

Сверхширокополосные сети приёмопередатчиков для групп мобильных объектов

А.С. Дмитриев^{1,2}, А.И. Рыжов¹, М.Г. Попов^{1,2}, В.В. Ицков^{1,2}, М.М. Петросян^{1,2}

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр.7, chaos@cplire.ru

²Московский физико-технический институт (государственный университет), Российская Федерация, 141700, г. Долгопрудный, Московской обл., Институтский пер., 9

В работе создаётся и экспериментально исследуется беспроводная сверхширокополосная (СШП) прямохаотическая сеть связи, приемопередатчики которой расположены на подвижных роботах (мобильных платформах). В качестве подвижных платформ предлагаются и реализовываются два варианта колесных платформ и платформа на основе беспилотного летательного аппарата – квадрокоптера. Проводятся серии экспериментов по самоконфигурации, самоорганизации и самовосстановлению беспроводных СШП сетей статического и мобильного типа. Устанавливаются характерные времена «переконфигурации» сети при ее структурных изменениях. Показывается практическая работоспособность предложенных алгоритмов и технических решений.

The problem of creation and experimental research of wireless UWB direct chaotic network (where transceiver nodes were placed on the mobile platforms) is considered in this report. Two options of wheeled platforms and a platform based on a UAV (quadrocopter) are proposed and realized to solve this task. A series of experiments is carried out to test the algorithms of self-configuration, self-organization and self-reconstruction of wireless UWB network for static and mobile scenarios. The characteristic times of “reconfiguration” are set during its structural changes. Practical applicability of the introduced algorithms and technical solutions are shown.

Введение

Развитие мобильной робототехники и ее потенциал сильно зависят от эффективности беспроводных систем связи, используемых в ней для взаимодействия с операторами и между мобильными платформами (роботами). Актуальным является также подключение локальных беспроводных сетей, размещаемых на мобильных объектах, к глобальным сетям. В связи с этим робототехническая тематика все более переплетается с тематикой Интернета вещей (Internet of Things – IoT) [1-3] и в некоторых аспектах, в том числе коммуникационных, рассматривается как составная часть IoT. Так, в [4] в Интернете вещей специально была выделена концепция Интернета робототехники (Internet of Robotic Things - IoRT).

Ярким примером системы объектов IoRT является беспилотный автомобильный транспорт. По некоторым оценкам уже в 2020 году по дорогам мира будут ездить около 250 миллионов связанных между собой автомобилей [5].

Еще одним быстроразвивающимся массовым направлением робототехники являются беспилотные летательные аппараты – БПЛА (Unmanned aerial vehicle - UAV). Причем в контексте данной статьи наибольший интерес представляют гражданские малоразмерные варианты БПЛА, количество которых по оценкам может превысить к началу 20-х годов только в США 10 миллионов.

Развитие вышеупомянутых направлений напрямую связано с прогрессом беспроводных систем связи, обеспечивающих обмен информационными потоками в пространстве Интернета робототехники.

В данной работе представлены результаты по созданию и экспериментальному исследованию локальной беспроводной сети прямохаотических сверхширокополосных (СШП) приемопередатчиков, размещаемых на мобильных платформах (роботах) [6].

Экспериментальные мобильные платформы

В процессе исследований было разработано и апробировано три варианта мобильной платформы. Эксперименты были проведены в здании ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Четырехколесное шасси на основе Arduino.

При анализе возможных решений по выбору мобильной платформы для экспериментальных исследований с беспроводными сверхширокополосными (СШП) сетями в первую очередь обращалось внимание на простоту и стоимость оборудования. С этой точки зрения привлекательным было использовать мобильные платформы на основе технологии Arduino. Именно на ее основе была разработана, изготовлена и экспериментально проверена исходная базовая платформа – колесный робот – с имплементированным в нее СШП прямохаотическим приемопередатчиком (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид шасси.



Рис. 2. Электроника платформы.

