
УДК 621.3.019.3

Анализ алгоритмов управления адаптивной сетью передачи данных по локальным параметрам

Бородин В.В.*, Петраков А.М.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: doc_bor1@mail.ru*

***e-mail: nio4@mai.ru*

Аннотация

В статье рассматривается задача анализа и выбора алгоритмов управления сетью связи, обеспечивающей обмен данными между летательными аппаратами (ЛА). Сеть представлена совокупностью обильных узлов (ЛА), обмены между которыми выполняются по радиоканалу по протоколу синхронная Алоха. Управление осуществляется на основе измерения локальных параметров, наблюдение за которыми доступно непосредственно на каждом ЛА. Предложены и проанализированы четыре метода управления, использующие в качестве локальных параметров текущую загрузку сети или количество повторных передач пакета. Для каждого метода управления определены оптимальные параметры управления. Исследование проводится на основе разработанной имитационной модели.

Ключевые слова: телекоммуникационные технологии авиационных систем, авиационные системы связи и передачи данных, интеллектуальное управление сетью, случайный многостанционный доступ.

Введение и постановка задачи

В настоящее время для эффективного решения задач управления летательными аппаратами (ЛА) используются системы связи для взаимодействия не только с наземным пунктом управления, но и для обмена данными между самими летательными аппаратами. При этом каждый ЛА является как источником, так и ретранслятором сообщений. Важной особенностью сети передачи данных в этом случае является динамическое изменение сетевой конфигурации и отсутствие внешних механизмов настройки. Необходимо также отметить относительно малое время жизни сети в одной и той же конфигурации.

Сети связи, обеспечивающие обмен данными между мобильными объектами с динамически изменяющейся конфигурацией в литературе [1] получили название адаптивных сетей.

Мобильная адаптивная сеть обладает рядом преимуществ по сравнению с сетями с фиксированной инфраструктурой: высокой живучестью, гибкостью топологии, автоматической адаптацией к изменениям сетевой конфигурации.

Реализации свойств адаптивной сети способствуют, прежде всего, технологии беспроводного доступа к распределенным информационным ресурсам и управление ресурсами каждого узла.

Одним из основных методов обеспечения многостанционного доступа к радиоканалу является протокол синхронная Алоха. Исследованию этого протокола доступа посвящено большое число работ [2,3,4]. В частности показано, что сеть в процессе своего функционирования может переходить из устойчивого

стационарного состояния в неустойчивое состояние. В устойчивом состоянии для управления сетью используют изменение среднего периода передачи искаженных пакетов. В условиях неустойчивого функционирования, управление сетью качественно другое и чаще всего связано с сокращением суммарного трафика и использовании административных методов.

Необходимо отметить, что практически любая современная телекоммуникационная сеть обладает в той или иной степени свойствами адаптивности. Однако такие сети проектируются и в основном эксплуатируются в стационарных условиях и имеют определенный объем ресурсов для выполнения заданных функций.

Качественное отличие адаптивных сетей состоит в том, что они функционируют в условиях априорной неопределенности относительно характеристик своего окружения. Кроме того, для адаптивных сетей, в силу постоянного изменения конфигурации, затруднено централизованное управление ресурсами. По этой причине управление преимущественно должно быть реализовано на каждом узле, т.е. являться локальным.

Предлагаемая работа посвящена задаче анализа алгоритмов управления, обеспечивающих высокую эффективность сети на основе анализа только локальных параметров, которые каждый узел может определить самостоятельно.

