

# Анализ эффективности метода последовательных обновлений при рассылке служебной информации в беспроводных сетях<sup>1</sup>

А.А. Белогаев\*, А.Н. Красилов<sup>\*,\*\*</sup>, А.И. Ляхов\*, Е.М. Хоров<sup>\*,\*\*</sup>

\* *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия*

\*\* *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*

Поступила в редколлегию 01.03.2018

**Аннотация**—Во многих сценариях использования беспроводных сетей необходимо осуществлять рассылку большого объема служебной информации, что значительно снижает долю канальных ресурсов, доступных для передачи пользовательских данных. Эта проблема особенно остро проявляется в сетях с высокой плотностью устройств, сенсорных сетях, а также сетях с высокой мобильностью, таких как сети транспортных средств и беспилотных летательных аппаратов. Существует несколько методов рассылки служебной информации. В данной работе проводится исследование перспективного метода рассылки, основанного на том, что станции в служебных сообщениях отправляют не всю информацию, а только обновления, произошедшие с момента отправки предыдущего сообщения (метод последовательных обновлений). Построена аналитическая модель данного метода рассылки, позволяющая оценить средний объем рассылаемой информации, а также надежность и оперативность ее доставки соседним станциям. На основе построенной модели разработан алгоритм адаптивного выбора параметров рассылки. С помощью имитационного моделирования в среде NS-3 показано, что использование разработанного алгоритма позволяет обеспечить минимальный объем рассылки при выполнении заданных ограничений на надежность и оперативность доставки информации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** беспроводная сеть, сетевые протоколы, служебная информация, рассылка, надежность, актуальность.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Многие сетевые протоколы, используемые в настоящее время в беспроводных сетях, генерируют большие объемы служебной информации. Так, например, для протоколов маршрутизации служебная информация – это информация о топологии сети и качестве соединений, для протоколов множественного доступа к каналу – информация о расписании передач (резервированиях канала), для протоколов многоадресной передачи данных – информация о составе группы адресатов и т.д. Для обеспечения корректной работы сетевых протоколов каждая станция сети должна осуществлять рассылку своей служебной информации соседним станциям. Зачастую для передачи служебной информации используются те же канальные ресурсы, что и для передачи пользовательской информации. В связи с этим возникает актуальная задача по разработке методов рассылки служебной информации, а также их моделей, позволяющих настраивать параметры рассылки таким образом, чтобы снизить объем потребляемых канальных ресурсов и при этом обеспечить заданные требования к надежности и оперативности доставки служебной информации соседним станциям. Рассмотрим наиболее популярные методы рассылки служебной информации, используемые в современных сетевых протоколах.

<sup>1</sup> Исследование выполнено в ИППИ РАН при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 14-50-00150

Наиболее простым методом рассылки служебной информации является так называемый метод *полной рассылки* (англ. full dump). В частности, такой метод рассылки применяется в известном проактивном протоколе маршрутизации OLSR [1]. При использовании данного метода каждая станция беспроводной сети периодически рассылает сообщения, содержащие всю хранимую служебную информацию. Служебная информация представляет собой набор информационных элементов (например, в протоколах маршрутизации информационный элемент – это запись о состоянии отдельного соединения и его метрике). Несомненным плюсом метода полной рассылки является его высокая устойчивость к потерям сообщений в канале, так как при потере одного сообщения соседняя станция получит всю необходимую информацию в следующем сообщении. Однако использование метода полной рассылки приводит к большому объему передаваемой служебной информации даже при отсутствии каких-либо изменений.

Другой метод рассылки служебной информации (будем называть его методом *групповой рассылки*) был предложен в стандарте IEEE 802.11 [2] для протокола детерминированного доступа к каналу. Согласно этому методу каждая станция сети делит все информационные элементы на относительно небольшое количество групп и рассылает информацию только о тех группах, в которых произошли изменения. При использовании данного метода объем рассылаемых служебных сообщений зависит от того, каким образом станция разбивает информационные элементы на группы. В работах [3,4] были исследованы различные алгоритмы управления группами и построены аналитические модели, позволяющие оценивать объем рассылаемой информации. Однако в данных работах используется предположение о том, что все служебные сообщения доставляются до соседних станций успешно, и, как следствие, не учитывается надежность, с которой информация доставляется соседним станциям.

Во многих протоколах маршрутизации (например, DSDV [5] и OSPF-MDR [6]) для снижения объемов рассылаемой служебной информации предлагается следующее улучшение метода полной рассылки. Помимо полных сообщений, которые содержат всю служебную информацию, станции могут рассылать короткие сообщения, называемые обновлениями (англ. differential update). Обновления содержат только ту часть информации, которая изменилась с момента отправки предыдущего сообщения. Будем далее называть такой метод рассылки методом *последовательных обновлений*. Следует заметить, что данный метод рассылки менее устойчив к потерям сообщений в канале, чем метод полной рассылки. Действительно, потеря соседней станцией хотя бы одного из обновлений приведет к тому, что эта станция будет обладать неполной (неактуальной) информацией вплоть до успешного получения следующего полного сообщения. В работах [7,8] проводилось исследование метода последовательных обновлений с помощью имитационного моделирования. Было показано, что он позволяет существенно снизить объем рассылки по сравнению с методом полной рассылки. Однако авторы не уделяли должного внимания вопросам надежности и оперативности доставки служебной информации.

