



## ТРЕХМЕРНЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ГЕТЕРОГЕННЫЕ СВЕРХПЛОТНЫЕ СЕТИ

**А. Е. КучерявыЙ<sup>\*</sup>, А. И. Парамонов, М. А. Маколкина,  
А. С. А. Мутханна, А. И. Выборнова, Р. А. Дунайцев,  
М. В. Захаров, Л. С. Горбачева, З. Т. Чан, А. В. Марочкина**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, 193232, Российской Федерации

\*Адрес для переписки: akouch@mail.ru

**Аннотация**—Развитие сетей связи ставит все новые задачи в области дальнейших научных исследований. При этом одним из основных направлений развития является создание высокоплотных и сверхплотных сетей. Сверхплотные сети относятся уже к технологиям сетей связи шестого поколения и требования к ним формируются в условиях их развертывания в трехмерном пространстве. Начиная с построения сетей связи пятого поколения, сети связи рассматриваются как гетерогенные, в которых в процессе предоставления услуг сетей могут совместно использоваться различные технологии, например, Интернета Вещей, беспилотных летательных аппаратов, автомобильных сетей и т. д. Это приводит к необходимости определения и исследования трехмерных многослойных гетерогенных сверхплотных сетей, чему и посвящена настоящая статья.

**Ключевые слова**—сети связи шестого поколения, трехмерные сети, сети сверхвысокой плотности, сети беспилотных летательных аппаратов, автомобильные сети, модельная сеть, связность.

### Информация о статье

УДК 004.7

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 26.11.2022, принята к печати 20.12.2022.

**Ссылка для цитирования:** КучерявыЙ А. Е., Парамонов А. И., Маколкина М. А., Мутханна А. С. А., Выборнова А. И., Дунайцев Р. А., Захаров М. В., Горбачева Л. С., Чан З. Т., Марочкина А. В. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 3. С. 1–12. DOI 10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12.



### 3 DIMENSION MULTILAYER HETEROGENOUS ULTRA DENSE NETWORKS

**A. Koucheryavy\*, A. Paramonov, A. Makolkina,  
A. S. A. Muthanna, A. Vybornova, R. Dunaytsev,  
M. Zaharov, L. Gorbacheva, D. T. Tran,  
A. Marochkina**

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\*Corresponding author: akouch@mail.ru

**Abstract**—The development of communication networks poses new challenges in the field of scientific research. At the same time, one of the main directions of development is the creation of high-density and ultra-dense networks. Ultra-dense networks already belong to the technologies of communication networks of the sixth generation and the requirements for them are formed in the conditions of their deployment in three-dimensional space. Starting with the construction of fifth generation communication networks, communication networks are considered as heterogeneous, in which various technologies can be used together in the process of providing network services, for example, the Internet of Things, unmanned aerial vehicles, vehicular ad hoc networks, etc. This leads to the need to define and study three-dimensional multi-layer heterogeneous ultra-dense networks, which is the subject of this article.

**Keywords**—6G networks, 3D networks, ultra high-density networks, unmanned aerial vehicle networks, vehicular ad hoc networks, model network, connectivity.

#### Article info

Article in Russia.

Received 26.11.2022, accepted 20.12.2022.

**For citation:** Koucheryavy A., Paramonov A., Makolkina A., Muthanna A. S. A., Vybornova A., Dunaytsev R., Zaharov M., Gorbacheva L., Tran D. T., Marochkina A.: 3 Dimension Multilayer Heterogenous Ultra Dense Networks // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 3. pp. 1–12. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-3-1-12.



## Введение

Появление высокоплотных сетей на этапе создания сетей связи пятого поколения [1, 2], как правило, связывают с концепцией Интернета Вещей [3, 4]. Действительно, число вещей может измеряться триллионами [5], что и приводит к появлению высокоплотных сетей. Такие сети потребовали новых методик планирования, и они были созданы на основе предложенных в работах [6, 7, 8] методов использования фрактальных фигур для представления структуры высокоплотных сетей.

Переход к сетям шестого поколения предполагает еще большее увеличение плотности сети до 100 устройств на кубический метр [9]. Такие сети называются сверхплотными и для разработки научно-обоснованных методик их планирования необходимо понимание архитектуры и функционирования этих сетей в трехмерном пространстве. Мало того, поскольку сети являются гетерогенными [10], наибольший интерес представляет совместное применение разнообразных сетей в трехмерном пространстве, что и является предметом исследований настоящей статьи.

