

## **Пропускная способность беспроводных, широкополосных сенсорных сетей.**

М.М. Петросян

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,*

*Москва, ул. Моховая 11-7, [chaos@cplire.ru](mailto:chaos@cplire.ru)*

### **Введение.**

В настоящее время разрабатывается беспроводные сенсорные сети(БСС) на основе хаотических радио импульсов. Одно из направлений использования, применение их для создания инфокоммуникационной инфраструктуры для малых населенных пунктов, хотя круг задач решаемый данными системами может быть достаточно широким. Для начала можно рассматривать следующую задачу, передача текстовых сообщений, фото и видео файлов. Таким образом эти функции значительной степени соответствуют тем возможностям которые обеспечивают приложения Whatsapp и Viber, главное отличие данной сети состоит в том, что она будет работать автономно, вне покрытия WIFI и мобильной сети. В данном докладе рассмотрим потенциальные возможности разрабатываемой сенсорной сети.

### **Анализ нынешнего состояния системы.**

В нынешний момент в изучаемой системе не используются алгоритмы избегания коллизий. Для анализа возможностей системы, было выбрано два типа топологий полностью связанная и MESH (MESH сеть это сетевая топология на принципе ячеек, в которой каждая рабочая станция сети соединяется с несколькими другими рабочими станциями этой же сети с возможным принятием на себя функций коммутатора для других рабочих станций).

Как модель MESH сети было выбрано решетчатая сеть с размерами 4x4 и 10x10, где каждое устройство связано с шагом 1, это показано на (Рис. 1) ,

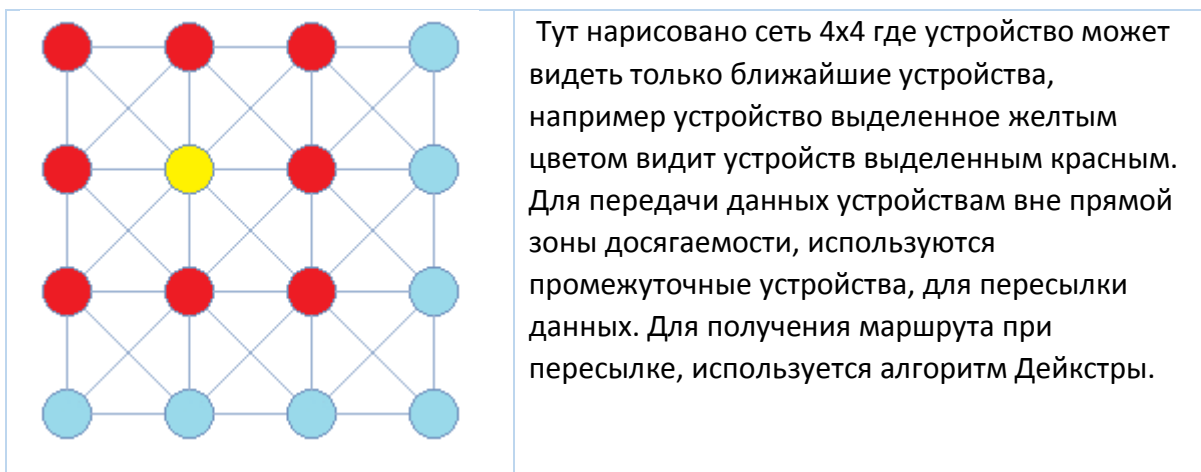


Рис. 1 Сеть 4x4

Каждое устройство генерирует пакеты данных, с заданной интенсивностью за единицу времени, эти пакеты данных могут быть предназначены как соседям передающего устройства, так и другим устройствам внутри данной локальной сети. Во втором случае, пакет будет передан через промежуточные устройства, которые выбираются таким образом, чтобы обеспечить минимальное количество перескоков.

В модели полносвязной сети количество устройств тоже либо 16 либо 100. В полносвязной сети одновременно может вещать только одно устройство, в обратном случае произойдет коллизия и пакеты не будут правильно приняты.

Были смоделированы следующие ситуации-

1. Каждое устройство передает по одной текстовой сообщении размером 200 бит (40 мкс) раз в 10 секунд
2. Каждое устройство передает по одной фотосообщению размером 1 Мбайт (16 с) раз в 5 минут.
3. Каждое устройство передает по одной видеосообщению размером 10 Мбайт (16 с) раз в час.

В результате моделирования были получены следующие результаты.

#### MESH

1 случай	Сетка 4x4	Сетка 10x10
Вероятность потери 1 пакета	4.2800e-005	2,24*10 <sup>-4</sup>
2 случай	Сетка 4x4	Сетка 10x10
Вероятность потери 1 пакета	0.1556	0.5235
3 случай	Сетка 4x4	Сетка 10x10
Вероятность потери 1 пакета	0.1294	0.4737

Пакет считается не потерянным, если после множества ретрансляций, оно доходит до конечного устройства.

#### Полносвязная топология

2 случай	Сетка 4x4	Сетка 10x10
Вероятность потери 1 пакета	0.1502	0.6407

3 случай	Сетка 4x4	Сетка 10x10
Вероятность потери 1 пакета	0.1265	0.5737

Как можно увидеть на таблицах, при передаче фото и видео файлов, характеристики системы не удовлетворяют минимальным необходимым требованиям. Что бы улучшить качество связи необходимо использовать протоколы избегания коллизий. Но для данной системы нельзя использовать множество протоколов спроектированных для приемопередатчиков с гармоническим несущим, так как данная система является сверхширокополосным, и к тому же манипуляции с частотой невозможно использовать в приемопередатчиках работающих на хаотических импульсах.

Дальше будем изучать методы улучшения пропускной способности системы.

### **Обзор наиболее популярных методов**

В полностью связанных сетях, где все устройства слышат друг друга, самым популярным методом является протокол CSMA (Carrier Sense Multiple Access - множественный доступ с прослушиванием несущей).

Данный протокол не противоречит работе системы.

