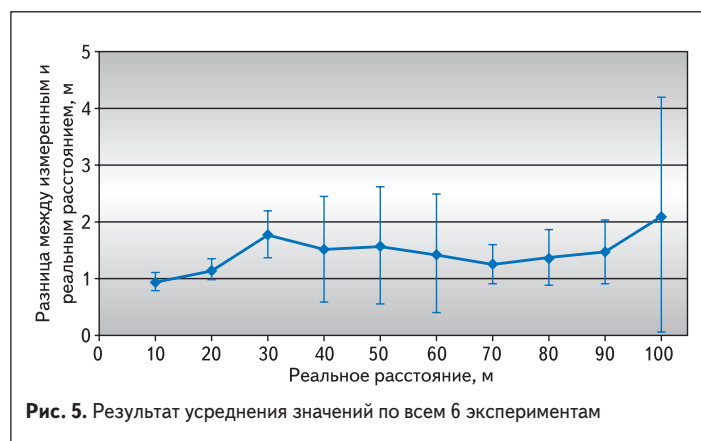


Рис. 5. Результат усреднения значений по всем 6 экспериментам

На графиках видно, что существует систематическая погрешность при измерении расстояний с помощью panoLOC, которая находится в пределах 1–4 м, и случайная погрешность каждого измерения, которая находится в пределах ± 80 см (90%-ный доверительный интервал) и практически не зависит от расстояния и применяемых модулей.

Обнаружено, что систематическая погрешность измерений зависит от положений антенн, которые немного отличались от точки к точке и от эксперимента к эксперименту, что повлияло на кривые, представленные на рис. 4.

Результат усреднения значений по всем 6 экспериментам и 90%-ный доверительный интервал случайной величины приведены на рис. 5.

Вследствие небольшого значения длины волны для частотного диапазона 2,4 ГГц ($\lambda \approx 12,5$ см), принципы распространения электромагнитных волн в данном диапазоне тождественны законам распространения световых волн; такие волны отражаются и поглощаются препятствиями. Хотя радиосвязь возможна при наличии небольших препятствий, наилучшее качество связи обеспечивается только в условиях прямой видимости. Наиболее вероятное объяснение небольшого завышения результатов измерений заключается в дополнительном «набеге» пути распространения электромагнитных волн из-за отражений от поверхности асфальтового покрытия (земли).

Эксперимент 2.

Изучение влияния отражений

Для проверки этой гипотезы был поставлен эксперимент с целью исключить отражающие факторы и выяснить точность измерения расстояний в этих условиях. Местом проведения замеров был выбран стадион с двумя вышками,

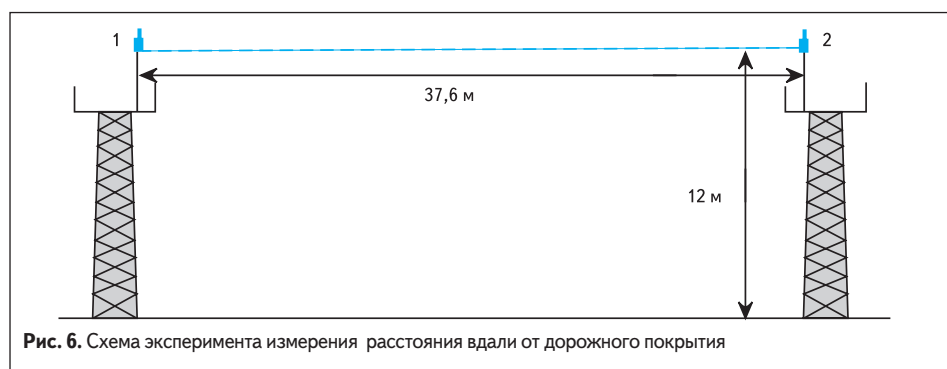


Рис. 6. Схема эксперимента измерения расстояния вдали от дорожного покрытия

причем возможные препятствия были достаточно удалены от условной прямой, соединяющей модули. В такой ситуации сигнал по прямой будет много сильнее отраженных. Схема данного эксперимента представлена на рис. 6.