В данной работе построена аналитическая модель метода последовательных обновлений, позволяющая оценить средний объем рассылаемой служебной информации, а также степень актуальности информации, характеризующую надежность и оперативность доставки этой информации соседним станциям. На основе построенной аналитической модели предложен алгоритм выбора оптимальных параметров рассылки. С помощью имитационного моделирования в среде NS-3 показано, что использование предложенного алгоритма позволяет существенно снизить объем рассылаемой служебной информации по сравнению со случаем использования фиксированных значений параметров рассылки и при этом обеспечить выполнение заданных требований к надежности и оперативности доставки служебной информации.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается беспроводная сеть, состоящая из  $M$  станций. Для обмена служебной информацией станции строго периодически отправляют широкополосные сообщения. Интервал между отправкой двух последовательных сообщений будем называть *слотом*. При использовании рассматриваемого метода рассылки служебной информации станции могут отправлять сообщения двух типов: *полное сообщение*, которое содержит все информационные элементы, хранимые на станции к моменту отправки сообщения, и *обновление*, содержащее только информационные элементы, которые были добавлены или удалены с момента отправки предыдущего сообщения (т.е. за последний слот). Для уменьшения объема рассылки станция отправляет полное сообщение только раз в  $N$  слотов, тогда как в начале остальных  $N - 1$  слотов станция отправляет обновления. Заметим, что случай  $N = 1$  соответствует методу полной рассылки, когда станция в каждом сообщении рассылает всю хранимую информацию.

В рамках исследуемого сценария предполагается, что количество новых информационных элементов, появляющихся на станции в течение слота, имеет пуассоновское распределение со средним значением  $\lambda$ . Время жизни каждого информационного элемента (т.е. время через которое информационный элемент будет удален со станции) имеет экспоненциальное распределение со средним значением  $1/\mu$  слотов. Длительность слота выбирается так, чтобы  $1/\mu \gg 1$ . Каждый информационный элемент имеет размер  $V_0$  бит, а общее число элементов, которые станция может рассылать, ограничено величиной  $R$ .

Мобильность станций моделируется следующим образом. Станции осуществляют случайное движение в замкнутой области пространства. Рассмотрим произвольно выбранную пару станций и обозначим  $\gamma_{ON}$  и  $\gamma_{OFF}$  среднюю длительность интервалов времени, выраженную в слотах, когда станции находятся соответственно внутри и вне зоны радиовидимости друг друга. Предполагается, что  $\gamma_{ON}$  и  $\gamma_{OFF}$  одинаковы для всех пар станций и много больше периода рассылки полных сообщений.

Даже когда две станции находятся в зоне радиовидимости друг друга, передача служебных сообщений между ними по беспроводному каналу может оказаться неуспешной из-за случайных помех или интерференции, вызванной передачами других станций. В данной работе мы предполагаем, что соседние станции декодируют сообщения независимо друг от друга, и вероятность ошибочного декодирования сообщения зависит от размера передаваемого сообщения. Для определенности в работе используется следующая зависимость вероятности ошибочного декодирования сообщения, содержащего  $s$  информационных элементов:

$$p_{err}^{(i)}(s) = 1 - (1 - ber^{(i)})^{sV_0},$$

где  $ber^{(i)}$  – вероятность ошибочного декодирования одного бита данных станцией  $i$ . Однако разработанная далее математическая модель применима для произвольных функций  $p_{err}^{(i)}(s)$ .

Для того чтобы повысить вероятность успешной доставки служебных сообщений, станции могут использовать механизм безусловных повторных передач, который заключается в том, что станции могут отправить несколько копий каждого сообщения. Как показано в работе [9], при большом числе станций в сети такой подход позволяет обеспечить меньший объем рассылки при том же уровне надежности по сравнению с индивидуальными повторами по запросу. Обозначим через  $n_f$  и  $n_d$  число попыток передачи в слоте для полного сообщения и обновления соответственно. Таким образом, рассматриваемый метод рассылки служебной информации определяется следующими параметрами: периодом рассылки полных сообщений  $N$  и числом попыток передач полных сообщений  $n_f$  и обновлений  $n_d$ .

Для оценки производительности описанного метода рассылки в работе используются два ключевых показателя: (а) средний объем рассылаемых сообщений и (б) степень актуальности рассылаемой информации. Последний показатель был предложен в работе [10] и харак-

теризует надежность и оперативность доставки служебной информации соседним станциям. Рассмотрим произвольно выбранную станцию  $A$ . *Степень актуальности*  $p_a$  служебной информации, рассылаемой станцией  $A$ , – это вероятность того, что в произвольно выбранный момент времени *все* соседи станции  $A$  имеют актуальную и полную информацию обо всех информационных элементах, рассылаемых станцией  $A$ . Соседями станции  $A$  являются станции, находящиеся в зоне ее радиовидимости. Для определенности будем считать, что в случае отсутствия других станций в зоне радиовидимости станции  $A$  рассылаемая ею информация также является актуальной.