## Архитектура трехмерной многослойной гетерогенной сверхплотной сети

В общем случае число слоев трехмерной многослойной сверхплотной сети может быть равно  $K$ , где  $K = 1, 2, \dots, n - 1, n$ . При этом будем считать, что даже если сверхплотным является только один слой, такую многослойную сеть будем относить к многослойным сверхплотным сетям, поскольку для ее планирования потребуется использовать методы планирования сверхплотных сетей. Любой из слоев сети может быть реализован на базе одной из современных технологий телекоммуникаций, например, устройствах Интернета Вещей (ИВ), беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) [11, 12], сетях автомобильного транспорта VANET (*Vehicular Ad Hoc Networks*) [13, 14] и т. д.

На рис. 1 изображен пример трехмерной многослойной гетерогенной сверхплотной сети. Отметим, что для общего случая целесообразно учитывать и то, что отдельные слои такой сети могут быть и двумерными, что отмечено на рисунке наличием двумерной автомобильной сети. Рассмотрим задачу обеспечения связности кластера сети ИВ, размещенного в объеме, ограниченном кубом со стороной  $a$ , посредством использования транзитного узла, размещенного на БПЛА с другими кластерами сети. При относительно малых значениях  $a$  все узлы кластера оказываются в зоне связи друг друга. Мы можем предположить, что другие кластеры аналогичны рассматриваемому и расстояние между ними превышает дальность связи узлов.

Такое распределение узлов характерно, например, для случая, когда узлы расположены в зданиях городской застройки и плотность узлов в них велика, а между зданиями узлы отсутствуют или их плотность мала из-за того, что узлы размещаются лишь на поверхности земли.

Задача состоит в обеспечении связности сети не только между узами одного кластера, но и между узами различных кластеров.



Модель распределения узлов сети в таком случае можно описать точечными процессами Гиббса [15]. Эти процессы используются для моделирования событий, для которых характерно взаимное «отталкивание». Частными случаями этого процесса могут быть, например, процесс твердого ядра и процесс Штрасуса [15]. Процесс твердого ядра основан на выборе заданной функции распределения, если расстояние между заданной точкой и ближайшим событием превышает заданную минимальную величину, в противном случае вероятность появления события равна нулю.

Граф сети в таком случае не будет связным, а будет содержать множество связных компонент, соответствующих множествам узлов, ограниченных в пространстве кубом.

