

УДК 621.3.019.3

Анализ эффективности передачи данных в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов

Бородин В.В.*, Петраков А.М., Шевцов В.А.*****

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*

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

Аннотация

Статья посвящена исследованию информационной сети автономной группировки беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Вследствие движения БЛА структура сети постоянно изменяется. Для эффективного обмена данными необходимо постоянное обновление информации о состоянии сети. В статье анализируются временные параметры процесса обновления сетевых матриц, необходимых, в частности, для маршрутизации сообщений.

Исследование осуществляется с использованием математической модели сети, имитирующей процессы обмена БЛА локальными данными о структуре сети. Получены временные характеристики обновления сетевых матриц с учетом используемых механизмов доступа и искажений передаваемых сообщений.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, сети передачи данных, случайный доступ, циклический доступ, маршрутизация, сетевые матрицы смежности.

1. Введение и постановка задачи

В настоящее время для решения многих задач предлагается использовать группировку (Swarm) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [1,2,3]. Эффективность группировки значительно повышается, при выполнении следующих условий:

1. Группировка является автономной, т.е. информационное взаимодействие с удаленным пунктом управления минимально или отсутствует.
2. Между БЛА группировки происходит обмен данными.

Для реализации обмена данными может быть использована сеть связи, узлами которой являются сами летательные аппараты, входящие в группировку. Наличие сети позволяет каждому БЛА передать данные на любой другой БЛА либо непосредственно по прямому каналу связи (такие БЛА являются смежными), либо с использованием ретрансляции, если передающий и приемный БЛА не имеют прямого канала связи. Возможные маршруты передачи данных (или непосредственно или через узлы ретрансляции) определяются структурой сети. Таким образом, каждый узел должен иметь возможность маршрутизации как своих,

так и транзитных пакетов. Основой для построения маршрута является матрица смежности сети (МСМ), которая содержит информацию о характеристиках каналов связи между смежными (т.е. имеющими прямой канал связи) узлами.

Движение БЛА относительно друг друга вызывает в общем случае изменение их взаимного положения, вследствие чего структура сети связи также изменяется. Это приводит к необходимости в каждом узле периодически обновлять информацию о текущей конфигурации сети.

Обновление матрицы смежности требует дополнительных обменов информацией между узлами. Поскольку скорость передачи информации ограничена, обновление матриц будет выполнено за конечное время.

Отсутствие ясных критериев завершения обновления МСМ может привести или к неоправданному увеличению времени, отведенному на обновление матриц, или к преждевременному началу передачи информационных пакетов. В обоих случаях это приводит к снижению эффективности функционирования сети.

Работа посвящена задаче оценки времени, необходимого для обновления матриц смежности при использовании различных алгоритмов доступа.

2.Описание модели сети

В данной работе исследуется адаптивная сеть, содержащая N узлов. Связь между узлами осуществляется по радиолинии с временным уплотнением. Далее предполагается, что канал связи между узлами является полудуплексным.

Модель сети задается графом, вершинами которого являются узлы сети, ребра графа моделируют канал связи между соответствующими узлами. Поскольку каналы полудуплексные, то ребра графа являются двунаправленными.

В общем случае граф имеет разметку, которая может отражать технические параметры канала связи, например, его загрузку, стоимость, время передачи и т.д. В рамках данной статьи мы будем учитывать только факт наличия канала между двумя узлами.

Граф сети может быть представлен в виде матрицы смежности размером $N \times N$. Элемент $M(k,n)$ этой матрицы равен единице, если узлы с номером k и n соединены каналом, и равен нулю в противном случае. Поскольку дуги ненаправленные, то матрица будет симметричной.

По матрице смежности могут быть определены все узлы, связанные с выбранным узлом. Процедура определения связанных узлов является итерационной.

Обозначим через $A(k)$ множество узлов, которые непосредственно связаны с узлом U_k . Обозначим через K_{cm} средний коэффициент смежности узлов. Этот коэффициент определяется как отношение общего количества узлов в сети к количеству узлов, непосредственно связанных с произвольным узлом. Через $C(k)$ обозначим множество узлов, связанных с узлом U_k .

