

Анализ алгоритмов маршрутизации 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

В статье рассмотрена адаптивная радиосеть, узлами которой являются беспилотные летательные аппараты (БЛА, дроны). Для группировки дронов характерно частое изменение взаимного положения и структуры сети, что приводит к необходимости динамической маршрутизации передаваемых пакетов. Каждый узел маршрутизирует свои пакеты на основании маршрутной информации, получаемой от других узлов по выделенному служебному каналу. Статья посвящена исследованию алгоритмов маршрутизации радиосети связи автономной группировки БЛА.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, адаптивные сети передачи данных, случайный доступ, маршрутизация, сетевые матрицы смежности, метрики маршрутизации, имитационное моделирование.

1. Введение и постановка задачи

В настоящее время [1] активно разрабатывается технология, позволяющая управлять «роем» или «стаей» роботизированных боевых единиц. Технология роя (swarm) позволяет автономно выполнять такие задачи, как построение боевых единиц, маневры внутри роя, дозаправка и перезарядка, видео и топографическая съемка местности. В данный момент такая технология наиболее актуальна для беспилотных летательных аппаратов (БЛА, дроны), хотя с развитием наземных роботизированных боевых систем может быть с успехом применена и для них.

Для управления совокупностью БЛА предлагается использовать телекоммуникационную адаптивную сеть [2,3,4], поддерживающую динамически изменяющуюся сетевую конфигурацию.

Для обеспечения требований к адаптивной сети необходимо решить ряд сложных проблем, в частности [4,5,6]:

1. Обеспечить эффективное управление шириной полосы частот.
2. Разработать маршрутные протоколы (МП), быстро адаптирующиеся к частым и непредсказуемым изменениям в сетевой топологии.
3. Выбрать оптимальный набор маршрутных метрик.

В настоящее время используются протоколы маршрутизации, ориентированные на поиск кратчайшего маршрутного расстояния с привязкой к сетевой топологии и местоположению узлов [5,7,8,9,10].

Для алгоритма вектора расстояния характерно то, что каждый узел сети осуществляет контроль информации о соединениях только с соседними узлами. Алгоритм вектора расстояния имеет большую эффективность расчетов маршрутов, но его слабой стороной является возможность появления маршрутных петель.

Алгоритм анализа состояния канала осуществляет периодическую рассылку информации о состоянии соединений со своими соседями, однако сеть в случае высокой мобильности узлов перегружается служебными сообщениями.

Наконец, алгоритм маршрутизации от источника подразумевает наличие в каждом пакете служебной информации, в которой прописан полный маршрут до узла назначения. Выбор маршрута осуществляется непосредственно отправителем. Преимущество данного алгоритма заключается в том, что с его помощью очень легко избежать маршрутных петель, а слабой его стороной, как и в случае алгоритма анализа состояния канала, является необходимость добавления в каждый пакет дополнительной служебной информации.

Что касается выбора маршрутных метрик, то в радиосетях, помимо измерения мощности сигнала, рекомендуется [6] определять и такие параметры (маршрутные метрики), как Channel Load (загрузка каналов), Noise (уровень шума), Beacon Frame (кадры-маяки), Hidden Node (скрытые узлы), Medium Sensing (измерение характеристик среды передачи), Time Histogram (временная гистограмма) и STA Statistics (статистика станции или устройства).

Несмотря на большой интерес к рассматриваемой теме, на наш взгляд

недостаточно внимания уделяется вопросам моделирования вероятностно-временных характеристик алгоритмов маршрутизации. Предлагаемая работа посвящена исследованию эффективности алгоритмов маршрутизации в условиях нестационарности, в частности, при изменении структуры сети.

2. Описание модели сети

2.1. Общее описание и модель информационного канала.

В данной работе исследуется адаптивная радиосеть с коммутацией пакетов и случайным доступом по протоколу синхронная Aloha. В качестве основного показателя эффективности сети выбрано среднее время передачи пакета по сети от исходящего узла А к входящему узлу Б. Связь между узлами осуществляется по двухканальной радиолинии. Первый канал – информационный, предназначенный для передачи целевой информации. Второй канал – служебный, предназначен для рассылки маршрутной информации о состоянии узлов или о состоянии каналов связи между узлами. Скорость передачи по служебному каналу составляет определенную часть от суммарной скорости передачи.