#### **Ненастойчивый CSMA.**

Когда у станции появляются данные для передачи, она сначала прослушивает канал, проверяя, свободен он или занят. Если канал бездействует, то станция отправляет данные. В противном случае, когда канал занят, станция ждет в течение случайного интервала времени, а затем снова прослушивает линию. Такой протокол называется ненастойчивым протоколом CSMA.

Случайное время выдержки выбирается с помощью алгоритма двоичной экспоненциальной выдержки.

Этот пример взят из описания протокола Ethernet[1], где отправитель имеет возможность узнать во время отправки кадра, что произошла коллизия (то есть другой хост пытался отправить данные). Если бы оба хоста пытались повторно отправить данные как только произошла коллизия, произойдет следующая коллизия, и эта последовательность продолжалась бы вечно. Устройства обязаны выбрать случайное значение внутри приемлемого интервала для гарантии, что эта ситуация не случится, поэтому используется алгоритм экспоненциальной выдержки. Здесь в качестве примера используется число 51.2 мкс, 10 Mbit/s Ethernet. Но на практике 51.2 мкс может быть заменено на любое другое положительное значение.

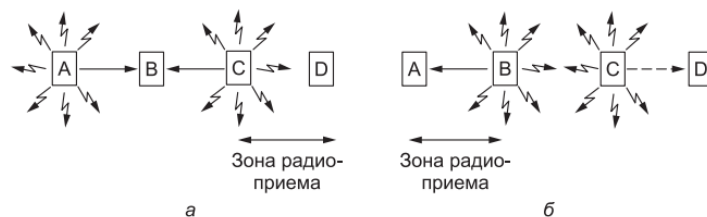
1. В случае когда устройство определяет, что канал занят, оно предотвращает отсылку данных.
2. Повторно пытается послать кадр после выдержки в 0 или 51.2 мкс, выбранной случайно.
3. Если отправка не удастся повторно отправить кадр после выдержки 0, 51.2 мкс, 102.4 мкс или 153.6 мкс.
4. Если и в этом случае неудача, пере отправить кадр после выдержки  $k \cdot 51.2$  мкс, где  $k$  это случайное целое число в интервале от 0 до  $2^c - 1$ .
5. В общем случае, после  $c$ -й неудачной отправки, повторно отправить кадр после выдержки  $k \cdot 51.2$  мкс, где  $k$  это случайное целое между 0 и  $2^c - 1$ .

Поскольку эти задержки вызывают коллизии у других станций, посылающих данные, существует вероятность, что в занятой сети сотни людей могут быть пойманы в единый набор коллизий. Из-за существования такой возможности процесс обрывается после 16 попыток передачи.

Данный протокол обеспечивает хорошую пропускную способность в сетях с полностью связной топологией, но в сетях где имеется проблема скрытой станции (hidden terminal problem), протокол CSMA не может обеспечивать хорошую пропускную способность.

### Рассмотрим подробнее данную проблему. (Таненбаум [2])

Пусть имеются четыре беспроводных станции. Мощность передатчиков такова, что взаимодействовать могут только соседние станции, то есть А с В, С с В и D, но не с А. (Рис,2)



1. Беспроводная локальная сеть: а — А и С — скрытые станции во время пересылки данных на В; б — В и С — засвеченные станции во время пересылки данных на А и D

Рис. 2. Беспроводная локальная сеть:

Сначала рассмотрим, что происходит, когда станции А и С передают данные станции В, как изображено на рис.1, а. Если станция А отправляет данные, а станция С сразу же опрашивает канал, то она не будет слышать станцию А, поскольку та расположена слишком далеко, и может прийти к неверному выводу о том, что канал свободен и что можно посылать данные станции В. Если станция С начнет передавать, она будет конфликтовать со станцией В и исказит кадр, передаваемый станцией А. Проблема,

закрывающаяся в том, что одна станция не может слышать возможного конкурента, поскольку конкурент расположен слишком далеко от нее, иногда называется проблемой скрытой станции (hidden terminal problem).

Теперь рассмотрим другую ситуацию: станция В передает данные станции А в то же время, когда станция С хочет начать передачу станции D, как показано на рис. 1, б. Станция С при опросе канала слышит выполняемую передачу и может ошибочно предположить, что она не может передавать данные станции D (пунктирная стрелка на рисунке). В действительности такая передача создала бы помехи только в зоне от станции В до станции С, где в данный момент не ведется прием. Такая ситуация иногда называется проблемой засвеченной станции (exposed terminal problem).[2]

Для решения данной проблемы были созданы множество протоколов на основе SRMA (split-channel reservation multiple access-множественный доступ с бронированием канала)[6] протокола такими являются MACAW[3], DBTMA[7], FAMA-NCS[5], MACA-MCS, MACA-CT[8] и множество других. Множество протоколов для увеличения пропускной способности используют дополнительный канал для общения узлов, или используют псевдослучайную перестройку частоты. В нашей задаче с хаотической несущей первый метод уменьшит эффективность из за того, что у хаотического несущего уже широкая полоса и мы вынуждены будем уменьшить ширину полосы, а второй метод нельзя реализовать с хаотическим несущим. Из этих протоколов больше всех для данной задачи подходит улучшенный вариант протокола MACAW протокол FAMA-NCS, которую дальше будем рассматривать.

### **FAMA-NCS**

Данный протокол из себя представляет гибрид из протоколов MACAW и CSMA.

При использовании FAMA-NCS, станция до отправки пакета занимает канал. Рассмотрим более подробно процесс создания канала.

