

Анализ характеристик детерминированной и вероятностной самоорганизации беспроводных сверхширокополосных сенсорных сетей на основе хаотических радиопульсов

Юркин В.Ю.

Московский Физико-Технический Институт (государственный университет); 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9; vitalik2002@gmail.com

В работе описываются детерминированный и вероятностный алгоритмы самоорганизации беспроводных сверхширокополосных сенсорных сетей на основе хаотических сигналов и приводится их сравнительный анализ. Показаны преимущества использования СШП сигналов с хаотической несущей по сравнению с узкополосными сигналами для задачи самоорганизации в плотных сенсорных сетях.

In this article deterministic and probabilistic algorithms for self-organization of UWB wireless sensor networks based on chaotic signals are described and comparative analysis is considered. The advantages of using UWB signals with the chaotic carrier compared to narrow-band signals used for the problem of self-organization in dense sensor networks are shown.

Введение

Использование СШП прямохаотических средств связи в беспроводных сенсорных сетях выглядит перспективным: оно позволяет создать малогабаритные приёмопередатчики, обеспечивающие высокие коммуникационные характеристики в реальных каналах в условиях многолучевых искажений; узлы могут контактировать только с близлежащими соседями и, благодаря низкой мощности, избегать межузловой интерференции, которая существует в узкополосных системах [1]. Стоит отметить, что потенциально скорость передачи данных на базе хаотических СШП сигналов гораздо выше, чем при использовании узкополосных сигналов. Рассмотрим, каким образом данная особенность сигналов сказывается при решении задачи самоорганизации беспроводных сенсорных сетей.

Задача автоматической организации беспроводной сенсорной сети исследуется со времени появления беспроводных ad hoc сетей [2]. В ходе исследований были выдвинуты требования к алгоритмам самоорганизации [3, 4]. Одним из основных требований является установление связей между всеми узлами сети, находящимися в пределах радиовидимости друг друга и объединением их в сеть. Для решения задачи установления связей между узлами в работе используются детерминированный и вероятностный алгоритмы самоорганизации сети.

Задача вероятностного и детерминированного алгоритмов самоорганизации заключается в определении узлами сети своих соседей (узлов, расположенных в пределах радиовидимости) и маршрутов до центрального узла. Центральным узлом называется узел, подключенный к ПК и играющий роль точки сбора данных с сенсорных узлов.

Для корректной работы алгоритмов самоорганизации должны выдерживаться следующие условия: радиус действия приёмопередатчиков должен обеспечивать связность сети; каждый приёмопередатчик должен иметь свой уникальный сетевой номер; известно общее число узлов сети; приёмопередатчики стационарны или медленно перемещаются в пространстве.

Центральный узел запускает процесс организации сети путём посылки в эфир специальных пакетов инициализации. Получая пакеты инициализации от центрального узла, узлы создают и хранят у себя таблицу маршрутизации, в которой записаны номер

сети, сетевой адрес центрального узла и сетевой адрес (ID) родительского (по отношению к «дереву» связей) узла сети. Последующая передача информации от сенсоров узла на точку сбора пойдет именно через этот узел. Если в сети несколько точек сбора данных, для каждой из них в таблице маршрутизации хранится соответствующая запись. Также на каждом узле хранится таблица связей, в которую записываются сетевые адреса устройств, находящихся «ниже» по дереву связей относительно данного узла.

В результате работы алгоритмов строится топология сети типа «дерево», корнем которого является центральный узел, подключенный к ПК. При этом передача данных от удаленных узлов на точку сбора осуществляется путем ретрансляции соответствующих пакетов промежуточными узлами.

Основное различие между алгоритмами находится на уровне доступа к каналу связи связанное с механизмом избегания коллизий. В детерминированном подходе используется механизм последовательного опроса центральным узлом остальных узлов с целью определения их локальных соседей. Так как все узлы опрашиваются последовательно, то в данном алгоритме отсутствуют коллизии. В вероятностном подходе опрос узлов происходит случайным образом, то есть узлы могут передавать сигналы друг другу одновременно. Условно такой подход можно назвать параллельным, так как в один момент времени сразу несколько узлов сети могут передавать и принимать сигналы. В связи с этим неизбежно возникновение ситуаций, при которых на один и тот же узел одновременно пытаются передать пакеты два или большее число других узлов, что приводит к коллизии и как следствие, потере всех передаваемых ему пакетов. Для избегания коллизий используется метод на базеALOHA [5]. Приёмопередатчик включает приёмник и прослушивает некоторое фиксированное время эфир. Если эфир оказался чист, то он продолжает прослушивание эфира в течение случайного промежутка времени, если и в этот раз сигналов в эфире обнаружено не было, то приёмопередатчик излучает свой сигнал в эфир. В случае если во время прослушивания эфира был обнаружен сигнал, то он принимается и обрабатывается приёмопередатчиком, а процесс доступа к каналу связи повторяется.