В результате было зарегистрировано 93 значения расстояния. Среднее значение: $D_{cp} = 38,42 \pm 0,05$ м (95%-ный доверительный интервал случайной величины — 0,44 м).

Разница между расстоянием, измеренным рулеткой, и средним расстоянием, зарегистрированным с помощью panoLOC модулей:

$$D_{cp} - D = 0,82 \text{ м.}$$

Анализ экспериментов по измерению расстояний (без препятствий, на расстоянии порядка 40 м) показал, что завышение вблизи дорожного покрытия (1,5 м) больше завышения, зарегистрированного вдали от дорожного покрытия (с вышек высотой 12 м), — 0,82 м. Следовательно, логичным было бы предположить, что значение в 0,82 м есть систематическая составляющая погрешности для данных датчиков при данных условиях, однако нужно учесть, что вышки на высоте 12 м немного колеблются относительно своего центрального положения (около 5–10 см) и, соответственно, меняется взаиморасположение датчиков.

Эксперимент 3.

Стабильность во времени

Основная идея эксперимента заключалась в исследовании стабильности измеренных значений на протяжении большого промежутка времени. Кроме этого, попутно проверялась точность измерений при отсутствии внешних помех и в условиях, когда датчики находятся неподвижно друг относительно друга (в покое).

Для эксперимента по измерению расстояния в течение длительного промежутка времени были выбраны две смежные комнаты (место 4 на рис. 1). Все приборы в данных комнатах были отключены. Для регистрации использовались те же два модуля Master и Slave, что и в предыдущем эксперименте.

Датчики находились в разных комнатах, их отделяла только гипсокартонная стена толщиной 0,31 м с одним слоем минеральной ваты; никаких других препятствий между ними не было. Расстояние от пола до датчиков составляло 1,80 м. Схема эксперимента с отмеченными расстояниями приведена на рис. 7.



Рис. 7. Схема эксперимента измерения расстояния в течение длительного времени

Эксперимент длился более 18 часов, за это время было проведено 64 162 измерения.

Среднее значение — $4,423 \pm 0,002$ м (95%-ный доверительный интервал случайной величины — 0,23 м). Отклонение среднего от реального расстояния, замеренного рулеткой, — 0,11 м.

Данные были усреднены по 60 измерениям (то есть результаты примерно за 1 минуту эксперимента). На рис. 8 приведен график, на котором для удобства отображения приведены усредненные значения за каждые полчаса. При этом 95%-ный доверительный интервал для средних значений составляет 0,04 м.

На рис. 8 по горизонтальной оси указано время записи результатов измерений, по вертикальной оси — усредненные расстояния. Видно, что в пределах доверительного интервала результаты измерений не меняются со временем.

На рис. 9 представлено распределение данных, зарегистрированных в данном эксперименте.



Рис. 8. Среднее по значимым данным (усредненным по 60 измерениям)



Рис. 9. Результаты исследования закона распределения зарегистрированных данных

На гистограмме по горизонтальной оси отложены значения выборки расстояний, по вертикальной — количество выпадений для каждой выборки. Исследование данного распределения, построенного с выборкой 5 см, показало, что закон распределения «нормальный». На гистограмме видно, что полуширина нормальной кривой (на полувысоте), характеризующая отклонение от среднего, составляет около 0,15 м.

Эксперимент по длительному измерению показал, что если усреднять по 60 измерениям, то точность измерения расстояния стационарными (неподвижными) датчиками при отсутствии внешних помех будет составлять около 0,04 м; при этом нужно учесть еще и систематическую погрешность 0,11 м, добавляемую данными модулями к реальному расстоянию, измеренному с помощью рулетки и дальномера. Нужно также отметить, что систематическая погрешность в этом эксперименте (0,11 м) меньше, чем в эксперименте с использованием вышек (0,82 м).

Эксперимент 4.

Влияние взаимной ориентации штыревых антенн

Дополнительно были проведены эксперименты по отслеживанию влияния взаимной ориентации антенн на точность и качество измерения расстояний. Анализ результатов экспериментов говорит о наличии значительного влияния взаимной ориентации антенн на измерения. При этом появляются завышенные значения расстояний (до 5 м на открытом пространстве), говорящие о том, что электромагнитная волна проходила не по прямой между модулями. Необходимо отметить, что если предельная дальность связи на открытом пространстве для

одинаковой ориентации антенн составила 300 м (а зона устойчивой связи — 100 м), то при перпендикулярной ориентации антенн связь на расстоянии 50 м практически уже отсутствует.