Допустим Б-ой станции необходимо передать пакет С-ому. Станция Б вещает RTS(Request To Send — запрос на передачу) пакет и все кто получает этот пакет должны на короткий промежуток подождать ответа, при получении RTS пакета, станция С отвечает CTS(Clear To Send — разрешение передачи) пакетом. Станции которые получили RTS но не получили CTS могут спокойно произвести передачу, так как С станция находится вне их досягаемости и они не смогут помешать в принятии данных С-ому. Станции которые получили CTS от С-ой, будут вынуждены подождать дольше так как С станция находится в радиусе их действия, и при попытке передачи они помешают С-ому принимать DATA пакеты от Б-ой станции. При условии, что все правильно приняли хендшейк пакеты (RTS-CTS) тогда Б устройство успешно с вероятностью один передаст DATA пакет С-ому. Когда станция пытается передать RTS пакет но обнаруживает, что канал занят, то ему необходимо перепланировать передачу, перепланировка в FAMA-NCS производится методом ненастойчивого CSMA протокола, это означает, что при обнаружении занятости канала(кто то еще в этот момент тоже решил передать RTS пакет), станция ждет случайный промежуток времени и снова прослушивает канал. Еще одной

отличительной чертой FAMA-NCS по отношению к его предшественнику, протоколу MACAW, является то, что в этом протоколе длина CTS больше длины RTS.

Посмотрим что это дает.

Пусть в некоторый момент устройство A прослушивает эфир и обнаруживает, что канал свободен и решает передать RTS, но в это время другое устройство рядом с ним через очень короткий промежуток начинает передавать CTS, такое может произойти в том случае если скрытый от него источник С отправил RTS его соседу В, и из за существования времени распространения В-ое устройство не вовремя услышит RTS от А, либо наоборот А-ое не услышит CTS от В.

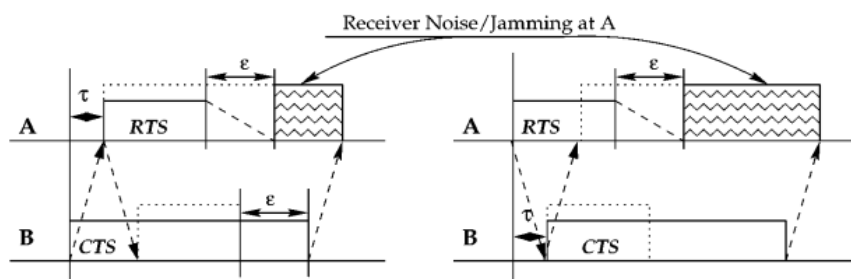
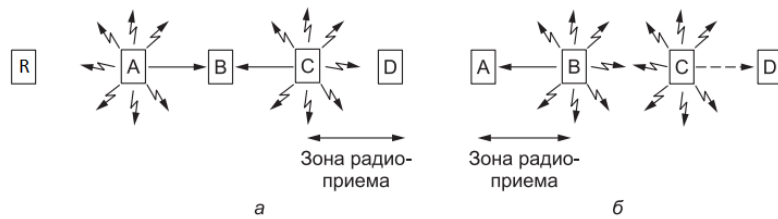


Рис.3 Возможные случаи коллизии RTS-CTS пакетов.

Эти явления подробно изображены на Рис. 3.  $\tau$ -время распространения. В любом случае придет ли RTS рано или поздно, все равно А-ое устройство услышит шум после передачи RTS и будет вынужден отложить передачу данных.

Замечание

У протокола FAMA есть особенность, которая уменьшает эффективность передачи данных, проблема состоит в следующем. После получения RTS пакета соседнее устройство должен промолчать на время равное длительности CTS пакета, и после этого он может передать так как он не мешает соседу при передаче. К примеру, передатчик В желает передать данные приемнику С, и начинает вещать RTS пакет. Приемопередатчик А получает RTS пакет и ждет получении CTS пакета, но так как С устройство находится вне зоны доступа А, то А может передавать пакеты приемнику R при этом не мешая В. Но эта возможность пропадает из за того, что при посылке пакета согласия CTS А не сможет правильно его принять так как В-ое устройство передает данные С, а устройство А находится в зоне В. Если решить эту проблему пропускная способность протокола FAMA намного улучшится.



1. Беспроводная локальная сеть: а — А и С — скрытые станции во время пересылки данных на В; б — В и С — засвеченные станции во время пересылки данных на А и D

## Результаты моделирования после введения протоколов избегания коллизий

Были смоделированы следующие ситуации-

1. Каждое устройство передает по одной фотосообщении размером 1 Мбайт (16 с) раз в 5 минут.
2. Каждое устройство передает по одной видеосообщении размером 10 Мбайт (16 с) раз в час.

В результате моделирования были получены следующие результаты.

MESH с протоколами

	Сетка 4x4 CSMA	Сетка 4x4 FAMA NCS	Сетка 10x10 CSMA	Сетка 10x10 FAMA NCS
1 случай	0.1012	0.0121	0.4845	0.0953
2 случай	0.0868	0.0109	0.4338	0.0726

MESH без использования протоколов

1 случай	Сетка 4x4	Сетка 10x10
Вероятность потери 1 пакета	0.1556	0.5235
2 случай	Сетка 4x4	Сетка 10x10
Вероятность потери 1 пакета	0.1294	0.4737

Пакет считается не потерянным, если после множества ретрансляций, оно доходит до конечного устройства.

Полносвязная топология с протоколами

	Сетка 4x4 CSMA	Сетка 4x4 FAMA NCS	Сетка 10x10 CSMA	Сетка 10x10 FAMA NCS
1 случай	0.0123	0.0044	0.0414	0.0051
2 случай	0.0099	0.0037	0.0250	0.0045

Полносвязная топология без использования протоколов

2 случай	Сетка 4x4	Сетка 10x10
Вероятность потери 1 пакета	0.1502	0.6407
3 случай	Сетка 4x4	Сетка 10x10
Вероятность потери 1 пакета	0.1265	0.5737

Сравнивая результаты, можно прийти к выводу, что обе протоколы сильно повышают качество связи в полносвязной сети. В MESH сети протокол CSMA не дает достаточного эффекта, но протокол FAMA NCS несколько раз повышает надежность передачи данных. Так как вышеприведенные данные не дают достаточного представления о системе и о протоколах, то дальше будут приведены более подробные данные.