Информационный канал является полудуплексным каналом с временным уплотнением и случайным доступом по протоколу синхронная Aloha [11]. Канал разбивается на последовательность интервалов (окон), длительность которых достаточна для передачи одного информационного пакета и передачи положительной ответной квитанции от узла назначения.

Для сетей со случайным доступом характерно появление наложений

(коллизий) одновременно переданных пакетов. Для расчета вероятности искажения пакетов вследствие взаимных наложений используется следующая модель.

Пусть каждый узел излучает сигнал изотропно на длине волны λ и мощность излучения равна $P_{пер}$.

Тогда на расстоянии r от узла мощность сигнала будет равна [12]:

$$P_c = \left(\frac{\lambda}{r}\right)^2 \cdot P_{пер} \quad (1)$$

На вход приемника узла Б поступает S_{AB} полезный сигнал от узла А (передающий пакеты для узла Б) и сигналы от остальных узлов, являющиеся помехой для этого сигнала S_{AB} . Кроме помехи от передающих узлов, на вход приемника поступает и шум (например, тепловой) мощностью $P_{ш}$.

Общая мощность помехи на входе приемника узла Б равна:

$$P_n = P_{ш} + \sum_k P_{ck} = P_{ш} \cdot (1 + \sum_k P_{ck} / P_{ш}) = P_{ш} \cdot (1 + \sum_k h_k) \quad (2)$$

где P_{ck} – мощность сигнала от k -го узла в рассматриваемой точке, $P_{ш}$ – мощность шума.

Суммирование происходит по всем узлам, передающим свои пакеты одновременно с узлом А.

Пусть $r_{гр}$ - радиус зоны обслуживания произвольного узла. Обозначим через $h_{гр}$ отношение сигнал/ шум на границе зоны обслуживания узла.

Тогда выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$P_c = \left(\frac{\lambda}{r}\right)^2 \cdot P_{nep} = \left(\frac{\lambda}{r_{zp}}\right)^2 \cdot \left(\frac{r_{zp}}{r}\right)^2 \cdot P_{nep} = P_{c_{zp}} \cdot \left(\frac{r_{zp}}{r}\right)^2 \quad (3)$$

где $P_{c_{гр}}$ – мощность сигнала на границе зоны обслуживания.

Подставляя (2) в (3) получим:

$$P_n = P_{ш} \cdot \left(1 + \sum_{\kappa} P_{с\kappa} / P_{ш}\right) = P_{ш} \cdot \left(1 + \frac{P_{c_{zp}}}{P_{ш}} \sum_{\kappa} \left(\frac{r_{zp}}{r_{\kappa}}\right)^2\right) = P_{ш} \cdot \left(1 + h_{zp} \cdot \sum_{\kappa} \left(\frac{r_{zp}}{r_{\kappa}}\right)^2\right)$$

Таким образом отношение сигнал/помеха для принимающего узла Б равно:

$$h_B = \frac{P_B}{P_n} = P_{c_{zp}} \left(\frac{r_{zp}}{r_{AB}}\right)^2 \cdot \left(P_{ш} \cdot \left(1 + h_{zp} \cdot \sum_{\kappa} \left(\frac{r_{zp}}{r_{\kappa B}}\right)^2\right)\right)^{-1} = \frac{h_{zp} \cdot (r_{zp} / r_{AB})^2}{1 + h_{zp} \sum_{\kappa} (r_{zp} / r_{\kappa B})^2} \quad (4)$$

В последнем выражении использованы следующие обозначения:

$h_{гр}$ - отношение сигнал/шум (потенциал) на границе зоны обслуживания,

h_B - отношение сигнал/помеха (потенциал) в рассматриваемой точке пространства (на входе приемника узла Б),

r_{AB} – расстояние от узла А до рассматриваемой точки пространства (узла Б).