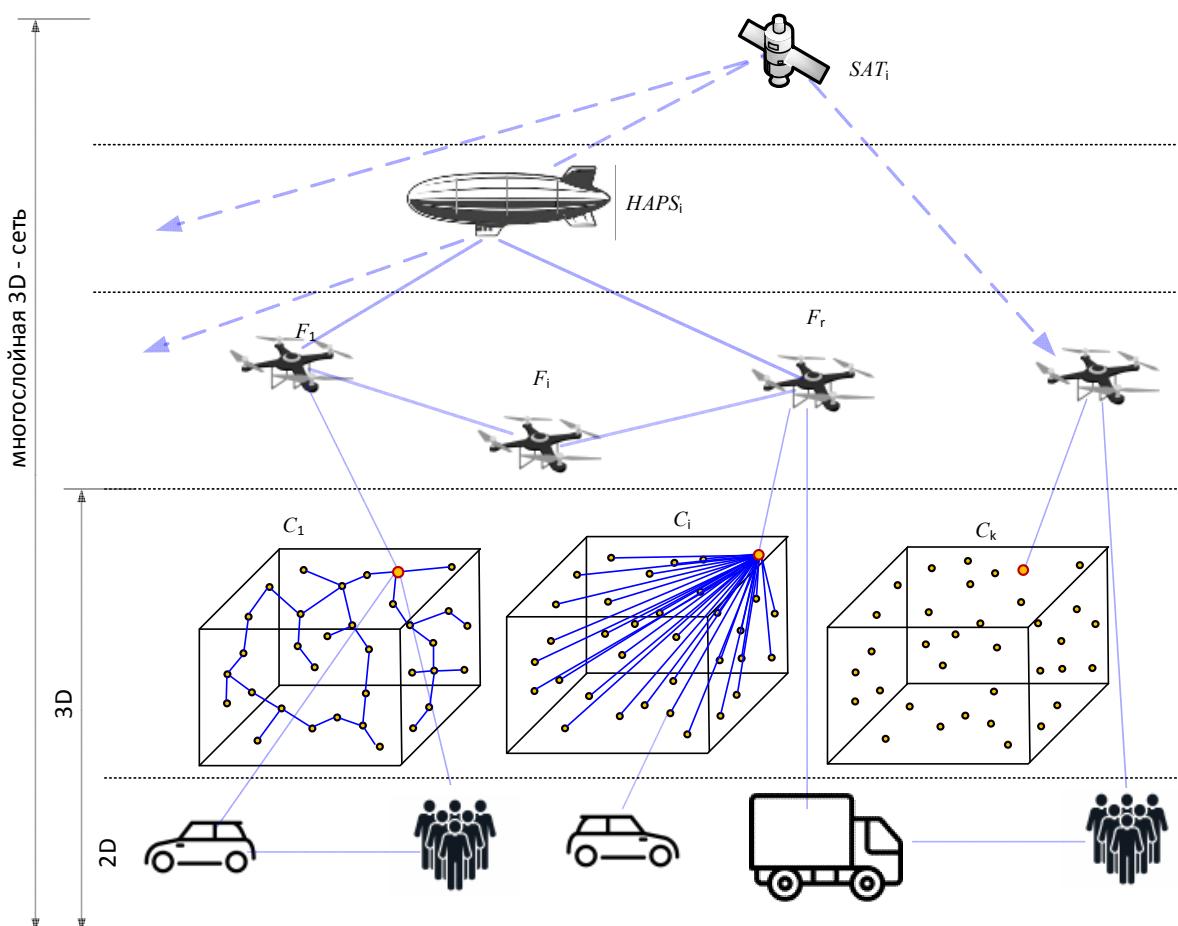


Рис. 1. Модель многослойной сети Интернета Вещей

Связность сети в пределах кластера можно описать как показано в [16]. Характеристики маршрутов в такой сети будут зависеть от геометрических особенностей, т. е. трехмерной фигуры, ограничивающей кластер сети. Так, для данного примера, нахождение функции распределения расстояний между узлами в области, ограниченной параллелепипедом, представлено, например, в [17]. Там же получено и точное выражение для средней величины расстояния. Полученные в [17] точные выражения для функции распределения и средней величины весьма громоздки, что затрудняет их использование для анализа. В случае



единичного куба выражение для функции распределения упрощается до вида [18, 19]:

$$P(l) = \begin{cases} -l^2[(l-8)l^2 + \pi(6l-4)] & 0 \leq l \leq 1 \\ 2l\left[\left(l^2 - 8\sqrt{l^2 - 1} + 3\right)^2 - 4\sqrt{l^2 - 1} + 12l^2 \sec^{-1} l + \pi(3 - 4l) - \frac{1}{2}\right] & 1 < l \leq \sqrt{2} \\ l\left[(1+l^2)\left(6\pi + 8\sqrt{l^2 - 2} - 5 - l^2\right) - 16l \csc^{-1}\left(\sqrt{2 - 2l^2}\right) + 16l \tan^{-1}\left(l\sqrt{l^2 - 2}\right) - 24(l^2 + 1) \tan^{-1}\left(\sqrt{l^2 - 2}\right)\right] & \sqrt{2} < l \leq \sqrt{3} \end{cases} \quad (1)$$

В случае единичного куба выражение для средней длины приводится к известному виду и его значение равно константе Роббинса  $\Delta(3)$  [2] (приблизительно 0,66).

$$\Delta(3) = \frac{1}{105} [4 + 17\sqrt{2} - 6\sqrt{3} + 21\ln(1 + \sqrt{2}) + 42\ln(2 + \sqrt{3}) - 7\pi] \approx 0,66170\dots \quad (2)$$

Используя данную константу, можно оценить теоретическое значение среднего расстояния между узлами в рассматриваемой области, которое составляет 33,1 м. Даже в виде (1) выражение функции распределения довольно сложно для практического применения. Оценим возможность более простого описания распределения расстояния между узлами с помощью имитационного моделирования. На рис. 2 приведена гистограмма, полученная в результате имитационного моделирования. При этом оценивалось среднее расстояние от узлов кластера до головного узла (ГУ). Эта оценка совпадает с приведенной выше при случайном расположении ГУ в пределах куба. Однако такое его размещение не всегда оправдано. Среднее расстояние будет зависеть от выбора точки расположения головного узла.

Минимальная величина среднего расстояния будет иметь место при расположении ГУ в центре куба (24,43 м), а максимальная - при расположении в каком-либо из его углов (48,17 м), соответствующие распределения приведены на рис. 2а и 2б. Эти значения следует учитывать при организации связи в пределах кластера. Для приводимого примера расстояния между узлами лежат в пределах зоны связи, что позволяет организовать в пределах куба один кластер.