### **Результаты моделирования**

Моделировалась ситуация, когда каждое устройство генерирует пакеты с размером 1 Мбайт, и при фиксированном размере пакета и количества устройств, менялось интенсивность генерации пакетов.

### **MESH топология**

В графиках 1 и 2 на оси X скорость передачи пакетов в мегабитах в секунду, на оси Y соотношение количества начатых пакетов и пакетов дошедших до конечного устройства, после множества ретрансляций .

пр- означает, что при передаче пакетов, устройства в режиме ожидания или в режиме блокировки не получают пакеты.



pl - соответственно означает, что получают.

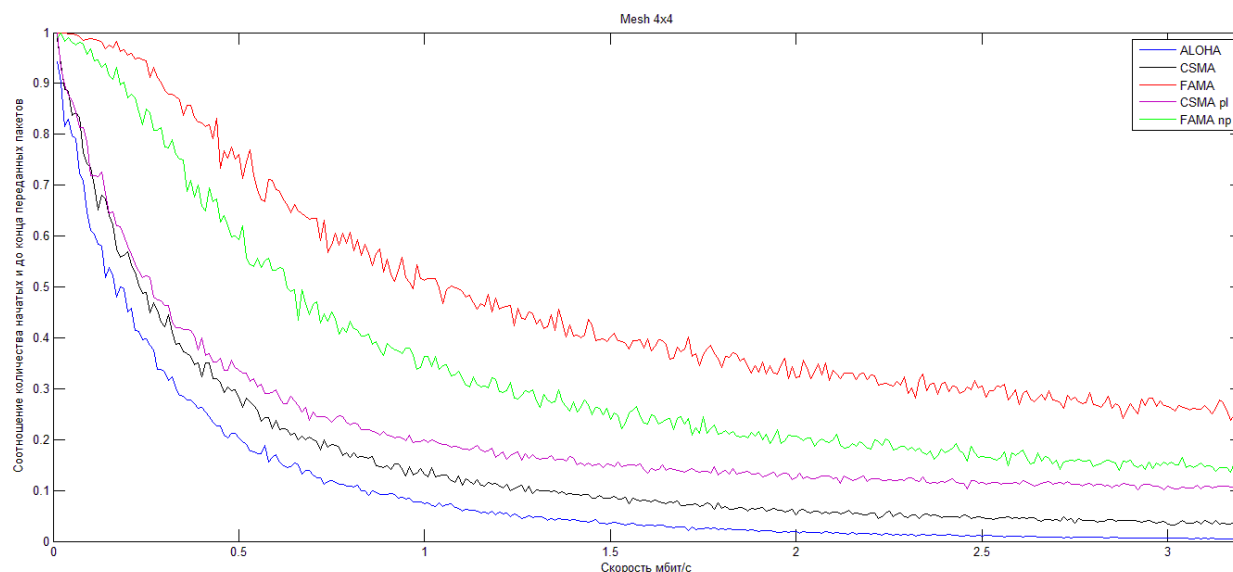


График 1. Сеть 4x4 MESH. Зависимость соотношения количества начатых и до конечного устройства отправленных пакетов от скорости генерации пакетов на каждом отдельном устройстве.

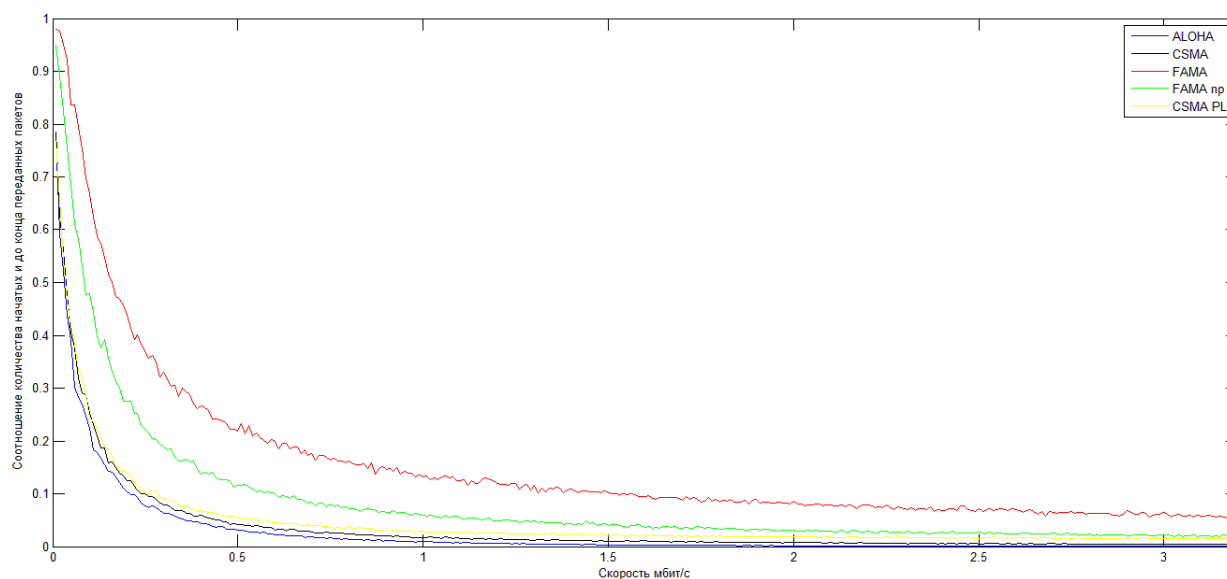


График 2. Сеть 10x10 MESH. Зависимость соотношения количества начатых и до конечного устройства отправленных пакетов от скорости генерации пакетов на каждом отдельном устройстве.

Как и ожидалось протокол FAMA выдает, лучше результаты чем CSMA и простая отправка данных при их получении (ALOHA). Но как видно на графике 2 при увеличении количества приемопередатчиков преимущество протокола FAMA перед CSMA и ALOHA уменьшается. Хотя и качество передачи данных улучшается при использовании протокола FAMA, но это достигается за счет уменьшения скорости передачи, так как протокол FAMA блокирует передачу данных соседям, передающим и принимающим устройств.