Описание модели сети

В данной работе исследуется фрагмент адаптивной сети, содержащий N конечных узлов (ОУ). Связь между узлами осуществляется по радиолинии с

временным уплотнением. Для доступа в канал используется протокол синхронная Алоха [2]. Согласно этому протоколу сообщение разбивается на пакеты одинаковой длины. Затем пакеты последовательно передаются по каналу связи. Интервал времени, на который пакет занимает канал, называется окно. В синхронном протоколе Алоха окна следуют последовательно одно за другим. Пакеты могут передаваться только в начале соответствующего окна. Узлы начинают передавать пакеты независимо друг от друга. Если за одно окно только один узел передает пакет, то считается, что пакет передан успешно. После успешной передачи узел может передавать следующий пакет. Если за одно окно два или более узла пытаются передать свои пакеты, происходит совместное искажение пакетов (коллизия) и такая передача не является успешной. В этом случае каждый узел повторно передает ранее искаженные пакеты через случайное время. Закон распределения времени повторения выбран равномерным. Максимальное время повторения (период повторения) равно K окон, соответственно среднее время повторения равно $K/2$.

Процедура повторяется до успешной передачи пакета. В дальнейшем предполагается, что каждый узел узнает о том, произошла коллизия или нет с его пакетом к началу следующего после передачи окна. Сообщение покидает очередь только в случае, если оно успешно передано. Искаженные пакеты ожидают повторной передачи в течение случайного времени повторения.

Каждый узел формирует сообщения в случайный момент времени. Если узел не содержит других сообщений, то вновь созданное сообщение начинает передаваться в начале следующего после формирования окна. Если к моменту

появления нового сообщения узел содержит другие сообщения, то вновь созданное сообщение записывается в буферное запоминающее устройство – встает в очередь. Далее сообщения передаются в порядке общей очереди.

Единицей измерения времени является окно. По этой причине все показатели эффективности и наблюдаемые параметры нормированы на одно окно. В частности трафик – это среднее количество сообщений, поступающих в сеть за время одного окна. Среднее время передачи пакета (сообщения) – это время, выраженное в количестве окон от момента первой передачи до момента успешной передачи пакета (всего сообщения). Аналогично нормированы все остальные показатели сети.

Исходными данными для модели являются:

- время моделирования, (выраженное в количестве окон) - t ,
- количество узлов - N ,
- суммарный трафик узлов – G . Трафик определяется как среднее количество пакетов, созданное всеми узлами за одно окно.
- период повторения передачи искаженных пакетов – K ,

По результатам моделирования определяются следующие основные характеристики сети.

- среднее условное время передачи пакета W_u . Это есть время от момента поступления пакета на узел до момента его успешной передачи. Учитываются только пакеты, которые были задержаны либо в очереди, либо хотя бы один раз повторно передавались.

- коэффициент вариации (КВР) условного времени передачи пакета, равный отношению стандартного отклонения условного времени передачи к среднему значению,

- загрузка сети R . Загрузка определяется как доля занятых окон. Фактически загрузка представляет собой трафик сети и трафик, созданный повторно передающимися пакетами.

В качестве показателя эффективности сети выбрано среднее условное время передачи пакета. На наш взгляд, этот показатель наиболее полно в интегральной форме учитывает большинство параметров сети, такие как количество узлов, трафик, время функционирования, период повторения. Кроме того, именно условное среднее время передачи является наиболее информативной характеристикой сети с точки зрения выполнения целевой функции по передаче данных.

Алгоритмы управления сетью

Как известно [2, 3], в стационарном состоянии управление сетью с многостанционным доступом по протоколу Алоха состоит в изменении периода передачи (периода повторения) искаженных пакетов. Характер изменения времени передачи от периода повторения иллюстрируется графиком на рисунке 1.

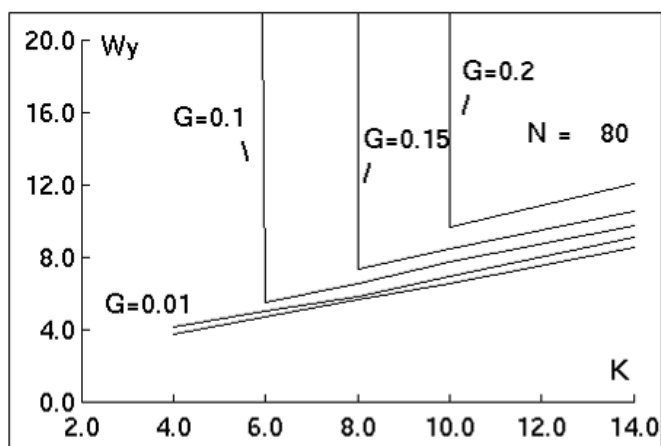


Рис.1 Зависимость времени передачи от периода повторения

Из приведенных результатов следует, что для каждого значения трафика, а также и количества узлов, существует оптимальное значение периода повторения, при котором время передачи принимает минимальное значение.