$r_{\kappa B}$ – расстояние от передающего узла до рассматриваемой точки пространства (узла Б).

Найденное значение потенциала может быть использовано для определения вероятности коллизии пакетов при условии одновременного излучения нескольких узлов. В частности, при оптимальном приеме сигнала с активной паузой и известными параметрами, вероятность искажения бита равна [12]:

$$Q = 1 - F(\sqrt{h})$$

где
$$F(u) = 1/\sqrt{2 \cdot \pi} \int_{-\infty}^u \exp(-x^2) dx$$

Искажения бит в пакете будем считать независимыми, кодовые методы исправления ошибок не используются. Тогда вероятность $Q_{\text{пакет}}$ искажения пакета, содержащего L бит, будет равна:

$$Q_{\text{пакет}} = 1 - (1 - Q)^L$$

Для управления сетью при возникновении коллизии используется механизм квитирования. С этой целью в сети информационный канал разделяется по времени на два последовательных временных интервала. Первый интервал используется для передачи информационного пакета, второй используется для передачи квитанции только тем узлом, которому адресован пакет. Если квитанция не поступила, передающий узел принимает решение о наступлении коллизии и повторно передает пакет.

2.2. Модель структуры сети

Моделирование структуры сети выполнено следующим образом. Определяется область нахождения узлов (квадрат, куб, и тд) единичной площади (объема). Далее случайным образом внутри области нахождения формируются координаты каждого узла.

Для определения маршрутов, введено понятие области смежности (зоны обслуживания). Область смежности узла A содержит те узлы B , для которых

вероятность искажения пакета, переданного узлом А не превышает заданной величины. Узлы, находящиеся в зоне обслуживания узла будем называть смежными этому узлу. В маршруте соседние узлы всегда являются смежными.

При моделировании движения узлов, координаты каждого узла получают небольшие случайные приращения. Степенью близости исходной и смещенной структур является относительное количество измененных каналов между узлами.

Модель структуры сети представляется в виде квадратной матрицы смежности (МС) размерностью $N \times N$. Элемент $M(k,m)$ этой матрицы является многокомпонентной величиной и определяет, в частности, смежность узлов m и k , расстояние между узлами, координаты узлов, значение метрики узла и канала связи между узлами. Каждый узел содержит свою локальную матрицу смежности, элементы которой отражают объем информации, доступный конкретному узлу. Маршрутизация выполняется каждым узлом по своей локальной матрице смежности. По мере передачи метрической информации, локальные МС узлов постепенно обновляют свое содержимое.

2.3. Алгоритм маршрутизации

Маршрутизация осуществляется на основании маршрутной информации, получаемой каждым узлом от соседних узлов по выделенному служебному каналу передачи данных. Задача маршрутизации состоит в определении последовательностей узлов ретрансляции для передачи пакета и выбор оптимальной последовательности.

При формировании пакета узел А - источник информации, записывает в пакет номер узла Б – получателя информации. Далее перед передачей пакета узел по своей локальной матрице смежности определяет список кратчайших (т.е. содержащих минимальное количество узлов ретрансляции) маршрутов до узла Б и для каждого маршрута определяет значение его метрики. После этого выбирается тот маршрут, метрика которого имеет экстремальное (как правило, минимальное) значение. Если имеется несколько маршрутов с одинаковыми метриками, то выбирается один маршрут случайным образом. В пакет записывается адрес транзитного узла С (первый узел выбранного маршрута), на который и направляется данный пакет. После приема пакета, приемный узел сравнивает адрес конечного узла и собственный адрес. Если узел, принявший пакет, является транзитным, то пакет ставится в очередь и ожидает передачи. Алгоритм маршрутизации повторяется.

Если узел С является конечным узлом маршрута (узлом Б), пакет удаляется из сети.

В работе анализируются следующие метрики:

- *«очередь»*: суммарная длина очереди узлов, входящих в выбранный маршрут,
- *«загрузка»*: суммарная загрузка узлов, входящих в маршрут,
- *«количество повторений»*: суммарное количество повторных передач пакетов узлами, входящими в маршрут,
- *«вероятность искажения»*: вероятность искажения пакета на маршруте.

