УДК 621.391.01

АНАЛИЗ СВЯЗАННОСТИ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С КОЛЛЕКТИВНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2008 г. ***А.Н. Садков, К.Г. Мишагин, В.А. Пастухов, А.Л. Умнов***

Нижегородский госуниверситет им. Н.И.Лобачевского

axel@wl.unn.ru

Поступила в редакцию 09.10.2008

Предлагается новый способ передачи информации в беспроводных сенсорных сетях, основанный на когерентном сложении полей, излучаемых близко расположенными беспроводными узлами. Когерентное сложение позволяет увеличить дальность передачи информации и может быть использовано для повышения зоны покрытия и решения проблемы низкой связанности сети в случае неоднородного размещения беспроводных узлов. Создана компьютерная модель сенсорной сети, использующей предлагаемый способ передачи информации. Проведен численный анализ эффективности метода коллективной передачи информации, основанный на изучении связанности сети, продемонстрирована возможность продления времени жизни сенсорной сети с помощью данного метода.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, коллективная передача информации, связанность сети.

Введение

В настоящее время беспроводные сенсорные сети стали новой парадигмой развития сетевых технологий. Такие сети состоят из большого числа автономных узлов, имеющих в своем составе трансивер, микропроцессор, сенсорное устройство и источник питания. Узлы сети, располагаясь на небольшом расстоянии друг от друга, собирают информацию о параметрах окружающей среды и передают ее по цепочке: от узла к узлу на точку сбора информации. Число узлов в подобных сетях может составлять от нескольких единиц до десятков тысяч. Области применения сенсорных сетей весьма обширны: экологический контроль больших территорий, охрана различных объектов, мониторинг производственных процессов, контроль сложных инженерных сооружений, сбор информации о состоянии сельскохозяйственных угодий, мониторинг жилища и многое другое.

В сенсорных сетях возникает целый ряд новых проблем, изучению которых уделяется большое внимание [1–4]. Одной из таких проблем является проблема низкой связанности, заключающаяся в дроблении сети на не связанные между собой группы узлов. Во многих задачах, когда требуется разместить достаточно большое количество беспроводных узлов на некоторой обширной территории, предполагается, что эти узлы разбрасываются с самолета или вертолета [2], при этом их пространственное распределение является случайным и может быть сильно неоднородным. Узлы могут иметь сильно неоднородное пространственное распределение, даже если они размещаются вручную. Это может быть связано с особенностями решаемой задачи (например, пространственное распределение объектов, к которым прикрепляются датчики, является неоднородным). В силу того что каждый узел обладает ограниченным радиусом радиосвязи, низкая плотность размещения узлов может приводить к разбиению сети на группы, связь между которыми отсутствует. Даже в случае высокой плотности размещения узлов особенности рельефа (водоемы, естественные преграды, строения и т.п.) могут привести к изоляции некоторых групп узлов от основной части сети. Другая причина дробления сети на не связанные друг с другом части – «энергетическая деградация» сети, под которой понимается постепенный выход из строя сенсорных узлов в результате истощения в них запаса энергии, который в каждом узле является ограниченным. В процессе работы в сенсорной сети формируются каналы передачи данных, состоящие из беспроводных узлов, по которым информация стекается в заданную приемную точку. При этом нагрузка распределяется неравномерно между разными узлами, например все каналы передачи данных проходят через узлы, окружающие точку сбора и обработки информации, поэтому на эти узлы приходится максимальная нагрузка. При случайном размещении беспроводных узлов эффект неравномерности распределения нагрузки между узлами усиливается. Так, некоторые узлы могут оказаться связующими звеньями между боль-

шими группами узлов, тогда энергия в связующих узлах заканчивается значительно быстрее, чем в большинстве остальных узлов, выход из строя связующих узлов также ведет к дроблению сети.