Заметим, что зависимость времени передачи от периода повторения имеет несимметричный характер. В силу этого использование большего периода повторения относительно оптимального значения является предпочтительнее, чем использование меньшего периода повторения. В частности, использование периода повторения, меньшего оптимального, может привести к существенному увеличению времени передачи, что соответствует переходу сети в неустойчивое состояние.

Оптимальные значение периода повторения в зависимости от трафика сети приведены на рисунке 2. Параметром графика является количество N узлов сети.

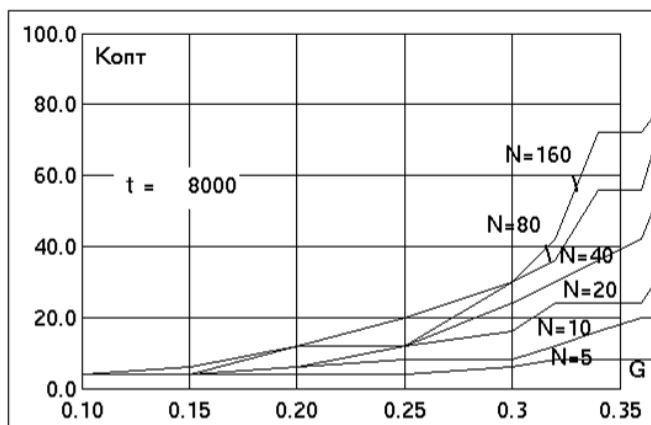


Рисунок 2. Зависимость оптимального значения периода повторения от параметров сети

Из полученных результатов следует, что при малом трафике оптимальное значение периода повторения практически постоянно и составляет величину $K=4$. С увеличением трафика оптимальные значения периода повторения увеличиваются, причем скорость роста тем выше, чем больше количество узлов в сети. При малом количестве узлов ($N < 5$) оптимальное значение периода повторения практически не зависит от трафика.

Отметим, что в общем случае, оптимальный период повторения зависит также от длительности функционирования узлов в сети. Связано это с тем, что с течением времени сеть может перейти в неустойчивый режим работы [2,4] и для предотвращения этого явления необходимо дополнительно увеличивать период повторения.

Таким образом, если в процессе функционирования сети определены такие параметры сети, как количество узлов, трафик, время функционирования узлов, то,

по крайней мере, принципиально, может быть определен оптимальный период повторения, который должен использовать каждый узел при повторной передаче пакетов. Оптимальное управление в этом случае учитывает средний трафик и количество узлов (управление по среднему трафику).

На рисунке 3 приведены графики зависимости минимального времени передачи от трафика и количества узлов при использовании метода управления по среднему трафику.

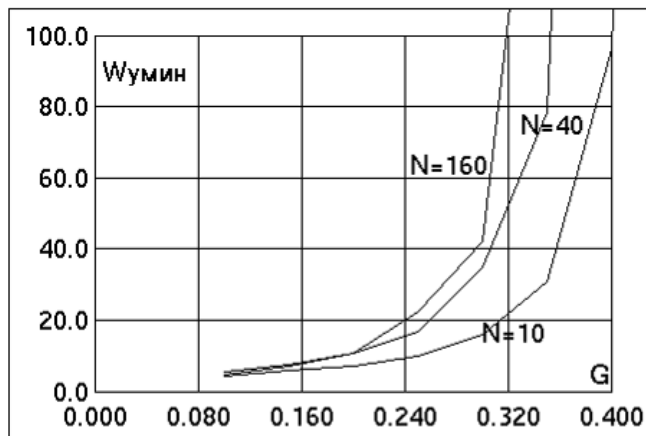


Рисунок 3. Зависимость минимального времени передачи при управлении по среднему трафику