Электроника платформы показана на рис. 2. Платформа состоит из шасси, блока питания, четырех моторов, драйвера шагового двигателя, двигателя постоянного тока, макетной платы STM32 – NUCLEO с 32 битным микроконтроллером, дистанционное управление и передача данных производится с применением хаотического СШП приёмопередающего (ПП) модуля ППМ-47 [7,8].

СШП модуль ППМ-47 может использоваться самостоятельно, без специальных дополнительных плат или устройств, например, в качестве корневого узла, подключаемого к компьютеру (планшету), или как ретранслятор. Он также может входить в состав сенсорных и актуаторных узлов, где вместе с ним применяются датчики или актуаторы, соответственно. Модуль имеет полосу частот 3-5 ГГц, динамический диапазон приемника 55 дБ, излучает сигнал с пиковой мощностью 13 дБм и средней мощностью при скорости передачи 100 кбит/сек около -11 дБм.

Дистанционное управление платформой осуществляется с базовой станции, включающей в себя приемопередающий модуль ППМ-47 и ноутбук под управлением OS Linux со специальным программным обеспечением.

С созданной платформой были проведены эксперименты, целью которых было выяснить возможности СШП прямохаотического радиоканала по надежной и бесперебойной связи робот-оператор в условиях движения и многолучевого распространения сигнала.

В помещении имеется множество металлических объектов, которые усиливают эффект многолучевого распространения. При проведении эксперимента с ноутбука, к которому был подключен ПП модуль, посылались командные пакеты на ПП модуль, подключенный к платформе. Надежная связь базовой станции с платформой обеспечивалась на расстояниях до 10-12 метров, что несколько меньше радиуса действия приемопередатчиков. Это объясняется низким расположением приемопередатчиков над полом.

В процессе экспериментов обнаружилось достаточно низкое качество покупных механических компонентов платформы. Поэтому было принято решение перейти на готовые шасси и апробировать два варианта их использования в качестве механической части платформы.

Стандартное шасси.

Для работы со стандартным шасси был принят вариант с разделением функций беспроводного управления с пульта оператора (первый канал) и функций передачи данных от меток, датчиков, а также взаимодействия между платформами (второй канал).

Для проведения экспериментов было использовано шасси с габаритами 330x200x95 мм (рис. 3). Скорость передвижения данного шасси может достигать 50 км/ч. Для управления используется передатчик, способный работать в диапазоне частот от 2.4 до 2.48 ГГц. При этом ширина полосы составляет 500 кГц, излучаемая мощность достигает 20 дБм, модуляция сигнала осуществляется методом GFSK. Чувствительность приемника системы составляет -100 дБм.



Рис. 3. Стандартное шасси с СШП Приемопередатчиком.

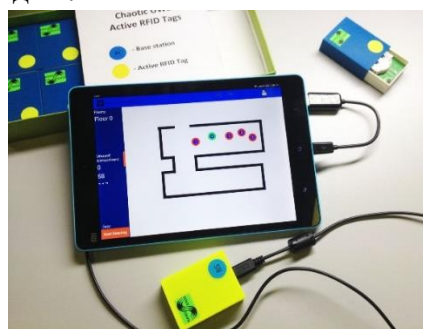


Рис. 4. Интерфейс ПО для планшета.

Концепция использования двух независимых каналов – стандартного для управления движением и сверхширокополосного для получения информации от объекта – потребовала использования второго интерфейсного устройства и создания специального программного обеспечения для него. В качестве такого интерфейсного устройства был выбран планшет под управлением операционной системы Android.

Для обеспечения взаимодействия первого приемопередатчика, расположенного на мобильной платформе, и приемопередатчика интерфейсного устройства реализовывалась логика работы, при которой приемопередатчик мобильной платформы функционировал в режиме активной метки. Он программировался на периодическую посылку сообщений, которые содержали как идентификаторы приемопередающего устройства, так и непосредственную информацию об ассоциированном мобильном объекте. Второй приёмопередающий модуль работал в качестве приёмника информации, подключался к планшету, и, после отправки на него специального пакета с планшета, начинал транслировать по USB на планшет все приходящие на него от активной метки данные.

