

Применение теории гиперграфов для решения задачи оптимизации производительности сетей в гражданской авиации

В.М. Антонова^{*,**}, К.А. Балакин^{*}, Н.А. Гречишкина^{**}, Д.С. Клыгин^{**},
Н.А. Кузнецов^{**}

^{*}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

^{**}Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Поступила в редколлегию 27.10.2021

Аннотация—В статье рассматривается проблема методов передачи и обработки информации сетей пятого поколения для гражданской авиации. Основное внимание уделяется проблеме распределения ресурсов для минимизации межсетевых помех и оптимизации производительности. Показано, что применение теории гиперграфов позволяет решить данную проблему для гражданской авиации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: авиация, гиперграф, 5G

DOI: 10.53921/18195822_2021_21_4_203

1. ВВЕДЕНИЕ

Изначальная концепция развития сетей мобильной связи 5G [1] не рассматривала применение сверхплотных гетерогенных сетей, в частности в сфере гражданской авиации. В виду актуальности авиации, появились различные решения по созданию инфраструктур пятого поколения на борту гражданского самолета, рассмотренные ранее [2]. С развитием данного направления возникли и сложные задачи по эффективному управлению и эксплуатации гетерогенных инфраструктур в сильно меняющихся сетевых условиях. Обеспечение унифицированной координации и управления радиоресурсами, через сосуществующие технологии множественного радиодоступа (multi-RAT), требует эффективного представления с использованием высокоуровневых абстракций характеристик и состояния телекоммуникационной сети. Без таких абстракций пользователи и сети не могут использовать весь потенциал увеличения плотности ресурсов и возможностей подключения, что приведет к неспособности удовлетворить амбиции 5G больших мегаполисов, таких как Москва или другие города с большой плотностью населения. В данной работе была решена проблема обеспечения связи на борту самолета при его посадке и взлете.

2. ГРАЖДАНСКАЯ АВИАЦИЯ И LEO СПУТНИКИ

Повсеместное развитие 5G в мире уже абсолютно точно не обойдется без использования спутниковой связи. Основное преимущество спутников перед наземной сетью – это зона покрытия. Особенно оно выгодно для mMTC – типа услуг с огромным количеством устройств. Группировки обычно организованы на нескольких орбитальных плоскостях, определенных заданной высотой над уровнем моря и наклоном. Зона покрытия спутника определяется как область Земли, где спутник виден на минимально заданном угле подъема. Проход – это период, в который спутник находится над местным горизонтом и доступен для радиосвязи с конкретной

наземной позицией. Из-за их малой высоты спутники LEO не поддерживают фиксированное положение в небе, а быстро перемещаются над поверхностью Земли, с продолжительностью каждого прохода в несколько минут. Как следствие, “плотные” сети необходимы в космическом сегменте, чтобы гарантировать, что любой наземный терминал всегда будет в зоне покрытия, как минимум, одного спутника. Наиболее актуальным считаем применение группировки LEO спутников в гражданской авиации, что и учитывалось в данной работе.

3. ТЕОРИЯ ГИПЕРГРАФА В СВЕРХПЛОТНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ 5G В АВИАЦИИ

Рассмотрим основные понятия теории гиперграфов [3] для их последующего применения в телекоммуникационных сетях пятого поколения.

Определение. Гиперграфом будем называть обобщенный граф, в котором любое подмножество данного множества может быть ребром, но имеет фундаментальное отличие от обычного графа.

Пусть $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ конечный набор. Гиперграф H на V является семейством $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ подмножества V такого, что

$$\bigcup_{i=1}^m e_i = V.$$

Элементы $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – вершины гиперграфа H , а множества $\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – гиперребра гиперграфа. Общий вид гиперграфа и матрицы такой (Рис. 1):