На первом шаге имеем $C_1(k)=A(k)$.

Далее, множество C_j на j -м шаге итерации определяем следующим образом:

$$C_j(k) = C_{j-1}(k) \cup A(n), n \in C_{j-1}(k) \quad (1)$$

Отметим важное свойство ненаправленных графов. Обозначим через $R(k,n)$ отношение связности узлов U_n и U_k . Это отношение является симметричным, поскольку каналы связи дуплексные. Кроме того, оно является транзитивным, т.е. если $R(k,n)$ и $R(n,l)$ то $R(k,l)$. Также очевидно, что каждый узел связан с самим собой, т.е справедливо $R(k,k)$. Наличие этих трех свойств показывает, что отношение связности является отношением эквивалентности [4]. В свою очередь это означает, что все множество узлов сети в общем случае может быть представлено в виде совокупности областей, в каждой из которой узлы связаны между собой. Узлы, принадлежащие различным областям, между собой не связаны.

Сеть будем называть полносвязной, если все ее узлы связаны, т.е. существует путь от любого узла сети к любому другому. В противном случае, сеть будем называть неполносвязной. В дальнейшем будет использоваться только полносвязная сеть.

Важным следствием данного результата является то, что множества C_j , определяемые уравнением (1) являются монотонно возрастающими, и, вследствие конечности количества узлов, последовательность $\{ C_j \}$ является ограниченной:

$$C_1(k) \subset C_2(k) \subset \dots \subset C(k) \quad (2)$$

Поэтому число итераций r может быть определено следующим образом:

$$r = \min J: C_{j+1} = C_j \quad (3)$$

3. Организация доступа в канале передачи данных между БЛА

Ниже рассмотрены следующие варианты доступа в канал обмена данными между БЛА.

1. Циклический доступ с временным разделением каналов. Каждому БЛА выделяется один временной интервал времени, в течение которого он полностью передает данные о матрице смежности. Временные окна следуют друг за другом, каждое временное окно закреплено за одним БЛА.
2. Случайный синхронный доступ. Канал разбивается на последовательные интервалы времени (окна), длительность которого достаточна для передачи данных о матрице смежности. Каждый БЛА случайным образом выбирает окно для передачи информации о матрице смежности. Если несколько БЛА выбирают одно и то же окно, то происходит столкновение (коллизия) данных. Повторная передача искаженных данных не производится. Неискаженная передача возможна при следующей передаче данных. Необходимо отметить, что искажение данных, передаваемых одновременно, не происходит, если соответствующие каналы пространственно разделены.

4. Алгоритм обновления матрицы смежности

Пусть сеть имеет некоторую фактическую матрицу смежности M_{CM} . Исходными данными для создания фактической матрицы являются количество (N) узлов сети и коэффициент смежности K_{CM} . Каждый узел имеет свой номер в сети (от

0 до $N-1$). В процессе создания фактической матрицы перебираются все узлы, и для каждого узла случайным образом определяется состав смежных узлов.

В начальный момент каждый узел сети имеет собственную (локальную) нулевую матрицу смежности, т.е. все элементы этих матриц равны нулю. Матрицу смежности узла U_k обозначим через $M(k)$. В процессе моделирования формируются локальные матрицы всех узлов, тождественные фактической матрице.

Алгоритм обновления локальной матрицы состоит в следующем.

Произвольный узел U_k сети направляет широковещательное сообщение, содержащее номер этого узла.

Это сообщение принимается всеми узлами, с которыми связан узел U_k . Каждый узел, который принял сообщение, обновляет свою матрицу смежности. В ней, в частности, появляются единицы на пересечении K -го столбца и L -ой строчки, где L – номер принимающего узла.

Далее каждый узел определяет изменение своей матрицы, которое произошло после приема сообщения. Это изменение содержит те соединения между узлами, которые ранее не были отмечены в матрице соответствующего узла. Если изменения ненулевые, то узел передает широковещательное сообщение, содержащее изменения матрицы и свой номер.

Сообщения передаются на смежные узлы и процедура циклически повторяется. Таким образом, за один цикл от одного узла передается сообщение, содержащее изменение матрицы смежности.