Для работы с системой было разработано специальное программное обеспечение (ПО), которое предназначено для работы, как с единичными устройствами, так и с группами объектов. Функции ПО заключается в отправке пакета, инициализирующего процесс приема, с планшета на приемник и, далее, в интерпретации приходящих пакетов (рис. 4).

В первой серии экспериментов изучалась возможность совместной работы по 2-м отдельным каналам по узкополосному (2.4-2.48 ГГц) и сверхширокополосному (3.0-5.5 ГГц). Каналы находятся в близких диапазонах электромагнитного спектра, что может приводить к их негативному влиянию друг на друга и, соответственно, к

ухудшению качества связи. В качестве источника на платформе была установлена активная метка, посылающая в эфир сигналы каждые 0.1 секунды. Во время экспериментов негативного влияния каналов друг на друга выявлено не было: дистанционное управление платформой было устойчивым при работе метки, и данные от метки регулярно поступали на терминал.

Во второй серии экспериментов была показана возможность динамической идентификации движущегося мобильного объекта, при этом приемопередатчики были настроены на работу на расстояниях до 10-15 м. Мобильный объект перемещался на постоянной скорости вдоль коридора: сначала к станции, затем, миновав ее, удалялся. Задачей было установить, фиксирует ли базовая станция сигналы от активной метки во время движения, и как базовая станция «теряет» метку после выхода шасси из зоны связи. Движение мобильного объекта осуществлялось со скоростью 6-7 км/час, и зону радиовидимости шасси проходило за 10-12 секунд. При темпе посылки меткой сигналов через 0.1 сек, запаздывание в установлении появления объекта в зоне составляло доли секунды.

Мобильная платформа на основе квадрокоптера.

После этих экспериментов было решено расширить концепцию использования СШП приемопередатчиков в качестве средств связи для мобильных объектов на беспилотные летательные аппараты (БПЛА) типа квадрокоптеров.

В качестве летательного аппарата для мобильной платформы был выбран квадрокоптер DJI PHANTOM 3 SE. Для управления используется радиоканал с частотами 5.725-5.850 ГГц, а для передачи видеоданных WiFi система (2.400-2.483 ГГц), которая передает видеопоток изображений размером 1280x720 пикселей при частоте кадров 30 к/с.

При реализации мобильной платформы на основе квадрокоптера были проведены серии экспериментов по подъему и движению квадрокоптера вместе с размещенным на его корпусе приёмопередающим устройством. Были выявлены определенные особенности использования квадрокоптера в закрытых помещениях и при размещении полезной нагрузки (в данном случае приемопередающего СШП модуля) на нём.

Во-первых, в помещении у квадрокоптера не работали системы позиционирования GPS и Глонасс. Во-вторых, оказалось, что система позиционирования по рельефу местности, использующая ультразвуковые датчики, накладывает ограничения на место расположения нагрузки. Так первоначально предполагаемое симметричное расположение приемопередатчика использовать нельзя: ППМ перекрывает зону видимости ультразвукового высотомера. Поэтому в дальнейшем использовалось несимметричное расположение модуля (рис. 5)



Рис. 5. Полет квадрокоптера с модулем ППМ-47.



Рис. 6. Измерение максимальной дальности передачи.

В ходе экспериментов было задействовано три радиоканала: канал для дистанционного управления квадрокоптером (частоты 5.725-5.850 ГГц), канал для передачи от него видеоизображения (частоты 2.400-2.483 ГГц) и канал для передачи

данных между СШП приёмопередающими модулями (частоты 3.0-5.0 ГГц) о наличии или отсутствии сигнала в зоне действия базовой станции. На планшете было установлено программное обеспечение для контроля состояния удалённого приёмопередающего модуля.

