Квадрокоптеры в Wi-Fi-сетях

Вместо введения

Интерес к квадрокоптерам увеличивается с каждым днем, ранее на площадках nag’a была опубликована серия статей на эту тему:

- Квадрокоптер в интернет-провайдинге
- Квадрокоптер при строительстве сетей

Нам стало интересно, как обстоят дела в беспроводном мире, и как квадрокоптеры могут помочь в вопросах организации беспроводных сетей. К слову сказать, идеи использовать беспилотных дронов для этих целей озвучиваются уже не первый год при презентации проектов на различных конференциях (в том числе и в РФ). На нашей памяти идеи использования подобного решения были совершенно разные: начиная от спасательных работ, проводимых МЧС, и вплоть до организации кратковременного радиопокрытия на больших открытых площадках при проведении всевозможных мероприятий. В общем, во всех тех ситуациях, в которых необходимо быстрое развертывание беспроводных сетей. К примеру, нужно чтобы беспроводная сеть начала функционировать сразу же на этапе развертывания проекта, для того чтобы другие службы уже могли начать работу, а в это время будет настраиваться стационарное оборудование.

Отголоски этих идей уводят нас к проекту SkyBender от компании Google и Facebook (о котором многие возможно слышали), в рамках которого задумывается использовать большие воздухоплавательные шары с Wi-Fi точками доступа для организации беспроводного интернета по всему земному шару:

- Google SkyBender Drone Project Aims To Deliver 5G WiFi
- Project Skybender: Google"s secretive 5G internet drone tests revealed
- Квадрокоптер в работе монтажника-связиста

В нашем случае для тех же целей используется квадрокоптер. И концепт проекта вроде как понятен: в воздухе зависает дрон, на борту которого находится беспроводное Wi-Fi устройство, функционирующее (например) в режиме точки доступа (Access Point). В задачу дрона входит обеспечение беспроводного радиопокрытия на определенной территории. Вроде все просто, если не брать в расчет электропитание этого "робота" и погодные условия. Концепт выглядит заманчиво и на первый взгляд довольно прост в реализации, но нам больше интересна физическая сторона вопроса: максимальные реализуемые скорости передачи данных, дальность связи и др. В поисках ответа были проанализированы англоязычные источники, в которых славные американские парни проводили эксперименты с беспилотным летательным аппаратом и точкой доступа на его борту. О результатах этих экспериментов мы бы и хотели поделиться в этой статье.

О методологии и особенностях устройств, используемых в эксперименте

В качестве основного элемента системы использовалась плата Intel Galileo. Плата основана на основе 32-битного центрального процессора Quark SoC x 1000 Intel с тактовой частотой 400 МГц. В эксперименте использовалось оборудование первого поколения. В качестве программного обеспечения использовалась версия Linux quark 3.19.8 yocto-standard. В качестве источника питания использовался внешний аккумулятор 10400 мАч. Батарея может обеспечить Galileo до 15 часов автономной работы в зависимости от режима работы и нагрузки трафика. В плате Galileo через порт PCI Express была подключена беспроводная карта Intel Dual Band Wireless-AC 7260 (внешний вид ее ничем не примечателен, форм-фактор как в обычных ноутбуках). Карта обеспечивает скорость передачи данных до 867 Мбит/сек и поддерживает несколько стандартов Wi-Fi (802.11a/b/g/n/ac). К карте были подключены две внешние антенны с усилением в 5 dBi. Общий вес платы Galileo, аккумуляторной батареи и всей антенной части составил 340 грамм.

На первом этапе эксперимента были исследованы теоретические возможности области покрытия БПЛА (беспилотного летательного аппарата). Расчет производился с использованием моделей распространения радиосигнала: "Free Space" и модель "Wireless Initiative New Radio" –WINNER D1. Подробнее о том, что такое модели распространения радиосигнала можно почитать здесь:

- Расчет радиуса действия точек доступа Wi-Fi

На основе этих моделей были рассчитаны максимальные ожидаемые дальности распространения для восходящего и нисходящего канала связи для нескольких версий стандарта Wi-Fi. Также была экспериментально измерена производительность платы Galileo в качестве промежуточного узла сети Wi-Fi.