- «очередь1»: длина очереди первого по маршруту узла сети (узлаС)
- «загрузка1»: загрузка первого по маршруту узла сети (узлаС)
- «количество повторений1»: количество повторных передач первого по маршруту узла сети (узла С)
- «случайный выбор»: случайный номер узла ретрансляции (узла С).

2.4. Модель служебного канала

В статье рассматриваются следующие два варианта организации служебного канала.

В первом варианте обмен маршрутной информацией осуществляется узлами по выделенному (например, частотному) каналу параллельно с передачей целевых информационных пакетов. Служебному каналу выделяется определенная доля $D_{сл}$ от общей скорости канала.

Во втором варианте осуществляется периодическое прерывание передачи информационных пакетов на интервал времени $T_{обн}$, достаточный для обновления маршрутной информации. Период повторения выбирается равным $T_{повт} = T_{обн} / D_{сл}$.

По служебному каналу выполняется рассылка метрической информации о состоянии узлов и о состоянии каналов.

Рассылка метрической информации о состоянии узлов осуществляется в циклическом режиме последовательно всеми узлами сети. Пусть узел A_1 , узел A_2 , узел A_3 , ... узел A_N , - последовательность, в которой узлы передают метрическую информацию. В начальный момент каждый узел имеет только информацию о

собственном состоянии.

В момент t_0 узел A_1 передает текущее состояние метрики на все смежные узлы. Далее в последующие моменты времени (такты) первого цикла t_1, t_2, \dots, t_{N-1} , соответствующий узел передает на все смежные узлы как информацию о своем собственном состоянии, так и поступившую к моменту передачи информацию о состоянии других узлов. На втором и последующих циклах каждый узел передает только информацию от узлов, которая поступила за время между текущей и предыдущей передачей. Фактически, каждый узел передает данные о состоянии вновь принятых узлов.

Алгоритм рассылки метрической информации о состоянии каналов между узлами, а также рассылка информации о структуре сети имеет много общего с предыдущим алгоритмом и состоит в следующем.

На первом цикле каждый узел A формирует эталонный сигнал, который поступает в соответствующие такты на все доступные узлы B . Мы предполагаем, что принятый сигнал может быть использован для оценки характеристик соответствующего канала связи между узлами A и B (например, расстояние между узлами). Таким образом, каждый узел накапливает информацию о характеристиках каналов, соединяющих его с другими узлами. Эта информация передается на остальные узлы в очередном для данного узла такте передачи. С целью сокращения объема передаваемой информации, в тактах на следующих циклах каждый узел передает информацию, которая поступила за время между текущей и предыдущей передачей.

3. Результаты моделирования служебного канала

Характеристиками служебного канала являются: доля $D_{сл}$ от общей скорости передачи пакетов и время t_p рассылки метрик всеми узлами сети. Предварительные исследования показали, что для широкого диапазона изменения исходных данных, оптимальное значение $D_{сл} \approx 5\%$. Это значение и используется в дальнейшем при моделировании.

Далее при моделировании принято, что метрика кодируется одним байтом, и передача метрической информации осуществляется стандартными ip-пакетами размером служебной части в 28 байт. Длина пакета для передачи маршрутной информации равна длине информационного пакета. Результаты моделирования служебного канала приведены в [13]. Показано, в частности, что объем передаваемой информации и, следовательно, время рассылки, состояния всех узлов пропорционально квадрату, а состояния каналов – кубу количества узлов в сети.

Для практически важных случаев (например, при количестве узлов несколько десятков и более) время передачи состояний каналов составляет несколько десятков или сотен окон. Фактически это означает, что рассылка может быть выполнена только при условии предоставления всего информационного канала, т.е. в режиме прерывания.

Таким образом, организация служебного канала зависит от используемых метрик. Передача маршрутной информации одновременно с передачей информационных пакетов целесообразно при относительно малых ее объемах,

например, при рассылке узловых меток. При большом объеме маршрутной информации необходимо использовать прерывание передачи информационных пакетов.