В данной работе предлагается метод коллективной передачи информации, направленный на решение проблемы низкой связанности в сенсорных сетях. Идея данного метода заключается в том, что близко расположенные друг к другу узлы объединяются для синхронной передачи данных на другой узел или точку сбора информации. Предполагается, что в приемном устройстве сигналы от передающих узлов когерентно складываются, таким образом, возникает возможность значительного увеличения дальности передачи информации внутри сети, что может быть использовано для установления или восстановления связи с изолированными группами узлов и должно способствовать повышению связанности и увеличению зоны покрытия сети в целом. Для осуществления когерентного сложения мощностей прежде всего необходимо обеспечить синхронизацию излучения беспроводных узлов. Решение задачи синхронизации генераторов в беспроводных узлах может быть достигнуто на основе стандартного подхода, предполагающего использование систем фазовой автоподстройки [5]. Однако реализация подобных схем синхронизации значительно усложняет устройство беспроводных узлов и существенно повышает их стоимость. Возможно другое решение – это использование в радиопередающих устройствах узлов пассивных рассеивателей, которые переизлучают общее для всех электромагнитное поле (поле подсветки), создаваемое некоторым сторонним источником. Таким образом, обеспечивается когерентность полей излучения беспроводных узлов, при этом внутреннее устройство самих узлов может быть крайне простым. Применение пассивных рассеивателей для передачи информации является новым направлением в развитии беспроводной связи, на данный момент пассивные рассеиватели уже применяются в устройствах считывания данных с беспроводных меток (системы RFID). Важно отметить, что использование общего поля подсветки позволяет существенно снизить энергетические затраты на передачу информации беспроводными узлами. В качестве пассивных рассеивателей могут быть использованы рассеиватели, переотражающие сигнал с преобразованием спектра (т.н. нелинейные рассеиватели), сигнал от которых может быть легко выделен на фоне сильного поля подсветки [6].

Для анализа эффективности предлагаемого метода коллективной передачи информации в работе проводится сравнение связанности сети с использованием коллективной передачи и без нее. Рассмотрен простой адаптивный алгоритм, предполагающий случайный подбор фазовых сдвигов в излучателях, для управления зоной покрытия передающего кластера. Демонстрируется возможность продления времени жизни сенсорной сети с помощью применения метода коллективной передачи информации.

1. Описание модели

Рассмотрим модель сенсорной сети, имеющей стационарную топологию (рис. 1а). Пусть все узлы сети одинаковы и случайно распределены по некоторой плоской территории, то есть лежат в одной плоскости. Предположим, что системы связи узлов устроены таким образом, что каждый узел имеет один и тот же фиксированный радиус действия R (рис. 1а), то есть будем считать, что любые два узла, находящиеся на расстоянии меньше R, могут организовать канал связи между собой, в противном случае связь невозможна (при коллективной передачи информации дальность радиосвязи может быть увеличена). Для реализации идеи когерентного сложения мощностей сеть разбивается на кластеры – группы узлов, излучение передатчиков которых может быть синхронизировано по частоте и стабилизировано по фазе. Фактически, подобные кластеры представляют собой виртуальные антенные решетки, формирующие общее поле излучения. Для образования кластеров используется энергетически эффективный алгоритм самоорганизации узлов, основанный на идентификационном номере, который изначально присвоен каждому узлу [7, 8]. Данный алгоритм предъявляет следующие требования, которые обеспечиваются в большинстве протоколов канального уровня в беспроводных сетях [8]:

1. Каждый узел имеет уникальный идентификационный номер и знает идентификационные номера ближайших соседей, т.е. узлов, находящихся внутри радиуса действия данного узла.

2. Сообщение, переданное узлом, принимается корректно всеми ближайшими соседями данного узла за конечное время.

В данной работе используется алгоритм кластеризации, в результате действия которого главным (центральным) узлом кластера становился узел, обладающий наибольшим количеством соседей (узлов на расстоянии меньшем R), например узлы № 2, 4, 28 – главные узлы в сво-

их кластерах (рис. 1а). Логику работы алгоритма можно представить следующим образом:

1. Обмен идентификационными номерами между ближайшими соседями.

