

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ СИГНАЛЬНО-КODOVЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ РАДИОСЕТЕЙ ПАКЕТНОГО ОБМЕНА ДАННЫХ

В. Н. ГОРЧАКОВ, С. В. КОЗЛОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: kozlov@bsuir.by

Аннотация. В статье рассматриваются децентрализованные радиосети пакетного обмена данных, такие как MANET. Обсуждаются преимущества этих сетей, а также проблемы, такие как кратковременность соединений и потеря пакетов. Рассматриваются критерии выбора сигнально-кодовых конструкций. Предложена математическая модель оптимизации выбора сигнально-кодовых конструкций, учитывающая факторы, влияющие на качество обслуживания и эффективность радиоинтерфейса.

Abstract. The article discusses decentralized packet-switched radio networks, such as MANET. It addresses the advantages of these networks as well as issues such as the transient nature of connections and packet loss. The criteria for selecting signal-code constructions are examined. A mathematical model for optimizing the choice of signal-code constructions is proposed, taking into account factors that influence the quality of service and the efficiency of the radio interface.

Введение

Децентрализованные радиосети пакетного обмена данных – беспроводные сети, в которых узлы могут взаимодействовать друг с другом без использования фиксированной инфраструктуры и центральных узлов: базовых станций, шлюзов, центральных маршрутизаторов (Рис. 1). Каждый узел такой сети функционирует в качестве приемника, передатчика и маршрутизатора, для обеспечения связи с другими устройствами. Децентрализованные радиосети, как правило, используют протоколы динамической маршрутизации, что позволяет при перемещении узлов оптимально изменять топологию всей сети.

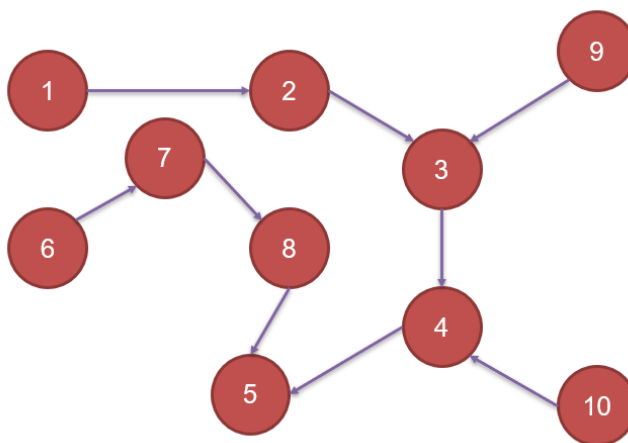


Рис. 1. Децентрализованная радиосеть пакетного обмена данных.

Существует несколько разновидностей децентрализованных радиосетей. Рассмотрим некоторые из них.

Mesh сети – это радиосети с ячеистой архитектурой, которые. В таких сетях могут быть как мобильные, так и стационарные абоненты, которые получают доступ к одному из маршрутизаторов в пределах радиуса действия сети. Топология этих сетей представляет собой звезду с произвольным соединением узлов.

Ad hoc сети – это радиосети, состоящие из случайно перемещающихся мобильных абонентов, которые обеспечивают полностью децентрализованное управление без необходимости в базовых станциях или опорных узлах. Топология таких сетей является фиксированной, при этом узлы соединяются случайным образом.

«ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ И РАДИОТЕХНОЛОГИИ 2024»

Открытая республиканская научно-практическая интернет-конференция,
21-22 ноября 2024 г., Минск, Республика Беларусь

MANET сети – это радиосети, состоящие из случайно перемещающихся мобильных абонентов, которые обеспечивают полностью децентрализованное функционирование без наличия базовых станций или опорных узлов. Топология таких сетей быстро изменяется, узлы соединяются случайным образом.

Основные особенности MANET включают:

- Децентрализованное управление: В таких сетях нет центрального управления, что позволяет каждому узлу самостоятельно принимать решения о передаче данных.
- Отсутствие базовых станций: MANET не требует установки фиксированных узлов или базовых станций, что делает их более гибкими и мобильными.
- Функции маршрутизатора: Каждый узел в сети может выполнять функции маршрутизатора, что позволяет передавать данные от одного узла к другому без необходимости в центральном узле.

