

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЕТИ IEEE 802.11ac ДЛЯ АЛГОРИТМОВ ВИЗУАЛЬНОГО SLAM С УДАЛЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ¹

Мамченко М.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
markmamcha@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты оценки пропускной способности канала, среднего значения задержки, коэффициента доставки пакетов и энергетических затрат при передаче данных в беспроводной сети IEEE 802.11ac, а также максимального времени функционирования беспилотного летательного аппарата при передаче данных на сервер удаленной обработки данных при решении задачи SLAM с использованием видеодатчиков.

Ключевые слова: SLAM, беспилотный летательный аппарат, беспроводная сеть IEEE 802.11ac, пропускная способность, задержка, коэффициент доставки пакетов, энергетические затраты.

Введение

Одним из развивающихся направлений в области одновременной локализации (навигации) и построения карты с использованием видеодатчиков (visual SLAM) является перенос ресурсоемких вычислений на сервера (в том числе граничных, туманных или облачных вычислений) для снижения энергетических затрат робота (беспилотного летательного аппарата, БПЛА) и повышения времени его функционирования.

В предыдущей работе было выявлено два основных подхода к построению подобных систем SLAM для роботов/БПЛА. Первый подход предполагает отправку необработанных данных с сенсоров (RGB камеры и камеры глубины) посредством беспроводного соединения на сервера, второй – осуществление предобработки на стороне робота/БПЛА (выявление, выделение и кодирование признаков и пр.) и отправку полученных данных на сервер для последующей обработки и получения ключевых фреймов/обновлений карты [1].

Кроме того, были сформулированы требования для построения систем визуального SLAM с использованием данных камер глубины и камер RGB. В частности, максимальное время обработки каждого запроса должно составлять не более 60 мс [2], результирующее количество кадров в секунду – не менее 30-35 [3], разрешение – не хуже 720p (1280 x 720) [4].

Также предъявлялись требования к каналу передачи данных. В частности, установлено, что целесообразно использовать беспроводное соединение с пропускной способностью не менее 350 Мбит/с с шириной канала не менее 40 МГц на частоте 5 ГГц и выше (в том числе в рамках беспроводных сетей стандарта 802.11ac) [5].

Целью настоящей работы является обзор существующих подходов и моделей оценивания пропускной способности и задержек в беспроводном канале, энергетических затрат и максимального времени работы робота/БПЛА (с учетом значения емкости батареи) в условиях обмена данными с удаленным сервером при решении задачи визуальной навигации и построения карты, результатов проведенных авторами экспериментов, а также моделирование решения задачи одновременной локализации (навигации) и построения карты роботом с обработкой данных на удаленном сервере. В частности, требуется смоделировать передачу данных в беспроводной сети 802.11ac между условным удаленным сервером (точка доступа, AP) и БПЛА (станция, STA) при решении задачи визуального SLAM и оценить значения пропускной способности, задержек, энергетических затрат и максимального времени работы летательного аппарата.

1. Обзор существующих подходов и способов, а также полученных экспериментальных результатов

1.1. Оценивание пропускной способности и задержек в беспроводном канале

В работах [6, 7] предлагается использование следующих критериев оценки эффективности беспроводной сети стандарта 802.11ac:

- Пропускная способность – максимальная скорость передачи данных между двумя узлами (устройствами) в сети:

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00338, <https://rscf.ru/project/23-19-00338/>.

$$Th = \frac{8 \times P_{Rec}}{T_{start} - T_{stop}}, \quad (1)$$

где P_{Rec} – длина полученного пакета (байт), T_{start} – общее время начала передачи данных (моделирования), T_{stop} – общее время завершения передачи данных (моделирования).

Среднее значение пропускной способности [8, 9]:

$$AT = \frac{PS \times PacRec}{(\sum T_{start} - \sum T_{stop})}, \quad (2)$$

где PS – длина всех полученных пакетов (бит), $PacRec$ – количество полученных пакетов.