В эксперименте использовалось два режима работы точек доступа Wi-Fi. Первый режим работы – "Инфраструктурный", он реализуется на большинстве коммерческих Wi-Fi роутеров. В этом режиме точка доступа выступает в роли центрального узла (Access Point, AP), которая соединяет все устройства в сети и выступает в роли шлюза для подключения к сети Интернет. То есть в этом режиме точка доступа принимает на себя все задачи по управлению сетью. В качестве второго режима работы рассматривается режим "Ad-Hoc", который менее распространен в современных реалиях. В этом режиме ни один беспроводной узел не выступает в роли центрального узла, все узлы равноправны и образуют так называемую ячеистую сеть (Mesh Network). Так как все узлы равноправны, то каждый узел в отдельности принимает на себя задачи клиента (хоста) и маршрутизатора. Кроме того, узлы Ad-Hoc могут перемещаться, образуя так называемую мобильную сеть (Mobile Ad-hoc NETwork - MANET). Достоинство этого режима заключается в том, что соединение между узлами может быть динамически изменено при перемещении устройств. Но эффективная работа такой сети может сильно зависеть от алгоритмов маршрутизации, отвечающих за доставку пакет между узлами сети. Из-за динамического характера топологии сети "стоимость" пути между узлами должна периодически пересчитываться для поиска наилучших путей.

Для тестирования этих двух режимов работы Wi-Fi роутера, в исследуемую сеть были включены два дополнительных устройства. В качестве узлов сети выступали два ноутбука с ОС Linux Ubuntu и Wi-Fi картой IEEE 802.11 a/b/g/n. На приемной стороне был установлен ноутбук с беспроводной картой Intel Centrino Advance-N 6230 и на другом конце ноутбук с картой Intel Dual Band 3160. Центральной частью системы всегда оставалась плата Intel Galileo, работающая в режиме AP (инфраструктурный режим), либо в качестве одного из промежуточных узлов (Ad-Hoc) между передатчиком и приемником. В последнем устройстве был использован протокол маршрутизации BATMAN. Он себя хорошо зарекомендовал по сравнению с другими протоколами, работающими при больших нагрузках трафика. Для получения метрик сети использовался хорошо известный инструмент iPerf3, позволяющий производить измерение полосы пропускания сети, количество потерянных пакетов, определять задержки в сети и пр. Также в iPerf’е возможна настройка нескольких параметров передачи. В этом эксперименте использовалась передача с постоянной скоростью между узлами сети со следующими параметрами: продолжительность передачи – 30 сек; скорость передачи: 1, 3, 5, 7, 9, 11 Мбит/сек; размер пакета: 512 и 1024 байта.

Измерения параметров реальной воздушной сети производились по следующей схеме, представленной на рисунке 1:

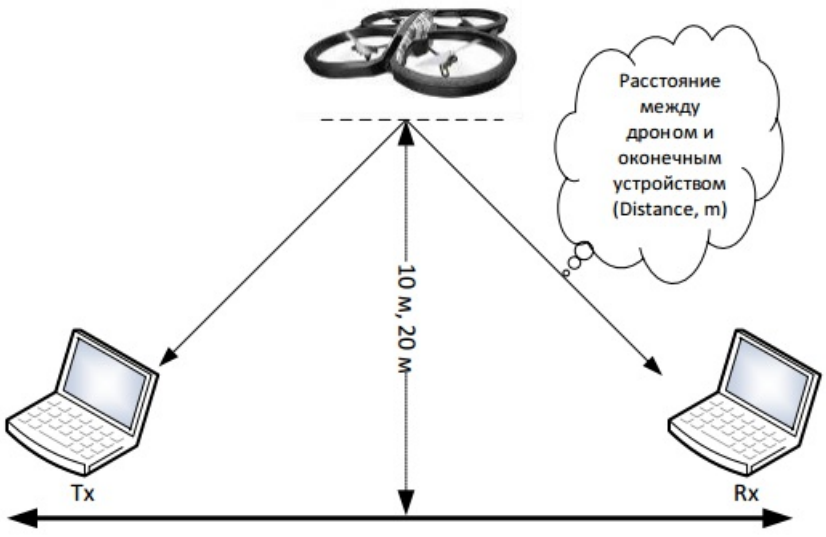


Рисунок 1

Два оконечных устройства постепенно удалялись друг от друга на определенное расстояние вдоль оси X (точки измерения показаны на оси X). В указанных точках измерялась максимальная пропускная способность сети с помощью сетевого анализатора iPerf3, и максимальный уровень сигнала с помощью анализатора спектра Rohde&Schwarz FSH3. Квадрокоптер зависал на высоте 10 и 20 метров, на которых и производились измерения. Внешний вид БПЛА приведен на рисунке ниже:



Рисунок 2

Результаты измерений. Радиус действия

Итак, резюмируя все то, что сказано выше измерялись два ключевых параметра системы: область радиопокрытия и скорость передачи данных.