Эти преимущества делают MANET хорошим выбором для обеспечения связи на удаленных, перемещающихся объектах. Использование беспроводной самоорганизующейся сети часто является единственным приемлемым вариантом для организации информационного обмена в опасных и быстроизменяющихся условиях. Развертывание систем связи на базе традиционных централизованных беспроводных и проводных технологий может быть сложной и дорогой. Кроме того, установка фиксированных узлов снижает мобильность сети, что делает ее менее эффективной в условиях, когда узлы могут быть перемещены, подавлены, разрушены.

Несмотря на все эти преимущества, самоорганизующиеся сети пока не получили широкого распространения на практике. Это связано с тем, что в условиях постоянно меняющейся сетевой структуры возникают определенные проблемы, которые затрудняют передачу данных. К основным факторам, влияющим на это, можно отнести:

- Кратковременность соединений. Соединения между узлами могут существовать очень недолго из-за быстрого изменения сетевой структуры.
- Искажение информации. В радиоканалах могут возникать помехи, что приводит к искажению передаваемых данных.
- Задержки передачи. Низкая пропускная способность радиоканалов может вызывать значительные задержки в передаче пакетов данных.
- Применение более сложных алгоритмов маршрутизации. Топология сети регулярно перестраивается в зависимости из изменения состояния узлов.
- Потери пакетов. Могут возникать перегрузки сети, что приводит к потере данных.

Эти проблемы могут снижать объем передаваемой информации и увеличивать время доставки данных, что является крайне нежелательным в сферах применения, где важна оперативность, точность и полнота полученной информации. Таким образом, необходимо обеспечить оптимальную работу сети на различных уровнях. В настоящей работе остановимся на физическом уровне, так как именно от него зависят характеристики канала связи между различными узлами.

Обоснование критериев выбора сигнально-кодовой конструкции

При передаче информации на физическом уровне по децентрализованным радиосетям пакетного обмена важную роль играют сигнально-кодовые конструкции, включающие в себя схемы модуляции и кодирования. Модуляция необходима для преобразования потока цифровых данных в высокочастотные сигналы. Могут применяться такие типы модуляции, как *ASK*, *PSK*, *FSK*, *CPM*, *OFDM* и др. Помехоустойчивые коды позволяют обнаружить и исправлять битовые ошибки через внесение избыточности в передаваемую информацию, что позволяет улучшить помехоустойчивость при влиянии на канал связи преднамеренных и непреднамеренных помех. В децентрализованных сетях находят применения блочные, сверточные и каскадные коды. Возможно применение таких кодов, как коды *Hamming*, *RS*, *BCH*, *LDPC*, *Polar*, *Turbo* и др.

Ширина спектра ΔF определяет диапазон частот, используемый для передачи сигнала. При выборе более широкой полосы увеличивается пропускная способность сети. Использование узкой полосы частот может приводить к снижению пропускной способности и повышать вероятность битовой ошибки (*BER*). Также ширина спектра накладывает ограничение на дальнейший выбор вида модуляции. При выборе ширины спектра также необходимо учитывать спектральную эффективность, которая выражает отношение скорости передачи данных к ширине спектра.

Сложность формирования и демодуляции сигнала. Сложность формирования зависит от типа модуляции. Например, схемы *ASK*, *FSK*, *PSK*, *CPM* модуляции просты в реализации относительно таких, как *QAM*, *OFDM*, *DSSS* требующих более сложных алгоритмов и аппаратных возможностей для реализации. Процесс формирования сигнала сопровождается цифровой обработкой. Более сложные алгоритмы могут требовать больше вычислительных ресурсов, что создаёт требования к аппаратным ресурсам. Могут потребоваться более производительные системы. Сложность демодуляции также зависит от типа исходной модуляции и алгоритмов обработки. Также возможно применение адаптивных подходов.

Сложность декодирования зависит от типа применяемого кода и метода его декодирования. К кодам с относительно простой реализацией можно отнести *Hamming*, *RS*, *BCH*. К сложным – *LDPC*, *Polar*, *Turbo* коды.

