

# Анализ алгоритма выбора облачного хранилища данных с использованием аналитической модели

Н. А. Демидов<sup>1</sup>, В. Н. Коваленко<sup>2</sup>

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

<sup>1</sup>deminickal@outlook.com, <sup>2</sup>kovalenkovadim1996@gmail.com

**Аннотация.** В статье приведены данные анализа алгоритма выбора места хранения данных. Представлена аналитическая модель, позволяющая описать процесс обслуживания голографического трафика и трафика мультимедиа в сетевой структуре с многоуровневой облачной архитектурой МЕС и БПЛА.

**Ключевые слова:** БПЛА, МЕС, НТС, голографический трафик, трафик мультимедиа

## I. ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования рынка Интернета Вещей подтверждают увеличение количества устройств, подключенных к сети, а также объема генерируемого ими трафика. Например, в 2018 году компания Strategy Analytics по результатам собственных исследований выдвинула собственный прогноз о развитии рынка «Интернета Вещей», в котором было высказано предположение, что к 2030 году количество устройств с доступом к сети может достичь 50 и более миллиардов [1]. Увеличение же объемов трафика было подтверждено исследователями компании Ericsson, установившими, что с начала 2021 года по январь 2022 года объемы генерируемого трафика увеличились на 40 %, достигнув 93 экзабайт в месяц [2].

Дополнительным фактором, приводящим к увеличению нагрузки в сети, может быть внедрение инновационной технологии, в рамках которой прогнозируется развитие голографического типа коммуникаций. Голографическая коммуникация позволяет реализовать эффект присутствия пользователя в реальном времени. Исследования показали, что для обеспечения передачи голографического трафика в соответствии с параметрами качества, необходимо учитывать объективно присущие особенности его обслуживания. Во-первых, непосредственно влияют на передачу данных, инкапсулированных в пакеты, задержки передачи. Во-вторых, имеют значение параметры пропускной способности сети. Изучение вышеуказанных параметров голографического трафика было проведено в процессе проведения натурного эксперимента, результаты которого представлены в статьях [3, 4]. Итак, для предоставления инновационных услуг на определенном уровне качества обслуживания, необходимо разработать комплекс функциональных требований к сетям связи и систему выбора места хранения данных для оперативной передачи данных при запросе.

Рассмотрим проблему разносторонне. Объем генерируемого трафика от устройств мультимедиа, сенсоров «Интернета Вещей», голографического оборудования возрастает. При передаче на ЦОД для дальнейшего хранения и затем передаче конечному пользователю возникает увеличение нагрузки на базовую сеть. Необходимо отметить, что генерируемый трафик и количество запросов пользователей в разных участках сети и в разное время будут неоднородны.

С другой стороны, сбор данных от устройств мультимедиа, сенсоров «Интернета Вещей» и голографического оборудования на достаточно большой площади (например, при сборе данных по всей территории города) не всегда может быть осуществлен с использованием стандартной сетевой инфраструктуры (например, не все сенсорные устройства могут обладать возможностью подключения к мобильным сетям связи).

Поэтому в данной работе для снижения общей задержки при предоставлении собранных данных пользователям по запросу предлагается размещать собранные данные на дополнительных вычислительных облаках на границе с сетью радиодоступа, а для сбора данных использовать Беспилотные Летательные Аппараты.

## II. МНОГОУРОВНЕВАЯ ОБЛАЧНАЯ АРХИТЕКТУРА И СЕТИ БПЛА

Для снижения нагрузки на удаленный сервер, а также уменьшения общей задержки при предоставлении собранных данных пользователям предлагается воспользоваться облаками многоуровневой облачной системы МЕС [5, 6].

В основе концепции граничных вычислений множественного доступа (Multi-access Edge Computing) – перенос вычислительного облака ближе к пользователю на границу сети радиодоступа, оставаясь при этом в сотовой сети. Вычислительные облака МЕС: Микро-облако, Мини-облако и Главное облако или удаленный сервер (вычислительные облака представлены в порядке удаления от конечного пользователя и в порядке возрастания вычислительных и запоминающих ресурсов) – привязаны к инфраструктуре оператора связи [5–8].

Другим вычислительным облаком, размещаемым на границе с сетью радиодоступа, может рассматриваться Микро-сервер Cloudlet, представляющий собой небольшой облачный ЦОД с повышенной мобильностью, обладающий меньшими ресурсами по сравнению с вычислительными облаками МЕС, однако обладающий возможностью размещения в локальной

---

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9 в ЕГИСУ НИОКТР.