Необходимо, отметить, что в радиосетях маршрутизация базируется на вычислении энергетика каналов связи между узлами, и необходимо, по крайней мере, иметь информацию о расстоянии между узлами или координаты. Рассылка координат может быть выполнена одновременно с рассылкой других узловых и метрик занимает относительно мало времени.

Если же в узлах отсутствуют технические средства, позволяющие определять их координаты, то необходимо рассылать параметры канала, а именно расстояния между узлами. Объем маршрутной информации при этом в N раз выше и для ее рассылки выполняется принудительное прерывание передачи информационных пакетов на время, необходимое для рассылки соответствующей информации.

4. Анализ алгоритма маршрутизации

На графиках и в тексте используются следующие обозначения.

T_c – среднее время передачи пакета по сети от источника до получателя пакета.

q – вероятность искажения пакета на границе области смежности узла. Учитываются искажения только от шума без учета коллизии со стороны других узлов.

G – суммарный трафик всех узлов сети – среднее число пакетов, передаваемых за одно окно.

N – количество узлов сети.

$h_{гр}$ – значение потенциала (отношение сигнал/шум) канала на границе области нахождения от наиболее удаленного узла.

D_n – степень отличия исходной и смещенной структур сети.

t – время функционирования сети (время моделирования).

Отметим, что интенсивность потока, как и все остальные временные параметры сети, нормированы на время передачи одного пакета по каналу связи.

Наибольший интерес представляет изучение влияния метрик и энергетики каналов связи на время передачи пакетов по сети.

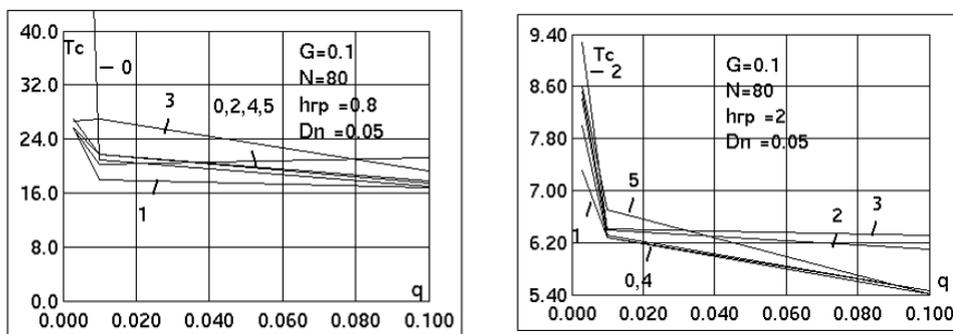
Вначале рассмотрим характеристики сети при рассылке узловых метрик.

На рисунке 1 приведены графики зависимости T_c от энергетики канала для различных метрик.

Прежде всего, необходимо отметить, что с ростом энергетики канала (увеличении $h_{гр}$), улучшается время передачи пакетов по сети. При этом снижается степень зависимости эффективности сети от маршрутной метрики. Для каналов с малой энергетикой (рис.1а), различие между максимальным и минимальным временем передачи составляет порядка 200%, а с большей энергетикой (рис1б) уже

только 20%.

Эффективность большинства из представленных метрик существенно зависит от параметров канала. Если объединить результаты моделирования, то получается, что для широкого диапазона изменения характеристик канала, при выполнении указанных выше ограничений, оптимальным является метрика «очередь1». Отметим, что и при других наборах исходных данных, данная метрика часто оказывалась наилучшей.



