

УДК 004.057.4

ВЫБОР ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ БПЛА СЛЕЖЕНИЯ ЗА РАЗВИТИЕМ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Игнатов Руслан Андреевич

магистрант

Российский новый университет, Москва

Аннотация. Несмотря на развитие средств ликвидации лесных пожаров, последние до сих пор представляют серьёзную угрозу, как для материальных ценностей, так и для жизни людей. Для успешной борьбы с пожарами необходимо своевременное поступление информации об их развитии. В данной статье будет рассмотрен концептуальный проект построения системы мониторинга пожаров в реальном времени с применением БПЛА, а именно реализация сетевого взаимодействия между последними.

Ключевые слова: лесные пожары, мониторинг в реальном времени, распределённые информационные системы, самоорганизующиеся компьютерные сети, беспроводные сенсорные сети, сети с перемещением узлов, протоколы маршрутизации, оптимизация энергопотребления сетей.

Введение

Несмотря на стремительное развитие технологий позволяющих обеспечить всё более своевременное обнаружение и локализацию лесных пожаров, они всё ещё представляют серьёзную опасность как для человека, так и для фауны. В среднем ежегодно регистрируются свыше 190 тысяч пожаров, из которых более 13 % (почти 25 тысяч) являются лесными, страдает более 2 миллионов гектаров леса [1].

Для снижения количества лесных пожаров и проходимой ими площади необходима работа в различных областях. Для снижения количества возникающих пожаров необходимо проведение общественно-разъяснительных мероприятий по разъяснению населению основных причин возникновения пожаров, обучению грамотному использованию огня и обучению пользованию распространёнными средствами пожаротушения, ведь до сих пор основной причиной пожаров является неосторожное обращение с огнём. Но помимо стремления уменьшить количество возникающих пожаров, необходимо развитие средств по их тушению.

Одной из самых сложных задач, возникающих при тушении лесного пожара, является точное определение охваченной огнём площади и своевременное определение тенденций в развитии пожара. Решить данную задачу призван концептуальный проект мониторинга за распространением лесного пожара с использованием распределённой информационной системы (РИС) из БПЛА. Одним из самых главных элементов любой РИС является построение сетевого взаимодействия между элементами системы. В данной статье пойдёт речь о выборе протокола, наиболее подходящего для подобной системы.

Лесные пожары и причины их возникновения

Лесной пожар – это неуправляемое горение, распространяющееся по лесной площади, окруженной негорящей территорией [2].

Все причины возникновения лесных пожаров можно разделить на две категории: природные и антропогенные. К природным причинам, главным образом, относятся грозы, совмещенные с предварительно засушливой погодой. К антропогенным относят различные факторы, связанные с человеком, включая неосторожное обращение с огнём и поджоги. Следует отметить, что на долю лесных пожаров, вызванных антропогенными факторами, приходится до 90 %. Средняя продолжительность лесных пожаров составляет 10-15 дней, за которые успевает выгореть до 500 га леса. В таблице 1 представлена статистика пожаров в 2007-2011 годах.

Таблица 1

Статистика лесных пожаров в России за 2007-2011 года

Параметр	2007	2008	2009	2010	2011
Количество пожаров (тыс ед.)	212,6	202,0	187,6	179,5	168,5
Количество лесных пожаров	17812	26285	23245	34812	21074
Доля лесных пожаров	8,38 %	13,01 %	12,39 %	19,39 %	12,51 %
Пройдено лесными пожарами (тыс га)	1620,3	2534,8	2592,6	2475,3	1673,8
Средняя площадь лесных пожаров (га)	90,97	96,44	111,53	71,10	79,42

Во время лесного пожара наибольшая интенсивность наблюдается на границе горящей области с негорящей, внутренняя же область представляет собой догорающие остатки леса.

Лесные пожары можно разделить на четыре категории:

1. Низовые

Происходит горение напочвенного покрова: горят трава, мхи, кора на нижней части деревьев, опавшие ветви и листва. Низовые пожары делятся на беглые и устойчивые. При беглом выгорает только верхний слой напочвенного покрова толщиной 2-3 см. При устойчивом же выгорает весь напочвенный покров.

2. Верховые

Происходит горение напочвенного покрова и крон деревьев. Верховые пожары также делятся на беглые и устойчивые (повальные).

3. Почвенные

Происходит горение гумуса или торфяного слоя. Почвенные пожары делятся на подстильногумусные и торфяные (подземные). При подстильногумусном происходит горение подстилки у гумусного слоя почвы. При торфяном происходит горение торфяного слоя на глубине до нескольких метров.