сети (Микро-сервер Cloudlet не привязан к инфраструктуре операторов связи) [9].

Облака МЕС и Cloudlet могут быть реализованы в одной сетевой инфраструктуре, образуя многоуровневую облачную систему с облаками МЕС на верхнем уровне и микро-серверами Cloudlet на одном из нижних уровней [5].

Сети БПЛА – беспроводные сенсорные сети, состоящие из двух сегментов – наземного (сенсорные устройства, мобильные устройства пользователей, Базовые Станции наземного сегмента) и летающего (один и или несколько БПЛА). БПЛА могут применяться для следующих задач [10–11]:

- замена наземной базовой станции при высокой нагрузке или выходе из рабочего состояния наземной базовой станции;
- для передачи данных при отсутствии возможности передаче сетевой инфраструктурой наземного сегмента;
- для развертывания различных сенсоров и сбора данных с сенсорных полей;
- использование ресурсов БПЛА для предоставления пользователям различных сервисов и для обработки запросов пользователей.

### III. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА

В предлагаемой архитектуре БПЛА выполняют функции по сбору данных от сенсоров, устройств мультимедиа и голографического оборудования, а также по доставке собранных данных до вычислительных облаков (что соответствует 2 и 3 задачам БПЛА).

Выбор облака для хранения собранных данных на основе прогнозируемой нагрузки, а также выбор БПЛА для сбора данных и последующей передаче вычислительным облакам, предлагается осуществлять на Главном облаке МЕС.

В данной работе предлагаемая сетевая архитектура по сбору данных с использованием БПЛА и многоуровневой облачной системы (вычислительные облака МЕС и Cloudlet) для хранения собранных данных и их последующей передаче пользователю по запросу, состоящая из следующих уровней: 1 уровень – Уровень пользовательских устройств, представленный мобильными устройствами пользователей и устройствами сбора данных; 2 уровень – уровень БПЛА; 3 уровень – уровень Микро-сервера Cloudlet, которое может быть как стационарным, так и подвижным (мобильным) при размещении на общественном автотранспорте; 4 уровень – уровень Микро-облака; 5 уровень – уровень Мини-облака; 6 уровень – Главное облако.

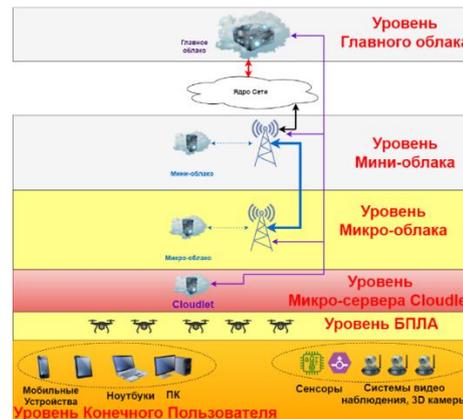


Рис. 1. Предлагаемая система многоуровневой облачной архитектуры и БПЛА

Стоит также отметить, что хранение собранных данных и предоставления их по запросу может осуществляться с использованием БПЛА.

### IV. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ АЛГОРИТМ (ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЙ)

Последовательность действий по выбору облака для хранения собранных данных, а также выбору БПЛА для сбора данных будет следующим:

1. определение периода сбора данных;
2. определение нагрузки для всех устройств сбора данных за период сбора данных.
3. отправка Главным облаком (оркестратором Главного облака) устройствам хранения данных (вычислительные облака МЕС и микро-серверам Cloudlet) запроса информации об их ресурсах: ресурсах хранения, пропускной способности сети, частоте процессора, количестве процессорных ядер;
4. определение общей задержки передачи собранных данных от вычислительного облака до всех конечных пользователей, которому может предоставляться определенный вид трафика.
5. выбор устройства хранения данных с наименьшей средней общей задержкой и достаточными ресурсами хранения;
6. определение зон повышенной нагрузки и объема данных, генерируемого каждой зоной;
7. определение количества и ресурсов БПЛА в сети (таких как ресурсы хранения, заряд батареи, возможные типы связи с устройствами сбора данных и пропускная способность сети);
8. определение зон подзарядки БПЛА и их первоначального расположения;
9. выбор БПЛА для сбора данных с определенных зон;
10. определение маршрута передачи данных от зон выгрузки трафика до выбранных облаков хранения данных.
11. отправка БПЛА в выбранные зоны для сбора данных;

12. передача собранных БПЛА данных ближайшему к БПЛА (последней зоне сбора данных) зоне выгрузки трафика;
13. отправка БПЛА к зоне подзарядки;
14. передача собранных данных по сети от зоны выгрузки трафика выбранным облакам для последующего хранения данных.