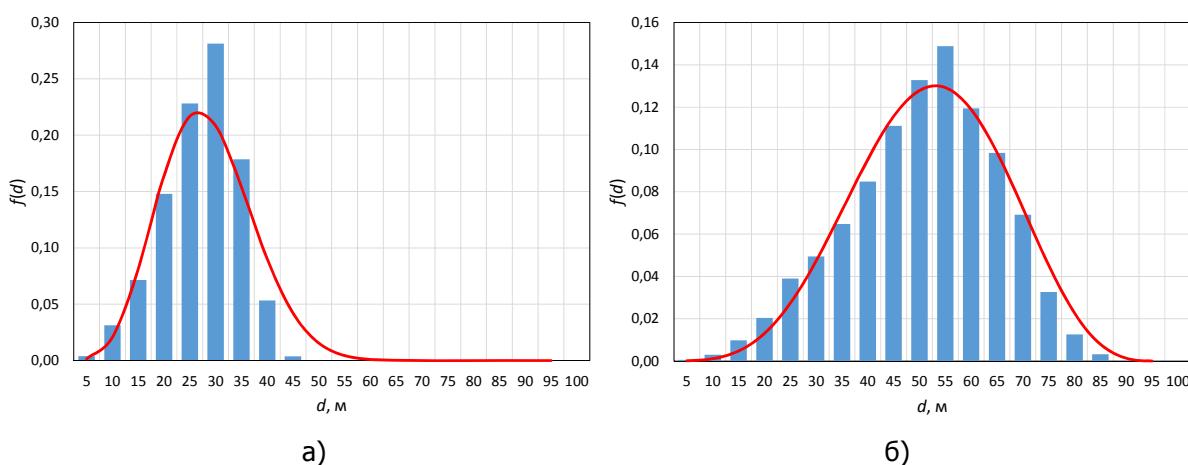


Рис. 2. Плотности вероятности расстояний между узлами кластера и головным узлом при размещении его в центре куба (а), в углу куба (б)

Отметим, что максимально возможное расстояние между узлами кластера будет определяться длиной диагонали куба, т. е.  $d_{\max} = a\sqrt{3}$ . Для приводимого примера ГУ должен находиться по возможности ближе к БПЛА, т. е. на верхнем ребре куба или в его углу. Тогда расстояния от него до узлов кластера будут лежать в границах, определяемых распределениями, приведенными на рис. 2.

На рис. 2а и 2б приведены аппроксимации эмпирических распределений  $\beta$ -распределением вида

$$f(d) = \frac{d^{\alpha-1} (1-d)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, \quad (3)$$

где  $B(\alpha, \beta)$  – бета-функция,  $\alpha, \beta$  – параметры распределения.

При большом количестве узлов и нескольких кластерах целесообразна организация иерархической структуры, т. е. выделения одного или нескольких головных узлов кластера, которые будут выполнять роль транзитных узлов при организации связи с узлами другого уровня. Выбор этих узлов решает задачу повышения эффективности использования сетевых ресурсов благодаря систематизации обмена данными, например, обмена данными по инициативе головных узлов, что снижает вероятность коллизий из-за асинхронной работы отдельных узлов сети.

Выбор головных узлов в данной задаче также решает задачу обеспечения связности сети, т. е. связи с узлами другого уровня (узлами, размещенными на БПЛА). При моделировании сети графом головные узлы, как и узлы, размещенные на БПЛА, являются шарнирами, т. е. узлами, связывающими компоненты графа.

Для их выбора, в частности, может быть использован метод, предложенный в [20].

Идея этого метода состоит в том, что сеть описывают моделью полносвязного неориентированного графа. В модели графа требуется найти все компо-



ненты (несвязные подсети). В рамках рассматриваемого примера такие компоненты будут образованы кластерами, сосредоточенными в ограниченных объемах  $C_1, \dots, C_k$ . Для этой цели можно использовать алгоритмы поиска минимального остова графа. Из найденного остова исключаются ребра, длина которых превышает радиус связи узла кластеров  $C_1, \dots, C_k$ . При наличии таких ребер будет получено несколько компонент графа, в данном примере соответствующих  $C_1, \dots, C_k$ . Узлы, которые были соединены исключенными ребрами, являются шарнирами графа. Для обеспечения связности сети необходимо получить связность шарниров минимальным количеством БПЛА.