На следующих графиках показано зависимость спада скорости, от скорости генерации пакетов на отдельных устройствах.

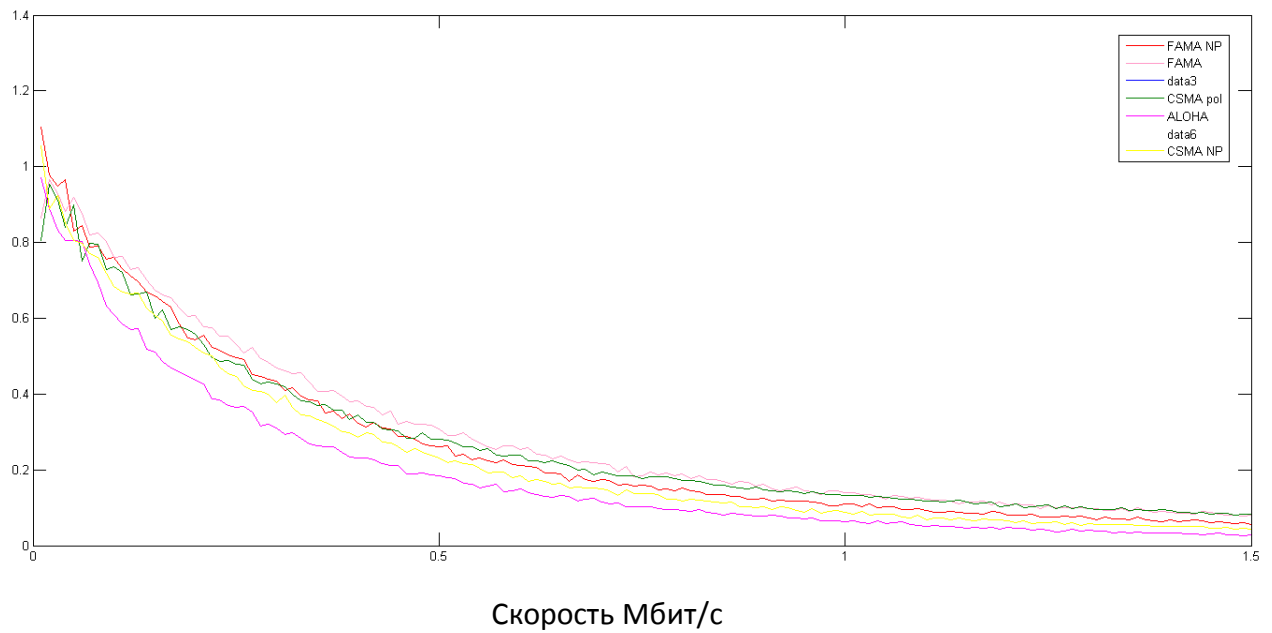


График 3. Сеть 4x4 MESH. Зависимость спада скорости, от скорости генерации пакетов на отдельных устройствах.

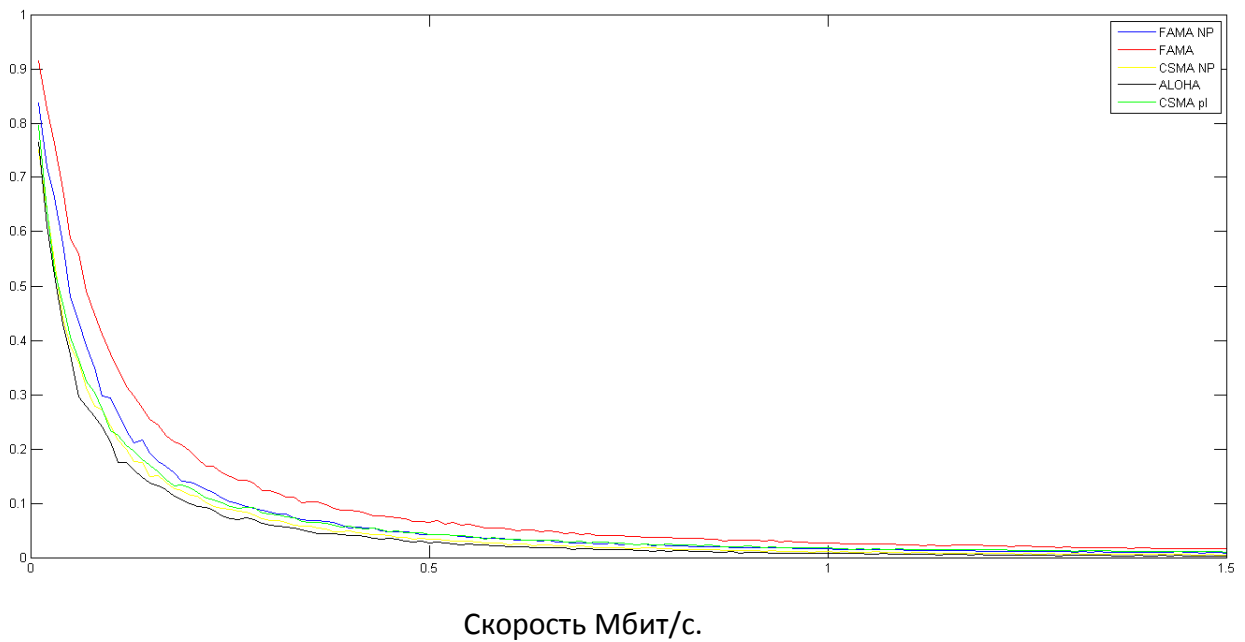


График 4. Сеть 10x10 MESH. Зависимость спада скорости, от скорости генерации пакетов на отдельных устройствах.

**Полносвязная топология.**

В приведенных графиках на оси X скорость передачи пакетов в мегабитах в секунду, на оси Y соотношение количества переданных и полученных пакетов.