В данной работе предполагается, что служебные сообщения, полученные станцией  $B$  от станции  $A$  обрабатываются следующим образом. Если в одном из слотов станция  $B$  не смогла успешно декодировать ни одну из копий сообщения, отправленного станцией  $A$ , то информация от станции  $A$  считается неактуальной (неполной) вплоть до успешного получения следующего полного сообщения от станции  $A$ . Иными словами, после пропущенного сообщения от станции  $A$  (полного сообщения или обновления), станция  $B$  не будет обрабатывать сообщения от станции  $A$  вплоть до успешного получения следующего полного сообщения, в котором содержится вся актуальная информация. Следует однако отметить, что возможны ситуации, когда потерянное сообщение от станции  $A$  не содержало новых информационных элементов относительно тех, которые уже были получены станцией  $B$  в предыдущих сообщениях. В этом случае невозможность декодировать сообщение не означает, что станция  $B$  обладает неактуальной информацией от станции  $A$ . В дальнейших работах планируется рассмотреть случай, когда станция  $B$  продолжает обрабатывать сообщения даже после потери одного из сообщений, и провести анализ влияния данного эффекта на степень актуальности получаемой информации.

Для корректной работы многих сетевых протоколов необходимо, чтобы степень актуальности информации была выше заданного порога  $p_{th}$  ( $p_{th} \sim 0.9$ ). Заметим, что высокой степени актуальности можно добиться за счет увеличения числа попыток передачи  $n_f$  и  $n_d$ , а также снижения периода рассылки полных сообщений  $N$ . Однако такой подход приводит к значительному росту объемов рассылаемой служебной информации. Таким образом, возникает задача выбора параметров рассматриваемого метода рассылки служебной информации.

Для решения данной задачи в разделе 3 строится аналитическая модель, позволяющая при заданных параметрах рассылки ( $N, n_f, n_d$ ) и параметрах сети (числе станций, времени жизни информационных элементов, мобильности станций и т.д.) оценивать средний объем рассылаемых служебных сообщений и степень актуальности получаемой служебной информации. Далее с помощью построенной модели могут быть найдены оптимальные значения параметров рассылки, при которых выполнено ограничение на степень актуальности ( $p_a > p_{th}$ ), а средний объем рассылаемых служебных сообщений минимален.

### 3. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

#### 3.1. Оценка среднего объема рассылаемой информации

Рассмотрим произвольную станцию  $A$  и оценим средний объем рассылаемых ею служебных сообщений. Для построения модели используем подход, предложенный ранее в работе [3] для исследования метода полной рассылки (т.е. для частного случая  $N = 1$ ). Согласно данному подходу рассылка информации моделируется с помощью цепи Маркова с дискретным временем, в которой состояние цепи описывается числом  $r$  ( $0 \leq r \leq R$ ) информационных элементов, хранимых станцией  $A$ . Система наблюдается в дискретные моменты, соответствующие началам слотов (т.е. в моменты отправки служебных сообщений).

Рассмотрим все возможные переходы цепи Маркова из состояния  $r$  в состояние  $r'$  за один слот и оценим их вероятности  $p_{r|r'}$ . Пусть в рассматриваемом слоте на станции  $A$  появилось  $f$  новых информационных элементов и удалено  $d$  из  $r$  существующих информационных

элементов ( $d \leq r$ ). Согласно рассматриваемому сценарию величина  $f$  имеет пуассоновское распределение с параметром  $\lambda$ :  $p_f(f) = \frac{\lambda^f}{f!} e^{-\lambda}$ . Так как время жизни каждого информационного элемента имеет экспоненциальное распределение со средним  $1/\mu$ , то вероятность удаления одного информационного элемента в рассматриваемом слоте равна  $\tilde{p} = 1 - e^{-\mu}$ . Времена жизни различных информационных элементов являются независимыми в совокупности случайными величинами. Следовательно, условная вероятность удаления  $d$  информационных элементов из  $r$  может быть найдена по следующей формуле:  $p_{d|r}(d|r) = C_r^d \tilde{p}^d (1 - \tilde{p})^{r-d}$ .

Поскольку общее количество хранимых и рассылаемых станцией информационных элементов ограничено величиной  $R$ , то из  $f$  новых информационных элементов, которые появились на станции А, может быть добавлено не больше  $n = \min(f, R + d - r)$  элементов. Оставшиеся  $f - n$  элементов будут отброшены. Тогда условная вероятность события, заключающегося в том, что на станции А добавлено ровно  $n$  информационных элементов, при заданных  $r$  и  $d$  может быть найдена следующим образом:

$$p_{n|r,d}(n|r,d) = \begin{cases} p_f(n), & n < R + d - r, \\ 1 - \sum_{j=0}^{n-1} p_f(j), & 0 < n = R + d - r, \\ 1, & 0 = n = R + d - r. \end{cases}$$

Используя полученные выражения для условных вероятностей, найдем переходные вероятности цепи Маркова  $p_{r|r'}$ . Если в начале слота было  $r$  информационных элементов, за время слота было удалено  $d$  информационных элементов и в начале следующего слота стало  $r'$  информационных элементов, то было добавлено  $n = r' + d - r$  новых элементов. Суммируя по всем возможным значениям  $d$ , имеем:

$$p_{r'|r} = \sum_{d=\max(0, r-r')}^r p_{d|r}(d|r) p_{n|r,d}(r' + d - r|r, d).$$

Зная все переходные вероятности цепи Маркова, находим стационарные вероятности  $\pi_r$  ( $0 \leq r \leq R$ ).

Оценим среднее число информационных элементов, отправляемых станцией в полных сообщениях и в обновлениях. Полное сообщение содержит все информационные элементы, хранимые на станции в момент его отправки. Следовательно, его средний размер  $E[r] = \sum_{r=0}^R \pi_r r$ .