- Сквозная задержка – время, затрачиваемое на передачу пакетов от узла-источника до узла назначения, включая задержки, вызванные средой распространения сигнала, обработкой в очереди пакетов и пр.:

$$T_{delay} = \sum T_{PacRec} - \sum T_{PacSent}, \quad (3)$$

где T_{PacRec} – время приема пакета, $T_{PacSent}$ – время отправки пакета.

Другой способ вычисления сквозной задержки также представлен в [8]:

$$T_{delay} = \frac{\sum D_{PacRec}}{PacRec}, \quad (4)$$

где $\sum D_{PacRec}$ – общая задержка при передаче всех принятых пакетов.

- Джиттер – изменяющееся значение задержки между доставкой пакетов по сравнению с промежутками времени между их отправкой. Среднее значение джиттера находится по формуле [8]:

$$AJ = \frac{\sum PacRecJ}{PacRec-1} = \frac{\sum (D_{PacRecn} - D_{PacRecn-1})}{PacRec-1}, \quad (5)$$

где $\sum PacRecJ$ – общее значение джиттера для всех принятых пакетов, $D_{PacRecn}$ – задержка при передаче текущего пакета n , $D_{PacRecn-1}$ – задержка при передаче предыдущего пакета $n-1$.

- Коэффициент доставки пакетов – отношение количества доставленных получателю пакетов ($PacRec$) к общему числу пакетов, отправленных получателю в сети ($PacSent$) в процентном соотношении [8]:

$$PDR = \frac{PacRec}{PacSent} \times 100. \quad (6)$$

В работе [5] представлена оценка объема передаваемого трафика и количества кадров в секунду при передаче данных глубины и RGB данных от робота на удаленный сервер обработки данных посредством беспроводной сети Wi-Fi при работе алгоритма ORB-SLAM2. Рассматривались следующие четыре сценария:

- отправка на сервер несжатых данных;
- отправка сжатых данных глубины (преобразование в формат PNG, алгоритм сжатия уровня 1) и RGB (преобразование в формат JPEG);
- отправка сжатых данных глубины (PNG, алгоритм сжатия уровня 9) и RGB (JPEG);
- отправка сжатых данных глубины (алгоритм RVL) и RGB (JPEG).

В рамках первого сценария удалось достичь 30 кадров в секунду, однако объем передаваемого трафика превышал 300 Мбит/с. Во втором сценарии среднее количество кадров в секунду составило 18, а объем трафика – около 50 Мбит/с. В третьем сценарии среднее количество кадров в секунду упало до 1 при объеме трафика до 20 Мбит/с. В четвертом сценарии количество кадров в секунду оставалось на приемлемом уровне (около 30), а объем передаваемого трафика составил чуть более 50 Мбит/с.

В соответствии с [10] значение пропускной способности канала между точкой доступа и БПЛА в любой момент времени (7) и агрегированное значение за время t (8) (при условии постоянной передачи данных) можно вычислить следующим образом:

$$R = B \times \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{d^2} \right), \quad (7)$$

$$R(t) = B \int_0^t \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{d(t)^2} \right) dt, \quad (8)$$

где B – полоса пропускания канала (Гц), γ_0 – отношение сигнал/шум для принятого сигнала при расстоянии между точкой доступа и БПЛА в 1 м (дБ), $d(t)$ – расстояние между БПЛА и точкой доступа (м).

Приведем некоторые примеры измеренных значений данных параметров.

В работах [6, 11] измеренное значение пропускной способности канала 802.11ac при передаче TCP-трафика составило 250-450 Мбит/с.

В работе [12] в рамках эксперимента при передаче видеопотока с разрешением 1080p максимальная скорость передачи данных составила 42,8 Мбит/с для беспроводной сети стандарта 802.11n и 55,5 Мбит/с – для сети стандарта 802.11ac. Средняя скорость передачи составила 14,3 и 36,8 Мбит/с соответственно.

В работе [13] значение джиттера при передаче TCP-трафика для беспроводной сети 802.11ac для всех моделируемых значений длины пакетов составило менее 5 мс, а для стандартной длины пакета 1500 байт – менее 1 мс. В статье [8] среднее значение джиттера для различных сценариев передачи трафика для сетей IPv4 и IPv6 составило 2-7 мс для беспроводной сети 802.11ac и 34-85 мс – для сети 802.11n.