а)

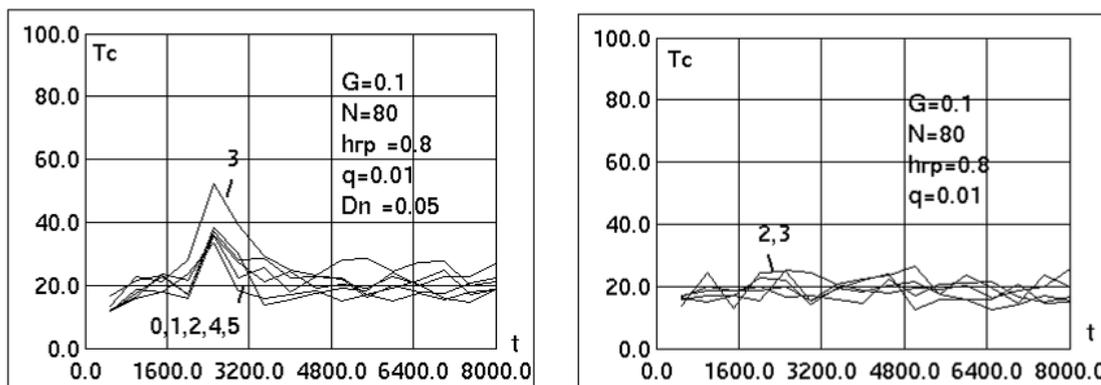
б)

Рисунок 1. Зависимость времени передачи по сети от метрики: 0 – «очередь», 1 – «очередь1», 2 – «загрузка», 3 – «загрузка1», 4 – «случайный выбор», 5 – «вероятность искажения».

Для уточнения характера влияния метрик на эффективность сети были определены зависимости эффективности функционирования от времени. На рисунке 2 приведены зависимости времени передачи пакета по сети в зависимости от времени функционирования. На рисунке 2а передача информации о структуре сети

происходит в режиме прерывания, на рисунке 2б – в непрерывном режиме, одновременно с передачей информационных пакетов. Отметим, что ступенчатость графиков объясняется статистическими погрешностями испытаний.

Из приведенных на рис.2а графиков следует, что в момент смены структуры сеть переходит из стационарного состояния в нестационарное. За время нахождения в этом состоянии происходит обмен между узлами информацией о новой структуре сети и рассасывание накопившихся за это время пакетов. Затем сеть вновь переходит в стационарное состояние.



а)

б)

Рисунок 2. Зависимость времени передачи по сети от времени функционирования для следующих метрик: 0 – «очередь», 1 – «очередь1», 2 – «загрузка», 3 – «загрузка1», 4 – «случайный выбор», 5 – «вероятность искажения».

Отметим, что при принятых исходных данных, влияние метрики на T_c на стационарных участках незначительно, что соответствует приведенным ранее усредненным результатам. Различие в метриках в основном проявляется на участке

изменения структуры.

Если передача маршрутной информации происходит параллельно с передачей информационных пакетов, переходные процессы, вызванные перестройкой структуры сети, менее заметны (см. рис.2б).

Выше отмечалось, что с уменьшением потенциала радиоканалов снижается и эффективность функционирования сети, в частности, увеличивается время передачи пакетов. Данный вывод иллюстрируется на рисунке 3, на котором приведена зависимость T_c от потенциала для различных значений вероятности q .

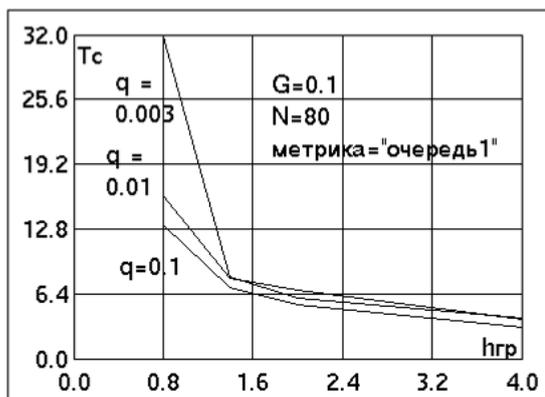


Рисунок 3. Зависимость времени передачи от характеристик радиоканала

Следует отметить, что параметры радиоканала оказывают влияние на время передачи только при относительно малых значениях потенциала и вероятности искажения пакета на границе области смежности. С ростом отношения сигнал/шум эта зависимость уменьшается и при определенном значении (для рассматриваемых примеров при $h_{гр} > 2$), практически исчезает. Полученный результат можно объяснить возникновением дополнительного трафика, который загружает сеть и

приводит к ухудшению ее характеристик. Если увеличивать потенциал или расширять область смежности узлов (увеличивая вероятность q), то количество ретрансляций будет снижаться, и в пределе получим сеть, у которой все узлы являются смежными. В такой сети дополнительный трафик отсутствует, вследствие чего ее характеристики достигают максимально возможного значения.