Обновления содержат все изменения с момента последнего отправленного сообщения, т.е. содержат все новые и все удаленные информационные элементы. Так как в стационарном режиме среднее число удаленных элементов  $E[d]$  равно среднему числу новых  $E[n]$  элементов, то средний размер обновления равен  $2E[d]$ . Используя полученные выше вероятности, можем найти  $E[d] = \sum_{d=0}^R d \sum_{r=d}^R p_{d|r} \pi_r$ .

Для исследуемого метода рассылки служебной информации станция А раз в  $N$  слотов генерирует полное сообщение, а в остальных  $N - 1$  слотах – обновления. Кроме того, для повышения надежности она рассылает  $n_f$  копий каждого полного сообщения и  $n_d$  копий каждого обновления. Тогда с учетом того, что размер одного информационного элемента равен  $V_0$ , окончательно получаем, что средний объем служебной информации, отправляемый станцией А за слот, равен:

$$E[V] = \left( \frac{1}{N} n_f E[r] + 2 \frac{N-1}{N} n_d E[d] \right) V_0. \quad (1)$$

## 3.2. Оценка степени актуальности информации

Рассмотрим произвольную пару станций А и В и оценим степень актуальности служебной информации, получаемой станцией В от станции А. Оценим сначала вероятность  $\hat{p}_a$  того, что в произвольно выбранный момент времени станция В имеет актуальную информацию от станции А при условии, что станции А и В находятся в зоне радиовидимости друг друга. Согласно предположениям, введенным в разделе 2, при потере любого из сообщений станция В восстановит актуальность информации от станции А только при успешном получении полного сообщения. В связи с этим можно рассматривать промежутки времени длительностью  $N$  слотов, которые начинаются с отправки полного сообщения, независимо друг от друга. Таким образом, для оценки  $\hat{p}_a$  достаточно рассмотреть один цикл, состоящий из  $N$  слотов.

Так как станция А отправляет  $n_f$  копий каждого полного сообщения и  $n_d$  копий каждого обновления, то вероятности потери (станция В не получила ни одной из копий) полного сообщения и обновления можно оценить следующим образом:

$$p_f = \sum_{r=0}^R \pi_r \{p_{err}(r)\}^{n_f},$$

$$p_d = \sum_{r=0}^R \pi_r \sum_{d=0}^r p_{d|r}(d|r) \sum_{n=0}^{R-(r-d)} p_{n|r,d}(n|r,d) \{p_{err}(d+n)\}^{n_d}.$$

Если в начале цикла из  $N$  слотов было потеряно полное сообщение, то информация от станции А остается неактуальной на протяжении всего цикла. Вероятность этого события равна  $p_f$ . Если же было потеряно обновление с номером  $i$  ( $1 \leq i \leq N-1$ ) и при этом все предыдущие сообщения были приняты успешно, то информация от станции А будет актуальной в течение  $i$  слотов и неактуальной в течение  $N-i$  слотов. Вероятность того, что станция В потеряла  $i$ -е обновление и при этом успешно получила все предыдущие сообщения (включая полное сообщение) равна  $(1-p_f)(1-p_d)^{i-1}p_d$ . Таким образом, вероятность актуальности информации за цикл из  $N$  слотов можно оценить по следующей формуле:

$$\hat{p}_a = p_f \cdot 0 + (1-p_f) \left[ \sum_{i=1}^{N-1} (1-p_d)^{i-1} p_d \frac{i}{N} + (1-p_d)^{N-1} \cdot 1 \right].$$

После суммирования окончательно получим:

$$\hat{p}_a = \frac{(1-p_f)(1-(1-p_d)^N)}{Np_d}. \quad (2)$$

Далее учтем мобильность станций А и В. Согласно рассматриваемому сценарию станции А и В находятся в зоне радиовидимости друг друга в среднем  $\gamma_{ON}$  слотов и вне зоны радиовидимости друг друга –  $\gamma_{OFF}$  слотов, причем  $\gamma_{ON}$  и  $\gamma_{OFF}$  много больше периода рассылки полных сообщений  $N$ . Рассмотрим один интервал времени между двумя последовательными появлениями станции В в зоне радиовидимости станции А (средняя длительность этого интервала  $\gamma_{ON} + \gamma_{OFF}$ ). При появлении станции В в зоне радиовидимости станции А в среднем проходит  $N/2$  слотов до отправки станцией А полного сообщения. Таким образом, когда станция В появляется в зоне радиовидимости станции А, информация от станции А неактуальна в среднем в течение  $N/2$  слотов. После отправки станцией А первого полного сообщения станция В обладает актуальной информацией с вероятностью  $\hat{p}_a$ . Согласно введенному определению в случае, когда станции А и В находятся вне зоны радиовидимости друг друга, информация,

рассылаемая станцией А также является актуальной. Тогда степень актуальности информации, рассылаемой станцией А, с учетом мобильности станций может быть оценена следующим образом:

$$p_a = \frac{\hat{p}_a(\gamma_{ON} - N/2) + \gamma_{OFF}}{\gamma_{ON} + \gamma_{OFF}} \quad (3)$$

Рассмотрим теперь общий случай, когда сеть состоит из  $M$  станций (т.е. служебные сообщения, отправляемые станцией А, могут быть получены  $M - 1$  другими станциями сети). Согласно рассматриваемому сценарию станции осуществляют движение, а также декодируют сообщения, отправленные станцией А, независимо друг от друга. Поэтому вероятность того, что информация, рассылаемая станцией А, является актуальной на остальных  $M - 1$  станциях, равна:

$$\bar{p}_a = \prod_{j=1}^{M-1} p_a^{(j)}, \quad (4)$$

где  $p_a^{(j)}$  – степень актуальности информации, рассылаемой станцией А и получаемой станцией с номером  $j$ , которая может быть найдена с помощью (2) и (3).