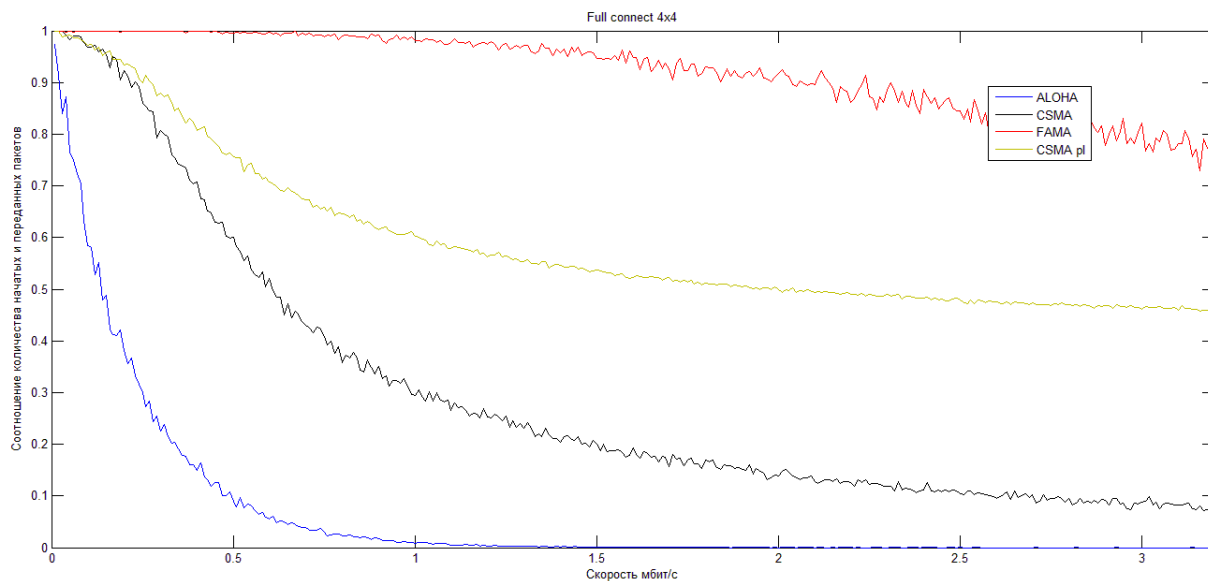


График 5. Сеть 4x4 . Зависимость соотношения количества переданных и успешно полученных пакетов, от скорости генерации пакетов на каждом отдельном устройстве.

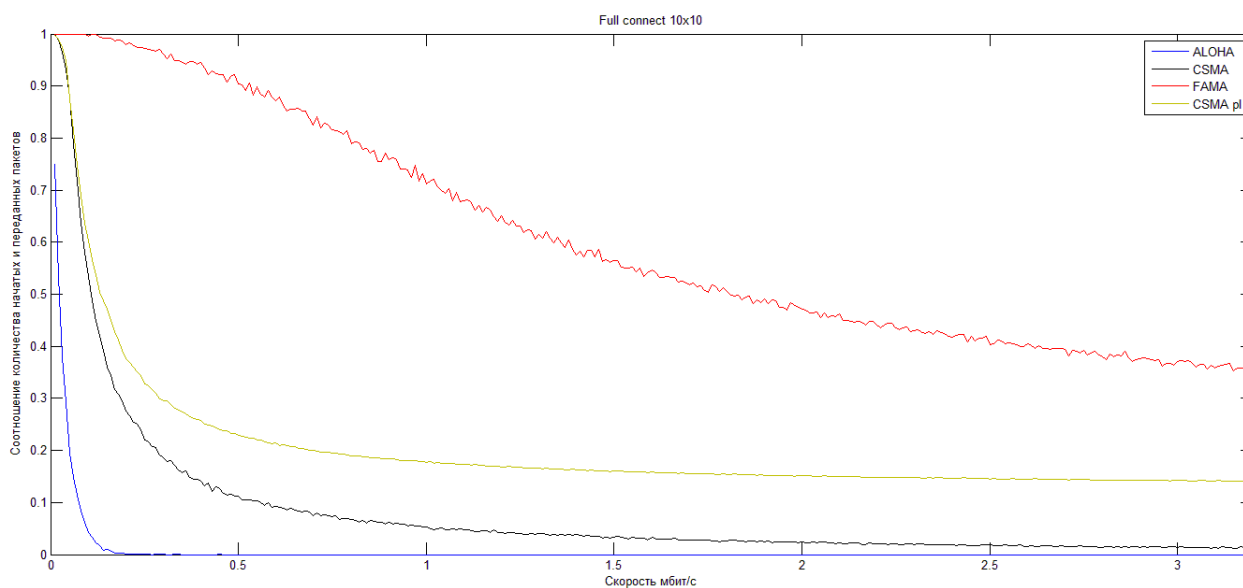


График 6. Сеть 10x10 . Зависимость соотношения количества переданных и успешно полученных пакетов, от скорости генерации пакетов на каждом отдельном устройстве.