Однако для адаптивных сетей подобный подход к управлению узлами сети, как уже отмечалось выше, малоперспективен. Прежде всего, это связано с тем, адаптивные сети функционируют в условиях переменной конфигурации и количество активных узлов постоянно изменяется. Кроме того, обмен служебной информацией о текущих значениях сетевых параметров приведет к определенному

расходу пропускной способности, которая и так ограничена, особенно в условиях большой загрузки.

В рамках рассматриваемой модели сети, локальными параметрами узла являются количество повторных передач и загрузка канала. Первый из перечисленных параметров непосредственно измеряется на каждом узле при передаче пакетов. Второй параметр также может быть определен каждым узлом в виде доли занятых окон. Соответственно, ниже рассмотрены два алгоритма управления сетью. Первый алгоритм основан на управлении по количеству повторных передач, второй алгоритм основан на управлении по текущей загрузке.

Суть первого алгоритма управления состоит в следующем.

Протоколом доступа предполагается, что период повторения будет увеличиваться в два раза каждый раз, когда происходит первое искажение пакета [3]. Использование такого алгоритма приводит к постепенному росту периода повторения до максимального значения, и время передачи также будет постепенно возрастать. Поэтому для эффективного управления адаптивной сетью необходимо, наряду с увеличением периода повторения, предусмотреть процедуры его снижения. Подобный алгоритм предотвратит постоянный рост времени передачи пакетов.

В настоящей работе исследован следующий алгоритм изменения периода повторения в зависимости от количества повторных передач.

Каждый узел определяет количество M повторных передач своего пакета. Для пакета, передаваемого в первый раз, $M=0$. Кроме того, фиксировано максимальное количество повторных передач $M_{доп}$. При искажении пакета, он

передается через случайное время, имеющее равномерное распределение в интервале $[1, K+1]$, где K – текущий интервал повторения. Если $M < M_{\text{доп}}$, то изменение периода повторения не происходит. Если $M \geq M_{\text{доп}}$, то при очередной передаче пакета период повторения увеличивается в V_1 раз, и становится равным $V_1 * K$. При каждой последующей передаче этого пакета, период повторения будет также увеличиваться в V_1 раз.

В случае успешной передачи пакета текущий период повторения уменьшается в V_2 раз. Минимальное значение периода повторения фиксировано и равно 4. Данное минимальное значение периода повторения определено в процессе экспериментов, при меньшем его значении сеть находится в стационарном режиме в очень узком диапазоне параметров (трафик менее 0.01 и количество станций менее 10) и велика вероятность перехода сети в неустойчивое состояние.

Второй алгоритм управления изменяет период повторения в зависимости от текущей загрузки канала, определяемой каждым узлом. Для реализации алгоритма, каждый узел имеет базу данных, в которой определённому диапазону загрузки ставится в соответствие оптимальный период повторения, соответствующий максимальному для данной сети, количеству узлов. Повторная передача пакета осуществляется через случайное время, имеющее равномерное распределение в интервале $[1, K+1]$, где K – найденный по базе данных период повторения.

Использование оптимального периода повторения для максимального количества узлов приводит, конечно, к завышенной задержке передачи пакета, причем тем выше, чем реальное количество узлов отличается от максимального.

Однако, как было показано выше (см. рис.2), завышенное значение периода повторения, по крайней мере, не приводит к переходу сети в неустойчивое состояние.

Для повышения эффективности алгоритма управления предусмотрено снижение периода повторения при каждой успешной передаче пакета. Аналогичная процедура использована в алгоритме управления по количеству повторных передач.

Определение загрузки узлом может выполнено по следующей схеме.

Поскольку каждый узел постоянно подключен к общему каналу передачи, он имеет возможность определять состояние всех временных окон, а именно, свободно окно или занято. На основании информации о состоянии канала загрузка может быть определена следующим образом.