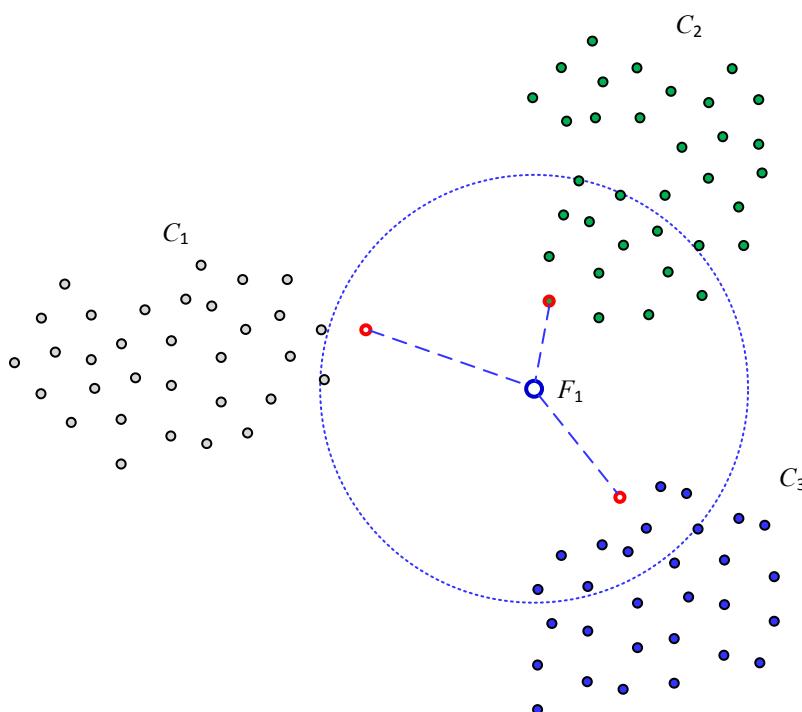


Рис. 3. Обеспечение связности между кластерами сети

Связность шарниров может быть обеспечена одним или несколькими БПЛА в зависимости от их расположения. При обеспечении связности желательно минимизировать количество используемых БПЛА.

Целью выбора точек размещения БПЛА является обеспечение связности шарниров. В [20] показано, что для этого может быть использован алгоритм кластеризации FOREL. Этим алгоритмом производится попытка найти центры возможных групп (кластеров), состоящих из шарниров, связность которых может быть обеспечена одним БПЛА. Если есть кластеры, содержащие только по одной вершине (одному шарниру), то расстояние между этим и другими шарнирами превышает радиус зоны связи БПЛА. В таком случае может быть использован следующий уровень сети, т. е. использована комбинация БПЛА и летательного аппарата с большей дальностью связи, например, HASP.

На следующем уровне сети могут быть элементы, размещенные на космических платформах. Этот уровень предназначен для обеспечения связности между «нижними» элементами предыдущего уровня, т. е. между HASP. Не исключается



возможность взаимодействия между элементами различных уровней, минуя промежуточные уровни. Количество уровней определяется целесообразностью их применения для решения конкретной задачи.

### **Модельная сеть для исследований, обучения и тестирования трехмерных многослойных сверхплотных сетей**

В лабораториях кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ построена модельная сеть для исследования, обучения и тестирования в области трехмерных трехслойных гетерогенных сверхплотных сетей.

Архитектура разработанной модельной сети представлена на рис. 4.