В данной работе предлагается выбирать БПЛА для сбора данных с одной зоны независимо от типа трафика, генерируемого устройствами данной зоны. Передачу данных предлагается осуществлять к ближайшим зоне выгрузки трафика (например, ближайшим вычислительным облакам).

В данной работе в качестве вычислительного облака для хранения данных выбиралось облако с минимальной суммой задержки поиска и задержки передачи данных до конечного пользователя.

Задержка передачи данных вычисляется как сумма задержек передачи между отдельными узлами, через которые передаются пакеты от облака хранения к конечному пользователю.

Задержка передачи данных между узлами (а также задержка передачи данных от облака до первого промежуточного узла и от последнего промежуточного узла до конечного пользователя) состоит из времени обработки данных и задержки распространения данных.

$$D_i^{Node} = D_i^{transfer} + D_i^{distribution}, i \in N^{DTN}, \quad (1)$$

где  $N^{DTN}$  – узлы, через которые осуществляется передача данных от облака хранения к пользователю. В качестве первого узла рассматривается вычислительное облако для хранения данных.

$N^{DTN} \in N^{Cloud}$ , где  $N^{Cloud}$  – Множество вычислительных облаков.

Последовательность координат вычислительных облаков:

$$q_l^{Cloud} = [X_l^{Cloud}, Y_l^{Cloud}] l \in N^{Cloud},$$

где  $X_l^{Cloud}$  – координата x облака l,  $Y_l^{Cloud}$  – координата y облака l.

Последовательность координат пользователей:

$$q_m^{User} = [x_m^{User}, y_m^{User}] m \in N^{User},$$

где  $x_m^{User}$  – координата x пользователя m,  $y_m^{User}$  – координата y пользователя m,  $N^{User}$  – множество пользователей

Общая задержка системы при передаче данных к вычислительному облаку за N переходов вычисляется по формуле:

$$D_l^{total} = \sum_{i=1}^N (D_i^{transfer} + D_i^{distribution}) + D_m^{Search}, \quad (2)$$

где N – количество узлов передачи данных, через которые осуществляется передача данных от облака хранения к пользователю (качестве первого узла рассматривается вычислительное облако).

Задержка передачи:

$$D_i^{transfer} = \frac{V}{Cap_i}, \quad (3)$$

где  $Cap$  – пропускная способность сети, V – Объем собираемых данных.

$$V = u * T, \quad (4)$$

где u – средний объем генерируемых данных в секунду (Мбит/с), T – период сбора данных.

Задержка распространения:

$$D_i^{distribution} = \frac{d_i}{k_i c}, \quad (5)$$

где  $k_i$  коэффициент распространения, c – скорость света, d – расстояние между узлами или между последним узлом, и пользователем.

Расстояние между узлами вычисляется по формуле:

$$d_{i,i+1} = \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2} \quad (6)$$

Расстояние между последним узлом и пользователем вычисляется по формуле:

$$d_{i,m} = \sqrt{(X_i - x_m)^2 + (Y_i - y_m)^2} \quad (7)$$

Выбора маршрута передачи данных от зоны выгрузки трафика к соответствующим облакам предлагается также осуществлять с минимальной задержкой передачи.

Выбор БПЛА предлагается осуществлять на основе ресурсов хранения БПЛА и заряда батареи БПЛА. В работе предлагается распределить зоны генерации трафика и БПЛА по убыванию их объемов данных и ресурсов хранения соответственно.

После выбора БПЛА с достаточными ресурсами для хранения данных необходимо определить: обладает ли внутренняя батарея БПЛА достаточным зарядом для сбора данных, их передаче на ближайшую зону выгрузки трафика и последующего возвращения БПЛА на подзарядку.

Если заряда батареи БПЛА недостаточно для сбора данных их передаче на ближайшую зону выгрузки трафика и последующего возвращения БПЛА на подзарядку, то выбор БПЛА для сбора данных (в соответствии с количеством ресурсов хранения) осуществляется снова. При этом данный БПЛА исключается из последующего выбора БПЛА для сбора данных.

При определении энергопотребления БПЛА необходимо учитывать потребление энергии БПЛА на следующих этапах:

1. при перемещении БПЛА от зоны размещения до зоны сбора данных;
2. при сборе данных;
3. при перемещении от зоны сбора данных до зоны выгрузки;
4. при передаче данных от БПЛА в зону выгрузки;
5. при перемещении БПЛА в зону подзарядки.