Среднее значение PDR для различных сценариев передачи трафика для сетей IPv4 и IPv6 составило 94-98% для беспроводной сети 802.11ac и 76-80% – для сети 802.11n [8].

Задержка при передаче TCP-трафика для беспроводной сети стандарта 802.11ac для всех моделируемых длин пакетов составила 35-75 мс [13] и 10-15 мс – в работе [14].

1.2. Оценивание энергетических затрат и максимального времени работы робота/БПЛА

В соответствии с работой [15] расчет энергетических потерь при передаче данных возможен по следующей формуле:

$$E_b = \alpha \times Th^{-1} + \beta, \quad (9)$$

где E_b – энергопотребление на бит передаваемых данных (нДж/бит), Th – пропускная способность (бит), α и β – поправочные коэффициенты (значения для различных типов трафика представлены в работе [15]).

В работе [16] потребление энергии на передачу данных беспроводным модулем Wi-Fi рассматривается как совокупность энергии, затрачиваемой на передачу E_t и работу элементов цепи E_c за время работы передатчика T_{on} . В предложенной модели учитываются факторы, влияющие на энергетические затраты при передаче, в том числе количество бит на символ, потери при распространении радиосигнала, коэффициент усиления антенны, значение несущей частоты, а также потери энергии в виде тепла и энергия, используемая потребителями в цепи.

В работе [17] представлена простая зависимость энергетических затрат E_{tx} на передачу данных от длины сообщения l (бит), дальности от приемника до передатчика d (м), затрат на работу усилителя ($\epsilon_s, \frac{\text{пДж}}{\text{бит} \times \text{м}^2}$, и $\epsilon_l, \frac{\text{пДж}}{\text{бит} \times \text{м}^4}$) и других элементов передатчика E_{elec} ($\frac{\text{нДж}}{\text{бит}}$):

$$E_{tx} = \begin{cases} l \times E_{elec} + l \times \epsilon_s \times d^2, & \text{для } d < d_0 \\ l \times E_{elec} + l \times \epsilon_l \times d^4, & \text{для } d \geq d_0 \end{cases} \quad (10)$$

где d_0 – пороговое значение расстояния.

В работе использованы следующие значения переменных: $E_{elec} = 50 \frac{\text{нДж}}{\text{бит}}$, $\epsilon_s = 10 \frac{\text{пДж}}{\text{бит} \times \text{м}^2}$, $\epsilon_l = 0,0013 \frac{\text{пДж}}{\text{бит} \times \text{м}^4}$, $d_0 = 100$ м [17].

В работе [18] представлена простая модель для расчета энергопотребления умных устройств, передающих потоковые видеоданные в беспроводных сетях Wi-Fi и LTE:

$$E = \frac{r_d \times D + r_t \times T + c}{\lambda}, \quad (11)$$

где r_d – энергетические затраты на передачу данных (Дж/Мбит), D – общий объем передаваемых видеоданных (Мбит), r_t – энергопотребление на единицу времени (Вт), T – время измерения энергопотребления (моделирования или передачи данных, с), c – безразмерная константа, λ – продолжительность видеоданных (с).

В соответствии с [19] для разрешения 720p и сетей 802.11n $r_d = 0,1655$ Дж/Мбит, $r_t = 0,7438$ Вт, а значение $c = 0$. В соответствии с [18] r_d и r_t могут принимать другие значения из диапазона: $r_d \in [0,5992 \dots 0,7664]$ Дж/Мбит, $r_t \in [0,47467 \dots 0,57664]$ Вт.

В работе [20] представлена количественная оценка энергетических затрат (мощности) при передаче данных модулями Wi-Fi Atheros AP91 и Ralink RT5350 при различных значениях пропускной способности и применяемых типах шифрования данных (открытая сеть, WEP-40, WPA-PSK и WPA2-PSK). Установлено, что основными факторами, влияющими на увеличение потребляемой энергии, являлись пропускная способность (+18,6-23 мВт на 1 Мбит/с), скорость передачи данных (+385-400 мВт), а также длина пакета (+90-157 мВт).