Как уже отмечалось выше, производилось экспериментальное измерение дальности связи, а также теоретический расчет радиопокрытия с использованием моделей распространения радиоволн: "Free Space" (свободного пространства) и модель WINNER D1. Формула Фрииса обычно используется, когда необходимо определить силу радиосигнала между передатчиком и приемником при отсутствии объектов на пути распространения радиоволн. Эта модель применяется только при расчете полей в дальней зоне, расчет производится по формуле:

$$L_{PROP} = 20\log_{10}(d(m)) + 20\log_{10}(f(MHz)) - 27.55$$

Модель WINNER D1 в отличие от модели Free Space представляет собой стохастическую модель, учитывающую потери в беспроводном канале связи для различных типов сред. Дальность связи по формуле WINNER D1 определяется по формуле:

$$L_{PROP} = A \cdot \log_{10}(d(m)) + B + C \cdot \log_{10}\left(\frac{f_c[GHz]}{5.0}\right)$$

В ней неопределенные буквенные переменные имеют следующие значения A = 21.5, B= 44.2, и C = 20. Они подбираются исходя из начальных условий при решении задачи, подробнее об их выборе можно прочитать в соответствующих источниках [1].

При расчетах мощность передатчика для Uplink и Downlink была принята равной 20 дБм (100 мВт). Расчет дальности связи производился для разных версий стандартов IEEE 802.11. В таблице ниже приведены результаты расчетов для нисходящего канала (Downlink) и для восходящего (Uplink). Обратите внимание, что сценарий для этих расчетов показан на рисунке 1, и при расчетах было принято, что БПЛА находится на высоте 10 м.

В реальном эксперименте оценивался уровень принимаемого сигнала. На рисунке ниже приводится уровень сигнала в зависимости от расстояния для инфраструктурного режима работы (слева) и режима Ad-hoc (справа) при работе дрона на высоте 10 метров.

Downlink.

Standard		Rate (Mbps)	Prop. Mod	Radius (m)	Max D (m)
2.4 GHz	802.11b	11	Friis	6719	6718,9
			Winner D1	4613	4612,9
	802.11g	54	Friis	950	949,95
			Winner D1	747	746,93
	802.11n	144	Friis	754	753,93
			Winner D1	603	602,92
		300	Friis	534	533,91
			Winner D1	438	437,89
5GHz	802.11a	6	Friis	2562	2561,9
			Winner D1	1882	1881,9
		54	Friis	362	361,86
			Winner D1	305	304,84
	802.11ac	78	Friis	182	181,73
			Winner D1	161	160,69
	802.11n	144	Friis	145	144,65
			Winner D1	130	129,61
		300	Friis	115	114,56
			Winner D1	105	104,52
	802.11ac	200	Friis	102	101,51
			Winner D1	94	93,47
		866	Friis	65	64,23
			Winner D1	62	61,19

Uplink.

Standard		Rate (Mbps)	Prop. Mod	Radius (m)	Max D (m)
2.4 GHz	802.11b	11	Friis	2440	2439,9
			Winner D1	2227	2226,9
	802.11g	54	Friis	487	486,90
			Winner D1	402	401,88
	802.11n	72.2	Friis	274	273,82
			Winner D1	235	234,79
		300	Friis	194	193,74
			Winner D1	171	170,71
5GHz	802.11a	6	Friis	1475	1474,9
			Winner D1	1126	1125,9
		54	Friis	234	233,79
			Winner D1	203	202,75

Рисунок 3

Те же экспериментальные данные но для работы дрона на высоте 20 метров:

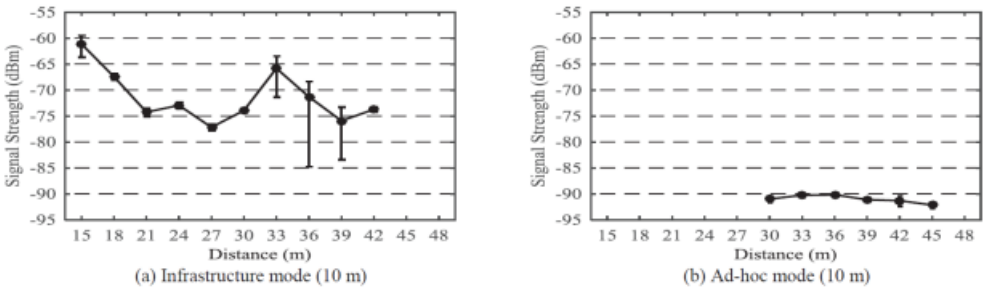


Рисунок 4

Наблюдается довольно заметное отличие между теоретическими расчетными значениями и достигнутыми в эксперименте. Эти различия вызваны множеством дополнительных факторов, не учитываемых в модели распространения сигнала, некоторые из них это: неустойчивость квадрокоптера, наводки от его шасси, атмосферные условия и пр. Но в целом можно отметить, что уровень принимаемого сигнала в инфраструктурном режиме работы значительно выше, чем уровень сигнала, достигнутый в Ad-hoc. На рисунках b и d изображено меньше измеренных контрольных точек, так как фиксировались только те измерения, которые были получены при работе беспилотника в качестве промежуточной точки между двумя оконечными устройствами. Результаты, полученные при непосредственном подключении передатчика и приемника ноутбука, в расчет не брались. Другими словами, когда расстояние между конечными точками доступа было меньше 60 метров (для высоты дрона 10 метров) или 80 метров (для высоты 20 метров), квадрокоптер не выступал в качестве промежуточного устройства в режиме Ad-hoc.

Результаты измерений. Скорость передачи данных

Чтобы оценить производительность инфраструктурного режима работы и режима Ad-hoc с точки зрения максимальной пропускной способности использовалась программа iPerf, с помощью которой запускались пакеты между оконечными точками доступа. Сначала измерения были произведены в лабораторных условиях, в котором измерялась скорость для указанных режимов работы и двух размеров пакета (512 и 1024 байта). Результаты измерений приведены в таблице ниже:

Режим работы	Размер пакета (байт)	Максимальная скорость передачи данных (Мбит/сек)
AP	512	10.5
	1024	11
Ad-Hoc	512	4.5
	1024	7.5

После чего измерения были произведены в реальных условиях. Скорости в зависимости от расстояния, полученные в результате измерений Wi-Fi сети, показаны на рисунках 5 и 6 ниже. Можно отметить, что скорость в инфраструктурном режиме значительно выше скорости в Ad-hoc сети. Для инфраструктурного режима работы (слева) и режима Ad-hoc (справа) при работе дрона на высоте 10 метров:

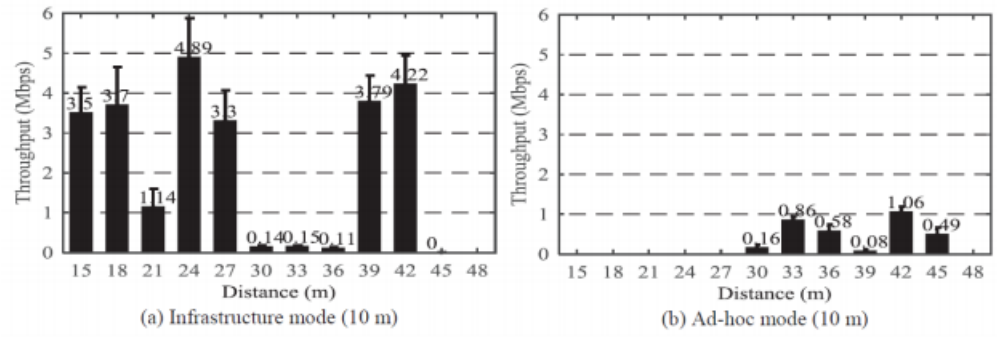


Рисунок 5

Те же экспериментальные данные но для работы дрона на высоте 20 метров:

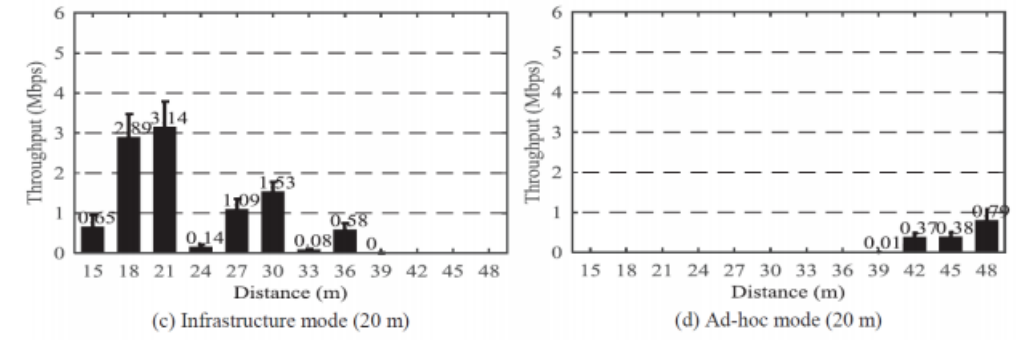


Рисунок 6

Максимальная скорость передачи данных по Wi-Fi различается для различных версий стандарта 802.11 и определяется главным образом методами модуляции, кодированием и технологиями расширения спектра, а также количеством пространственных потоков, шириной канала и пр. Ниже для сравнения приведены максимальные теоретически достижимые скорости передачи данных для заданных условий испытаний. В эксперименте точки доступа настраивались на самопроизвольный выбор версии протокола 802.11g-802.11n для обеспечения наилучших условий передачи в зависимости от качества канала связи. Максимально достижимые скорости для рассматриваемого эксперимента приведены ниже:

	10 m		20 m	
Distance(m)	Infrastructure	Ad-hoc	Infrastructure	Ad-hoc
15	54 Mbps	--	45 Mbps	--
18	60 Mbps	--	135 Mbps	--
21	54 Mbps	--	90 Mbps	--
24	90 Mbps	--	30 Mbps	--
27	81 Mbps	--	54 Mbps	--
30	5 Mbps	6 Mbps	30 Mbps	--
33	5 Mbps	6 Mbps	40 Mbps	--
36	5 Mbps	11Mbps	30 Mbps	--
39	81 Mbps	5.5 Mbps	30 Mbps	5.5 Mbps
42	81 Mbps	11 Mbps	81 Mbps	5.5 Mbps
45	5 Mbps	1 Mbps	5 Mbps	1 Mbps

С увеличением расстояния снижается качество канала связи, что заставляет беспроводные сетевые карты использовать более консервативные методы модуляции, что в свою очередь приводит к уменьшению максимальной скорости передачи данных. Инфраструктурный режим работы обеспечивает более высокие скорости передачи по сравнению с режимом Ad-hoc.

Заключение

Таким образом, в этой статье был рассмотрен один из наиболее эффективных вариантов применения квадрокоптеров в беспроводной связи – для построения автоматически конфигурируемых mesh-сетей. Для решения этой задачи было рассмотрено два режима работы беспроводного устройства на борту дрона: Ad-Hoc и инфраструктурный. Сначала производился теоретический расчет дальности связи с использованием двух моделей распространения сигнала "Free Space" и "WINNER D1". Далее производилось сравнение режимов работы точки доступа по дальности связи и предельной пропускной способности. Инфраструктурный режим работы показал лучший результаты. Но с точки зрения энергопотребления режим работы Ad-Hoc приблизительно на 4% эффективнее. Беспилотные летательные аппараты открывают новые возможности в сфере телекоммуникаций и, возможно, в будущем мы увидим их в концепте сетей следующих поколений беспроводной связи.

Список литературы:

1. Winner and I. S. Technologies, "IST-4-027756 WINNER II. D1.1.2 V1.2. WINNER II Channel Models," 2008.
2. WiFi networks on drones
3. Google SkyBender Drone Project Aims To Deliver 5G WiFi
4. Project Skybender: Google"s secretive 5G internet drone tests revealed
5. Квадрокоптер в интернет-провайдинге
6. Квадрокоптер при строительстве сетей
7. Квадрокоптер в работе монтажника-связиста
8. Квадрокоптер научили находить уязвимые сети и гаджеты на большой высоте