Эксперимент 5.

Проверка зависимости точности измерений от используемой аппаратуры

Метод SDS-TWR, реализованный разработчиками, предполагает получение величины расстояния путем усреднения результатов двух измерений, со стороны инициатора и отвечающей стороны. В связи с этим некоторый интерес представляла проверка следующих моментов.

Во-первых, возможны ли условия, когда только одна из сторон постоянно завышает измерения? Во-вторых, есть ли зависимость от расстояния в разбросе результата на стороне инициатора и на отвечающей стороне?

Для получения ответа был поставлен специальный эксперимент, обработка результатов которого показала, что одна из сторон стабильно завышает результаты по отношению к другой. Чаще всего это завышение находилось в пределах точности измерений, но иногда разница составляла более полуметра. По предварительным данным это можно связать с различием аппаратных частей объектов. Проверка второй гипотезы показала отсутствие какой-либо зависимости разброса результатов измерений на различных сторонах от расстояния.

Также интересно было выяснить, есть ли зависимость точности измерения от конкретного экземпляра модуля nanoLOC. В связи с этим были проведены соответствующие эксперименты, которые показали небольшую зависимость зарегистрированного расстояния от конкретного

экземпляра датчика, которая может быть связана, в том числе, и с нечеткой выдержкой взаимной ориентации антенн при переходе от одной точки к другой в процессе эксперимента.

Выводы

По сделанным экспериментам можно сделать основной вывод: применяемые радиомодули стандарта nanoLOC позволяют достаточно точно измерять расстояния. При этом результаты измерений получаются немного завышенными (по-разному в зависимости от внешних условий). Однако в ряде случаев это может быть скорректировано путем предварительной калибровки системы или введением специальных градуировочных кривых.

Чаще всего «набег расстояний» связан с отражениями от соседних объектов, существованием препятствий на пути между датчиками и различным взаиморасположением антенн. Минимальное завышение было достигнуто в экспериментах с длительным временем накопления данных от неподвижных объектов и составило 0,11 м.

Литература

1. Аникин А. Определение местоположения объекта с помощью приемопередатчиков nanoLOC // Беспроводные технологии. 2007. № 3.
2. Orbaek P. Positioning and location technologies. WorkSPACE, PalCom Projects. 2005. <http://www.daimi.au.dk/DIS/materialer/positioning-tech.pdf>.
3. Артеев В., Долгушин С. Беспроводные сети nanoNET // Беспроводные технологии. 2005. № 1.
4. Мошечкин А. П. Исследование скорости передачи данных в беспроводных сетях Nanonet // Беспроводные технологии. 2006. №3.
5. Жиганов Е. Д., Красков С. Е., Мошечкин А. П. Исследование условий применимости приемопередатчиков стандарта Nanonet в беспроводных сетях датчиков // Беспроводные технологии. 2007. № 1–2.
6. Жиганов Е. Д., Мошечкин А. П. Аппаратная коррекция ошибок (FEC) в сетях стандарта nanoNET (IEEE 802.15.4a) // Беспроводные технологии. 2007. № 3.
7. Мошечкин А. П., Чухарев А. Л. Передача длинных кадров в сетях стандарта nanoNET (IEEE 802.15.4a) // Беспроводные технологии. 2007. № 3.
8. Жиганов Е. Д., Мошечкин А. П. Беспроводные сети датчиков на основе технологии nanoNET // Информационные технологии. 2007. № 11.
9. Дмитриев С. А., Жиганов Е. Д., Мошечкин А. П. NanoNET-модуль с интерфейсом USB // Беспроводные технологии. 2008. № 1.

Данное исследование проведено в рамках проектов, поддерживаемых Министерством образования и науки РФ, Американским фондом гражданских исследований и развития (CRDF) и Правительством Республики Карелия, а также частично финансировалось в рамках других договорных работ.

Авторы благодарят И. М. Некрылову за помощь при подготовке статьи.