Потребление энергии БПЛА на 1, 3 и 5 этапах определяется только потреблением энергии из-за механических операций (полета) и может быть определено следующими формулами [12]:

$E_F = 0,5 * m * t_F * U_F^2$ , где  $m$  – масса БПЛА.  $t_F$  – время полета,  $U_F$  – скорость полета БПЛА

$$U_F = \frac{\sqrt{(x_{k+1}-x_k)^2+(y_{k+1}-y_k)^2+(z_{k+1}-z_k)^2}}{t_F}, \quad (8)$$

где координаты  $x, y, z$  характеризуют положение БПЛА в момент времени  $k$ .

При сборе данных на этапе 2 и их передаче на 4 этапе энергия расходуется как на выполнение задачи приема/передачи данных, так и на выполнение механических операций (зависание БПЛА в зоне сбора или рядом с зоной выгрузки трафика).

Потребление энергии из-за механических операций (зависание БПЛА) может быть вычислено по следующей формуле:

$$E_H = p^H t_h, \quad (9)$$

где  $p^H$  представляет коэффициент потребления мощности при зависании БПЛА,  $t_h$  – время зависания БПЛА.

Энергопотребление при приеме/передаче данных может быть вычислено по формуле [13]:

$$E_t = \left( 2^{\frac{v}{B \cdot D_q^{transfer}}} - 1 \right) * \frac{q^2 * B * D_q^{transfer}}{h}, \quad (10)$$

где  $q^2$  – мощность Белого Гауссовского шума,  $B$  – ширина полосы частот,  $h$  – коэффициент усиления мощности канала,  $D_q^{transfer}$  – задержка при передаче данных для  $q$  БПЛА.

Стоит также отметить, что суммарное потребление энергии БПЛА при приеме данных от всех устройств одной зоны вычисляется как сумма потреблений энергии при передаче данных от каждого устройства.

Время зависания БПЛА будет равным времени, затрачиваемому при приеме/передаче данных. Также время на сбор данных со всей зоны сбора предполагается рассчитывать как сумму времени, затрачиваемое на передачу данных от каждого устройства по отдельности.

## V. ИМИТАЦИЯ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

Имитация работы алгоритма выбора проводилась в программном комплексе MATLAB. Для определения зон повышенной нагрузки использовался алгоритм k-средних, а для определения точек для сбора данных с помощью БПЛА – алгоритм Forel. Параметры имитационной модели представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Сетевая зона	1000x1000x100	БПЛА	5
Количество зон	5	Устройство генерации трафика	50-100
$B$	20 МГц	$m$ БПЛА,	1 – 3 кг
$q^2$	10	У БПЛА	45-50 узлов

Объем генерируемого трафика в секунду составлял 1,314 Мбит/с для трафика мультимедиа и 54 Мбит/с для голографического трафика, а период сбора трафика был равен 60 с. Объемы ресурсов хранения БПЛА, равными в имитационной модели 8, 16, или 32 ГБ, было достаточно для сбора данных с каждой зоны БПЛА. В табл. 2 представлено суммарное потребление энергии в Вт/ч для всех БПЛА при сборе данных от каждой из 5 зон.

ТАБЛИЦА II. СУММАРНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ БПЛА

БПЛА \ Зона	1	2	3	4	5
1	166,86	165,45	93,71	90,63	160,80
2	163,69	160,71	91,33	86,43	157,18
3	166,99	165,65	93,81	90,80	160,95
4	167,11	165,83	93,91	90,97	161,10
5	166,86	165,45	93,71	90,63	160,80

Рассмотрим энергопотребление на примере первого БПЛА. В табл. 3 представлено энергопотребление для БПЛА 1 для каждой из 5 зон.

ТАБЛИЦА III. ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ БПЛА № 1

Эн.-е (этап), Вт/ч	1 зона	2 зона	3 зона	4 зона	5 зона
$E_F$ (1)	58,04	72,49	31,09	27,68	54,12
$E_t$ (2)	0,97	2,61	1,44	2,87	3,78
$E_H$ (2)	39,44	17,42	21,13	18,81	36,78
$E_F$ (3)	1,35	0,68	0,28	2,34	0,82
$E_t$ (4)	37,68	53,57	21,99	21,49	37,48
$E_H$ (4)	25,60	12,87	14,94	14,60	25,47
$E_F$ (5)	3,77	5,80	2,85	2,85	2,35

По результатам проводимой симуляции видно, что потребление энергии больше всего уходило на обработку данных. При этом потребление энергии при зависании было значительно больше потребления энергии при полете.