### 3.3. Асимптотический анализ

Рассмотрим асимптотический случай высокой нагрузки, когда  $\lambda \rightarrow \infty$ . В этом случае общее количество информационных элементов, хранимых станцией А, в точности равно пороговому значению  $R$  (т.е.  $\pi_R = 1$  и  $\pi_r = 0$  при  $r < R$ ). Если в каком-то слоте удаляется некоторый информационный элемент, то в том же слоте на его место добавляется новый. Среднее число информационных элементов, удаляемых в произвольно выбранном слоте, а значит, и добавляемых в этом слоте, равно  $R(1 - e^{-\mu})$ . Тогда средний объем рассылаемой информации можно оценить по следующей формуле:

$$E[V] = \left( \frac{1}{N} n_f R + 2 \frac{N-1}{N} n_d R (1 - e^{-\mu}) \right) V_0.$$

Вероятности потери полного сообщения и обновления пересчитываются следующим образом:  $p_f = \{p_{err}(R)\}^{n_f}$ ,  $p_d = \sum_{d=0}^R p_{d|R}(d|R) \{p_{err}(2d)\}^{n_d}$ . Далее можно оценить степень актуальности  $\bar{p}_a$ , используя выражения (2)–(4).

Таким образом, для асимптотического случая можно получить явные выражения для среднего объема рассылаемой служебной информации и степени актуальности без подсчета стационарных вероятностей цепи Маркова, что существенно снижает вычислительную сложность модели. В разделе 4 будет показано, что использование этих выражений для определения параметров рассылки позволяет получать результаты, близкие к оптимальным, при любой нагрузке.

### 3.4. Алгоритм выбора параметров

Производительность рассматриваемого метода рассылки определяется тремя параметрами: периодом рассылки полных сообщений  $N$ , а также количеством попыток передачи полных сообщений и обновлений –  $n_f$  и  $n_d$  соответственно. При известных и/или измеренных в процессе работы сети параметрах сети (число станций  $M$ , среднее время жизни информационных элементов  $\mu$ , мобильность станций  $\gamma_{ON}$  и  $\gamma_{OFF}$ , и др.), с помощью разработанной аналитической модели можно найти такие параметры рассылки  $(N^*, n_f^*, n_d^*)$ , при которых выполнено ограничение на степень актуальности информации ( $\bar{p}_a \geq p_{th}$ ), а объем рассылаемой информации

минимален. Заметим, что неравенство  $\bar{p}_a \geq p_{th}$  накладывает ограничение на период рассылки полных сообщений. Используя соотношения (3) и (4), а также учитывая, что вероятность  $\hat{p}_a$  меньше либо равна единице, можно получить следующую оценку максимально возможного периода рассылки:

$$N_{max} = \left\lfloor 2(1 - p_{th}^{\frac{1}{M-1}})(\gamma_{ON} + \gamma_{OFF}) \right\rfloor. \quad (5)$$

Для поиска оптимальных параметров рассылки предлагается следующий алгоритм.

1. Оцениваем параметры сети ( $\mu$ ,  $\gamma_{ON}$ ,  $\gamma_{OFF}$  и т.д.) и находим максимально допустимое значение  $N_{max}$  согласно (5).
2. Используя полный перебор по множеству допустимых параметров ( $N \leq N_{max}$ ,  $n_f$  и  $n_d$  ограничены максимальным числом попыток передачи, устанавливаемым протоколом канального уровня), находим такие тройки параметров  $(N, n_f, n_d)$ , для которых выполнено условие  $\bar{p}_a \geq p_{th}$ .
3. Из допустимого множества параметров, полученных на втором шаге, находим тройку параметров  $(N^*, n_f^*, n_d^*)$ , обеспечивающую наименьший объем рассылки согласно (1).

Заметим, что для уменьшения вычислительной сложности построенного алгоритма при поиске оптимальных параметров можно использовать асимптотические оценки  $E[V]$  и  $\bar{p}_a$ , представленные в разделе 3.3.

#### 4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе представлены результаты валидации разработанной аналитической модели, а также результаты исследования предложенного алгоритма адаптивной настройки параметров рассылки, полученные в среде имитационного моделирования NS-3 [11].