2. Рассылка каждым узлом информации о количестве ближайших соседей.

3. Узел, имеющий максимальное количество соседей и минимальный номер в случае, если несколько узлов имеют одинаковое количество соседей, передает сообщение о том, что он является центральным узлом. Приняв данное сообщение от одного или нескольких узлов, остальные узлы присоединяются к кластеру, в котором центральный узел имеет максимальное количество соседей (минимальный номер в случае одинакового количества соседей у нескольких узлов).

4. Посылка узлами, не являющимися центральными, сообщения со своим номером и номером центрального узла своего кластера, таким образом, главные узлы знают все узлы, входящие в кластер.

Детальное описание данного алгоритма можно найти в работах [7, 8]. В результате действия алгоритма каждый кластер имеет топологию «звезда», то есть связь между узлами кластера происходит через центральный узел. Прямая связь между центральными узлами отсутствует.

Данный алгоритм позволяет получать кластеры компактной формы, что важно для организации на их основе виртуальных антенных решеток. Узел, принадлежащий кластеру, для передачи информации предварительно распределяет свои данные между узлами кластера через центральный узел, а затем эта информация по команде центрального узла синхронно передается всем кластером на любой из узлов другого кластера.

При расчете суммарного поля от системы излучающих узлов сети комплексная амплитуда поля на расстоянии r от каждого узла вычисляется по эмпирической формуле, полученной для приземных каналов связи [9]:

$$E(r) = E_s\left(\frac{r}{R}\right)^{-d} \exp(-ikr), \qquad (1)$$

где E_s – фиксированный порог чувствительности по полю для приемных устройств, k – волновое число в свободном пространстве, d – степень затухания поля, которая варьируется от $d = 1$ (для модели свободного пространства) до $d = 2$ (для модели распространения радиоволн над проводящей поверхностью). Радиус действия R является фиксированным и не зависит от выбранной степени затухания d (предполагается, что для разных степеней затухания мощность излучателей разная, обеспечивающая постоянство параметра R). Такое требование является естественным для сети, предназначенной для мониторинга параметров среды с заданным пространственным разрешением.

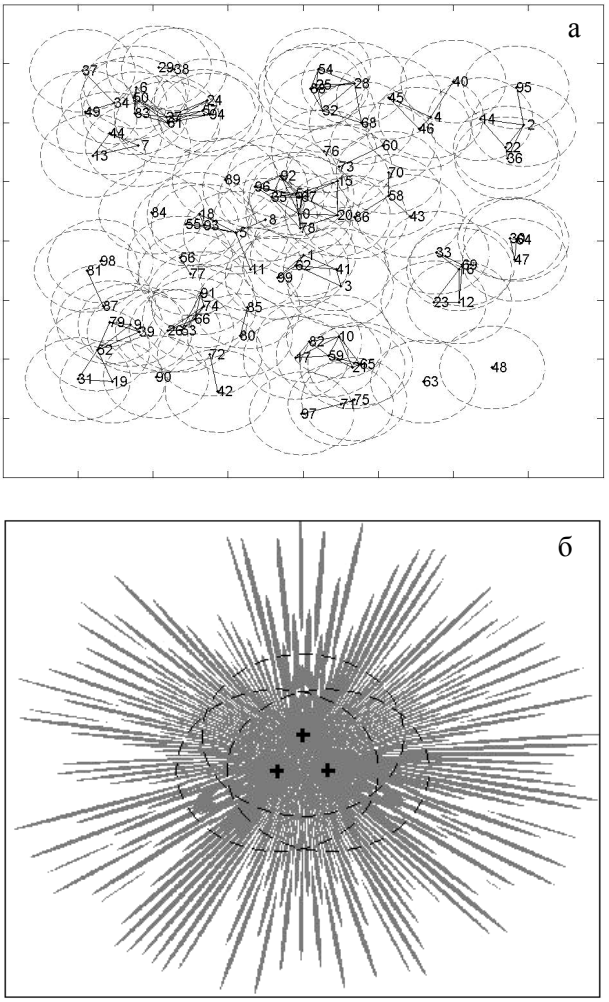

Рис. 1. а – Иллюстрация сенсорной сети с разбиением узлов на кластеры, б – зона покрытия виртуальной антенной решетки, состоящей из трех всенаправленных антенн. Пунктиром отмечены границы зоны покрытия для каждого узла в отдельности