Узлы передают свои сообщения в ответ на пришедшее сообщение и только в том случае, если оно приводит к изменению их внутренней матрицы.

Завершение обновления матриц определяется фактом совпадения всех локальных матриц с фактической матрицей МСМ.

По результатам моделирования определяются следующие показатели обновления матрицы смежности.

1. Число узлов, для которых определены все смежные узлы по отношению к общему числу узлов – доля областей смежности.
2. Число узлов, для которых полностью определена матрица смежности по отношению к общему числу узлов – доля созданных матриц смежности.
3. Распределение количества передач, при которой узел полностью определил локальную матрицу смежности.
4. Число узлов, передающих сообщения об обновлении матрицы смежности по отношению к общему числу узлов – трафик сети.

5. Определение времени обновления матриц смежности при циклическом доступе

Результаты моделирования процесса обновления матриц при условии отсутствия искажений передаваемых данных, приведены на рисунке 1.

Графики показателей обновления МСМ построены в зависимости от текущего времени выполнения задачи по обновлению матриц смежности. Единицей

измерения времени на этих и следующих графиках является окно – время, необходимое для передачи одного сообщения. Коэффициент смежности и количество узлов сети являются параметрами.

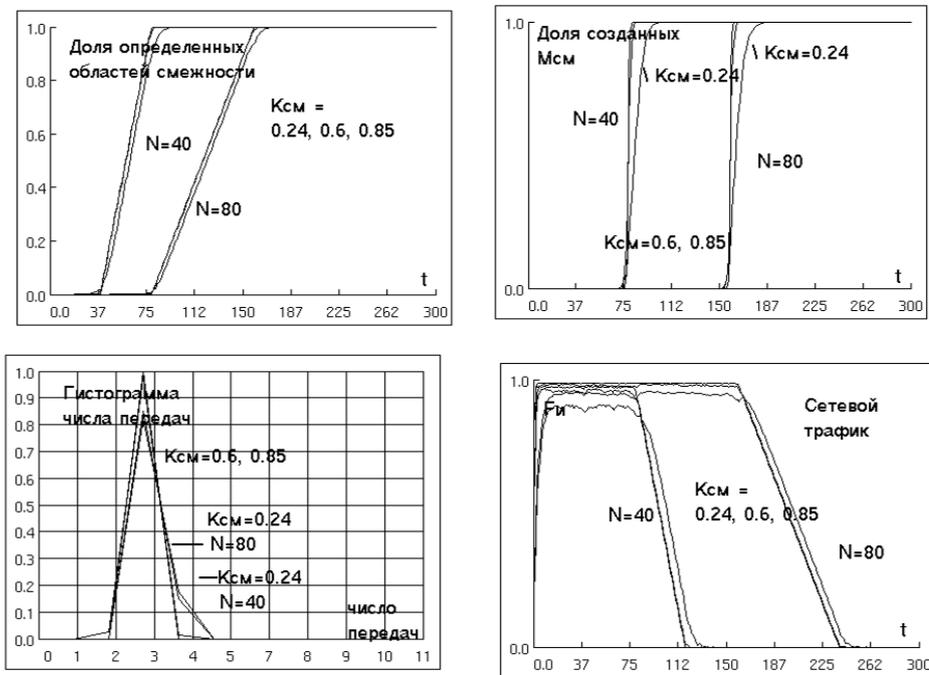


Рисунок 1. Изменение показателей обновления МСМ от времени при отсутствии искажений передачи

Один из наиболее интересных результатов, на наш взгляд, состоит в том, что число передач данных до полного построения матриц смежности практически не зависит от числа узлов и уровня смежности сети. Среднее число передач не превышает трех, при этом дисперсия числа передач мала (порядка 0.1 - 0.15 от среднего значения). Это позволяет сделать вывод о том, что удобным критерием, определяющим завершение передач данных обновления матриц смежности, является достижение определенного порога числа передач.