##### 4.1. Постановка экспериментов

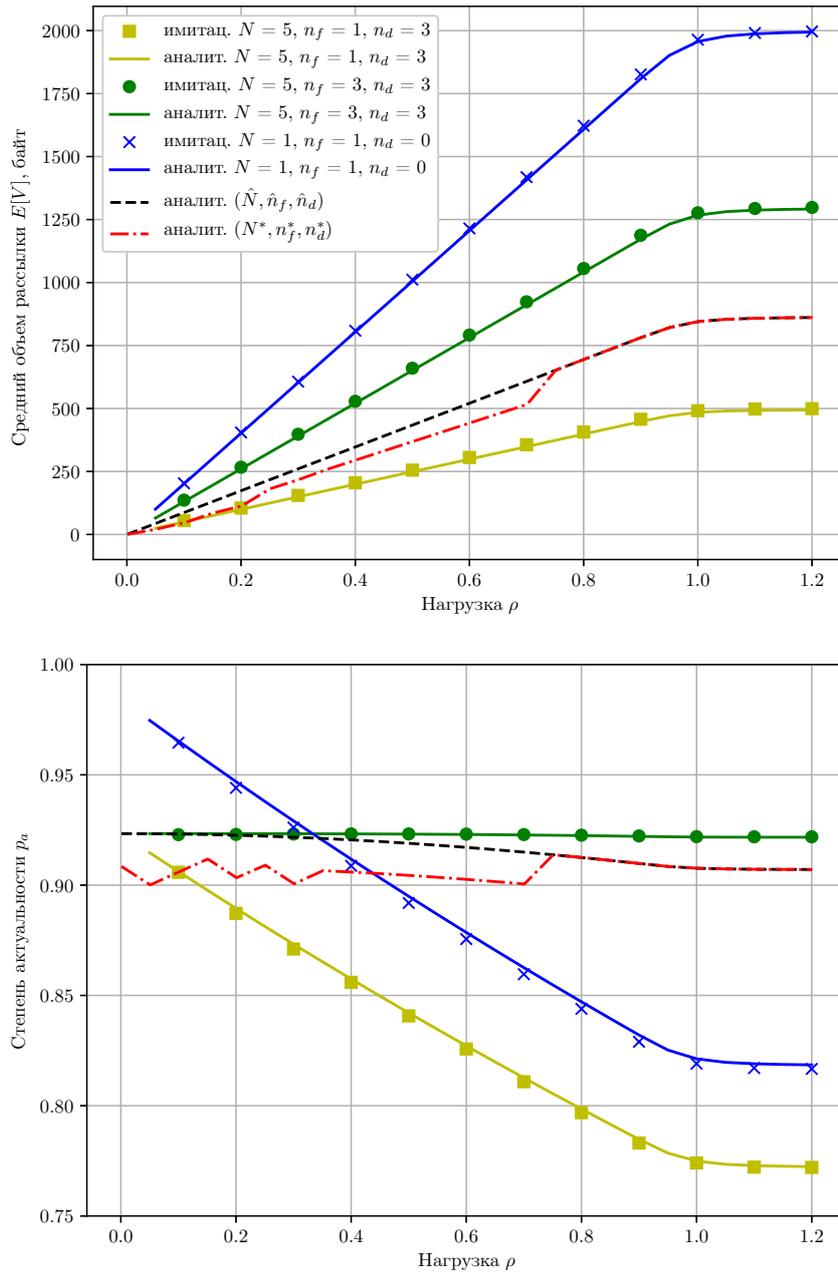
Для исследования метода последовательных обновлений в среде NS-3 моделируется сеть Wi-Fi, работающая в режиме ad hoc. На физическом уровне станции используют протокол IEEE 802.11a. Для передачи служебных сообщений станции используют канал шириной 20 МГц на несущей частоте 2.4 ГГц. Мощность передачи  $P_{TX} = 16$  дБм. Предварительный эксперимент показал, что при данных параметрах физического уровня радиус зоны радиовидимости одной станции равен  $L_{TX} = 105$  м.

Мобильность станций моделируется следующим образом. В начале эксперимента  $M$  станций равномерно размещаются в квадрате со стороной  $5 \cdot L_{TX}$ . Каждая станция равновероятно выбирает некоторое направление движения и движется с постоянной скоростью  $U$ . Когда станция достигает какой-либо из границ квадрата, то она отражается от этой границы в случайном направлении.

Во всех экспериментах, представленных ниже, используются следующие значения параметров, указанных в разделе 2:  $R = 1000$ ,  $V_0 = 2$  байта,  $\mu = 0,01$ , период генерации сообщений (длительность слота)  $T_s = 512$  мс. Предполагается, что вероятность ошибочного декодирования одного бита одинакова для всех станций и выбирается таким образом, чтобы для сообщения, состоящего из  $R$  информационных элементов,  $p_{err}(R) = 0,1$ .

##### 4.2. Валидация аналитической модели

Для оценки точности построенной аналитической модели был запущен эксперимент со следующими параметрами:  $U = 5$  м/с,  $M = 20$ . На рис. 1 представлены графики зависимости



**Рис. 1.** Средней объем рассылки и степень актуальности информации в зависимости от нагрузки.

среднего объема рассылаемых сообщений и степени актуальности информации от нагрузки  $\rho = \frac{\lambda}{\mu R}$  при различных значениях параметров рассылки  $(N, n_f, n_d)$ . Для построения аналитических кривых была использована статистика, полученная за время эксперимента, о времени нахождения станций внутри/вне зоны радиовидимости друг друга. На основе этой статистики были получены оценки параметров модели  $\gamma_{ON}$  и  $\gamma_{OFF}$ . Из рис. 1 можно видеть, что при фиксированных значениях параметров рассылки  $(N, n_f, n_d)$  результаты, полученные аналитически и с помощью имитационного моделирования, отличаются незначительно, что говорит о высокой точности построенной аналитической модели.