Приёмопередающие модули были настроены на работу на расстояниях, характерных для данного помещения (до 15 м)

В первой серии экспериментов была подтверждена возможность поднятия квадрокоптером приёмопередающего модуля, а также его возможность маневрировать при наличии дополнительной нагрузки. Квадрокоптер вместе с приёмопередающим модулем был поднят на высоту около 1.5 м, вращался вокруг своей оси симметрии на 360 градусов и перемещался вдоль горизонтальной плоскости (рис. 6).

Во второй серии экспериментов проверялась возможность совместной работы всех трех радиоканалов связи. С помощью пульта контроля самого квадрокоптера производилось управление мобильной платформой, при этом квадрокоптер по своему второму радиоканалу непрерывно слал видеосигнал, фиксировавшийся монитором на пульте контроля и, наконец, приёмопередающий модуль, расположенный на квадрокоптере, периодически слал данные на базовую станцию.

В случае, когда квадрокоптер располагался на полу, максимальная дальность работы составила порядка 5 метров, что вызвано эффектом затенения. При подъёме квадрокоптера в воздух на высоту около 1.5 м максимальная дальность связи между приёмопередающими модулями составила около 11 м (рис. 6).

В ходе проведения экспериментов наблюдалась устойчивая связь как в радиоканале квадрокоптера (команды от пульта дистанционного управления и видеосигнал от его камеры передавался без искажений), так и в радиоканале передачи данных между приёмопередающими модулями.

Формирование и контроль состояния сети в группе роботов

По результатам проведенных исследований был сделан вывод о возможности и целесообразности увеличения радиуса действия разработанных СШП приемопередающих средств для того, чтобы расширить возможности их применения вне помещений. Одно из возможных решений - повышение мощности передатчиков и оптимизация приемных устройств. С этой целью на основе имеющегося задела были разработаны, изготовлены и исследованы СШП приемопередатчики с выходной мощностью до 100 мВт – ППМ-57 [9], что позволяет обеспечить связь (и получать данные) на расстоянии до 100 м при скорости передачи до 6 Мбит/сек.

Эти СШП средства связи были использованы при групповом управлении роботами и апробации алгоритмов коллективного поведения.

Особенностями беспроводных сетей, применяемых для связи с группами мобильных объектов являются: изменение расстояния между объектами; эффекты, связанные с движением (например, вхождение объектов в радио тень); возможность в процессе функционирования группировки изменения топологии сети.

Было разработано сетевое программное обеспечение для контроля за формированием сети, управления беспроводными каналами связи, по которым производится передача данных между устройствами (например, установленными на мобильных платформах), а также между мобильными платформами и базовой станцией.

Были проведены эксперименты по связи с группами приемопередатчиков до 10 устройств, расположенных в разных частях помещения, в том числе на мобильных объектах. В начале каждого эксперимента производилась инициализация СШП беспроводной сети связи, в ходе которой каждое приемопередающее устройство

определяло наличие соседей, т.е. устройств, находящихся в зоне его прямой видимости, выявлялись возможные маршруты между приемопередатчиками объектов. Затем, в соответствии с заданным критерием, по команде с базовой станции автоматически отбирались оптимальные маршруты между указанными объектами и базовой станцией. Время инициализации пропорционально числу элементов в сети и, например, для сети из 10 элементов составляет в среднем около 8 секунд.