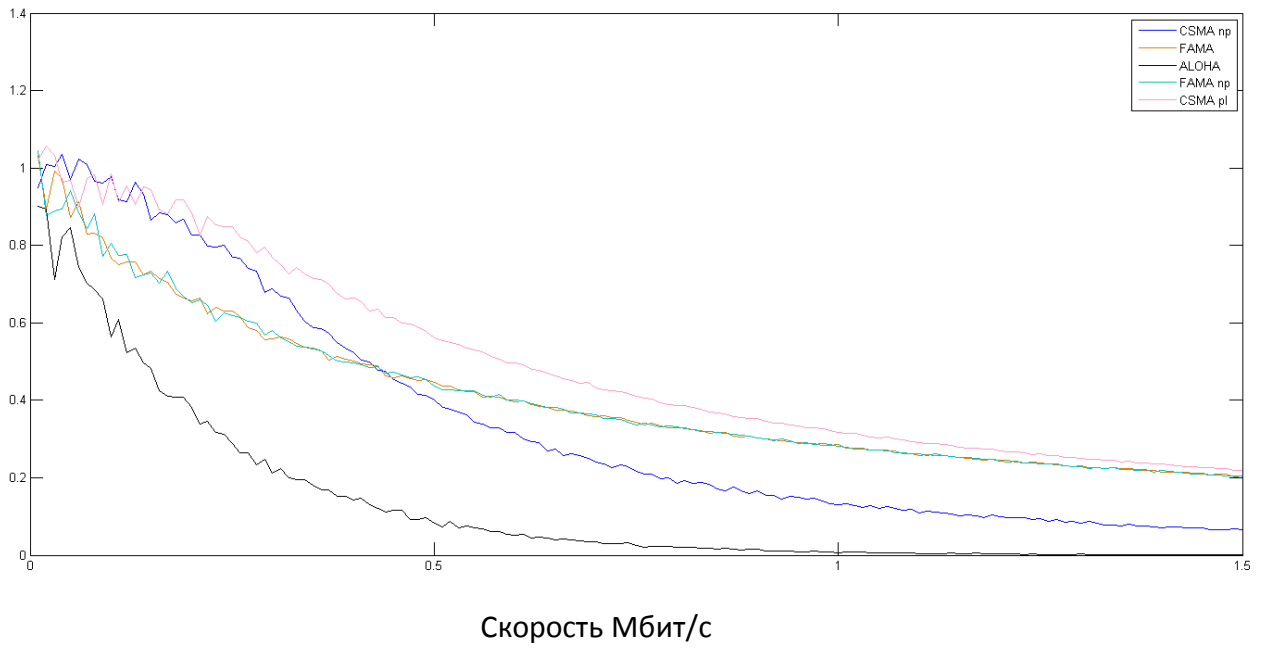


График 7. Сеть 4x4 . Зависимость спада скорости, от скорости генерации пакетов на отдельных устройствах.

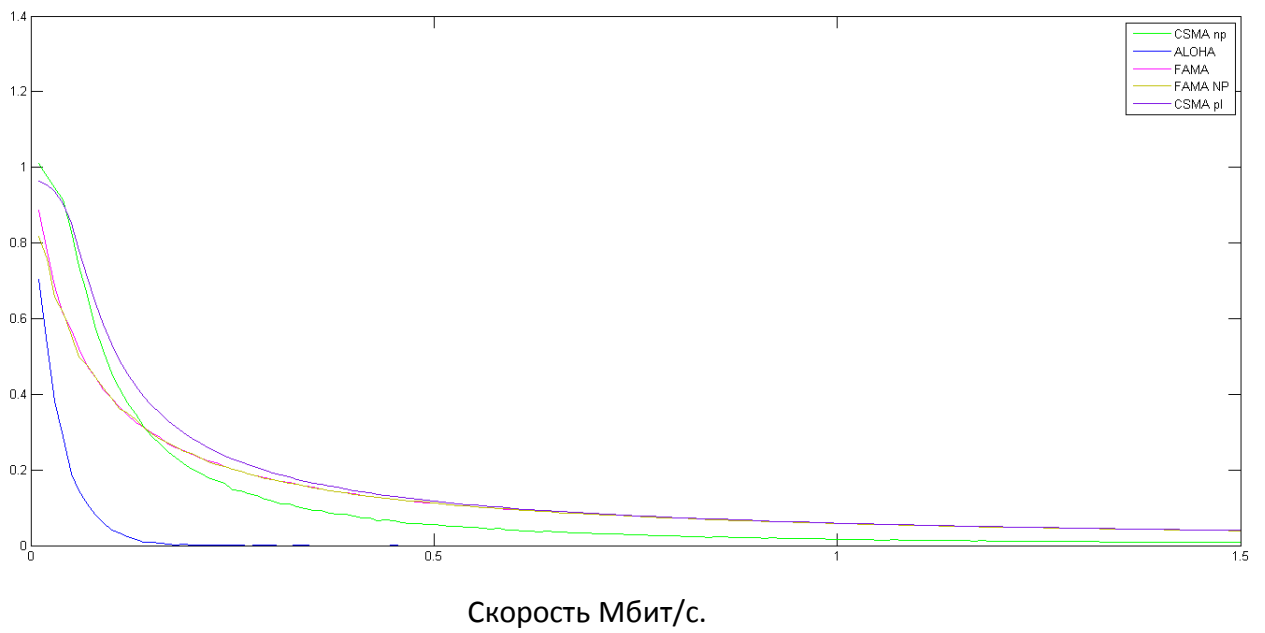


График 8. Сеть 10x10 . Зависимость спада скорости, от скорости генерации пакетов на отдельных устройствах.