Рассмотрим теперь поведение сети при условии, что маршрутная информация содержит параметры каналов связи между узлами. Как уже отмечалось, подобная ситуация возникает, если каждый узел может определять только расстояние до других узлов.

Типичные графики зависимости эффективности сети от времени функционирования приведены на рисунке 4.

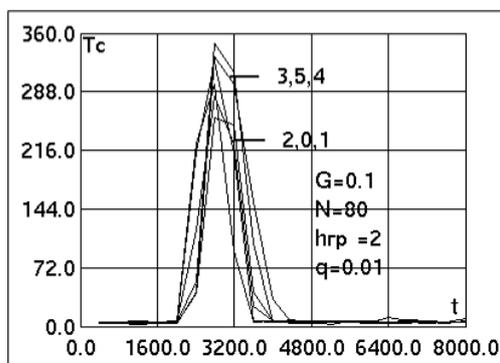


Рисунок 4. Время передачи по сети при рассылке параметров каналов для следующих метрик: 0 – «очередь», 1 – «очередь1», 2 – «загрузка», 3 – «количество повторений», 4 – «вероятность искажения», 5 – «случайный выбор».

Из приведенных результатов следует, что характеристики сети при передаче

параметров каналов качественно не отличаются от передачи параметров узлов (см. рис.2). На стационарных участках (структура сети не изменяется) влияние метрик мало и для приведенных параметров время передачи по сети составляет величину, порядка 5 окон. Влияние метрик проявляется в основном на участке перестройки структуры.

Анализ результатов показывает, что в основном резкое снижение эффективности функционирования сети вызвано длительными (сотни и более окон) прерываниями в ее работе. Для устранения прерывания предложен новый механизм совмещенной передачи данных о метриках, в том числе, о метрике каналов связи.

Суть совмещенной передачи метрик состоит в следующем. При изменении структуры сети в МС каждого узла записываются адреса только смежных узлов. Рассылка информации о смежных узлах выполняется обычным способом по прерыванию функционирования сети. Поскольку время такой рассылки пропорционально количеству узлов, ее влияние на характеристики сети незначительно.

Далее каждый узел А по своей локальной матрице определяет маршрут до узла назначения Б. Если узел Б является смежным, то пакет передается непосредственно на этот узел. Если узел Б не является смежным, то узел А согласно метрике выбирает смежный узел и адресует пакет на этот узел. Предварительно в него записывается метрическая информация о узле А и о канале связи между узлами А и Б (или С). Таким образом, при передаче пакета все узлы, принявшие пакет, получают также информацию о состоянии узлов и соответствующих каналов. Эта

информация записывается в локальную матрицу смежности каждого узла. Таким образом, в процессе передачи информационных пакетов, постепенно заполняются локальные матрицы смежности узлов.

Типовые характеристики времени передачи по сети для совмещенного метода с использованием дополнительно двух различных метрик («случайный выбор» и «очередь 1») приведены на рисунке 5.

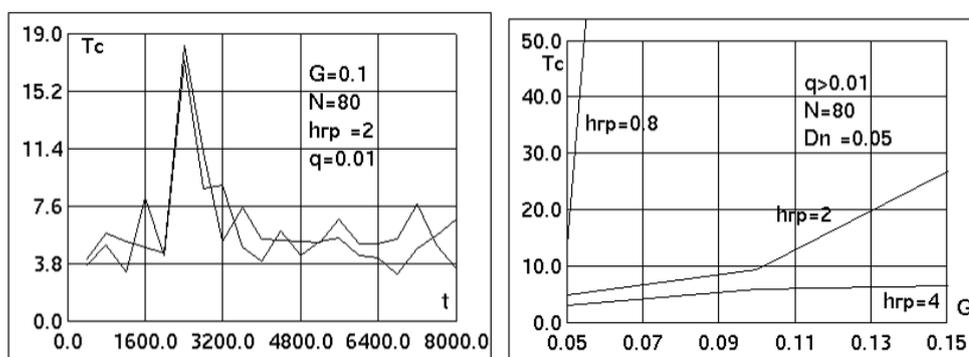


Рис.5. Характеристики совмещенного метода передачи маршрутной информации.