Отметим также, что после завершения обновления матриц смежности, сеть еще в течение определенного времени продолжает передавать данные, не приводящие, однако, к изменению локальных матриц. Снижение сетевого трафика указывает на завершение обновления локальных матриц. Кроме того, время обновления локальных матриц является практически линейной функцией от числа узлов и слабо зависит от коэффициента смежности.

Анализ поведения сетевого трафика от времени показывает, что, по крайней мере, на начальном участке, все передаваемые сообщения являются значимыми, т.е. содержат новую информацию для обновления матриц смежности. Это указывает на то, что при формировании матрицы смежности доступ по выделенным каналам является эффективным, поскольку именно при этом обеспечивается полная загрузка каналов передачи данных.

Рассмотрим теперь характеристики обновления матриц при наличии искажений передаваемых сообщений, вызванных воздействием шумов и помех.

Прежде всего, в экспериментах получено доказательство того, что искажение передаваемых данных приводит к невозможности полного построения локальных матриц смежности.

Объяснение эффекта состоит, на наш взгляд, в том, что узел передает данные о матрице смежности только в случае наличия изменений локальной матрицы. Сами эти изменения формируются на основании данных, полученных от других узлов. Если ошибки в передаче отсутствуют, то с вероятностью единица все изменения рано или поздно дойдут до всех узлов. В случае искажений, всегда существует

вероятность того, что какой-либо узел не получит всех изменений локальных матриц других узлов. Как следствие, часть узлов не сможет полностью сформировать свои локальные матрицы.

По этой причине в дальнейшем используется модифицированный механизм обновления матриц. Каждый узел передает свои данные регулярно без учета изменений локальной матрицы по отношению к предыдущей передаче.

Результаты моделирования процесса обновления матриц при наличии искажений приведены на рисунке 2.

При моделировании принято, что каждое принятое сообщение может быть искажено с вероятностью q . Искажения сообщений происходят независимо.

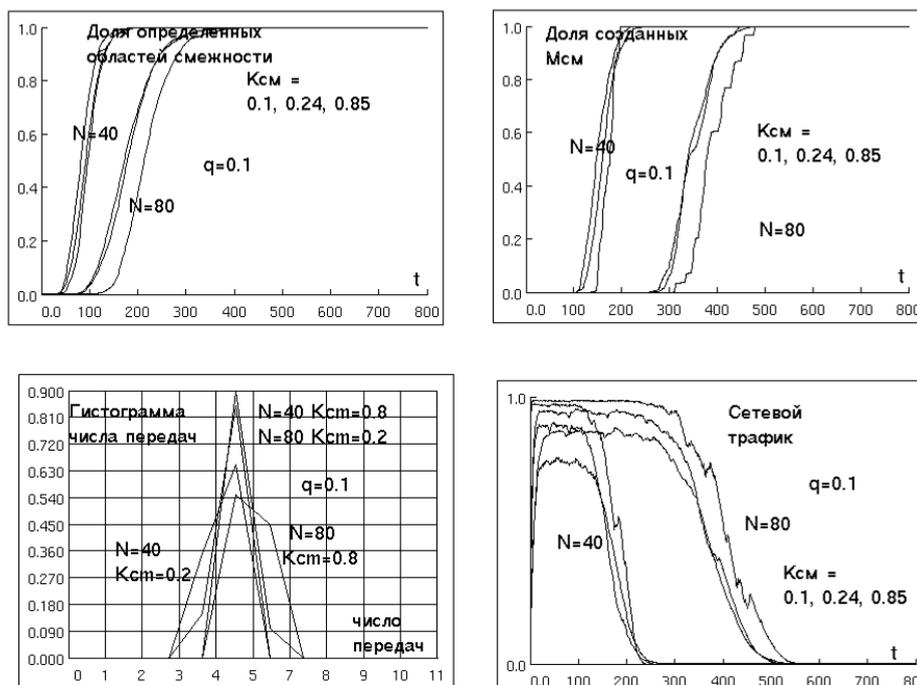


Рисунок 2. Изменение показателей обновления MCM от времени при наличии искажений передачи

Из полученных результатов следует, что время обновления матриц смежности при наличии искажений зависит от количества узлов сети и слабо зависит от коэффициента смежности. Отметим также, что кратность увеличения времени обновления МСМ и количества передач, вызванное воздействием помехи в основном определяется величиной искажения данных.