В экспериментах основная часть приемопередатчиков находилась в статическом состоянии, а одно из устройств размещалось на мобильной платформе. Это позволяло в процессе экспериментов дистанционно по беспроводному каналу управления менять его местоположение в зале и следить за изменением топологии связности коммуникационной сети с помощью графического интерфейса на ПК. Было установлено, что в зависимости от положения мобильной платформы система связей между устройствами меняется, но при этом связность сети обычно сохраняется, что обеспечивает возможность связи между двумя любыми узлами либо напрямую, либо с использованием ретрансляций. Примеры реализуемых топологий приведены на рис. 7. Следует отметить, что каждое изменение топологии сети требует повторения процедуры инициализации, поскольку нужно уточнить наличие связей между узлами сети. Полная инициализация – достаточно медленный процесс. Однако, если, как это было в рассматриваемых экспериментах, меняется положение только одного узла, то могут появляться и исчезать только связи между ней и остальными узлами. Связи же между остальными узлами не меняются в силу их статичности. Учет этого факта уменьшал время повторной, по существу, частичной инициализации, в среднем до 2-3 секунд.

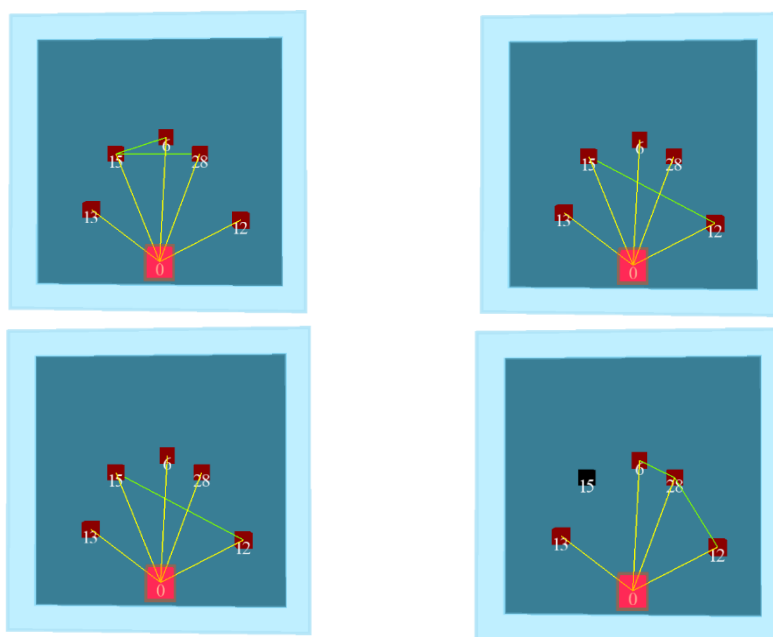


Рис. 7. Изменение связей между узлами сети при изменении положения мобильного узла (узел с номером №15).

Группировка мобильных платформ

Следующим этапом исследований была апробация разработанных алгоритмов и технических решений на группировке мобильных роботов.

При создании группировки использовались вышеупомянутые колёсные платформы. В качестве приемопередатчиков на платформы были установлены устройства ППМ-57 (рис. 8). В первой серии экспериментов группировка состояла из четырех колесных платформ, которые могли свободно перемещаться по проходам

между креслами зала, и одного статического установленного приемопередатчика (рис. 9). Настройка чувствительности приемопередатчиков была произведена таким образом, чтобы при перемещении дистанционно управляемых платформ и соответствующем изменении условий распространения СШП радиосигналов между объектами, происходило изменение топологии сети. В исходном состоянии платформы группировки были размещены на расстояниях друг от друга, при которых обеспечивалась связь каждой платформы с четырьмя остальными и базовой станцией.



Рис. 8. Мобильная колёсная платформа с ПИМ-57.



Рис. 9. Группировка мобильных колесных платформ в движении.

После начала движения топология сети могла радикально меняться. В первую очередь, при этом интересны ситуации, в которых при изменении топологии сеть остается односвязной. Это означает, что, несмотря на отсутствие части связей, всегда имеется хотя бы один маршрут, по которому каждая платформа может связаться с любой другой и с базовой станцией. Было установлено, что в зависимости от взаимного расположения платформ в процессе экспериментов топология сети менялась радикальным образом, включая случаи, при котором терялась ее односвязность. Это приводило к потере связи с теми элементами, которые «выпадали» из связной части сети.