На рис. 1б представлена зона покрытия кластера – виртуальной антенной решетки (параметр d = 1), найденная путем суммирования полей трех синхронно излучающих узлов. Закрашена область, внутри которой величина поля превышает порог чувствительности E_s. Как видно, площадь покрытия увеличивается по сравнению с общей площадью покрытия одиночных узлов (на рис. 1б площадь закрашенной территории более чем в два раза превышает общую площадь покрытия одиночных узлов), однако граница этой зоны сильно изрезана. Рисунок 1б имеет следующий масштаб: расстоя-

ние между узлами составляет 30λ, а радиус действия каждого узла – 50λ, где λ – длина волны электромагнитного излучения. Характерным диапазоном частот для сенсорных сетей является диапазон около 2.4 ГГц. Например, стандарт беспроводной связи 802.15.4 (ZigBee), который кроме прочих областей применения также нацелен на использование в сенсорных сетях, имеет спецификацию для данного частотного диапазона. Если частота излучения беспроводных узлов составляет 2.4 ГГц (λ = 12.5 см), то на представленном рисунке радиус действия узлов – 6.25 м, расстояние между узлами – 3.75 м. Важно отметить, что изрезанность зоны покрытия приводит к тому, что связь между двумя кластерами, использующими метод коллективной передачи информации, может быть как двунаправленной, так и однонаправленной. При численном моделировании сети с коллективной передачей информации будем рассматривать двунаправленную связь, то есть считается, что связь между двумя кластерами возможна при условии, если хотя бы один из узлов кластера А находится внутри зоны покрытия кластера Б и хотя бы один узел кластера Б находится внутри зоны покрытия кластера А. Таким образом возможна реализация алгоритмов передачи данных, которые предполагают посылку служебных сообщений, подтверждающих правильность передачи данных.

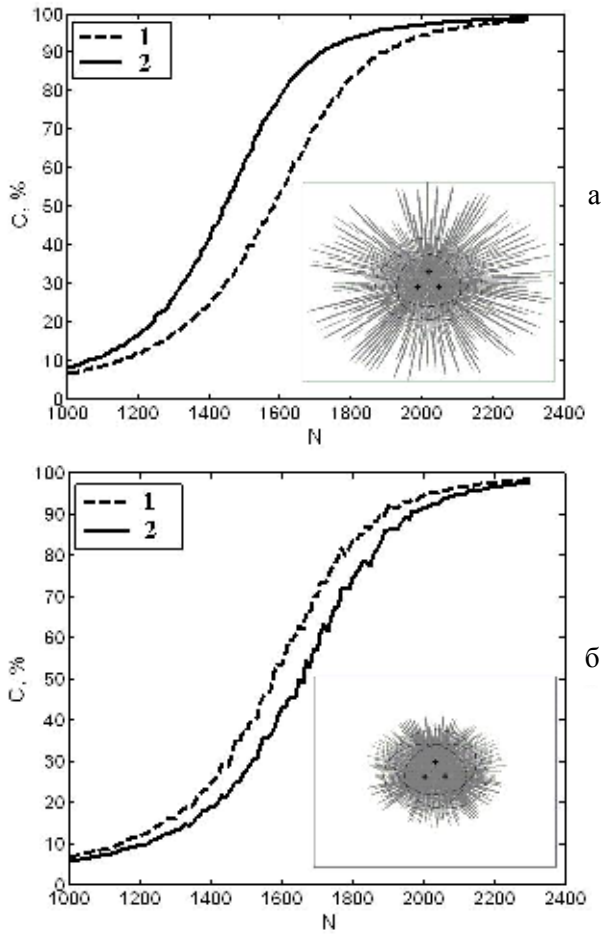

Рис. 2. Зависимость связанности сети от общего количества узлов для разных значений степени затухания поля (а – d = 1, б – d = 2); 1 – результат для сети без кластеризации, 2 – сеть с кластеризацией. Во вставках представлена иллюстрация зоны покрытия кластера из трех узлов при соответствующих значениях параметра d