Среднее количество передач до полного обновления локальных матриц зависит от вероятности искажения. В расчете на один узел оно не превышает десяти. Коэффициент вариации слабо зависит от вероятности искажения и по порядку величины не превышает 0.15.

Отметим также, что при высокой вероятности искажения снижение сетевого трафика уже не означает завершения обновления локальных матриц, как это наблюдалось в случае отсутствия искажений. Фактически МСМ формируются в течение всего времени передачи значимых сообщений.

6.Определение времени обновления матриц смежности

при случайном доступе

В ряде применений группировки БЛА использование циклического доступа может оказаться невозможным. Альтернативным механизмом доступа является случайный многостанционный синхронный доступ без квитирования [5,6]. В этом случае по каналу постоянно передаются временные окна, любой узел сети может

начать передачу вначале некоторого, выбранного случайным образом, окна. Длительность окна достаточна для передачи всего сообщения.

В случае, если в окне передается только один пакет, считается, что он доходит до адресата без искажений. Столкновение (коллизия) сообщений наступает в том случае, если одновременно несколько узлов передают свои сообщения и занимаемые им окна пространственно не разделены.

Для моделирования этого типа доступа была разработана имитационная модель. Модель содержит N узлов, соединенных между собой дуплексным каналом обмена данными. Для передачи пакетов широковещательный режим без квитирования.

Каждый узел передает сообщения через случайное время, имеющее экспоненциальное распределение со средним значением Θ . Суммарный поток сообщений от всех узлов (трафик) будет пуассоновским с параметром (в расчете на одно окно) G .

Результаты моделирования приведены на рисунке 3.

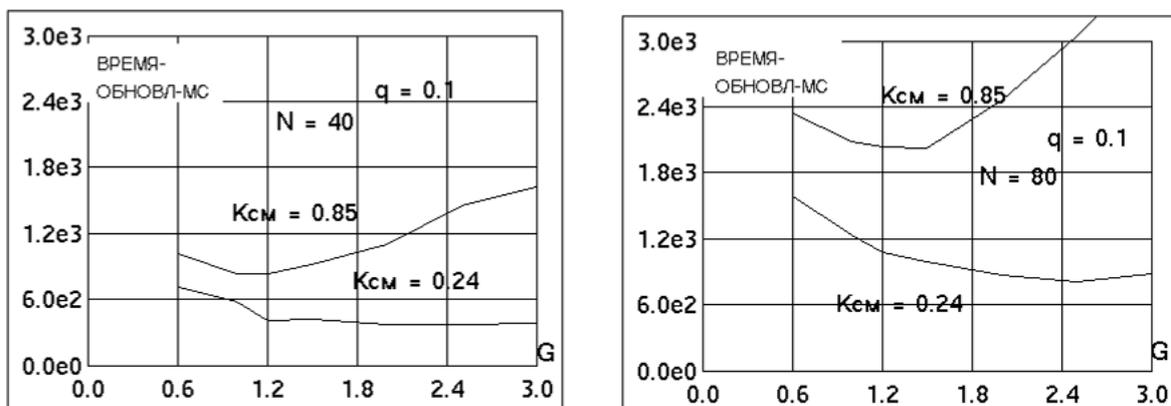


Рисунок 3. Изменение показателей обновления МСМ от времени при случайном доступе

Результаты моделирования показали, что время обновления матриц смежности существенно зависит от трафика G и существует оптимальное значение трафика, при котором время обновления минимально. С увеличением коэффициента смежности сети оптимальное значение трафика уменьшается.

Время обновления матриц смежности при случайном доступе и отсутствии ошибок многократно превышает время обновления при циклическом доступе.

Необходимо отметить, что при случайном доступе время обновления матриц снижается с уменьшением коэффициента смежности. Связано это, по видимому, с тем, что высокая связность сети означает также и высокое значение вероятности столкновения сообщений, что и приводит к увеличению времени обновления матриц. Это обстоятельство указывает на то, что случайный доступ целесообразно использовать при малых $K_{см}$.