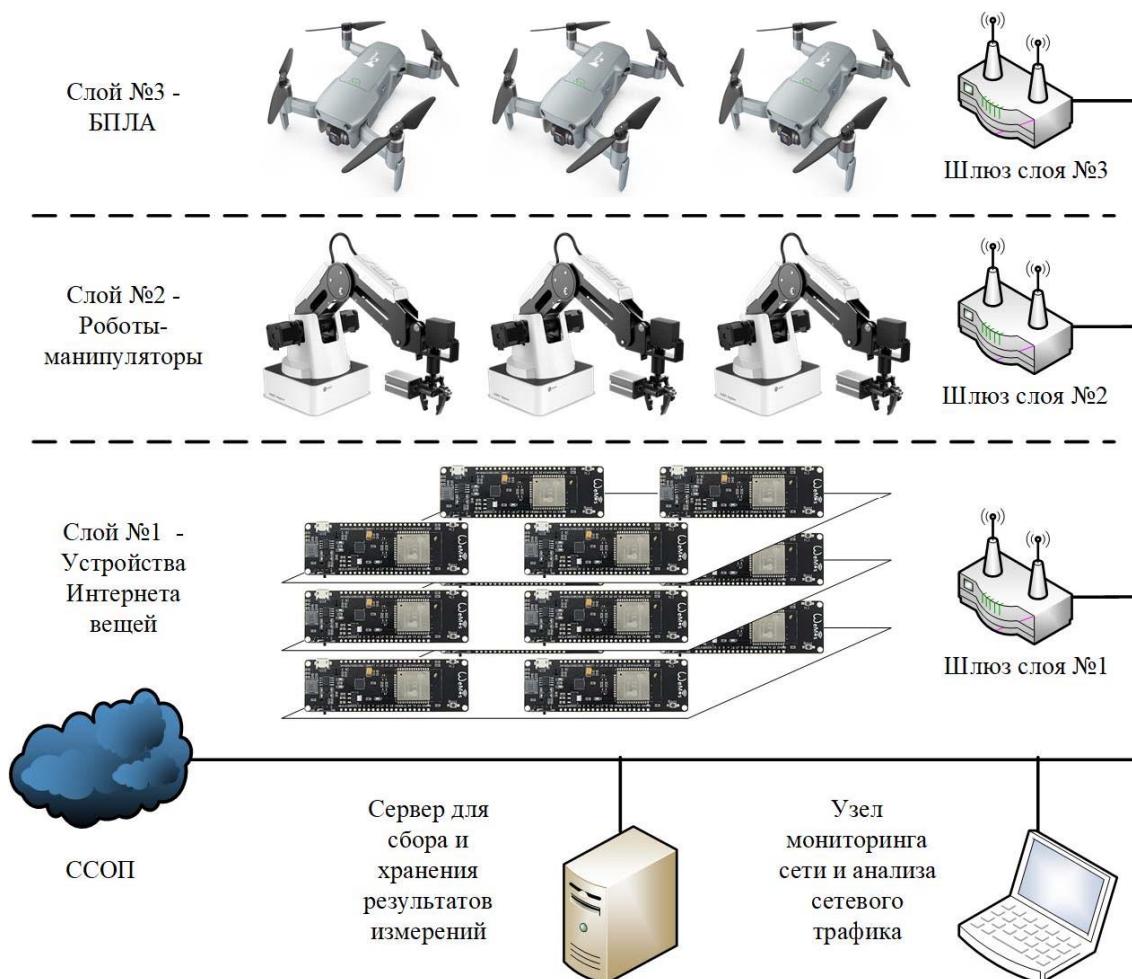


Рис. 4. Архитектура модельной сети

В качестве узлов первого слоя используются Интернет вещи WeMos на базе микроконтроллера ESP32. Интернет вещи снабжены различными типами сенсоров для сбора информации из окружающего мира и объединены в mesh-сеть.

В качестве второго слоя используются роботизированные программно-управляемые манипуляторы Dobot Magician. Централизованное управление с помощью специализированного программного обеспечения реализовано на базе сервера.



В качестве третьего слоя модельной сети используются БПЛА (квадрокоптеры) X-Hubsan Ace Pro, перемещением которых управляют операторы или программное обеспечение согласно заранее определенных маршрутов. БПЛА обеспечивают требуемую связность и надежность модельной сети.

Кроме того, для проведения исследований в архитектуре трехслойной модельной сети для каждого из слоев предусмотрены гетерогенные семантические шлюзы, которые обеспечивают резервные каналы связи и устойчивость сети, например, при проведении нагрузочного тестирования. Узел мониторинга сети и анализа сетевого трафика во взаимодействии с гетерогенными шлюзами обеспечивает мониторинг ключевых параметров работы сети при проведении исследований, а также перехват и последующий анализ генерируемого сетевого трафика. Сервер обеспечивает работу соответствующего программного обеспечения и долгосрочное хранение результатов измерений.

## Выводы

1. Начало исследований в области сетей связи шестого поколения требует перехода к исследованиям сетей в трехмерном пространстве, поскольку нормирование плотности устройств в сверхплотных сетях 6G осуществляется в объеме.

2. В статье введено понятие трехмерных многослойных гетерогенных сверхплотных сетей, предложены архитектурные решения для таких сетей, а также исследованы характеристики связности на примере многослойной гетерогенной сверхплотной сети.

3. Представлены архитектура, состав и возможности модельной сети для исследования, обучения и тестирования в области трехмерных трехслойных гетерогенных сверхплотных сетей, созданной в лабораториях кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

## Литература

1. Бутенко В., Веерпалу В., Девяткин Е., Федоров Д. Сети 5G/IMT-2020&IoT – основа цифровой трансформации // Электросвязь. 2018. № 12. С. 4–9.
2. Бородин А. С., Кучеряный А. Е. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики // Электросвязь. 2017. № 5. С. 45–49.
3. Кучеряный А. Е., Прокопьев А. В., Кучеряный Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич, 2011. 312 с.
4. Кучеряный А. Е. Интернет Вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21–24.
5. Кучеряный А. Е. Триллионные сети // Телекоммуникации. 2013. № 7. С. 19–22.
6. Тонких Е. В., Парамонов А. И., Кучеряный А. Е. Планирование структуры сети интернета вещей с использованием фракталов // Электросвязь. 2021. № 4. С. 55–62.
7. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Издательство компьютерных исследований, 2002. 665 с.
8. Морозов А. Д. Введение в теорию фракталов. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 160 с.
9. Leppanen K., Latva-aho M. Key Drivers and Research Challenges for 6G // Fifth ITU Workshop on Network 2030. Geneva, Switzerland, 14–16 October, 2019. URL: <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2019101416/Pages/programme.aspx>
10. Andreev S, Gerasimenko M., Galinina O., Koucheryavy Y., Himayat N., Yeh S.-P., Talwar S. Intelligent Access Network Selection in Converged Multi-Radio Heterogeneous Networks // IEEE Wireless Communications. V. 21, № 6, pp. 86–96.