Коэффициент зависания был подсчитан по формуле:

$$p^H = \sqrt{\frac{(m \cdot g)^3}{2\pi \cdot r^2 \cdot p}}, \quad (11)$$

где  $r=0,115$  м (радиус БПЛА),  $p=1,225$  (коэффициент плотности воздуха),  $g$  – ускорение свободного падения.

Пропускная способность сети при передаче данных была подсчитана с использованием теоремы Шеннона–Хартли. На 4 этапе расстояния между БПЛА и зоной выгрузки трафика рассматривалось равным 10 метрам, мощность Антенны БПЛА при сборе/передаче данных составляло 20 ДБм.

## VI. ВЫВОДЫ

В данной работе была предложена сетевая архитектура по сбору данных с использованием БПЛА и многоуровневой облачной системы для хранения собранных данных и их последующей передаче пользователю по запросу. Многоуровневая облачная система была представлена облаками MEC и Cloudlet. Была предложена последовательность действий по выбору облака для хранения собранных данных, а также выбору БПЛА для сбора данных. В качестве облака для хранения данных в данной работе было предложено выбирать облака с минимальной суммой задержек поиска, передачи и распространения собранных данных до конечного пользователя. В данной статье также было

предложено осуществлять выбор БПЛА на основе ресурсов хранения БПЛА и заряда батареи. Были представлены формулы для подсчета задержек передачи, поиска, распространения, а также энергопотребления при приеме/передаче данных, зависания и полете БПЛА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Количество IoT-устройств в мире достигло 22 млрд единиц [Электронный ресурс]. – URL: <https://profit.kz/news/53350/Kolichestvo-IoT-ustrojstv-v-mire-dostiglo-22-mlrd-edinic/>
- [2] Richard Möller, “Mobile network traffic doubled in last two years: Ericsson Mobility Report”, p. 15, June 2022.
- [3] Демидов Н.А. Исследование передачи трафика 3d видеопотока с использованием технологии DWDM // 78-я научно-техническая конференция СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио 24–28 апреля, 2023. С.178-181.
- [4] Демидов Н.А. Некоторые аспекты исследования передачи трафика 3d-видеоизображений // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сб. науч. ст. в 4 т. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция / Под. ред. С.И. Макаренко; сост. В.С. Елагин, Е.А. Аникевич. СПб.: СПбГУТ, 2023. Т. 1. С. 389-394.
- [5] Коваленко В.Н., Мутханна А.С.А. Перспективные технологии для снижения нагрузки на базовую сеть, применяемые на границе с сетью радиодоступа // 76 Региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «СТУДЕНЧЕСКАЯ ВЕСНА – 2022», 2022. Том 1. С. 67-72.
- [6] Ahmet Cihat Baktir, Atay Ozgovde, Cem Ersoy, How Can Edge Computing Benefit from Software-Defined Networking: A Survey, Use Cases & Future Directions / IEEE Communications Surveys & Tutorials June 2017.
- [7] Ateya A.A., Muthanna A., Gudkova I., Abuarqoub A., Vybornova A., Koucheryavy A. Development of Intelligent Core Network for Tactile Internet and Future Smart Systems // Journal of Sensor and Actuator Networks. 2018. Vol. 7. Iss. 1.
- [8] A. Ateya, A. Muthanna and A. Koucheryavy, 5G framework based on multi-level edge computing with D2D enabled communication // In 2018 20th international conference on advanced communication technology (ICACT), pp. 507–512. IEEE, 2018
- [9] Aleksandar Bahtovski, Marjan Gusev, Cloudlet Challenges // 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013, pp. 704–711.
- [10] V. Nikolayevich, A. Alzaghir, A. Volkov, A. Muthanna, A. Koucheryavy, Clustering algorithms for UAV placement in 5G and Beyond Networks // 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). DOI:10.1109/ICUMT51630.2020.9222415
- [11] Волков А.Н., Коваленко В.Н., Мутханна А.С.А., Родакова А.О., Система распределенных вычислений на основе летающего сегмента сети, глубоко имплементированного в архитектуру сетей связи 5g/imt-2020 и сетей 2030 // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. X Юбилейная Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. 2021. Т. 5. С. 403-408.
- [12] Jeong S. Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimization of bit allocation and path planning / S. Jeong, O. Simeone, J. Kang // IEEE Trans. Veh. Technol., 2018. vol. 67, no. 3. P. 2049–2063.
- [13] Jeong S. Mobile cloud computing with a UAV-mounted cloudlet: optimal bit allocation for communication and computation / S. Jeong, O. Simeone, and J. Kang // IET Commun., 2017, vol. 11, no. 7. P. 969–974.