Пусть L – количество окон, среди которых занято $L_{пор}$ окон. Тогда оценка загрузки R определяется следующим выражением:

$$R = L_{пор} / L$$

При моделировании принято, что $L_{пор} = 5$.

Типичная зависимость загрузки канала от трафика приведена на рисунке 4.

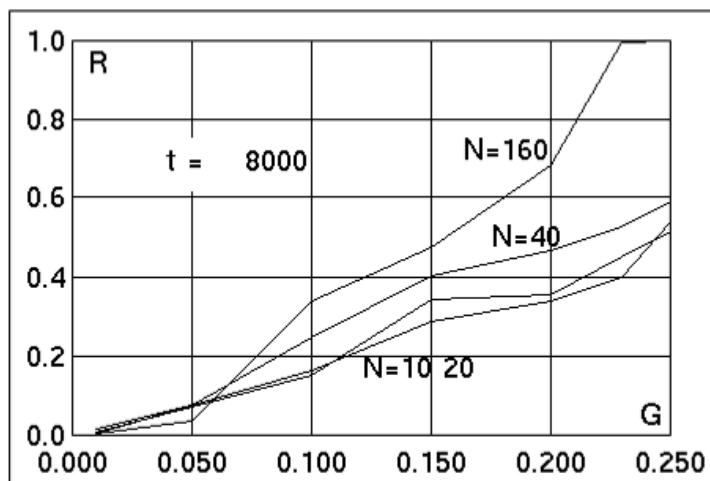


Рисунок 4. Зависимость загрузки канала от трафика

Анализ алгоритма управления по количеству повторений

В процессе моделирования первого алгоритма управления по количеству повторных передач, прежде всего, были определены коэффициенты $M_{доп}$, V_1 и V_2 , обеспечивающие минимальное значение времени передачи. В ходе экспериментов было получено, что минимальное значение времени передачи достигается при $M_{доп} = 1$, $V_1 = 1.3$ и $V_2 = 0.8$.

Таким образом, увеличивать период повторения необходимо после первой неуспешной передачи пакета, при этом период повторения необходимо увеличивать на 30%. Отметим, что данный результат отличается от рекомендаций протокола доступа, который рекомендует увеличивать период повторения в 2 раза.

На рисунке 5 приведены графики зависимости времени передачи от времени функционирования сети и количества узлов при трафике $G=0.3$.

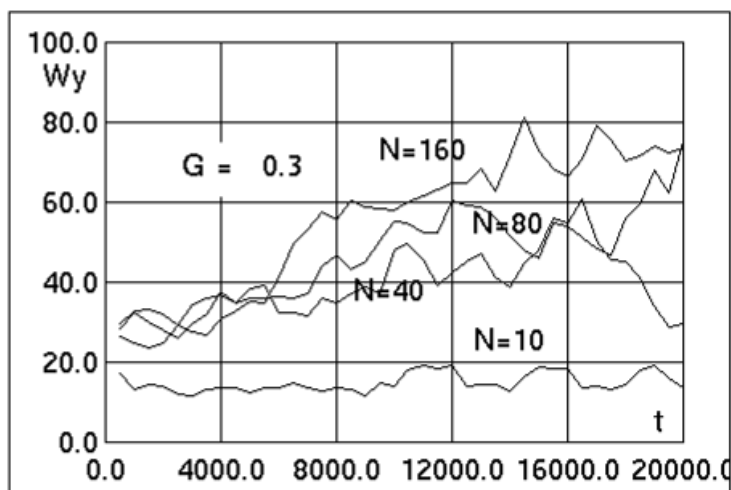


Рисунок 5. Зависимость времени передачи от времени функционирования и количества узлов

Отметим следующие важные особенности полученных зависимостей. При малом количестве узлов ($N < 20$) среднее время передачи не зависит от времени функционирования. При большем количестве узлов ($N > 20$), время передачи увеличивается с ростом времени функционирования. Подобная зависимость справедлива только при большом трафике $G \geq 0.3$. При меньшем трафике эффективность сети не зависит от времени функционирования.