2. Компьютерное моделирование

Для численного анализа используется модель сенсорной сети, описанная выше. При моделировании метода коллективной передачи информации этот метод реализуется во всей сети, то есть вся сеть разбивается на кластеры и обмен информацией осуществляется между кластерами. В следующих численных экспериментах связанность сети определяется как процентное отношение количества узлов, составляющих связный граф наибольшего размера, к общему числу узлов сети. В случае когда связанность сети составляет C =100%, существует маршрут, связывающий любые два узла. Сеть имеет следующие пространственные масштабы: территория, на которой размещаются узлы, имеет размер 1000λ × 1000λ, радиус действия каждого узла составляет 30λ. Координаты узлов выбираются случайно с равномерной функцией распределения на сетке с шагом λ/2. При расчете связанности количество узлов сети изменяется от 1000 до 2300 с шагом 10. Каждое значение коэффициента связанности усредняется по результатам 500–1000 экспериментов. На рис. 2а представлен результат для параметра d = 1, на рис. 2б – для d = 2. Как видно, степень затухания поля существенно влияет на эффективность использования когерентного сложения мощностей. Так, при d = 1 на рис. 2а видно, что использование коллективной передачи информации дает выигрыш в связанности сети, а при d = 2 на рис. 2б, наоборот, коэффициент связанности для сети с коллективной передачей информации хуже, чем для обычной сети. Интересно выяснить, при каком значении параметра d связанность сети с кластеризацией (с использованием коллективной передачи информации) равна связанности сети без кластеризации. На рис. 3 представлена зависимость коэффициента связанности от параметра d для количества узлов сети N = 1700 и N = 2000. Напомним, что радиус действия одиночных узлов R фиксирован и не зависит от d, поэтому связанность сети без кластеризации также не зависит от параметра d. Видно, что величина связанности одинакова и для сети с

для сети с коллективной передачей информации, и для обычной сети при значении $d \approx 1.4$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что прямое использование когерентного сложения мощностей близких узлов может не только не улучшить связанность сенсорной сети, но и ухудшить ее. Сделать эффективным использование предлагаемого метода коллективной передачи информации можно с помощью введения адаптивных алгоритмов подстройки фазы. Однако многие задачи, связанные с применением сенсорных сетей, требуют использования дешевых беспроводных узлов, имеющих максимально простое устройство, в таком случае реализация сложных адаптивных алгоритмов, направленных на оптимальную подстройку фазовых сдвигов для обеспечения максимума поля излучения в точке приема, становится невозможной. Рассмотрим наиболее простой алгоритм, который может быть реализован в дешевых сенсорных узлах. Как уже было сказано выше, предполагается, что связь между кластерами должна быть двунаправленной. После передачи кластером сообщения центральный узел кластера ждет подтверждение о принятии данного сообщения другими кластерами. Информация, подтверждающая корректный прием, может быть принята непосредственно центральным узлом либо любым другим узлом кластера, инициировавшего передачу данных, и далее передана на центральный узел. Если по истечении некоторого интервала времени центральный узел не получил ни одного подтверждения, тогда он инициирует перестройку фаз в узлах кластера и повторную передачу данных всем кластером. Перестройка фазы излучения происходит по случайному закону независимо в каждом узле кластера. Путем изменения фазы излучения в беспроводных узлах можно управлять зоной покрытия передающего кластера. Осуществление нескольких случайных перестроек фаз позволяет повысить вероятность попадания принимающего узла в зону покрытия кластера, таким образом можно сгладить вредное влияние изрезанности зоны покрытия. Как было показано в [10], управление сдвигом фазы переизлучаемого поля можно довольно просто реализовать в нелинейных рассеивателях. На рис. 4а и рис. 4б представлены графики, аналогичные графикам на рис. 2, но с использованием случайного подбора фазовых сдвигов. В данном случае в каждом узле кластера максимальное количество случайных изменений фазы равнялось четырем. Как видно, даже такой случайный подбор фазовых сдвигов позволяет качественно улучшить связанность