Также на рис. 1 представлены результаты, полученные с помощью аналитической модели для случая, когда параметры рассылки выбираются с помощью алгоритма, описанного в разделе 3.4. Ограничение на степень актуальности  $p_{th} = 0,9$ . Рассматриваются два случая: (а) для каждого значения  $\lambda$  отдельно находятся оптимальные параметры  $(N^*, n_f^*, n_d^*)$ , обеспечивающие минимальный объем рассылки, (б) находятся оптимальные параметры  $(\hat{N}, \hat{n}_f, \hat{n}_d)$  для асимптотического случая  $\lambda \rightarrow \infty$  с использованием выражений, представленных в разделе 3.3. Для полученных параметров  $(\hat{N}, \hat{n}_f, \hat{n}_d)$  аналитически вычисляются объем рассылки и степень актуальности при других значениях  $\lambda$  и соответственно других значениях нагрузки  $\rho$ . Можно видеть, что использование асимптотических формул, приведенных в разделе 3.3, для определения параметров рассылки позволяет получать результаты, близкие к оптимальным, при любой нагрузке. При этом существенно снижается вычислительная сложность алгоритма поиска параметров, что позволяет его использовать на устройствах, обладающих небольшими вычислительными ресурсами, в режиме реального времени. Заметим также, что выбор фиксированных параметров рассылки  $N = 5, n_f = 1, n_d = 3$  приводит к меньшему среднему объему рассылки. Однако при данных значениях параметров не выполнено ограничение на степень актуальности информации.

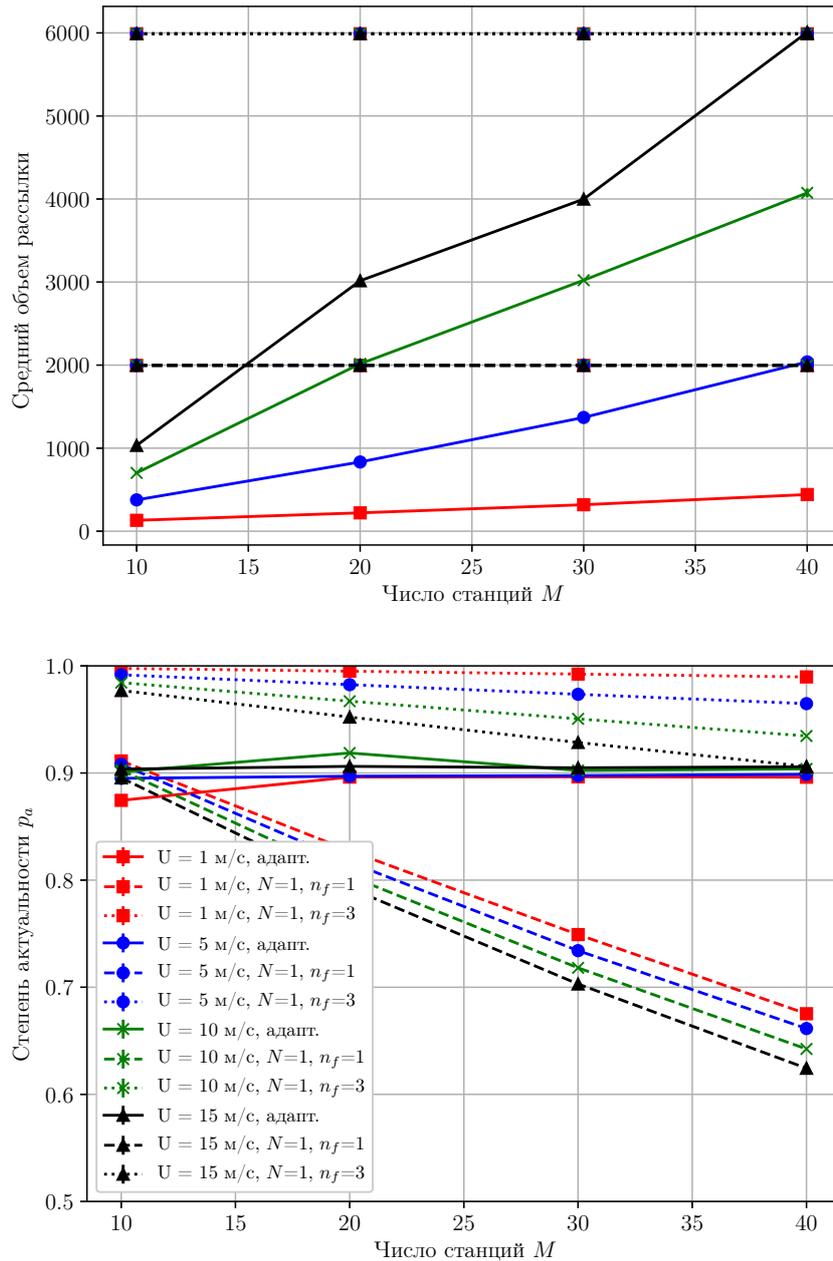
#### 4.3. Анализ эффективности алгоритма адаптивной настройки параметров

Проведем исследование предложенного алгоритма адаптивной настройки параметров. Для этого рассмотрим следующий сценарий. С течением времени каждая станция сети собирает статистику, необходимую для оценки параметров модели ( $\mu, \gamma_{ON}, \gamma_{OFF}$  и др.). Используя полученные оценки, станции с периодом  $N$  слотов осуществляют динамическую настройку параметров рассылки, используя алгоритм, предложенный в разделе 3.4.