4. Пятнистые

Происходит возникновение новых очагов пожара из-за распространения продуктов сгорания конвекционными потоками при сильном пожаре. Данный тип лесного пожара выделяют не все исследователи.

Существует несколько способов обнаружения лесных пожаров:

1. Наземное патрулирование

Осуществляется специальными механизированными патрульными службами. При обнаружении пожара патрульной службой она докладывает об этом в лесничество через рацию или телефон и приступает к тушению первичными средствами пожаротушения.

2. Использование наблюдательных пунктов

Наблюдение осуществляется специально обученными людьми с наблюдательных пунктов, распределённых по территории леса. В случае обнаружения пожара наблюдатель определяет азимут на пожар и сообщает о нём в лесничество через рацию или телефон. В настоящее время данный метод не используется, в связи с большим расходом людских ресурсов.

3. Использование автоматизированных наблюдательных пунктов

Представляет собой дальнейшее развитие обычных наблюдательных пунктов, в которых человека заменяет система камер с возможностью дистанционного управления и осуществляющих передачу видео-

ряда с пункта наблюдения. Примером такой системы является российская система мониторинга лесных пожаров «Лесной дозор».

4. Авиационное патрулирование

Патрулирование осуществляется самолётами или вертолётами по установленным маршрутам. В случае обнаружения пожара осуществляется его облёт с нанесением на карту его границ. Кроме того, обычно авиация несёт на себе десантников-пожарных, осуществляющих первоначальное тушение пожара.

5. Спутниковый мониторинг

Мониторинг обеспечивается при помощи съёмки со спутника и последующей обработки на Земле.

Несмотря на кажущуюся эффективность спутникового наблюдения, его реальное применение очень ограничено по причине того, что для успешного обнаружения пожара он должен развиться на территории как минимум 20 га, а периодичность обновления составляет всего несколько раз за сутки. А в настоящее время пожар считается своевременно обнаруженным при условии, если его площадь в момент обнаружения не более 1 га, в момент начала тушения – 5 га, а задержка в 4-6 часов критична и может привести к существенному увеличению как ущерба от пожара, так и стоимости его ликвидации.

Современные средства мониторинга лесных пожаров

Как уже было сказано в предыдущем разделе, в настоящее время применяется 4 способа мониторинга возникновения лесных пожаров:

1. Наземное патрулирование;
2. Наблюдательные пункты;
3. Автоматизированные наблюдательные пункты;
4. Авиационное наблюдение;
5. Спутниковый мониторинг.

Однако применение данных способов для мониторинга распространения пожара осложнено. Главной проблемой данных методов является то, что они не обеспечивают оперативное получение информации для последующего анализа, или обладают недостаточным покрытием.

Наземное патрулирование обеспечивает оперативное получение информации, но её последующая передача для анализа значительно осложнена. Кроме того, использование подобного метода требует привлечения большого количества людских ресурсов.

Наблюдательные пункты обеспечивают ещё более оперативное получение информации, чем наземное патрулирование и, что немаловажно, позволяют снизить затраты людских ресурсов. Но данные затраты всё равно существенны, кроме того требуются повышенные материальные затраты на создание и поддержания инфраструктуры.

Автоматизированные наблюдательные пункты устраняют главную проблему традиционных наблюдательных пунктов – высокие требования по использованию людских ресурсов. Но несмотря на это, данный метод остаётся всё ещё недостаточно эффективным.

Авиационное наблюдение с использованием вертолётов или самолётов позволяет с минимальной тратой людских ресурсов и с приемлемой тратой материальных средств качественно обеспечить задачу обнаружения новых пожаров, но в случае отслеживания развития пожара подобный способ не обеспечивает достаточную эффективность.

Спутниковое наблюдение обеспечивает низкие затраты как людских, так и материальных ресурсов для непосредственного процесса мониторинга, но подобные системы дороги в развёртывании и не обеспечивают своевременное получение информации – средняя задержка получения новой информации составляет 6 часов.

Как видно из вышесказанного, существующие методы мониторинга не позволяют обеспечить своевременное получение информации о протекании пожара и своевременное прогнозирование возможных вариан-

тов развития ситуации, что в значительной степени осложняет и удорожает задачу тушения лесных пожаров.

Автоматическая система мониторинга лесных пожаров, основанная на беспроводной сенсорной сети БПЛА

Обеспечить оперативное информирование служб, принимающих участие в ликвидации пожара, призван проект автоматической системы мониторинга лесных пожаров. Данная система представляет собой сеть из БПЛА, осуществляющих слежение за ситуацией в реальном времени. Собранные аппаратами данные передаются во внешнюю систему, где происходит их анализ и прогнозирование дальнейшего развития пожара. Благодаря данной системе будет обеспечен наиболее своевременный доступ к необходимой информации для всех служб.