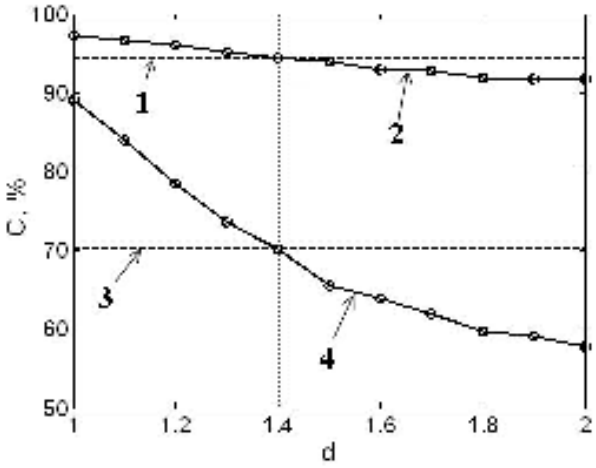

Рис. 3. Зависимость связанности сети без кластеризации (пунктир – 1, 3) и с кластеризацией (сплошная линия – 2, 4) от параметра d для общего количества узлов $N = 1700$ (линии 3, 4) и $N = 2000$ (линии 1, 2)

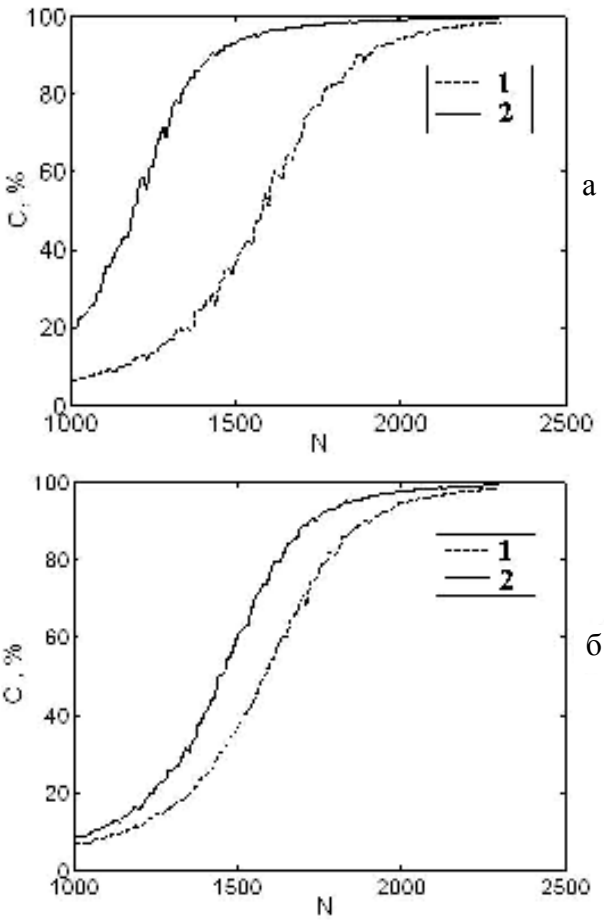

Рис. 4. Зависимость связанности сети от общего количества узлов для разных значений степени затухания поля (а – $d = 1$, б – $d = 2$) при использовании случайного подбора фазовых сдвигов; 1 – результат для сети без кластеризации, 2 – сеть с кластеризацией

сети при использовании метода коллективной передачи информации.