На рис. 2 представлены графики зависимости объема рассылки и степени актуальности от числа станций  $M$  и скорости их движения  $U$ , когда нагрузка на каждой станции  $\rho = 1,2$ . Рассматриваются два способа управления параметрами рассылки: (а) использование фиксированных значений параметров рассылки, (б) адаптивная настройка параметров согласно алгоритму, описанному выше. Видно, что использование фиксированных значений параметров рассылки приводит либо к не выполнению ограничения на степень актуальности информации (см. графики для  $N = 1, n_f = 1$ ), либо к высокому объему рассылки (см. графики для  $N = 1, n_f = 3$ ). Использование предложенного адаптивного алгоритма выбора параметров обеспечивает выполнение заданного ограничения на степень актуальности при любых параметрах сценария ( $M$  и  $U$ ) и при этом снижает средний объем рассылаемых сообщений. В частности, при низкой мобильности станций ( $U < 5$  м/с) использование предложенного алгоритма позволяет на порядок снизить объем рассылки по сравнению со случаем использования фиксированных значений параметров  $N = 1, n_f = 3$ . Напротив, при высокой мобильности ( $U > 20$  м/с), а также при большом числе станций в сети ( $M > 30$ ) для достижения заданного уровня актуальности согласно (5) станции вынуждены уменьшать период рассылки полных сообщений  $N$ , что, в свою очередь, приводит к увеличению объемов рассылаемых сообщений. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет адаптивно изменять параметры рассылки так, чтобы обеспечить заданные требования к надежности и оперативности доставки служебной информации и при этом существенно снизить объем канальных ресурсов, затрачиваемых на осуществление рассылки этой информации.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен анализ эффективности метода последовательных обновлений при рассылке служебной информации в мобильных беспроводных сетях. Построена аналитическая



**Рис. 2.** Средней объем рассылки и степень актуальности информации в зависимости от числа узлов в сети  $M$  и скорости их движения  $U$ .

модель данного метода рассылки, позволяющая оценить средний объем информации, рассылаемой каждой станцией, и степень актуальности, характеризующую надежность и оперативность доставки этой информации соседним станциям. На основе построенной аналитической модели предложен алгоритм выбора оптимальных параметров рассылки, позволяющих обеспечить минимальный объем рассылки при заданном ограничении на степень актуальности. Численные результаты показывают, что использование предложенного алгоритма позволяет существенно снизить объем рассылаемой служебной информации по сравнению со случаем использования фиксированных значений параметров рассылки и при этом выполнить заданное ограничение на степень актуальности. В частности, показано, что при низкой мобильности

станций и малой плотности сети можно снизить объем рассылки на порядок. В дальнейших работах планируется провести сравнительный анализ существующих методов рассылки служебной информации (в том числе провести сравнение метода последовательных обновлений с методом групповой рассылки) в различных сценариях использования беспроводных сетей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clausen T., Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). — RFC 3626.
2. 802.11-2012 - IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
3. Study of the group-based approach to disseminate control information in wireless networks / Andrey Belogaev, Evgeny Khorov, Artem Krasilov, Andrey Lyakhov // Wireless Communication Systems (ISWCS), 2015 International Symposium on / IEEE. — 2015. — P. 621–625.
4. Study of the enhanced algorithm for control information dissemination in Wi-Fi Mesh networks / Andrey Belogaev, Evgeny Khorov, Artem Krasilov, Andrey Lyakhov // Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on / IEEE. — 2016. — P. 1–6.
5. Perkins Charles E, Bhagwat Pravin. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers // ACM SIGCOMM computer communication review. — Vol. 24. — 1994. — P. 234–244.
6. Ogier R., Spagnolo P. Mobile Ad Hoc Network (MANET) Extension of OSPF Using Connected Dominating Set (CDS) Flooding. — RFC 5614.
7. Viennot Laurent, Jacquet Philippe, Clausen Thomas Heide. Analyzing control traffic overhead versus mobility and data traffic activity in mobile ad-hoc network protocols // Wireless Networks. — 2004. — Vol. 10, no. 4. — P. 447–455.
8. Huang Yangcheng, Bhatti Saleem, Sørensen Søren-Aksel. The impact of topology update strategies on the performance of a proactive MANET routing protocol // International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems. — 2008. — Vol. 23, no. 6. — P. 447–460.
9. Groupcast routing systems with the possibility of choosing a channel transmission method / A.A. Safonov, A.I. Lyakhov, A.N. Yurgenson, O.D. Sokolova // Automation and Remote Control. — 2013. — Vol. 74, no. 10. — P. 1710–1723.
10. Nekrasov P., Fakhriev D. Network information broadcasting in narrow band self-organizing networks // Automation and Remote Control. — 2015. — Vol. 76, no. 4. — P. 634–649.
11. The NS-3 network simulator. — URL: <http://www.nsnam.org/>.

## Analysis of Differential Update Method for Control Information Dissemination in Wireless Networks<sup>1</sup>

A.A. Belogaev, A.N. Krasilov, A.I. Lyakhov, E.M. Khorov

In many scenarios, protocols used in wireless networks disseminate high amount of control information, which reduces the fraction of channel resources available for transmission of user data. Such a problem is especially crucial in dense networks, sensor networks and networks with high mobility, e.g., networks of vehicles and drones. Existing protocols use different methods for control information dissemination. In this paper, we consider one of the most promising methods called differential update. According to it, instead of

<sup>1</sup> The research was done at IITP RAS and supported by the Russian Science Foundation (agreement No 14-50-00150)

large message containing the whole information, a station can send small differential update message which contain only information modified since the transmission of the previous message. We develop an analytical model of this method that allows estimating the average amount of control information transmitted by each station and the probability that the information is delivered to neighboring stations reliably and in time. Using the developed analytical model, we propose an algorithm for tuning parameters of the differential update method. Simulation results obtained with NS-3 show that the proposed algorithm minimizes the amount of sent control information and at the same time provide the required reliability and timeliness.

**KEYWORDS:** wireless network, network protocol, control information, information dissemination, reliability, relevance.