В работе [15] для беспроводных сетей 802.11n в различных сценариях (ширина канала и используемый транспортный протокол) значение энергетических затрат на передачу данных составило 13,97–1902,11 нДж/бит, для сети 802.11n/ac – 10-950 нДж/бит.

1.3. Оценивание максимального времени функционирования робота/БПЛА

Для расчета максимального времени функционирования робота/БПЛА возможно условно выделить две составляющие энергопотребления – энергетические затраты на обмен данными E_{tx} и движение робота (полет БПЛА) E_{mov} .

Для нахождения значения E_{mov} возможно использовать существующие модели. В частности, в работах [21, 22] предложена следующая модель расчета энергетических затрат на полет БПЛА из точки i в точку j за время t_{ij} :

$$E_{ij} = \sqrt{\frac{g^3}{2 \times \rho \times \xi \times n}} \times (\omega + \mu + p)^{3/2} \times t_{ij}, \quad (12)$$

где g – ускорение свободного падения (Н/кг), ρ – плотность воздуха (кг/м³), ξ – площадь вращения лопастей (м²), n – количество движителей БПЛА, ω, μ, p – масса каркаса (планера), батареи и полезной нагрузки БПЛА соответственно (кг).

В условиях совершения полета в режиме удержания высоты (зависания в воздухе) модель энергопотребления можно представить в следующем виде [23]:

$$E_{hov} = \frac{g \times (\omega + \mu + p)^{3/2}}{\sqrt{2 \times \rho \times \xi \times n}} \times t_{hov}, \quad (13)$$

где t_{hov} – время полета БПЛА в режиме удержания высоты.

Другие математические модели для расчета энергетических затрат на перемещение робота/БПЛА представлены, например, в работах [10, 24-27].

Зная значения E_{tx} и E_{mov} , общую затрачиваемую мощность можно найти по формуле [18]:

$$P = P_{tx} + P_{mov} = \frac{E_{tx}}{t_{tx}} + \frac{E_{mov}}{t_{mov}}, \quad (14)$$

где t_{tx} – общее время работы передатчика, t_{mov} – общее время движения робота/полета БПЛА.

Таким образом, зная емкость батареи C (А·ч), максимальное время функционирования робота/БПЛА (в часах) в условиях работы алгоритма SLAM с обработкой данных на удаленном сервере возможно найти так [19]:

$$t_{mov.max} = \frac{C \times U}{P}, \quad (15)$$

где U – выходное напряжение батареи (В).

2. Эксперимент (моделирование)

Сравнение предложенных подходов и моделей расчета параметров канала, передачи данных и энергопотребления было проведено в форме имитационного моделирования в среде MATLAB R2023a. Рассматривались два сценария [1] передачи данных между точкой доступа (AP, условный удаленный сервер обработки данных) и абонентской станцией (STA, условный БПЛА) по беспроводному соединению Wi-Fi 802.11ac. Предполагалось, что БПЛА (STA) расположен на расстоянии 100 метров от точки доступа AP и совершает полет в режиме удержания высоты [23]. Исходные энергетические параметры, характеристики моделируемого канала связи и другие тактико-технические характеристики БПЛА представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Параметр (характеристика), единица измерения	Значение
Рабочая частота, ГГц	5
Номер канала	50

Параметр (характеристика), единица измерения	Значение
Ширина канала, МГц	40
Расстояние между точкой доступа и станцией, м	100
Емкость аккумуляторной батареи, Ампер-час	5
Напряжение питания, В	15,4
Радиус лопастей, м	0,1
Площадь вращения лопасти, м ²	0,0314
Количество двигателей БПЛА	4
Общая масса планера, батареи и полезной нагрузки БПЛА, кг	1
Плотность воздуха, кг/м ³	1,2754

В рамках первого сценария предполагалась отправка необработанных видеоданных на сервер. Скорость передачи данных от станции к точке доступа и обратно задана значением 40 Мбит/с, длина пакета – 1500 байт. Модель трафика – on/off, трафик однопоточный, сжатие не предусматривалось. Второй сценарий предполагал предобработку данных на БПЛА и их отправку на сервер для дальнейшей обработки и получения ключевых фреймов/обновлений карты. Скорость передачи данных от станции к точке доступа – 10 Мбит/с, обратно – 4 Мбит/с, длина пакета – 1500 байт, модель трафика – on/off, трафик однопоточный, сжатие не предусматривалось. Для обоих сценариев для расчета затухания сигнала L (дБ) использовалась модель распространения в свободном пространстве [28]:

$$L = 20 \times \lg \left(\frac{4 \times \pi \times d}{\lambda} \right), \quad (16)$$

где d – расстояние между точкой доступа AP и станцией STA (м), λ – длина волны (м).