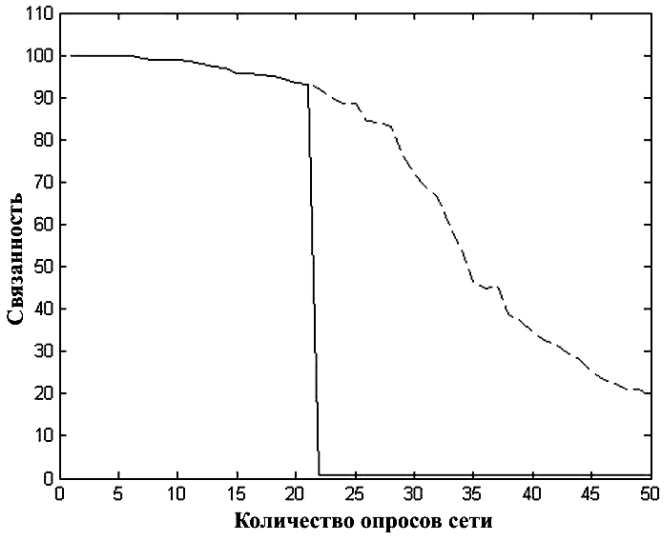

Рис. 5. Энергетическая деградация сенсорной сети без использования метода коллективной передачи информации (сплошная линия) и с использованием метода коллективной передачи информации, который включается после 21 цикла работы сети (пунктирная линия)

Рассмотрим теперь вопрос, касающийся времени жизни сенсорных сетей. В типичном режиме работы узлы сенсорной сети передают информацию на базовую станцию (точку сбора информации), которая обеспечивает хранение данных и доступ к ним через другие сети или через Интернет. Все информационные потоки сенсорной сети сходятся к базовой станции, поэтому максимальная энергетическая нагрузка ложится на узлы, находящиеся в непосредственной близости от базовой станции. В результате энергетической деградации эти узлы первыми выходят из строя, изолируя базовую станцию от всех остальных сенсорных узлов, энергетический ресурс которых еще не израсходован. На рис. 5 представлен график, иллюстрирующий энергетическую деградацию сенсорной сети – зависимость связанности сети от количества опросов сети. В данном случае под связанностью понимается относительное количество узлов (в процентах), информация от которых может быть доставлена на базовую станцию. Как видно (рис. 5, сплошная линия), после 21 цикла работы сети резко уменьшается количество сенсорных узлов, информация от которых может быть доставлена на базовую станцию, что связано с выходом из строя узлов, ее окружающих. Если после изоляции базовой станции осуществить кластеризацию сети и применить метод коллективной передачи информации, то можно организовать новые каналы связи между оставшимися узлами и базовой станцией и, таким образом, продлить работу сенсорной сети (рис. 5, пунктирная линия). Представленный на рис. 5 результат получен при следующих параметрах модели сенсорной сети: степень затухания поля d=2, количество случайных изменений фазы при использовании метода коллективной передачи информации равняется четырем. На первоначальном этапе каждый узел имеет начальный запас энергии W_0 = 0.4 Дж. В эксперименте полагалось, что данные передаются на базовую станцию периодически, то есть базовая станция посылает широковещательный запрос, после чего все узлы начинают передавать свою информацию. Каждая такая передача информации называется опросом сети. При кластерной передаче информации учитываются энергетические затраты на предварительный обмен данными внутри кластера и на коллективную передачу информации всеми узлами кластера. Энергия, потраченная на прием и передачу одного сообщения от другого узла, определяется следующей формулой:

$$W_{relay} = W_{rx} + W_{tx} , \qquad (2)$$

где W_{rx} – энергетические затраты в приемнике, W_{tx} – энергетические затраты в передатчике. Энергия, расходуемая на измерение и передачу параметров исследуемого явления:

$$W_{sense} = W_s + W_{tx} , \qquad (3)$$

где W_s – энергия, потраченная в сенсоре. При моделировании энергетические затраты равнялись $W_{sense} = W_{relay}$ = 0.5 мДж. В результате компьютерного эксперимента (рис. 5) получено, что использование метода коллективной передачи информации позволяет продлить эффективное время функционирования сенсорной сети приблизительно в полтора раза.