Создание автоматической системы мониторинга за распространением лесных пожаров позволит обеспечить:

- снижение стоимости их ликвидации;
- снижение возможных рисков здоровью лиц, принимающих участие в их ликвидации;
- снижение возможного материального ущерба от них;
- большую мобильность отрядов ликвидации;
- своевременное поступление актуальной информации о состоянии лесного массива;
- сохранность лесных ресурсов.

Данная система должна:

- работать автономно в течение минимум 360 часов;
- обеспечивать покрытие территории площадью 100 га;
- иметь возможность расширения по площади вплоть до 500 га;
- иметь устойчивость к восходящим потокам воздуха скоростью до 35 м/с;

- рабочий диапазон по высоте: 100–500 метров над поверхностью земли;
- иметь разрешающую способность при съёмке с высоты 100 м не менее 1 ppi;
- обеспечивать передачу собранных данных во внешнюю сеть;
- обеспечивать выгрузку данных не позднее 2 минут после их сбора;
- самореконфигурироваться в случае перемещения БПЛА.

Требования к системе определены исходя из статистики лесных пожаров, приведённой выше.

Для полноценного функционирования сети требуется построение одноранговой (peer-to-peer, p2p) сети, построенной по технологии беспроводной сенсорной сети (БСС) для взаимодействия БПЛА между собой и передачи собранных данных во внешнюю сеть. Использование p2p-сети позволит обеспечить отказоустойчивость системы и обеспечить достаточную зону покрытия, а применение технологии БСС позволит снизить сложности конфигурирования сети и значительно снизить энергопотребление отдельных узлов, что приведёт к увеличению времени автономной работы.

Протоколы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях

В настоящее время существует огромное количество протоколов, применяемых в беспроводных сенсорных сетях, обеспечивающих построение различных сетей. Главной особенностью подобных протоколов является обеспечение максимального времени автономной работы узлов, за счёт значительного снижения потребления энергии на сетевое взаимодействие. Все протоколы, применяемые в БСС, можно условно разделить на три группы [3]:

- Протоколы ориентированные на сети с появлением/исчезновением узлов сети.

Примеры: ACQUIRE, COUGAR, GeRaF, LEACH, PEGASIS, Rumor, ZigBee.

- Протоколы ориентированные на сети с перемещением узлов сети

Примеры: DSDV, SEAD.

- Универсальные протоколы.

Примеры: GAF, SPIN.

В связи с тем, что БПЛА должны подстраиваться под текущую ситуацию за счёт перемещения, для решения поставленной задачи подходят универсальные протоколы и протоколы, ориентированные на перемещение. Соответственно, ниже будут рассматриваться именно данные протоколы. Применение же протоколов, ориентированных на сети с появлением/исчезновением нерационально — сеть, построенная на данном протоколе, не будет достаточно быстро перестраиваться в случае перемещения узлов.

Протокол DSDV

Протокол DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector) – таблично-ориентированный протокол, основанный на улучшенной версии классического алгоритма маршрутизации Беллмана-Форда. В данном протоколе в каждом узле имеется таблица маршрутизации, содержащая такую информацию, как список узлов, следующий переход, метрику следующего перехода и номер последовательности, обеспечивающий борьбу с петлями. Во время значительных изменений в топологии происходит глобальное обновление таблиц маршрутизации, во время же незначительных происходит рассылка исключительно отдельных изменений, что обеспечивает снижение нагрузки на каналы передачи данных.

Генерация таблиц маршрутизации для всех узлов сети представляет собой наиболее ресурсоёмкую задачу в протоколе DSDV. Как уже было сказано выше, для снижения данной нагрузки применяется рассылка

обновлений по сети. Данная рассылка может происходить как с определённой периодичностью, так и на основании расписания. С увеличением же количества узлов или с возрастанием их мобильности происходит значительное увеличение количества записей в таблицах, что негативно сказывается на требованиях к аппаратным средствам для хранения, передачи и расчёта обновлений.

Наиболее ресурсоёмкая задача в протоколе – генерация двух таблиц маршрутизации для каждого узла. Обновления данных таблиц рассылаются по сети с определённой периодичностью или на основании расписания. Причём, с увеличением количества узлов и/или их мобильности, значительно возрастает и количество записей в таблицах, что приводит к увеличению требований к таким важным параметрам, как количество используемой устройствами памяти для хранения таблиц маршрутизации, ширина канала между ними и процессорное время, требуемое для расчёта и распространения обновлений. Даже если данные характеристики позволят обеспечить функционирование сети по протоколу DSDV, при большом количестве высокоподвижных узлов возможна ситуация, когда почти все ресурсы системы будут тратиться на поддержание работы сети, а не на полезную работу [4].