Сравнение с результатами, полученными ранее, показывает, что при рассылке метрической информации о каналах, совмещенный метод передачи по эффективности существенно лучше метода передачи с прерыванием. Кроме того, характеристики совмещенного метода сравнимы с характеристиками отдельной передачей параметров узлов.

Полученные результаты показывают, что совмещенный метод является эффективным средством рассылки маршрутной информации, особенно при малом трафике и относительно высокой энергетике канала связи.

5. Результаты работы и основные рекомендации

В данной работе рассмотрено влияние на эффективность маршрутизации качественного и количественного состава маршрутных метрик, характеристик служебного канала, а также трафика и энергетических параметров каналов связи.

Качественно маршрутные метрики различаются на узловые метрики, характеризующие состояние узла и каналные метрики, характеризующие состояние каналов связи между узлами. Наименьший объем рассылаемой маршрутной информации соответствует случаю узловых метрик. Однако в ряде случаев необходимо, наряду с состоянием, передавать также и каналные метрики. Объем рассылаемой узлами информации в этом случае существенно превышает объем информации соответствующий передаче узловых метрик.

Вариант организации служебного канала зависит от объема передаваемой маршрутной информации. При малом объеме, в частности, при передаче узловых метрик, может быть использован выделенный канал, и рассылка маршрутной информации осуществляется одновременно с обменом информационными пакетами. Если объем данных велик, в частности, при передаче каналных метрик, необходимо прерывание передачи информационных пакетов на время рассылки маршрутной информации.

Показано, что влияние маршрутных метрик наиболее критично в условиях нестационарного поведения сети, в частности, во время перестройки структуры. На стационарных участках наблюдается слабая зависимость эффективности

функционирования сети от метрики.

С целью повышения эффективности сети при передаче канальных метрик предложено использование совмещенного режима, при котором передача метрик осуществляется в информационном пакете. Результаты имитационного моделирования показали высокую эффективность совмещенного метода в определенных диапазонах изменения трафика и энергетики канала.

6.

7. Библиографический список

1. Swarm - система управления "роем" боевых роботов. Современная армия: <http://www.modernarmy.ru/article/228>
2. Попов В.А., Федутинов 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 Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», Москва, Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2012. С. 59-62.
4. Шельгов В.И. Курс на адаптивные сети // Сети и системы связи. 2007. №3. С. 3-4.
5. Разгуляев Л.В. Перспективные мобильные адаптивные сети передачи информации для СВ США // Зарубежное военное обозрение. 2008. №1. С. 35-39.

6. Семенов А. Адаптивные решения в беспроводных сетях. Сети и телекоммуникации // Byte, 2004, №6 (70):
<http://www.bytemag.ru/articles/detail.php?ID=8764>
7. Jacquet P., Clausen T. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). *IETF*, October 2003: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
8. Ogier R., Templin F., Lewis M. Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF). *IETF*, February 2004: <http://tools.ietf.org/html/rfc3684>
9. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. *IETF*, July 2003: <http://tools.ietf.org/html/rfc3561>
10. Настасин К.С. Родионов В.В. Особенности маршрутизации в совмещенной сети сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа // Труды МАИ, 2011, № 49: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28108&PAGEN_2=2
11. Блэк Ю. Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы. - М.: Мир, 1990. – 506 с.
12. Пестряков В.Б., Кузенков В.Д. Радиотехнические системы. - М.: Радио и связь, 1985. - 376 с.
13. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ эффективности передачи данных в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ, 2015, № 81: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57894>