- 11.Kirichek R., Paramonov A., Koucheryavy A. Swarm of public unmanned aerial vehicles as a queuing network // Communications in Computer and Information Science, 2016, Vol. 601, pp. 111–120.
- 12.Dao N., Koucheryavy A., Paramonov A. Analysis of Routes in the Network based on a Swarm of UAVS // Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016, Vol. 376, pp. 1261–1271.
- 13.Vladyko A., Khakimov A., Muthanna A., Ateya A.A., Koucheryavy, A. Distributed Edge Computing to Assist Ultra-Low-Latency VANET Applications // Future Internet, 2019, vol. 11, iss. 6, pp. 128.
- 14.Владыко А. Г., Мутханна А. С., Кучерявый А. Е. Метод выгрузки трафика в V2X/5G сетях на основе системы граничных вычислений // Электросвязь. 2020. № 8. С. 64–70.
- 15.Daley, D. & Vere-Jones, David. (2003). An introduction to the theory of point processes. Vol. I: Elementary theory and methods. 2nd ed. Vol. 1. 10.1007/b97277.
- 16.Дао Ч. Н., Парамонов А. И. Анализ структуры сетей связи на базе беспилотных летательных аппаратов // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016). Материалы 19-й международной научной конференции: в 3 т. / Под общей редакцией В. М. Вишневского и К. Е. Самуилова. М., 2016. С. 92–100.
- 17.Koucheryavy A., Vladyko A., Kirichek R. State of the Art and Research Challenges for Public Flying Ubiquitous Sensor Networks // The 15th International Conference on Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2015. LNCS, Springer, Heidelberg, 2015.
- 18.Sahingoz O. K. Networking Model in Flying Ad Hoc Networks (FANETs): Concepts and Challenges // Journal of Intelligent Robotics Systems. V.74, issue 1-2, Springer, 2014.
- 19.Rosario D., Zhao Z., Braun T., Cerqueira E., Santos A. A Comparative Analysis of Beaconless Opportunistic Routing Protocols for Video Dissemination over Flying Ad-hoc Networks // The 14th International Conference on Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2014. LNCS 8638, Springer, Heidelberg, 2014.
- 20.Нуриллоев И. Н., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Метод оценки и обеспечения связности беспроводной сенсорной сети // Электросвязь. 2017. № 7. С. 39–44.

## References

1. Butenko V., Veerpalu V., Devyatkin E., Fedorov D. Seti 5G/IMT-2020&IoT – osnova cifrovoj transformacii // Electrosvyaz. 2018. N 12. pp. 4–9.
2. Volkov A., Muthanna A., Koucheryavy A. Fifth generation communication networks: on the way to networks 2030 // Electrosvyaz. 2017. N 5. pp. 45–49.
3. Kucheryavyj A. E., Prokop'ev A. V., Kucheryavyj E. A. Samoorganizuyushchiesya seti. SPb.: Lyubavich, 2011. 312 s.
4. Kucheryavyj A. E. Internet Veshchej // Electrosvyaz. 2013. N 1. pp. 21–24.
5. Kucheryavyj A. E. Trillionnye seti // Telekommunikacii. 2013. N 7. pp. 19–22.
6. Tonkikh E. V., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Modeling the network structure of the IoT using fractals // Electrosvyaz. 2021. N 4. pp. 55–62.
7. Mandel'brot B. Fraktal'naya geometriya prirody. M.: Izdatel'stvo komp'yuternyh issledovanij, 2002. 665 s.
8. Morozov A. D. Vvedenie v teoriyu fraktalov. Moskva-Izhevsk: Institut komp'yuternyh issledovanij, 2002. 160 s.
9. Leppanen K., Latva-aho M. Key Drivers and Research Challenges for 6G // Fifth ITU Workshop on Network 2030. Geneva, Switzerland, 14–16 October, 2019. URL: <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2019101416/Pages/programme.aspx>
- 10.Andreev S, Gerasimenko M., Galinina O., Koucheryavy Y., Himayat N., Yeh S.-P., Talwar S. Intelligent Access Network Selection in Converged Multi-Radio Heterogeneous Networks // IEEE Wireless Communications. V. 21, № 6, pp. 86–96.
- 11.Kirichek R., Paramonov A., Koucheryavy A. Swarm of public unmanned aerial vehicles as a queuing network // Communications in Computer and Information Science, 2016, Vol. 601, pp. 111–120.
- 12.Dao N., Koucheryavy A., Paramonov A. Analysis of Routes in the Network based on a Swarm of UAVS // Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016, Vol. 376, pp. 1261–1271.