Согласно проведённому в университете Карнеги-Меллона исследованию, протоколом DSDV не обеспечивается стабильная передача данных в том случае, если узлы в сети достаточно мобильны, и движение узлов не прекращается на некоторое время, хотя бы раз в 300 секунд. В данной ситуации могут происходить потери пакетов до 30 % [5]. Также в протоколе DSDV отсутствует поддержка более одного маршрута между двумя узлами – одновременно может существовать исключительно одна связь «узел-узел». Кроме того, данный протокол подвержен проблеме с переполнением номера последовательности в динамических сетях. Но, несмотря на это, данный протокол является хорошим выбором для сетей с малым количеством узлов.

Протокол SEAD

Протокол SEAD (Secure Efficient Ad hoc Distance vector routing) является дальнейшим улучшением протокола DSDV, а именно версии DSDV-SQ. Главным отличием является обеспечение защиты от устройств, которые могут не использовать задержку [6]. Кроме того, снижено влияние проблемы переполнения номера последовательности за счёт отсутствия его инкремента в случае потери связи с узлом. Также была добавлена защита нижней границы метрик при помощи однонаправленных хэш-цепочек.

Благодаря данным улучшениям значительно увеличилась защищённость системы, но несмотря на все улучшения, данный протокол всё равно не является подходящим для сетей с большим количеством узлов. Исследование, проведённое в университете Карнеги-Меллона, показало, что протокол SEAD позволяет добиться существенного снижения потерь пакетов по сравнению со своим предшественником – протоколом DSDV-SQ. Потери в сети, построенной по протоколу SEAD, не превышают 10 %, в то время как в сети, построенной по протоколу DSDV-SQ потери могут достигать до 25 %. Но данные улучшения негативно сказались на количестве необходимых служебных сообщений: если при тестировании в DSDV-SQ-сети из 50 узлов потребовалась передача примерно 11 мегабайт служебной информации, то в аналогичном тестировании с использованием протокола SEAD на служебную информацию приходится уже более 55 Мбайт. Также значительно повысилась задержка в сетях со стационарными узлами – с 15 до 58 мсек.

Протокол GAF

Протокол GAF (Geographic Adaptive Fidelity) построен на идее эквивалентности узлов. Узлы считаются эквивалентными в том случае, если они могут принадлежать к одним и тем же маршрутам связи. Для опре-

деления эквивалентности используются данные GPS (или другой системы позиционирования), обеспечивающие определение относительного взаиморасположения узлов. Затем пространство разбивается на ячейки виртуальной сетки, каждая из которых включает в себя эквивалентные узлы.

Узлы могут находиться в трёх состояниях: сон (sleeping), поиск (discovery), работа (active). Изначально узлы в стадии поиска осуществляют обнаружение соседних узлов, которое продолжается время T_d . После завершения стадии поиска узлы переходят в состояние работы на время T_a , причём они продолжают рассылать сообщения поиска с интервалом T_d . По окончании режима работы происходит переход обратно в режим поиска, и цикл повторяется заново. В том случае, если ищущий или работающий узел обнаруживает наличие эквивалентного узла, он может перейти в режим сна, тем самым обеспечив снижение энергопотребления. Режим сна длится время T_s , а по окончании устройство переходит в режим поиска.

Благодаря своей архитектуре, протокол GAF позволяет достичь стабильного функционирования сети из, как минимум, 200 узлов в условиях, когда эти узлы обмениваются 1-20 раз в секунду пакетами объёмом 512 байт [7]. Кроме того, увеличение плотности расположения узлов в виртуальной сетке положительно сказывается на стабильности сети.

Протокол SPIN

Протокол SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation) основан на рассылке сообщений с мета-данными. Перед отправкой данных происходит рассылка мета-данных по сети. Кроме того, каждый узел по получению новых данных оповещает о них соседние узлы, которые могут по необходимости запросить пересылку этих данных и им. Соответственно в сети, построенной по протоколу SPIN, существуют три типа сообщений

ADV, REQ и DATA. Сообщение ADV содержит в себе мета-данные и обеспечивает их рассылку, сообщение REQ служит для запроса одним узлом пересылки данных с другого, а сообщение DATA представляет собой непосредственно передаваемые данные. Использование подобной системы решает проблему излишней рассылки данных по сети.