Секция 4 «Радиотехнологии и их элементная база»

Некоторые современные коды декодируются итеративными алгоритмами (*LDPC*). В этом случае с повышением числа итераций растут затраты на вычисления, что требуют повышения требования к аппаратным ресурсам.

Время задержки. Время декодирования при использовании блочных кодов зависит от длины кодового слова N , так как изначально происходит накопление до полного блока и только после этого декодирование. Большее число итераций позволяет корректировать больше битовых ошибок, но приводит к увеличению времени декодирования. Задержка при декодировании также зависит от аппаратных ресурсов. Более производительные процессоры позволяют выполнить декодирование быстрее. Уменьшение задержек также можно производится через параллелизацию с использованием многопроцессорных систем и систем на кристалле на базе ПЛИС.

Устойчивость к пакетным ошибкам. Данный критерий зависит от корректирующих свойств кода и вида модуляции. Выбирается такая сигнально-кодовая конструкция, которая обеспечивает вероятность битовой ошибки *BER* не ниже заданного значения, при фиксированном значении E_b/N_0 .

Требуемое E_b/N_0 . Мощность передачи. Энергопотребление. При воздействии помех на узел увеличивается значение спектральной плотности мощности шума и отклонения от требуемого значения E_b/N_0 , что приводит к ухудшению качества соединения. При увеличении мощности передачи будет возрастать излучаемая энергия на один бит E_b , что улучшит качество соединения за счет изменения соотношения E_b/N_0 . Однако при возрастании мощности передачи, возрастает и энергопотребление, что приводит к более быстрому расходу ресурса аккумулятора мобильного узла. Исходят из этой проблемы можно сделать вывод, а необходимости реализовали алгоритма адаптивного управления мощностью передачи и энергопотреблением при ограничении на качество соединения.

Энергетическая эффективность: В децентрализованных радиосетях возможно применение мобильных узлов, в которых для уменьшения расхода заряда аккумулятора необходимо минимизировать энергопотребление, что продлит время жизни устройства от одного цикла зарядки.

Масса. Поскольку узел сети может быть мобильным, необходимо обеспечить минимальную массу устройства при обеспечении конфигурации других критериев.

Стоимость. Необходимо обеспечить минимальную при выполнении всех прочих критериев во всех заданных конфигурациях.

Математическая формулировка поставленной задачи

Выполним математическую постановку задачи оптимального выбора сигнально кодовой конструкции в сетях MANET. Введем следующие обозначения:

$\sigma = (V_M, V_{ДК}, V_{ПК}, I_{ИТ})$ – вид сигнально-кодовой конструкции, включающий вид модуляции V_M , вид декодирования $V_{ДК}$ (когерентное, некогерентное и т.д.), вид помехоустойчивого кода $V_{ПК}$, число итераций при декодировании помехоустойчивого кода $I_{ИТ}$, при использовании многокаскадных составных кодов параметры $V_{ПК}$ и $I_{ИТ}$ детализируются соответствующим образом;

C – информационную скорость передачи данных;

\mathbf{u} – вектор, определяющий условия функционирования линий связи в MANET-сети и включающий минимальную и максимальную дальность связи, вид и параметры модели распространения (ослабления) сигналов, параметры межсистемных помех, а также статистические параметры распределения указанных величин;

μ – вектор, определяющий технические характеристики радиоинтерфейса для одного узла MANET-сети и включающий излучаемую мощность, характеристики направленности антенн, чувствительность приемника и т.д.;

ξ – вектор, определяющий параметры управления трафиком в сети, включающий алгоритмы маршрутизации, обслуживания очередей, переспроса и т.д.;

В качестве показателей эффективности функционирования передачи данных в MANET-сети будем использовать:

– стоимость $S(C, \sigma, \mu)$ оборудования (в расчете на узел, включающий передатчик и приемник с заданными пространственными параметрами обслуживания);

– качество обслуживания (Quality of Service, QoS) $Q(C, \sigma, \mu, \mathbf{u}, \xi)$, при определении которого необходимо также учитывать параметры ξ управления трафиком и маршрутизацию в сети; при анализе качества функционирования только радиоинтерфейса используется

– вероятность битовой ошибки $BER(C, \sigma, \mu, \mathbf{u})$;

- время задержки в декодировании пакетов $\tau(C, \sigma)$;
- ширину спектра излучаемых сигналов $\Delta F(C, \sigma)$;
- массу $M(C, \sigma, \mu)$ и объем (габариты) $V(C, \sigma, \mu)$ аппаратуры.