Зависимости времени обновления МСМ при коэффициенте смежности $K_{см} = 0.1$ от вероятности искажения приведены на рисунке 4.

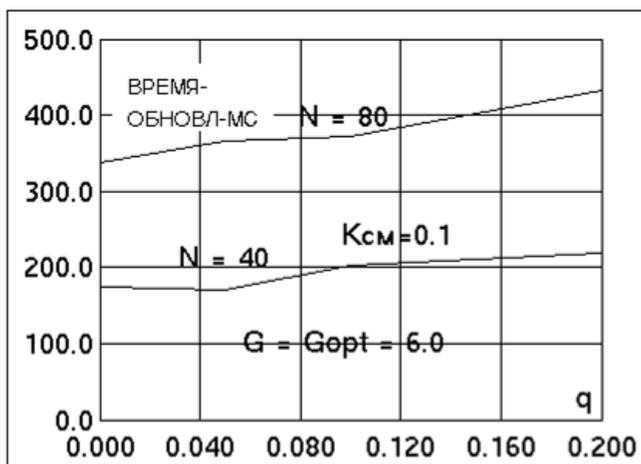


Рисунок 4. Зависимости времени обновления МСМ от вероятности искажения и оптимальном трафике

Как следует из приведенных результатов, случайный доступ значительно менее чувствителен к искажениям по сравнению с рассмотренным ранее циклическим доступом.

Зависимость количества передач при циклическом доступе от вероятности искажения приведена на рисунке 5.

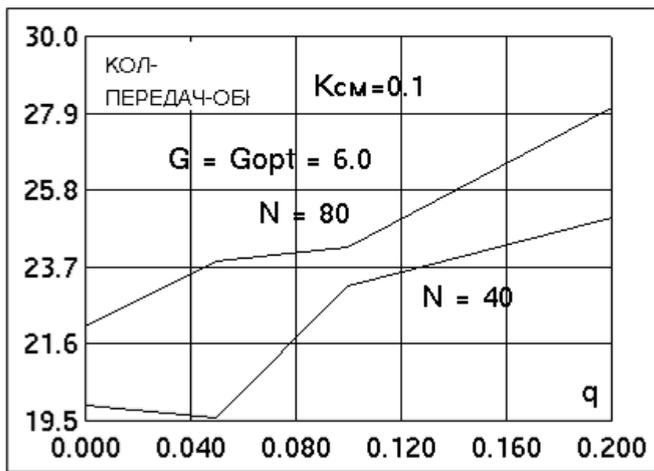


Рисунок 5. Зависимость количества передач для обновления МСМ от вероятности искажения и оптимальном трафике

Отметим, что количество передач, приходящееся на один узел сети при случайном доступе, превышает аналогичные характеристики циклического доступа. Отметим также, что коэффициент вариации количества передач имеет значение, не превышающее 0.15, и практически совпадает с этой характеристикой циклического доступа.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при малом коэффициенте смежности различие в характеристиках сетей со случайным и циклическим доступом будет сокращаться.

На рисунке 6 приведены зависимости времени обновления МСМ при случайном (СД) и циклическом (ЦД) доступе от вероятности искажения и коэффициенте смежности $K_{см} = 0.1$.

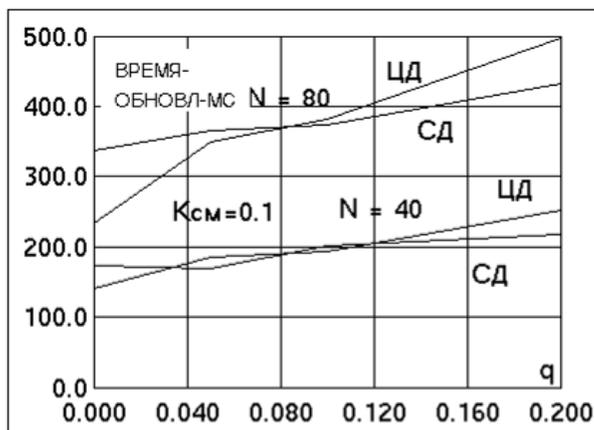


Рисунок 6. Сравнительные характеристики обновления МСМ при случайном (СД) и циклическом (ЦД) доступе

Сравнение времени обновления МСМ при случайном и циклическом доступе показывает, что при малом коэффициенте смежности случайный доступ обладает

более высокими характеристиками, при этом отличие тем выше, чем больше число узлов и вероятность искажения.