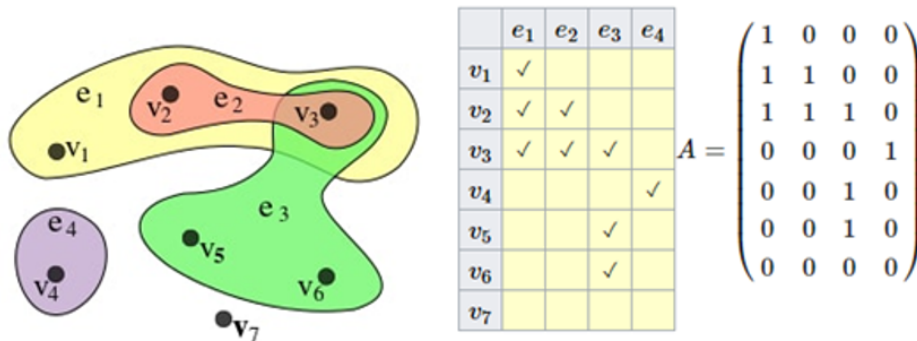


Рис. 1. Гиперграф с множеством вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_7\}$ и гиперребрами $E = \{e_1, e_2, e_3\}, \{e_2, e_3\}, \{e_3, e_5, e_6\}$.

В теории гиперграфа выделяются следующие основные направления: сопоставление гиперграфов [4], раскраска гиперграфов [5] и игра гиперграфов [6]. Их характеристики могут быть резюмированы соответственно следующим образом:

- 1. Сопоставление гиперграфов.** Проблема сопоставления гиперграфов – это сопоставление нескольких измерений, при котором объекты делятся на несколько непересекающихся групп с одним объектом в каждой группе. Поскольку для каждой вершины требуется информация только от соседних вершин в сопоставлении гиперграфов, это распределенный подход.

2. **Раскраска гиперграфа.** Раскраска гиперграфа, возникающая из раскраски карты, широко используется в задачах назначения “многие к одному”, таких как планирование и выделение ресурсов. Для раскраски гиперграфа требуется централизованный узел, который имеет всю информацию о гиперграфе и выбирает цвет для каждой вершины.
3. **Игра с гиперграфом.** Игра с гиперграфом также подходит для решения задач сопоставления “многие к одному”, особенно в тех случаях, когда полезность каждой вершины связана только с вершинами в гиперребрах. В отличие от раскраски гиперграфов, игра с гиперграфами – это распределенный метод, в котором каждая вершина вычисляет полезность посредством обмена информацией между различными вершинами и использует стратегию с наибольшей полезностью.

4. СОПОСТАВЛЕНИЕ ГИПЕРГРАФОВ В CRAN СЕТИ 5G В АВИАЦИИ

Общая тенденция по развёртыванию сетей 5G сводится к использованию централизованного узла, обслуживающего различные базовые станции [7]. В задаче распределения ресурсов для CRAN сети мы предполагаем, что один борт самолета может подключиться только к одной удаленной радиоголовке и ему будет назначен один канал. При этом предположении распределение ресурсов можно сформулировать как трёхмерный гиперграф.

В модели сопоставления гиперграфов мы формулируем пользователей, каналы и удаленные радиоголовки в виде трех непересекающихся групп вершин, а гиперребра указывают отношения между этими вершинами. Таким образом, мы можем найти оптимальное соответствие для распределения каналов [8].

Для сети 5G в авиации можно рассмотреть следующую модель гиперграфа:

- Вершины: пользователи, каналы и удаленные радиоголовки;
- Гиперребра: качество связи удовлетворяет минимальным требованиям;
- Вес: скорость передачи данных;

Данная модель хорошо согласуется с моделью сопоставления гиперграфа [7].

Существует специальный гиперграф, называемый r -равномерным гиперграфом. Если множество вершин разбивается на r непересекающихся подмножеств так, что каждое гиперребро содержит только одну вершину в каждом подмножестве.

Следовательно, задача согласования r -мерного гиперграфа состоит в том, чтобы найти подмножество гиперребер r -однородного взвешенного гиперграфа с максимальным общим весом. В контексте задачи сетей 5G все сводится к простому двойному-однородному гиперграфу, где каждое ребро можно рассматривать как набор из двух базовых станций, которые он соединяет.