В процессе функционирования, загрузка сети, время передачи пакета, количество искажений пакетов, носят случайный характер. По этой причине случайным является и период повторения. В этой связи был изучен закон распределения периода повторения. Одним из наиболее интересных результатов, на наш взгляд, является поведение коэффициента вариации распределения (КВР)

периода повторения. На рисунке 5 приведена зависимость КВР от трафика сети для разного количества узлов.

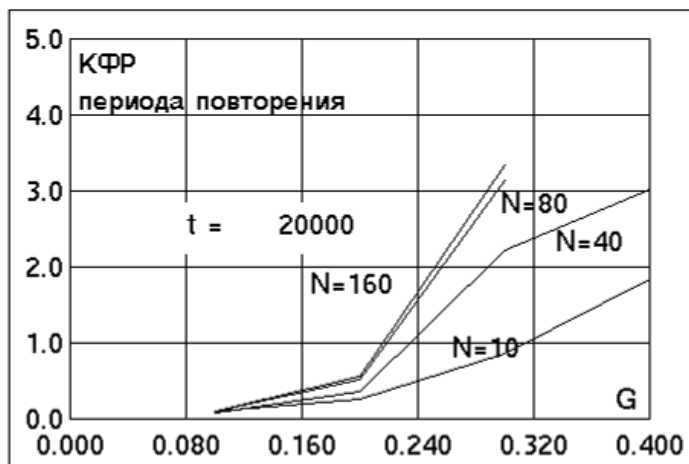


Рисунок 5. Зависимость коэффициента формы распределения периода повторения от параметров сети

Из приведенных результатов следует, что при высоком трафике нормальное отклонение в несколько раз превышает среднее значение периода повторения. Высокая дисперсия указывает на то, что велика доля узлов, у которых период повторения существенно выше среднего значения. Для исследования этого явления построены гистограммы распределения периода повторения. Пример гистограммы для трафика $G=0.3$ и количества узлов $N=160$ приведен на рисунке 6. По горизонтальной оси отложен период повторения, нормированный на среднее значение, по вертикальной оси – доля узлов, имеющих соответствующее значение периода повторения.

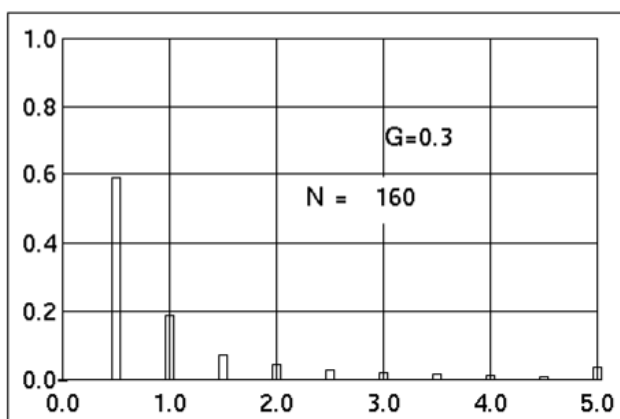


Рисунок 6. Гистограмма распределения периода повторения

Из приведенной гистограммы следует, что 60% узлов имеют период повторения, меньший среднего значения. Для этих узлов характерным является и относительно малое время передачи пакета. Однако для 10% узлов период повторения в несколько раз превышает среднее значение, соответственно и время передачи пакетов этими узлами также велико.

Отметим также то, что при низком трафике ($G < 0.2$) дисперсия периода повторения мала, и все узлы имеют период повторения, сравнимый со средним значением.

Анализ алгоритма управления по текущей загрузке

Рассмотрим теперь характеристики алгоритма управления по текущей загрузке.

База данных оптимальных значений периода повторения от загрузки формировалась на основе результатов моделирования сети (см. рис.4 и рис.2).