Заключение

В данной работе предлагается и анализируется эффективность использования когерентного сложения мощностей близко расположенных узлов сенсорной сети для совместной передачи информации. В качестве критерия для анализа используется характеристика связанности сети. Результаты компьютерного моделирования показали, что прямая реализация метода коллективной передачи информации (без использования адаптивных алгоритмов) позволяет как улучшить, так и ухудшить связанность сети в зависимости от условий распространения радиоволн (а именно степени затухания поля с расстоянием). Если степень затухания напряженности электромагнитного поля $d > 1.4$, то связанность сети, основанной на коллективной передаче информации, становится ниже в сравнении с сетью без использования коллективной передачи информации. Показано, что использование простого адаптивного алгоритма, который предполагает случайную подстройку фаз в излучателях, позволяет решить эту проблему и качественно повысить эффективность использования коллективной передачи информации даже в случае высокой степени затухания поля. Использование случайной подстройки не обеспечивает максимальную суммарную мощность в приемном узле, однако дает возможность повысить связанность сети без реализации сложных адаптивных алгоритмов, исследование которых требует отдельного рассмотрения. Важно отметить, что в реальных условиях многолучевого распространения узлы сети могут попадать в зону замирания сигнала и связь с такими узлами нарушается. Управление полем излучения кластера за счет подстройки фаз в передатчиках должно позволить эффективно бороться с подобными эффектами интерференции. В работе также было продемонстрировано, что применение метода коллективной передачи информации позволяет значительно продлить время жизни сенсорной сети.

Список литературы

1. Callaway E.H. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. CRC Press, 2004.

2. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., and Cayirci E. // IEEE Comm. Magazine. 2002. V. 40. № 8. P. 102.

3. Kawadia V., Kumar P.R. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2005. V. 1. № 23. P. 76.

4. Laneman J.N., Tse D.N.C., and Wornell G.W. // IEEE Trans. Inform. Theory. 2004. V. 50. № 12. P. 3062.

5. Tu Y.S., Pottie G.J. // Proc. IEEE Vehicular Technology Conference. 2002. V. 1. P. 130.

6. Умнов А.Л., Головачев Д.А., Филимонов В.А., Шишалов И.С. // Нелинейный мир. 2004. Т. 2. № 5–6. С. 327.

7. Gerla M., Tsai T.C. // ACM Baltzer Journal of Wireless Networks. 1995. V. 1(3). P. 255.

8. Lin C.R., Gerla M. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1997. V. 15. № 7. P. 1265.

9. Sohrabi K., Manriquez B., and Pottie G.J. // Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference, Houston, TX, May 16–20, 1999. P. 571.

10. Умнов А.Л., Филимонов В.А., Шишалов И.С. // Труды 8-й научн. конф. по радиофизике. 7 мая 2004 г. / Ред. А.В. Якимов. Н. Новгород: ННГУ. С. 29.

CONNECTIVITY ANALYSIS OF A SENSOR NETWORK WITH COLLECTIVE INFORMATION TRANSMISSION

A.N. Sadkov, K.G. Mishagin, V.A. Pastukhov, A.L. Umnov

A new method based on coherent combining of neighboring wireless node emitted fields is proposed for information transmission in wireless sensor networks. Coherent combining allows extending transmission range and can be used to increase the coverage zone and to solve the problem of network low connectivity in case of non-homogeneous distribution of wireless nodes. A computer model of the sensor network with collective information transmission has been developed. A numerical analysis of the suggested method efficiency based on the study of the network connectivity has been carried out. The possibility of sensor network life extension by this method has been demonstrated.