7. Сегментация сети связи с целью сокращения времени обновления

МСМ

Результаты моделирования показывают, что время обновления матриц смежности линейно зависит от количества узлов. При большом размере сети процедура обновления может потребовать большого временного ресурса. Сократить время обновления возможно при сегментации сети на подсети.

Разобьем исходную сеть на P_1 подсетей, каждая из которых имеет одинаковое количество узлов. Каждую из этих подсетей в свою очередь разобьем на P_2 подсетей. Через M разбиений (M – глубина разбиения) получим, что каждая подсеть содержит N/P узлов, где $P = P_1 * P_2 * \dots * P_M$.

Процесс обновления матриц смежности будет выглядеть следующим образом. Сначала обновляются матрицы узлов, входящих в подсети глубиной M . Затем происходит обновление матриц подсетей уровня $M-1$ и т.д.

Общее время обновления матриц будет пропорционально:

$$t = N/P + P_1 + P_2 + \dots + P_M \quad (4)$$

Минимальное значение время обновления принимает, если

$$P_1 = P_2 = \dots = P_M = \sqrt[M]{N} \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получим следующее выражение для минимального времени обновления:

$$t_M = (M + 1) * \sqrt[M+1]{N} \quad (6)$$

Полученное выражение определяет минимальное время обновления матриц смежности при глубине разбиения M . Дифференцируя (6) по M и приравнявая производную нулю, получим оценку для оптимальной глубины разбиения, равную:

$$M_{opt} = \ln N - 1$$

И окончательно:

$$t_{min} = \sqrt[\ln N]{N} * \ln N = e * \ln N$$

Полученный результат показывает, что при оптимальной сегментации сети зависимость времени обновления является логарифмической функцией от количества узлов.

8. Результаты работы и основные выводы

Работа посвящена задаче исследования характеристик обновления локальных матриц смежности группировки беспилотных летательных аппаратов. Наличие локальной матрицы смежности позволяет каждому БЛА автономно определять маршруты передачи сообщений.

Формирование локальной матрицы смежности происходит в процессе многократных обменов между БЛА группировки информацией о текущем состоянии матриц смежности. Для организации обменов используется сеть передачи данных, узлами которой являются БЛА.

Рассмотрены два механизма доступа к сети в процессе обновления матриц – циклический доступ и случайный доступ. Разработана имитационная модель сети,

позволяющая определять характеристики обновления МСМ в зависимости от структуры сети и искажения данных при передаче. Приводятся результаты моделирования, на основании которых могут быть определены области эффективного использования каждого метода доступа и предложены критерии для определения факта завершения обновления МСМ.

Сравнительный анализ методов доступа показал, что при отсутствии искажений (или в случае малой величины искажений) циклический доступ обеспечивает более высокую эффективность по сравнению со случайным доступом.

Случайный доступ целесообразно использовать при относительно высоких вероятностях искажения данных (порядка 0.1 и выше), большом числе узлов (более 40) и малой связности сети.

Библиографический список

1. Разгуляев. Л.В. Перспективные мобильные адаптивные сети передачи информации для СВ США // Зарубежное военное обозрение. 2008. №1. С. 35-39.
2. Попов В.А., Федутин Д.В. Тенденции развития систем передачи данных при использовании БЛА // Зарубежное военное обозрение. 2006. №4. С. 47-52.
3. Ким Н.В, Крылов И.Г. Групповое применение БЛА в задачах наблюдения. Сборник докладов IX –й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», Москва, Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2012, С.59-62.

4. Колмогоров А.Н., Фомин С.В.. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1972. - 496 с.
5. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979. -600 с.
6. Блэк Ю. Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы. М.: Мир, 1990. – 506 с.