Очевидно, что при разработке сети необходимо стремиться к минимизации стоимости оборудования при выполнении требований по качеству обслуживания и внешнесистемных требований к радиointерфейсу. Поэтому, формальную математическую постановку задачи можно сформулировать в виде:

$$(C_{\text{опт}}, \sigma_{\text{опт}}, \mu_{\text{опт}}) = \arg \min_{C, \sigma, \mu} S(C, \sigma, \mu) \quad (1)$$

при

$$\min_{\mathbf{u}} Q(C, \sigma, \mu, \mathbf{u}, \xi) \geq Q_{\min}; \quad (2)$$

$$\tau(C, \sigma) \leq \tau_{\max}; \quad (3)$$

$$\Delta F(C, \sigma) \leq \Delta F_{\max}; \quad (4)$$

$$M(C, \sigma, \mu) \leq M_{\max}, V(C, \sigma, \mu) \leq V_{\max}, \quad (5)$$

где Q_{\min} – минимально допустимое качество обслуживания; τ_{\max} – максимально-допустимая задержка в декодировании пакетов; ΔF_{\max} – максимальная ширина спектра излучаемых сигналов; M_{\max}, V_{\max} – максимально возможные масса и объем аппаратуры радиointерфейса.

Ограничения (2) и (3) определяет эффективность радиointерфейса по основному назначению, ограничение (4) – это внешнесистемное ограничение по электромагнитной совместимости, (5) – внешнесистемное ограничение с позиций технической реализации радиointерфейса на мобильных объектах.

Отметим, что в число оптимизируемых параметров наряду с сигнально-кодовой конструкцией входит также скорость передачи данных, что позволяет при анализе качества обслуживания в сети с динамичной топологией варьировать параметры таких методов повышения эффективности информационного обмена, как обслуживание очередей и организацию обратной связи между источником и приемником [1].

Анализ задачи оптимизации (1) при ограничениях (2) – (5) показывает, что основные трудности заключаются в установлении основных функциональных связей $S(C, \sigma, \mu)$, $M(C, \sigma, \mu)$ и $V(C, \sigma, \mu)$, что особенно важно, $Q(C, \sigma, \mu, \mathbf{u}, \xi)$.

Определение функциональной зависимости $Q(C, \sigma, \mu, \mathbf{u}, \xi)$ требует разработки полной модели MANET-сети на физическом, канальном, сетевом уровнях, что является наиболее трудоемкой частью исследований. При наличии такой связи возможно определение предварительного перечня сигнально-кодовых конструкций для последующей оптимизации.

Определение функциональных связей $S(C, \sigma, \mu)$, $M(C, \sigma, \mu)$ и $V(C, \sigma, \mu)$ возможно на основе обобщения данных о доступной элементной базе и имеющихся образцах радиointерфейса.

Заключение

Математическая постановка задачи, предложенная в данной работе, позволяет систематизировать подход к выбору параметров, необходимых для достижения заданных требований по качеству обслуживания и эффективности радиointерфейса.

Дальнейшие исследования в области децентрализованных радиосетей и их сигнально-кодовых конструкций имеют большое значение для повышения надежности и эффективности передачи данных в условиях, требующих высокой мобильности и адаптивности

Список использованных источников

1. Польщиков К.А. Теоретические основы пакетной передачи данных в беспроводной самоорганизующейся сети при обеспечении связи на объектах строительства: диссертация ... доктора технических наук : 05.13.01 / Польщиков Константин Александрович; [Место защиты: Орлов. гос. ун-т]. - Белгород, 2016. - 312 с. : ил. - М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Чиров Д.С., Лобов Е.М. Выбор сигнально-кодовой конструкции для командно-телеметрической линии радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами средней и большой дальности и // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №10. С. 21-28.
3. Кузнецов В.С., Волков А.С., Солодков А.В., Баскаков А.Е. Разработка гетерогенной помехозащищенной системы радиосвязи с временным кодово-адресным разделением // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №9. С. 4-9.