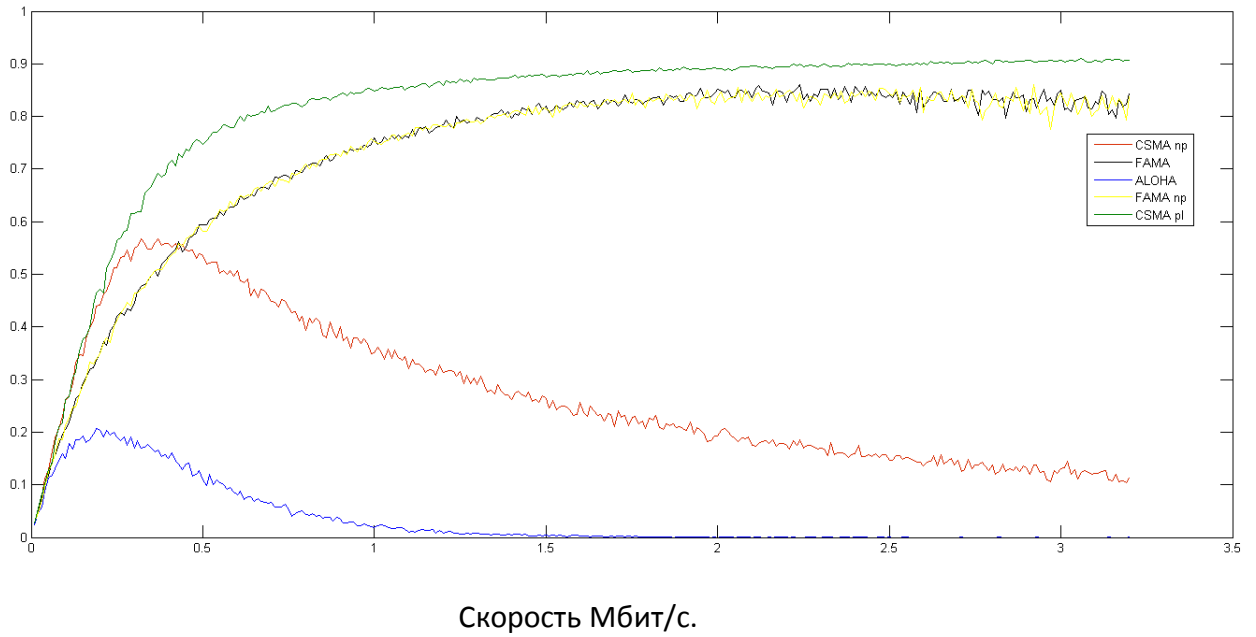


График 9. Сеть 4x4 . Зависимость количества переданных пакетов, за время равное длительности пакета от скорости генерации пакетов на отдельном устройстве.

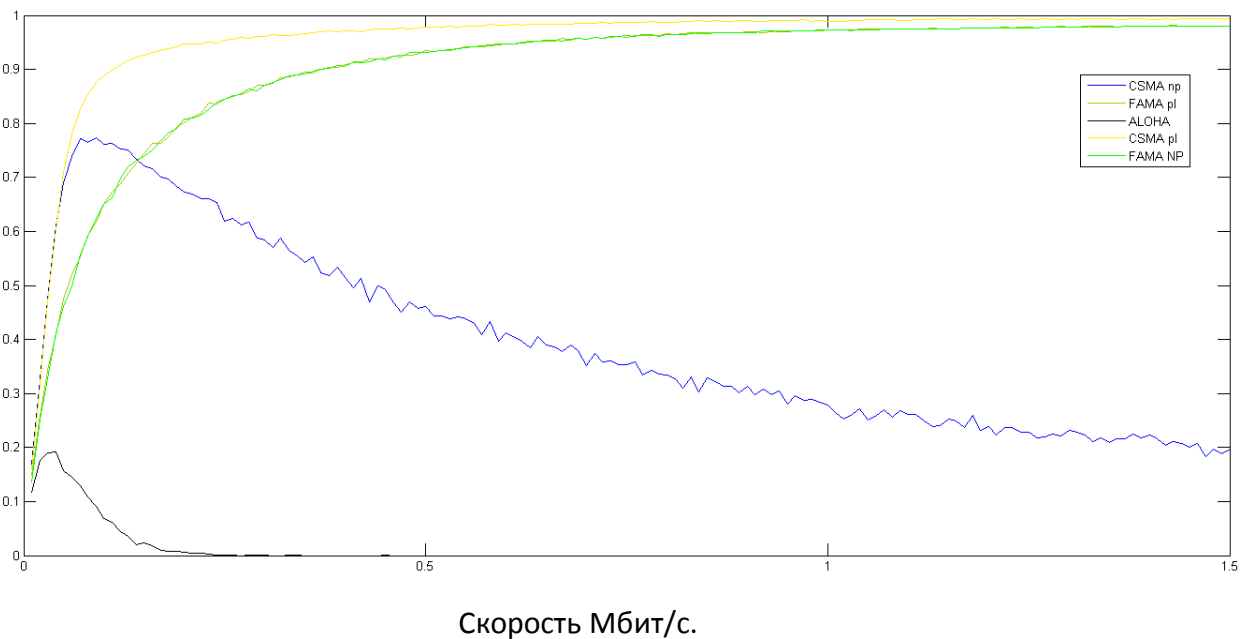


График 10. Сеть 10x10 .Зависимость количества переданных пакетов, за время равное длительности пакета, от скорости генерации пакетов на отдельном устройстве.

Из полученных результатов видно что в полносвязных сетях, в энергосберегающем режиме, т е когда устройство не может постоянно прослушивать эфир, лучше

использовать протокол FAMA, в случае когда нет необходимости в энергосбережении, протокол CSMA показывает лучший результат.

## **Выводы**

Для устройств с хаотическим несущим можно использовать протоколы множественного доступа, которые будут повышать пропускную способность сети.

При применении протоколов множественного доступа диапазон применения системы увеличивается.

Существует возможность улучшить протокол FAMA NCS.

[1][https://ru.wikipedia.org/wiki/Экспоненциальная\\_выдержка](https://ru.wikipedia.org/wiki/Экспоненциальная_выдержка)

[2] Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. — СПб.: Питер, 2012. — 960 с.: ил.

[3] MACAW: A media access protocol for wireless LAN's Vaduvur Bharghavan Alan Demers Scott Shenker Lixia Zhang

[5] Performance of Floor Acquisition Multiple Access in Ad-Hoc Networks J.J. Garcia-Luna-Aceves and Chane L. Fullmer

[6] F.A. Tobagi and L. Kleinrock, Packet switching in radio channels:

Part III – Polling and (dynamic) split-channel reservation multiple access, IEEE Trans. Commun. COM-24(8) (1976) 832–845.

[7] Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA)— A Multiple Access Control Scheme for Ad Hoc Networks Zygmunt J. Haas, Senior Member, IEEE, and Jing Deng, Student Member, IEEE

[8] A Multiple Access Protocol with Collision Avoidance and MultiCTS Candidates for Multi-channel Ad-hoc Networks Yao Zhao, Yong Xiang, Leiming Xu, Meilin Shi Tsinghua University of Computer Science and Technology Beijing, China