При расчете энергетических затрат на передачу данных между точкой доступа и станцией на основе модели [15] были использованы универсальные значения поправочных коэффициентов для сети 802.11ac ($\alpha = 305,3$, и $\beta = 13,1$). В модели [17] использованы указанные выше значения переменных E_{elec} , ϵ_l и ϵ_s . В модели [18, 19] продолжительность потоковых видеоданных λ задавалась равной времени моделирования, общий размер видеоданных D – равным общему объему данных, переданных станцией. Для разрешения 720p использованы следующие значения переменных: $r_d = 0,1655$ Дж/Мбит, $r_t = 0,7438$ Вт и $c = 0$.

Результаты моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты оценки параметров канала связи, энергетических затрат на передачу данных и максимально возможного времени полета БПЛА

Параметр (характеристика), единица измерения	Значение (сценарий №1)	Значение (сценарий №2)
Время моделирования, с	1	1
Пропускная способность точки доступа, Мбит/с	5,724	4,008
Пропускная способность станции, Мбит/с	14,292	7,02
Объем данных от точки доступа, бит	6033696	4306864
Объем данных от станции, бит	14683240	7387552
Среднее значение задержки при передаче пакетов от точки доступа, с	0,1563	0,0014
Среднее значение задержки при передаче пакетов от станции, с	0,3557	0,0021
Коэффициент доставки пакетов для точки доступа	0,9715 (97,15%)	0,9868 (98,68%)
Коэффициент доставки пакетов для станции	0,9690 (96,9%)	0,9868 (98,68%)
Энергетические затраты на передачу данных, Дж [15]	AP – 0,0790	STA – 0,1924
Энергетические затраты на передачу данных, Дж [17]	AP – 1,0861	STA – 2,6430
Энергетические затраты на передачу данных, Дж [18]	-	STA – 3,1739
Мощность при передаче данных, Вт [15]	AP – 0,0790	STA – 0,1924
Мощность при передаче данных, Вт [17]	AP – 1,0861	STA – 2,6430
Мощность при передаче данных, Вт [18]	-	STA – 3,1739
Энергетические затраты на полет БПЛА в режиме удержания высоты, Дж [23]	17,3094	17,3094
Мощность при полете БПЛА в режиме удержания высоты, Вт [23]	17,3094	17,3094
Максимально возможное время полета робота, без передачи данных, в режиме зависания, ч [23]	4,4484	4,4484
Максимально возможное время полета робота, с передачей данных [15], в режиме зависания, ч [23]	4,3996	4,4237

Параметр (характеристика), единица измерения	Значение (сценарий №1)	Значение (сценарий №2)
Максимально возможное время полета робота, с передачей данных [17], в режиме зависания, ч [23]	3,8592	4,1311
Максимально возможное время полета робота, с передачей данных [18], в режиме зависания, ч [23]	3,7592	-

3. Анализ полученных результатов

В рамках первого сценария значение пропускной способности больше, чем во втором в связи с большим значением скорости и объема передаваемых данных. Для первого сценария характерны большие (по сравнению со вторым) значения средней задержки – 156-355 мс. Для решения данной проблемы необходимо использование методов и алгоритмов сжатия данных, в противном случае передача необработанных видеоданных на сервер при работе алгоритмов визуального SLAM не имеет смысла. Значения задержки для второго сценария (14-21 мс) допустимы. Значения коэффициента доставки пакетов для точки доступа и станции во втором сценарии лучше, чем в первом, но в целом – допустимы для обоих сценариев.