Однако задача сопоставления r -однородного гиперграфа является NP-трудной для $r \geq 3$. Таким образом, алгоритм локального поиска [1] используется для эффективного решения проблемы сопоставления гиперграфов. Чтобы облегчить понимание алгоритма локального поиска, требуется сначала ввести важную концепцию графа без клешней (k -claw).

Определение. Для гиперграфа $H = (V, E)$ репрезентативный граф H – это граф $L(H) = (V', E')$, где каждое гиперребро в E представлено вершиной в V' , а пересечение двух гиперребер соответствует ребру в E' . В репрезентативном графе k -claw C_k определяется как подграф $L(H)$, центральная вершина которого соединяется с k независимыми вершинами (когтями) (Рис. 2).

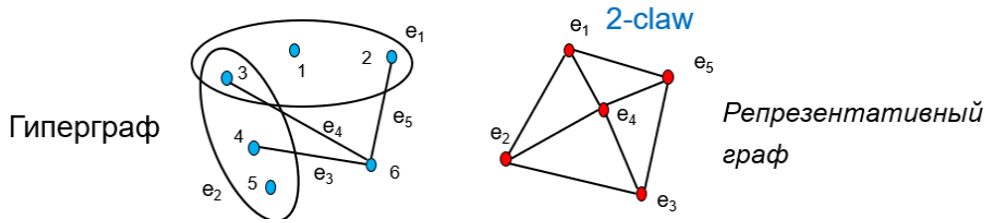


Рис. 2. Граф без клешней

Предположим, что в системе существует M пользователей, K каналов и N удаленных радиоголовок. В модели сопоставления гиперграфов пользователи, каналы и удалённые радиоголовки соответствуют трем непересекающимся подмножествам вершин, а гиперребро подразумевает, что содержащиеся вершины потенциально могут быть сопоставлением. Из-за помех невозможно определить вес на каждом гиперребре, и поэтому мы предлагается использование итерационного алгоритма сопоставления гиперграфов со сложностью $O(MNK(M + N + K)^6)$ для решения этой проблемы в достаточной степени. На каждой итерации каждое гиперребро будет обновлять свой вес, и выбранные гиперребра не могут иметь общую вершину канала, то есть канал может быть сопоставлен с одним пользователем.

Данный алгоритм может быть описан следующим образом (Рис. 3):

Шаг 1. Постройте гиперграф и инициализируйте веса гиперребер. Например, в качестве начального веса мы можем определить скорость передачи данных.

Шаг 2. Примените алгоритм локального поиска [9], чтобы найти сопоставление, которое не имеет общей вершины канала. Кроме того, удалите из гиперграфа те гиперребра, у которых есть те же пользователи, что и в этом сопоставлении.

Шаг 3. Обновите веса гиперребер в соответствии с текущим соответствием. Вес каждого гиперребра определяется как улучшение скорости передачи данных, когда это гиперребро добавляется к текущему сопоставлению. Если улучшение скорости передачи данных отрицательное (скорость передачи данных снижена), это гиперребро удаляется из гиперграфа.

Шаг 4. Повторяйте шаги 2 и 3 до тех пор, пока гиперграф не будет иметь пустой набор гиперребер.

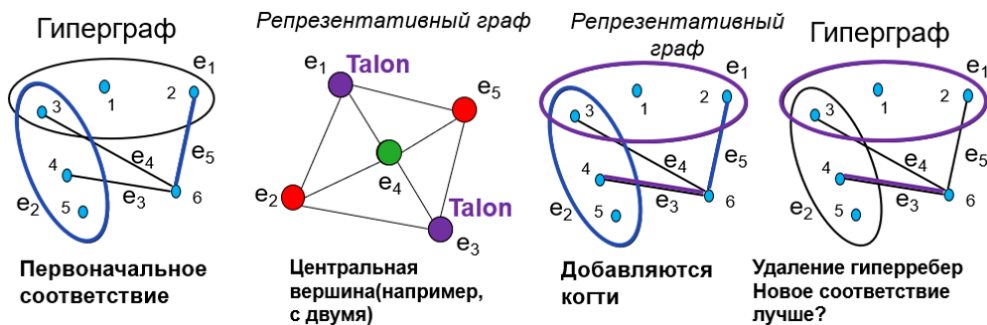


Рис. 3. Алгоритм распределения ресурсов

5. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА СОПОСТАВЛЕНИЕ ГИПЕРГРАФА В АВИАЦИИ