Одним из преимуществ протокола SPIN является локализованность изменения топологии за счёт того, что каждому узлу известны только ближайшие соседи. Недостатками же является отсутствие гарантии того, что данные будут вообще переданы, и то, что данный протокол не подходит для сетей, которые требуют пересылки данных через регулярные временные интервалы [8].

Требования к сети БПЛА

С целью снижения стоимости аппаратного обеспечения и снижения нагрузки на сеть разрешение матрицы фотовидеоаппаратуры не должно превышать 16 мегапикселей. Произведя достаточно простые расчёты, можно определить угол, необходимый для обеспечения требующейся разрешающей способности в 1 ppi:

$$\alpha = 2 \times \arctan\left(\frac{\sqrt{r}}{ppi \times 2} \times 0,0254\right) / h = 2 \times \arctan\left(\frac{\sqrt{16000000}}{1 \times 2} \times 0,0254\right) \times 100^{-1} = 53,14^\circ,$$

где r – разрешение матрицы, ppi – количество точек на дюйм, h – высота.

Таким образом, аппаратура БПЛА, для достижения необходимой точности, не должна иметь поле зрения, превышающее $53,14^\circ$. Кроме того, подобный низкий угол обеспечит минимальные оптические искажения.

Исходя из вышесказанного, можно рассчитать покрытие территории одним БПЛА в случае использования аппаратуры, имеющей поле зрения 50° при нахождении на высоте 100 м. Данный аппарат обеспечит покрытие площади в $8697,71 \text{ м}^2$, согласно формуле:

$$\left(\tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right) \times h \times 2\right)^2,$$

где α – поле зрения, а h – высота

Средняя площадь лесных пожаров за 2007-2011 гг. составляет 89,89 га.

Учитывая вышеизложенное, можно найти среднее количество БПЛА, необходимых для обеспечения непрерывного мониторинга за распространением пожара:

$$\frac{1000000}{8697,71} = 114,97.$$

Для расширения зоны покрытия до 500 га, требуется следующее количество БПЛА:

$$\frac{5000000}{8697,71} = 574,86.$$

Таким образом, для покрытия всей территории среднестатистического лесного пожара необходимо обеспечить бесперебойную работу минимум 115 БПЛА и 1 трансивера, обеспечивающего передачу во внешнюю сеть. Кроме того, необходимо обеспечить возможность расширения количества аппаратов в случае большей площади возгорания вплоть до 300 га, что потребует стабильной работы сети из 575 БПЛА. Необходимое количество устройств можно значительно снизить, но это приведёт и к соответствующему падению точности получаемой информации.

Выводы

Исходя из произведённых расчётов, выбранный алгоритм маршрутизации для беспроводной сенсорной сети БПЛА должен обеспечивать бесперебойную работу минимум 116 устройств и иметь возможность для дальнейшего расширения до 576 устройств.

Протоколы DSDV и SEAD не позволяют построить систему, подходящую под данные требования. Главной причиной этого является значи-

тельное увеличение потока служебной информации в случае, если сеть насчитывает достаточно большое количество узлов.

Протокол SEAD не эффективен для построения сетей требующих передачу данных с заданным интервалом и не гарантирует доставку данных.

Протокол GAF должен обеспечить стабильную работу сети БПЛА для мониторинга за пожарами средней площади (до 100 га). Для обеспечения бесперебойного мониторинга и за пожарами более высокой сложности (до 500 га) может потребоваться незначительная доработка протокола под конкретные задачи.

Дата публикации: 16 июня 2018

© Игнатов Руслан Андреевич

Список использованных источников

1. Пожары и пожарная безопасность в 2011 году: Статистический сборник / под общ. ред. В.И. Климкина. М.: ВНИИПО, 2012. 137 с.
2. Каницкая Л.В. Лесная пирология: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2013. 206 с.
3. Игнатов Р.А., Лосев В.В. Протоколы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. 2018. № 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://apriori-journal.ru/seria2/2-2018/Ignatov-Losev.pdf>
4. Guoyou He. Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) Protocol. Helsinki University of Technology. 2002.
5. Broth J., Maltz D.A. A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc NetWork Routing Protocols. Carnegie Mellon University. 1998.
6. Yih-Chun Hu, Johnson D.B., Perrig A. SEAD: secure efficient distance vector routing for mobile wireless ad hoc networks. Elsevier. 2003. С. 180-185.
7. Xu Y., Heidemann J., Estrin D. Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing // Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM). Rome, 2001. С. 70-84.
8. Vidhi S. Patel, Chandresh R. Parekh. Survey on Sensor Protocol for Information via Negotiation (SPIN) protocol. Gandhinagar, Government Engineering College. 2014. С. 1453-1455.