Диапазон $[0, 1]$ изменения загрузки был разделен на 10 непересекающихся областей $(R_i, R_{i+1}]$, каждой из которых соответствует определенный диапазон изменения трафика $(G_i, G_{i+1}]$ (см. рис.4). В свою очередь для каждого граничного значения трафика областей G_i определен оптимальный период повторения K_i (см. рис. 2). Максимальное количество узлов принято равным $N = 160$, максимальный период повторения равен $K_{\max} = 180$ окон.

Зависимость времени передачи от времени функционирования при трафике $G=0.3$ и различном количестве узлов приведена на рисунке 7.

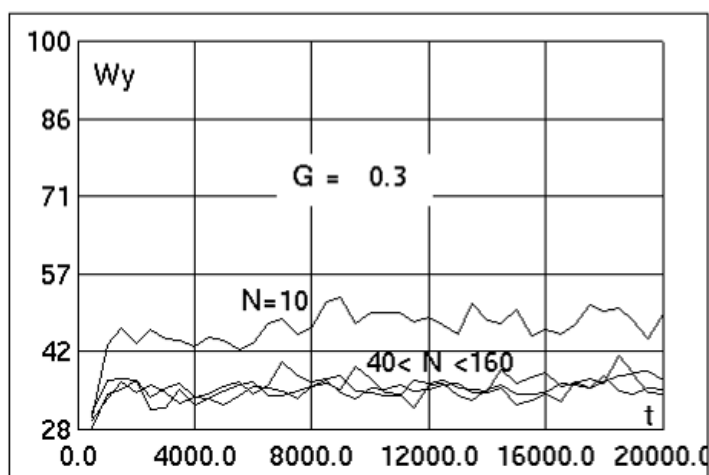


Рисунок 7. Зависимость времени передачи при управлении по текущей нагрузке.

Из полученных результатов следует, что даже при высоком трафике зависимость времени передачи не зависит от времени функционирования (за исключением начального переходного периода).

Отметим также следующую особенность рассматриваемого метода управления: с ростом количества узлов время передачи уменьшается. Особенно явно это проявляется при малом (от 10 до 40) количестве узлов (см. рис.7).

Объяснение этого, парадоксального на первый взгляд, результата состоит в том, что верхняя граница изменения периода повторения совпадает с оптимальным значением, соответствующему именно максимальному количеству узлов. Поэтому минимальное время передачи будет достигаться именно для этого случая. Сеть с малым количеством узлов находится в неоптимальных условиях. Увеличение периода повторения в случае повторной передачи, приводит естественным образом, к большим значениям времени передачи пакета.

Комбинированный метод управления

Выше был отмечен недостаток метода управления по загрузке, состоящий в том, что в случае искажения переданного пакета, период повторения увеличивается до максимального значения, соответствующего текущему уровню загрузки. По этой причине предложен метод управления, который сочетает в себе положительные свойства двух рассмотренных выше методов управления. Суть нового метода состоит в том, что при успешной передаче период повторения снижается так же, как и при управлении по загрузке. В случае искажения пакета, период увеличивается, но не до максимального значения, а постепенно, так, как это осуществляется при управлении по количеству повторов.

Зависимость времени передачи от времени функционирования сети для этого метода управления приведена на рисунке 8. Приведенный результат показывает, что

комбинированный метод имеет минимальное время передачи пакета на всем интервале времени функционирования сети. Кроме того, даже при высоком трафике $G=0.3$ эффективность сети не зависит от времени функционирования, а различие между временем передачи для широкого диапазона изменения количества узлов (от 10 до 160) относительно не велико.