Условия применения алгоритма могут быть описаны следующим образом:

1. Взлётно-посадочная полоса длиной 3 км.
2. Наличие координирующего устройства управления доступов в виде облачной технологии 5G.
3. Самолет перед посадкой/ по окончании взлета подключается к LEO-спутнику.
4. Использование малых сот для обеспечения процесса перехода в зону следующей макросоты.
5. Использование макросот как основной базовой станции передачи данных.
6. Обеспечение работы в процессе перехода между базовыми станциями (handover) на скорости 250 км/ч.

Отдельно стоит отметить зависимость распределения ресурсов с учетом меняющейся скорости борта самолета. Данный параметр не учитывается напрямую, т.к. в качестве веса гиперребер используется скорость соединения, которая, в свою очередь, зависит от скорости передвижающегося объекта, в данном случае – самолёта.

Так же при расчете показательной схемы учитывается факт применения слайсинга [1] для фиксации канала для одного борта самолета.

Схема передвижения самолета на момент посадки может быть представлена следующим образом (Рис. 4):

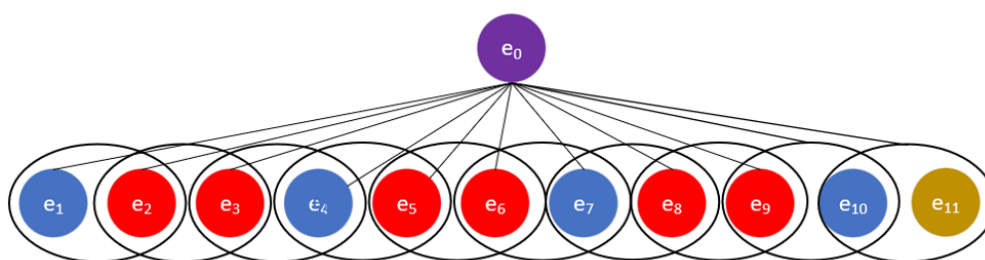


Рис. 4. Multi-RAT 5G сеть во время посадки

Где определены:

1. e_0 – координирующее ядро C-RAN
2. e_1, e_4, e_7, e_{10} – макросоты
3. $e_2, e_3, e_5, e_6, e_8, e_9$ – малые соты
4. e_{11} – LEO спутник

Зададим веса на основании скорости передачи трафика. В начальный момент приземления уже имеется соединение между самолётом e_{12} и спутником e_{11} (Рис. 5).

Согласно алгоритму, удалим вершины не имеющие общих каналов (Рис. 6):

Далее при перемещении самолета и смены базовой станции e_{11} на e_{10} на стыке процесса Handover имеем (Рис. 7):