Моделирование работы детерминированного и вероятностного алгоритмов самоорганизации беспроводной сенсорной сети

Для моделирования беспроводной сенсорной сети была разработана имитационная модель, описывающая работу сети на канальном и сетевом уровне. На канальном уровне моделируется доступ к каналу связи, передача и приём пакетов, обрабатываются коллизии. На сетевом уровне в модели формируются, анализируются и обрабатываются различные типы сетевых пакетов. В отдельном программном модуле задаётся общая логика работы устройств сети. Такая структура модели позволяет изменять логику работы устройств сети и следить за поведением сети в целом.

Целью моделирования являлось выяснение работоспособности предложенных алгоритмов и определение специфики их применения. В качестве сравнительной характеристики было выбрано время самоорганизации сети. Время самоорганизации сети – это время, через которое центральный узел получит информацию обо всех узлах, входящих в организуемую сеть (идентификационные номера), а также данные о связях между узлами сети и сможет определить топологию сети. Отметим, что знание топологии сети не является обязательным требованием к самоорганизующимся сетям.

Вероятностный алгоритм

Вероятностный алгоритм самоорганизации включает в себя упрощённую версию алгоритма маршрутизации AODV[6] и механизм борьбы с коллизиями на основе

ALONA. Центральный узел рассылает пакеты инициализации соседним узлам. Узлы получившие пакет инициализации в первый раз ретранслируют его всем соседям, при этом записывая в свою таблицу маршрутизации информацию об узле, от которого пакет был получен (идентификационный номер узла родителя). После получения пакета инициализации узел выжидает некоторое фиксированное время и отправляет на центральный узел пакет подтверждения о подключении к сети, в котором содержится информация для определения топологии сети.

На площади 100x100 случайным образом располагается 100 узлов сети с радиусом действия 20. Один из узлов назначается точкой сбора. Далее с помощью вероятностного алгоритма моделируется процесс самоорганизации сети. В результате моделирования формируется структура связей типа "дерево".

Было проведено 4 эксперимента по 20 испытаний. Расположение узлов изменялось случайным образом при проведении каждого испытания. В каждом эксперименте задавался параметр RandWaitPeriod. Физический смысл параметра RandWaitPeriod – максимально возможное количество временных слотов в пределах которого случайным образом задерживается отправка сигнала в эфир, если до этого в эфире не было обнаружено других сигналов. Длительность одного временного слота равна сумме длительности пакета и времени обработки его на принимающем узле. Каждый узел случайным образом выбирает номер временного слота на интервале [0, RandWaitPeriod].

Параметры проведённых экспериментов:

Постоянные величины: длительность пакета – 60 мкс (18 байт); время обработки пакета на узле – 20 мкс; фиксированное время прослушивания эфира – 120 мкс; время, через которое отправляются пакеты подтверждения о присоединении узла к сети – 12000 мкс. Перечисленные исходные данные обеспечивают физическую скорость передачи 2,5 Мбит/с.

Переменной величиной в каждом эксперименте было максимальное количество временных слотов RandWaitPeriod. В первом, втором, третьем и четвёртом эксперименте значение RandWaitPeriod принимало значения 100, 150, 200 и 250 соответственно. Результаты проведённых экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты моделирования сети с помощью асинхронного алгоритма

RandWaitPeriod	Среднее кол-во проинициализированных узлов (из 100)	Среднее время инициализации в мкс	Усреднённое значение максимального кол-ва прыжков
100	86,7	245160	7,95
150	90,9	356692	8,05
200	92,95	485024	8,5
250	93,95	550015	8,15

Детерминированный алгоритм

В детерминированном алгоритме узлы сети присоединяются к центральному узлу поочередно. Первыми информацию о себе и своих связях сообщают узлы расположенный в непосредственной радиовидимости центрального узла. Затем опрашиваются узлы расположенные в одной ретрансляции от центрального узла. Потом центральный узел запрашивает информацию от узлов расположенных на расстоянии двух ретрансляций от него и т.д. Процесс продолжается пока все узлы не сообщат на центральный узел необходимую ему информацию для определения топологии сети.

Эксперименты, аналогичные описанным выше, были проведены с помощью детерминированного алгоритма. Но в детерминированном алгоритме отсутствуют случайные задержки, следовательно эксперименты не будут отличаться друг от друга, поэтому был проведён один эксперимент из 20 испытаний. Результаты проведённого эксперимента представлены в таблице 2.

Сравнив таблицы 1 и 2 легко видеть, что в вероятностном алгоритме количество проинициализированных узлов меньше 95%, а в детерминированном равно 100%. При этом значительно различается время инициализации узлов. Среднее время инициализации в детерминированном алгоритме составляет порядка 1,3 секунды, в то время как при использовании вероятностного алгоритма оно составляет порядка 0,5 секунды.