Расчетные энергетические затраты на передачу данных в модели [17] больше аналогичных значений для модели [15] в силу того, что $d = d_0$, т.е. в соответствии с моделью [17] значение расстояния между STA и AP возводится в степень 4.

Наибольшие значения расчетных энергетических затрат на передачу данных получены с использованием модели [18], в связи с чем значительно сокращается максимально возможное время полета БПЛА в режиме удержания высоты. Следует отметить, что данное значение рассчитывалось только в рамках первого сценария, предусматривающего передачу необработанных видеоданных на сервер, и только для станции STA (БПЛА).

Затраты энергии на передачу одного бита данных с использованием различных моделей составили:

- 13,1 нДж/бит (AP/STA) для обоих сценариев – использованием модели [15];
- 180 нДж/бит (AP/STA) для обоих сценариев – использованием модели [17];
- около 216 нДж/бит (STA) для первого сценария – использованием модели [18].

В целом с практической точки зрения в интересах планируемых натурных испытаний следует рассматривать использование схемы удаленной обработки данных для алгоритмов визуального SLAM на основе второго сценария.

4. Заключение

В работе представлены результаты анализа существующих подходов и моделей для оценки пропускной способности и задержек в беспроводном канале, а также энергетических затрат и максимального времени работы робота/БПЛА в условиях работы алгоритмов визуального SLAM с удаленной обработкой данных в беспроводной сети стандарта IEEE 802.11ac. Проведено имитационное моделирование для оценки пропускной способности канала, среднего значения задержки, коэффициента доставки пакетов, энергетических затрат при передаче данных (на основе рассмотренных моделей и подходов), а также максимально возможного времени работы робота (полета БПЛА в режиме удержания высоты) при передаче данных между роботом (станцией) и условным сервером удаленной обработки данных (точка доступа). В целом при подготовке к проведению натурных испытаний следует рассматривать использование схемы удаленной обработки данных для алгоритмов визуального SLAM с предобработкой данных на стороне робота (выявление, выделение и кодирование признаков и пр.) и отправкой полученных данных на сервер для последующей обработки и получения роботом готовых ключевых фреймов/обновлений карты.

Литература

1. *Jharko E., Mamchenko M., Khripunov S.P.* Robot/UAV Indoor Visual SLAM in Smart Cities Based on Remote Data Processing // 2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – Sochi, 2023. – P. 504–508.
2. *Jiao J., Yun P., Liu M.* A Cloud-Based Visual SLAM Framework for Low-Cost Agents // Computer Vision Systems. ICVS 2017. Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10528. – P. 471–484.
3. *Cao H., Xu J., Li D., Shangguan L., Liu Y., Yang Z.* Edge Assisted Mobile Semantic Visual SLAM // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2022. – P. 1–10.