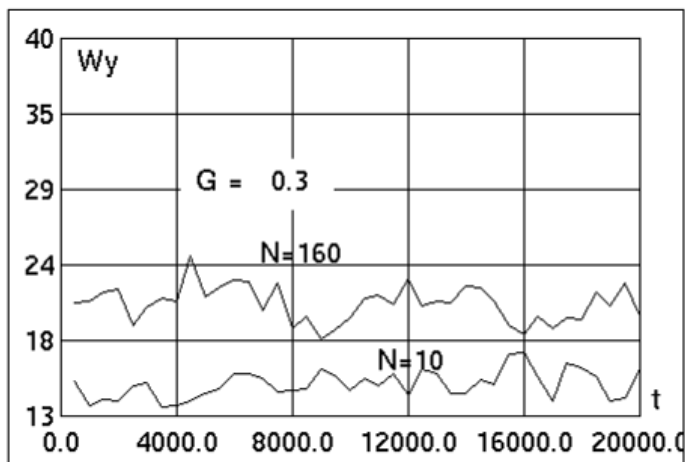


Рисунок 8. Зависимость времени передачи при комбинированном управлении

Сравнение методов управления

Результаты сравнительного анализа всех четырех методов управления приведены на рисунке 8. Эффективность управления зависит от времени функционирования сети, количества узлов и трафика. При малом и среднем трафике $G < 0.25$ наиболее эффективным управлением является управление по количеству повторных передач при условии выбора оптимальных параметров управления. При большом трафике $G > 0.25$ и числе узлов $N > 20$ эффективным становится метод управления по загрузке. Отметим также, что при малом и среднем трафике время

передачи для сетей с управлением по среднему трафику занимает промежуточное положение: они ниже, чем при управлении по загрузке, но выше, чем при управлении по количеству повторов. Такое положение сохраняется для всего диапазона исследуемого числа узлов от 10 до 160.



Рисунок 8. Сравнительные характеристики методов управления

Дополнительно необходимо отметить, что при малом времени функционирования (для рассматриваемого случая при $t < 6000$ окон) управление по количеству повторных передач эффективнее управления по загрузке и приводит к меньшим значениям времени передачи. Однако при большом времени функционирования, управление по загрузке оказывается эффективнее, особенно при большом количестве узлов.

Комбинированный метод управления позволяет существенно уменьшить время передачи пакета. При малом и среднем трафике время передачи совпадет со временем передачи при управлении по количеству повторений, а при большом трафике время передачи даже ниже, чем при управлении по загрузке. Отметим, что

данный вывод остается справедливым на всем интервале функционирования сети и для произвольного количества узлов сети.

Результаты работы

В работе рассмотрены четыре метода управления сетью с многостанционным доступом по проколу синхронная Алоха.

Первый метод учитывает средний трафик сети и количество узлов сети. Для каждого значения трафика и числа узлов определяется оптимальный период повторения.

Второй метод использует для изменения периода повторения текущее количество повторных передач. При достижении определенного уровня, период увеличивается при каждой новой повторной передаче пакета. В случае успешной передачи период повторения снижается. Для этого метода определены оптимальные скорости увеличения и снижения периода повторения и пороговое значение количества повторных передач.

Третий метод использует для изменения периода повторения текущую загрузку сети. В случае искажения пакета, период повторения увеличивается до соответствующей текущей загрузке граничной величины. Это граничное значение периода повторения определяется из условия обеспечения минимального времени передачи только для максимально возможного для данной сети количества узлов. При успешной передаче пакета, период повторения уменьшается.

Четвертый метод является комбинацией второго и третьего методов управления. При искажении пакета, период повторения постепенно увеличивается, но только до граничного значения.

Результаты моделирования показывают, что во всем диапазоне трафика и количества узлов наилучшими характеристиками обладает четвертый, комбинированный метод управления. Среди первых трех методов управления при малом и среднем трафике наилучшим является второй метод управления, а при высоком трафике и большом количестве узлов наилучшим является третий метод управления.

Библиографический список

1. Разгуляев Л.В. Перспективные мобильные адаптивные сети передачи информации для СВ США // Зарубежное военное обозрение. 2008. №1. С. 35-39.
2. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. - М.: Мир, 1979. - 600 с.
3. Блэк Ю. Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы. - М. Мир, 1990. – 506 с.
4. Кузнецов Д.Ю., Назаров А.А. Исследование немарковских моделей сетей связи с адаптивными протоколами случайного множественного доступа // Автоматика и телемеханика. 2001. №5. С.124–146.