Согласно беспроводным сетям стандарта ZigBee, физическая скорость передачи данных между узлами ограничена сверху 250 Кбит/с на частоте 2,4 ГГц. То есть все узкополосные ZigBee-устройства в 10 раз медленнее, чем приёмопередатчики на основе хаотических сигналов. Это означает, что время самоорганизации сети ZigBee будет на порядок больше, чем в СШП сетях с хаотической несущей.

Таблица 2. Результаты моделирования сети с помощью синхронного алгоритма

RandWaitPeriod	Среднее кол-во проинициализированных узлов (из 100)	Среднее время инициализации в мкс	Усреднённое значение максимального кол-ва прыжков
-	100	1438300	6,85

В результате моделирования самоорганизации двумя алгоритмами, можно сделать вывод, что вероятностный алгоритм подходит для задач, в которых не критична 100% инициализация узлов сети, и важно время развёртывания сети. Детерминированный алгоритм подходит для приложений в которых важна инициализация всех узлов сети и не требуется быстрое развёртывание сети.

Самоорганизация в "плотных" беспроводных сенсорных сетях

В связи с рядом ограничений для беспроводных сенсорных сетей, описанных в стандарте IEEE 802.15.4a и согласно принятому в 2002 году федеральной комиссией по коммуникациям США частотному диапазону и спектральной маске мощности для нелицензируемых СШП систем связи [7] ограничивается дальность действия СШП приёмопередатчиков. Радиус действия прямохаотических приёмопередатчиков составляет примерно 30% от заявленной дальности узкополосных приёмопередатчиков стандарта ZigBee. Напомним, что в спецификации Zigbee устройства должны устанавливать связь на расстоянии до 100 м.

Таким образом, для покрытия одной и той же площади сенсорной сетью из устройств стандарта ZigBee и СШП сенсорной сетью из прямохаотических сенсорных приёмопередатчиков последних потребуется больше. Для приложений, в которых требуется разместить большое количество сенсорных устройств на небольшой площади, то есть для плотных сенсорных сетей, предпочтительным будет использование приёмопередатчиков на базе СШП сигналов с хаотической несущей. Преимущество такого подхода заключается в более надёжной доставке пакетов за счёт избегания коллизий между узлами, попавшими в радиус действия передающего устройства. Если узкополосный ZigBee приёмопередатчик может установить связь с аналогичным приёмопередатчиком на расстоянии до 100 метров без ретрансляций, то для СШП сетей потребуется 2 ретрансляции. Но учитывая, что скорость передачи в

СШП сетях на порядок больше, сообщение до узла назначения будет доставлено быстрее. Оценим время доставки сообщения в ZigBee сети без ретрансляций и в СШП сети на базе прямохаотических приёмопередатчиков. Для передачи сообщения длиной 17 байт на скорости 250 Кбит/с ZigBee устройству понадобится ~550 мкс. Для передачи того же сообщения в СШП сети, работающей на скорости 2,5 Мбит/с с двумя ретрансляциями и учётом времени обработки на каждом ретрансляторе понадобится ~200 мкс (время обработка ~20 мкс). Из приведённых оценок видно, что время доставки в СШП сетях отличается более чем в 2 раза от узкополосных сетей стандарта ZigBee.

Из описанных выше алгоритмов самоорганизации для плотных сетей удобно использовать вероятностный алгоритм самоорганизации, так как его время самоорганизации почти в 3 раза меньше, чем у детерминированного. Кроме того время самоорганизации в вероятностном алгоритме можно уменьшить используя знания о плотности сети и в зависимости от этого подобрать параметр RandWaitPeriod.

Выводы

В работе описаны детерминированный и вероятностный алгоритмы самоорганизации беспроводных сверхширокополосных сенсорных сетей на основе хаотических сигналов. Приведены сравнительные характеристики обоих алгоритмов, полученные в результате моделирования. Показаны преимущества СШП сенсорных сетей на базе хаотических сигналов по сравнению с сетями стандарта ZigBee при решении задачи самоорганизации.

Приведены оценки времени самоорганизации в СШП сетях при использовании вероятностного и детерминированного алгоритмов. Описаны преимущества использования СШП сигналов с хаотической несущей по сравнению с узкополосными сигналами для задачи самоорганизации в плотных сенсорных сетях.

Литература

1. Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Юркин В.Ю. Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети на основе хаотических радиоимпульсов. *Изв. ВУЗов, Прикладная нелинейная динамика*, 2009, т. 17, №4, с. 90-104.
2. С. К. Toh, *Ad Hoc Mobile Wireless Networks*, Prentice Hall Publishers, 2002.
3. Krishnamchari B., *Networking Wireless Sensors*, Cambridge University Press, 2005, pp.202.
4. Mills K.L., A brief survey of self-organization in wireless sensor networks // *Wireless Communications and Mobile Computing*. - 2007. - V. 7, N. 7. - P. 823-834.
5. N. Abramson. Power-aware routing in mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the Fall 1970 AFIPS Computer Conference*, 1970.
6. <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc3561/>
7. FCC News Release. Feb. 14. 2002. <http://www.fcc.gov/headlines2002.html>