4. *Van Opendenbosch D., Oelsch M., Garcea A., Aykut T., Steinbach E.* Selection and Compression of Local Binary Features for Remote Visual SLAM // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2018. – P. 7270–7277.
5. *Alves J., Bernardino A.* A Remote RGB-D VSLAM Solution for Low Computational Powered Robots // 2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). – 2020. – P. 214–220.
6. *Rochim A.F., Harijadi B., Purbanugraha Y.P., Fuad S., Nugroho K.A.* Performance comparison of wireless protocol IEEE 802.11ax vs 802.11ac // 2020 International Conference on Smart Technology and Applications (ICoSTA). – Surabaya, 2020. – P. 1–5.
7. *Sarvade V.P., Kulkarni S.A.* Performance analysis of IEEE 802.11ac for vehicular networks using realistic traffic scenarios // 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). – Udupi, 2017. – P. 137–141.
8. *Dasgupta S., Roy P.J., Sharma N., Misra D.D.* Application of IPv4, IPv6 and Dual Stack Interface over 802.11ac, 802.11n and 802.11g Wireless Standards // 2020 Third International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEECC). – Bengaluru, 2020. – P. 1–6.
9. *Sbai O., Elboukhari M.* Simulation of MANET's Single and Multiple Blackhole Attack with NS-3 // 2018 IEEE 5th International Congress on Information Science and Technology (CiSt). – Marrakech, 2018. – P. 612–617.
10. *Zeng Y., Xu J., Zhang R.* Energy Minimization for Wireless Communication With Rotary-Wing UAV // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2019. – Vol. 18, N 4. – P. 2329–2345.
11. *Alakoca H., Karaca M., Karabulut Kurt G.* Performance of TCP over 802.11ac based WLANs via testbed measurements // 2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). – Brussels, 2015. – P. 611–615.
12. *Kaewkiriya T.* Performance comparison of Wi-Fi IEEE 802.11ac and Wi-Fi IEEE 802.11n // 2017 2nd International Conference on Communication Systems, Computing and IT Applications (CSCITA). – Mumbai, 2017. – P. 235–240.
13. *Narayan S., Jayawardena C., Wang J., Ma W., Geetu G.* Performance test of IEEE 802.11ac wireless devices // 2015 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI). – Coimbatore, 2015. – P. 1–6.
14. *Sui K. et al.* Characterizing and Improving WiFi Latency in Large-Scale Operational Networks // MobiSys '16: Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. – 2016. – P. 347–360.
15. *Sun L., Deng H., Sheshadri R.K., Zheng W., Koutsonikolas D.* Experimental Evaluation of WiFi Active Power/Energy Consumption Models for Smartphones // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2017. – Vol. 16, N 1. – P. 115–129.
16. *Mahmood F., Perrins E., Liu L.* Modeling and Analysis of Energy Consumption for RF Transceivers in Wireless Cellular Systems // 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – San Diego, 2015. – P. 1–6.
17. *Sotheara S., Aso K., Aomi N., Shimamoto S.* Effective data gathering and energy efficient communication protocol in Wireless Sensor Networks employing UAV // 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – Istanbul, 2014. – P. 2342–2347.
18. *Zou L., Javed A., Muntean G.-M.* Smart mobile device power consumption measurement for video streaming in wireless environments: WiFi vs. LTE // 2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). – Cagliari, 2017. – P. 1–6.
19. *Zou L., Trestian R., Muntean G.-M.* eDOAS: Energy-aware device-oriented adaptive multimedia scheme for Wi-Fi offload // 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – Istanbul, 2014. – P. 2916–2921.
20. *Palem G., Tozlu S.* On energy consumption of Wi-Fi Access Points // 2012 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC). – Las Vegas, 2012. – P. 434–438.
21. *Dorling K., Heinrichs J., Messier G.G., Magierowski S.* Vehicle Routing Problems for Drone Delivery // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2017. – Vol. 47, N 1. – P. 70–85.
22. *Bruni M.E., Khodaparasti S., Perboli G.* Energy Efficient UAV-Based Last-Mile Delivery: A Tactical-Operational Model With Shared Depots and Non-Linear Energy Consumption // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 18560–18570.
23. *Muli C., Park S., Liu M.* A Comparative Study on Energy Consumption Models for Drones // Internet of Things. GIoTS 2022. Lecture Notes in Computer Science. – 2022. – Vol. 13533. – P. 199–210.
24. *Song Q., Jin S., Zheng F.-C.* Completion Time and Energy Consumption Minimization for UAV-Enabled Multicasting // IEEE Wireless Communications Letters. – 2019. – Vol. 8, N 3. – P. 821–824.
25. *Rastegardoost N., Jabbari B.* Minimizing Wi-Fi Latency With Unlicensed LTE Opportunistic White-Space Utilization // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2019. – Vol. 18, N 3. – P. 1914–1926.
26. *Gao N. et al.* Energy model for UAV communications: Experimental validation and model generalization // China Communications. – 2021. – Vol. 18, N 7. – P. 253–264.
27. *Song Q., Zeng Y., Xu J.* A survey of prototype and experiment for UAV communications // Sci. China Inf. Sci. – 2021. – Vol. 64, N 140301. – P. 1–21.
28. *Katircioğlu O., Isel H., Ceylan O., Taraktas F., Yagci H.B.* Comparing ray tracing, free space path loss and logarithmic distance path loss models in success of indoor localization with RSSI // 2011 19th Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers. – Belgrade, 2011. – P. 313–316.