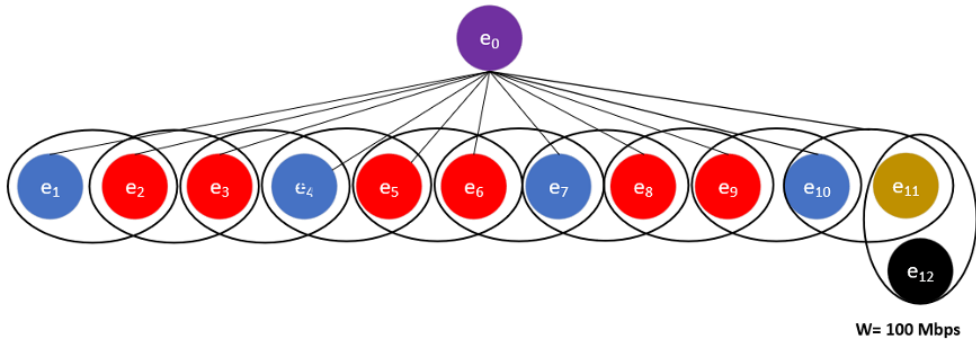


Рис. 5. Соединение между самолетом и базовой станцией в виде LEO спутника

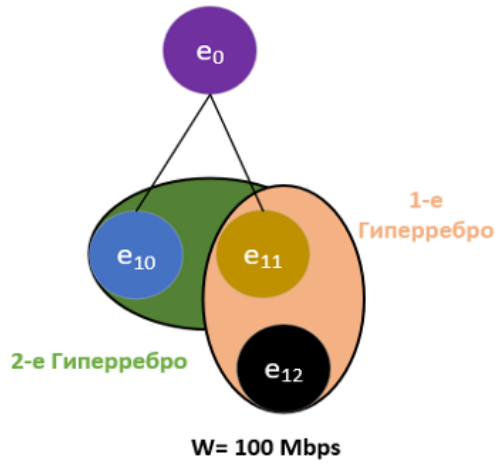


Рис. 6. Применение сопоставления гиперграфа для самолета

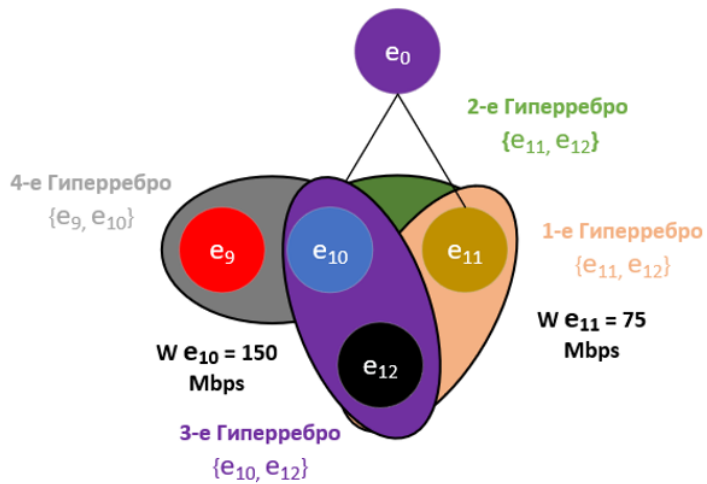


Рис. 7. Гиперграф во время процесса Handover

После окончательной смены базовой станции на e_{10} имеем (Рис. 8):

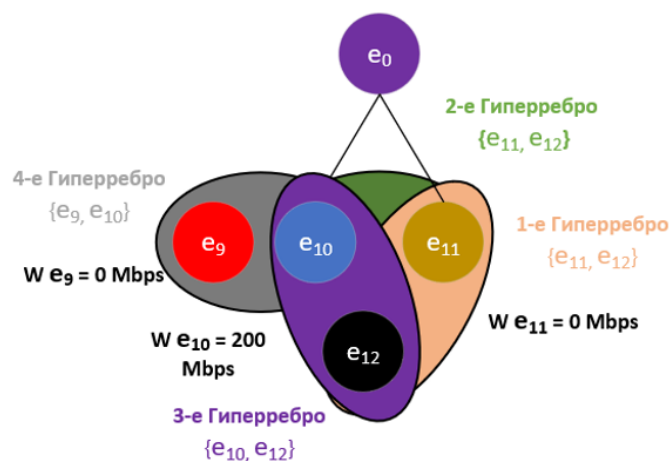


Рис. 8. Гиперграф по окончании процесса Handover

Таким образом алгоритм повторяется до полной остановки самолет на взлетно-посадочной полосе.