- 13.Vladyko A., Khakimov A., Muthanna A., Ateya A.A., Koucheryavy, A. Distributed Edge Computing to Assist Ultra-Low-Latency VANET Applications // Future Internet, 2019, vol. 11, iss. 6, pp. 128.
- 14.Vladyko A. G., Muthanna A. S., Koucheryavy A. Eu. Traffic offloading method for V2X/5G networks based on the edge computing system // Electrosvyaz. 2020. N 8. pp. 64–70.
- 15.Daley, D. & Vere-Jones, David. (2003). An introduction to the theory of point processes. Vol. I: Elementary theory and methods. 2nd ed. Vol. 1. 10.1007/b97277.
- 16.Dao CH. N., Paramonov A. I. Analiz struktury setej svyazi na baze bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Raspredelenyye komp'yuternye i telekommunikacionnye seti: upravlenie, vychislenie, svyaz' (DCCN-2016). Materialy 19-j mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii: v 3 t. / Pod obshchej redakciej V. M. Vishnevskogo i K. E. Samujlova. M., 2016. pp. 92–100.
- 17.Koucheryvy A., Vladyko A., Kirichek R. State of the Art and Research Challenges for Public Flying Ubiquitous Sensor Networks // The 15th International Conference on Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2015. LNCS, Springer, Heidelberg, 2015.
- 18.Sahingoz O. K. Networking Model in Flying Ad Hoc Networks (FANETs): Concepts and Challenges // Journal of Intelligent Robotics Systems. V. 74, issue 1-2, Springer, 2014.
- 19.Rosario D., Zhao Z., Braun T., Cerqueira E., Santos A. A Comparative Analysis of Beaconless Opportunistic Routing Protocols for Video Dissemination over Flying Ad-hoc Networks // The 14th International Conference on Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2014. LNCS 8638, Springer, Heidelberg, 2014.
- 20.Nurilloev I. N., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Method of estimation and maintenance of connectivity of the wireless sensor network // Electrosvyaz. 2017. N 7. pp. 39–44.

**Кучерявый Андрей Евгеньевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [akouch@mail.ru](mailto:akouch@mail.ru)

**Парамонов Александр Иванович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [alex-in-spb@yandex.ru](mailto:alex-in-spb@yandex.ru)

**Маколкина Мария Александровна**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [makolkina@list.ru](mailto:makolkina@list.ru)

**Мутханна Аммар Салех Али**

кандидат технических наук, доцент кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [ammarexpress@gmail.com](mailto:ammarexpress@gmail.com)

**Выборнова Анастасия Игоревна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [a.vybornova@gmail.com](mailto:a.vybornova@gmail.com)

**Дунайцев Роман Альбертович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [roman.dunaytsev@mail.ru](mailto:roman.dunaytsev@mail.ru)

**Koucheryavy Andrey E.**

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Head of the Department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, [akouch@mail.ru](mailto:akouch@mail.ru)

**Paramonov Alexander I.**

Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor at the Department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, [alex-in-spb@yandex.ru](mailto:alex-in-spb@yandex.ru)

**Makolkina Mariya A.**

Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor at the Department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, [makolkina@list.ru](mailto:makolkina@list.ru)

**Muthanna Ammar S.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, [ammarexpress@gmail.com](mailto:ammarexpress@gmail.com)

**Vybornova Anastasija I.**

Candidate of Engineering Sciences, assistant professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, [a.vybornova@gmail.com](mailto:a.vybornova@gmail.com)

**Dunaytscev Roman A.**

Candidate of Engineering Sciences, assistant professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, [roman.dunaytsev@mail.ru](mailto:roman.dunaytsev@mail.ru)

**Захаров Максим Валерьевич**

старший преподаватель кафедры  
Санкт-Петербургского государственного университета  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
[max\\_z.93@mail.ru](mailto:max_z.93@mail.ru)

**Zaharov Maxim V.**

Senior Lecturer at the Department,  
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University  
of Telecommunications, [max\\_z.93@mail.ru](mailto:max_z.93@mail.ru)

**Горбачева Любовь Сергеевна**

ассистент Санкт-Петербургского государственного  
университета телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [77qls@mail.ru](mailto:77qls@mail.ru)

**Gorbacheva Lyubov S.**

Assistant, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State  
University of Telecommunications, [77qls@mail.ru](mailto:77qls@mail.ru)

**Чан Зыонг Тунг**

аспирант Санкт-Петербургского государственного  
университета телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

**Tran D. T.**

Postgraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg  
State University of Telecommunications

**Марочкина Анастасия Вячеславовна**

аспирант Санкт-Петербургского государственного  
университета телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [anastasiy1996@mail.ru](mailto:anastasiy1996@mail.ru)

**Marochkina Anastasiya V.**

Postgraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg  
State University of Telecommunications,  
[anastasiy1996@mail.ru](mailto:anastasiy1996@mail.ru)