Одна из проблем, которая достаточно остро встала в этих экспериментах – время реинициализации сети. Оно не являлось критичным при работе со статическими сетями. В ситуации, когда только одна, или некоторая часть платформ является мобильной, эта проблема тоже еще не является критически острой. Но при полностью мобильной группировке роботов, ее уже нельзя решить с помощью полумер.



Рис. 10. Мобильная группировка, включающая четыре колесных платформы и квадрокоптер: а) группировка перед стартом квадрокоптера, топология коммуникационной сети полносвязна; б) квадрокоптер летает по залу, топология сети меняется с изменением положения БПЛА.

Анализ ситуации показал, что длительность инициализации (и, соответственно, реинициализации) определяется балансом требований к энергопотреблению приемопередатчиков в сети. До сих пор применялись режимы работы сети, при которых опрос соседей производился достаточно редко: скважность между включенным и выключенным состоянием приемника составляла более 15. Программное снижение скважности до двух позволило снизить продолжительность процесса реинициализации в среднем до 3 секунд, что позволяет существенно ускорить допустимые динамические изменения в местоположении объектов группировки роботов без потери работоспособности ее коммуникационной системы.

Это было наглядно видно, когда во второй группе экспериментов в группировку вместо статического узла была дополнительно включена мобильная платформа на основе квадрокоптера (рис. 10). В исходном положении платформ (рис. 10а) топология коммуникационной сети была полносвязной. В случаях, когда квадрокоптер выпадал из сети в процессе движения, удавалось быстро восстановить связность сети за счет коррекции его положения в пространстве.

Заключение

В работе рассмотрена задача создания и экспериментального исследования беспроводной сверхширокополосной прямохаотической сети связи, приемопередатчики которой расположены на подвижных роботах (мобильных платформах).

Предложены и реализованы два варианта колесных платформ и платформа на основе беспилотного летательного аппарата – квадрокоптера для решения поставленной задачи. Проведены серии экспериментов по самоконфигурации, самоорганизации и самовосстановлению беспроводных СШП сетей статического и мобильного типа. Установлены характерные времена «переконфигурации» сети при ее структурных изменениях. Показаны практическая работоспособность предложенных алгоритмов и технических решений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 1619-00084).

Литература

1. Gershenfeld N., Krikorian R., Cohen D. The internet of things. Scientific American. 2004. V. 291, Issue 4. P. 76-81.
2. Грингард С. Интернет вещей. М.: Альпина. 2016. 186 с. (Greengard, S. The Internet of Things. MIT Press. 2015.)
3. Internet of Things vs. Internet of Everything: What's the Difference? ABI Research. 2014. 10 p.
4. The Internet of Robotic Things. <https://www.abiresearch.com/marketresearch/product/1019712-the-internet-of-robotic-things/> (accessed October 12, 2016).
5. Gartner Says By 2020, a Quarter Billion Connected Vehicles Will Enable New In-Vehicle Services and Automated Driving Capabilities. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2970017> (accessed October 12, 2016).
6. Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Мохсени Т.И., Попов М.Г. Взаимодействие и навигация роботов на основе сверхширокополосной прямохаотической связи // Радиотехника и Электроника. 2016. Т. 61. №8. С.1-8
7. Дмитриев А.С., М. Ю. Герасимов М.Ю., Ицков В.В., Лазарев В.А., Попов М.Г., Рыжов А.И. Активные беспроводные сверхширокополосные сети на основе

хаотических радиоимпульсов. // Радиотехника и Электроника. 2016. Т. 62. №4. С. 354-363.

8. Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Попов М.Г. Беспроводные активные сети на основе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов // Электронные компоненты. 2016. №11. С. 96-100.

9. Отчёт о ПНИИ «Создание программно-аппаратных средств инфо-коммуникационной инфраструктуры для малых населённых пунктов на основе подхода сверхширокополосных беспроводных программно-конфигурируемых сетей». № ГР 114122470036. 2015 г. 36 с.