Общая зависимость весов (скорости соединения) от расстояния взлетно-посадочной полосы может быть представлена следующим графиком (Рис. 9):

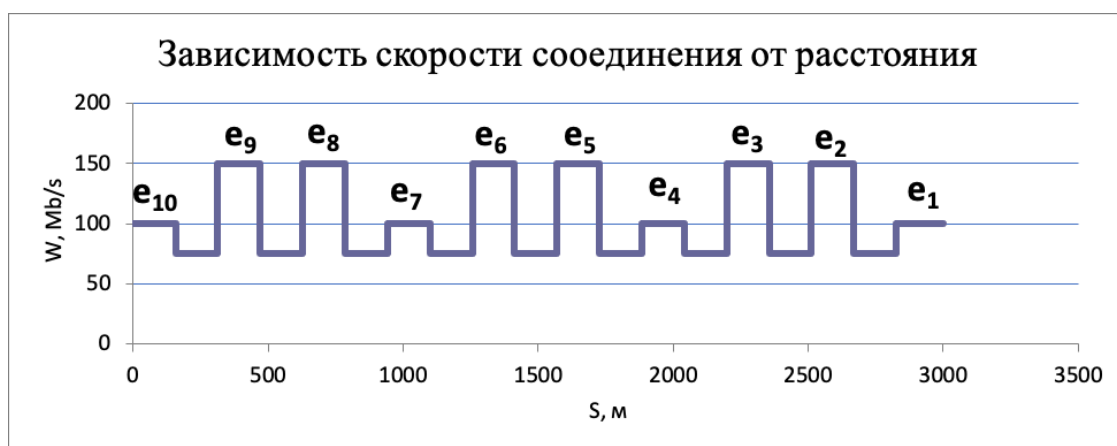


Рис. 9. График зависимости скорости соединения от расстояния

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание новых методов распределения ресурсов для таких технологий, как сети пятого поколения, не является тривиальной задачей и требует достаточно сильного математического аппарата. На наш взгляд, применение теории гиперграфов может стать одним из направлений решения данной проблемы и позволит оптимизировать производительность сетей 5G. Предложенный алгоритм сопоставления гиперграфов в авиации решит проблему гетерогенной сети с облачным управлением. Создание различных алгоритмов на базе раскраски и игры гиперграфов, в теории, может решить проблему распределения ресурсов в таких технология как D2D, отдельных Smallcell и Macrocell.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихвинский В.О., Тереньтев С.В., Коваль В.А. *Сети мобильной связи 5G технологии, архитектура и услуги*. М.: Издательский дом Медиа Паблишер, 2019.
2. Антонова В.М., Клыгин Д.С. О некоторых особенностях построения сетей пятого поколения для гражданской авиации. *Журнал радиоэлектроники* 2021, № 4.
3. Робин Уилсон, *Введение в теорию графов*. М.: МИР, 2019.
4. Song L., Niyato D., Han Z., Hossain E. *Wireless device-to-device communications and networks*, United Kingdom: Cambridge University Press, 2015.
5. Wang L., Huaqing W., Yinan D., Chen W. Hypergraph-based wireless distributed storage optimization for cellular D2D underlays. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, vol. 34, no. 10, pp. 2650–2666.
6. Zhang H., Song L., Zhu H. Radio resource allocation for device-to-device underlay communication using hypergraph theory. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, vol. 15, no. 7, pp. 4852–4861.
7. Новые стандарты связи | Научные сенсации, Наука 2.0.
<https://www.youtube.com/watch?v=2av4mkUy9MM> (Дата обращения 11.10.2021)
8. Zhang, H., Song, L., Han, Z., Zhang, Y. *Hypergraph theory in wireless communication networks*. Beijing: Springer International Publishing, 2018, pp. 3–35
9. Youming S., Wu Q., Xu Y., Zhang Y. Distributed channel access for device-to-device communications: a hypergraph-based learning solution. *IEEE Communications Letters*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 180–183.

Application of the Hypergraphs Theory to Solve the Problem of Optimizing Network Performance in Civil Aviation

V.M. Antonova, K.A. Balakin, N.A. Grechishkina, D.S. Klygin, N.A. Kuznetsov

This article considers the problem of methods for transmitting and processing information from fifth-generation networks for aviation. The main attention is paid to the problem of resource allocation to minimize inter-cellular interference and optimize performance. As a result, it is determined that the application of the hypergraph theory makes it possible to solve this problem in aviation segment.

KEYWORDS: aviation, hypergraph, 5G.