

Исследование алгоритмов группировки пользователей при многоадресной передаче данных в многоантенных системах*

Белогаев А.А.^{1,2}, Литвинов М.Л.^{2,3}, Красилов А.Н.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

² Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

³ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

abelogaev@hse.ru, litvinov.ml@phystech.edu, akrasilov@hse.ru

Аннотация В связи с активной разработкой и развертыванием сотовых сетей пятого поколения (5G) в ближайшем будущем ожидается значительное увеличение объема трафика, генерируемого новыми сервисами, требующими многоадресной доставки данных. Так, например, в сетях интеллектуальных транспортных систем требуется надёжная и своевременная доставка сообщений о ситуации на дороге от базовой станции множеству пользователей. Для повышения емкости сети и надежности доставки данных в сетях 5G предлагается использование на базовой станции множества антенн. Поскольку требования к качеству обслуживания должны быть выполнены для всех пользователей, выбор параметров передачи, как правило, определяется пользователем с наихудшими канальными условиями. При этом с ростом числа пользователей, подписанных на сервис, минимальное отношение сигнал/шум уменьшается, что в свою очередь приводит к увеличению объема потребляемых канальных ресурсов. Одним из возможных способов решения данной проблемы является разбиение пользователей на группы, в каждой из которых отношение сигнал/шум для наихудшего пользователя будет выше, чем в случае одной группы. В данной работе исследуется семейство алгоритмов группировки пользователей, основанных на методе кластеризации K-means. Предложена новая метрика, согласно которой пользователи добавляются в группы (кластеры). С помощью имитационного моделирования в среде NS-3 сравниваются алгоритмы с различными метриками и показано, что использование предложенной метрики позволяет снизить объем потребляемых канальных ресурсов.

* Исследование выполнено в НИУ ВШЭ за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10158, <https://rscf.ru/project/21-79-10158/>

Keywords: 5G, многоадресная передача, прекодинг, группировка пользователей, потребление канальных ресурсов

1 Введение

Сервисы многоадресной передачи данных являются важной частью как современных сотовых сетей, так и сотовых сетей нового поколения (5G) [1]. Среди таких сервисов есть как сервисы широкополосной передачи данных, например, видеотрансляции, так и сервисы, генерирующие ненасыщенный трафик, состоящий из сообщений, которые необходимо доставить множеству абонентов. Примером приложений, предоставляющих последний тип сервиса, являются приложения, доставляющие автономным автомобилям сообщения о ситуации на дороге в интеллектуальных транспортных системах (далее — приложения ИТС). Важнейшим показателем эффективности работы сети для таких приложений является потребление канальных ресурсов, так как от него напрямую зависит емкость сети, т.е. количество различных сервисов, которые могут одновременно обслуживаться сетью [2, 3]. При этом для приложений ИТС должна обеспечиваться высокая вероятность успешной доставки сообщений, поскольку потеря сообщения может привести к аварийной ситуации. Одним из ключевых подходов для увеличения емкости сети и надежности доставки данных в сетях 5G является увеличение мощности принимаемого сигнала за счет использования большого числа антенн (англ.: massive MIMO) на базовой станции.

При выборе параметров многоадресной передачи данных, таких как прекодер (т.е. назначение сигналов и мощности на каждую передающую антенну), назначение частотно-временных ресурсов, сигнально-кодовая конструкция (СКК), необходимо учитывать, что различные пользователи находятся в разных канальных условиях, а требования к качеству обслуживания необходимо выполнить для всех пользователей. Поэтому для приложений ИТС выбор параметров передачи определяется пользователем с наихудшими канальными условиями, т.е. отношением сигнал/шум, поскольку в противном случае высока вероятность невыполнения требований к качеству обслуживания для этого пользователя [4, 5]. В данной работе мы полагаем, что прекодер выбирается таким образом, чтобы максимизировать минимальное среди всех пользователей отношение сигнал/шум, после чего выбор СКК и частотно-временных ресурсов осуществляется для пользователя с минимальным отношением сигнал/шум.

Увеличение числа пользователей, которым приложение ИТС доставляет данные, увеличивает и объем канальных ресурсов, необходимый для передачи сообщения, поскольку уменьшается отношение сигнал/шум для пользователя с наихудшими канальными условиями. Чтобы снизить потребление канальных ресурсов, можно разбить пользователей на несколько групп,

каждая из которых будет обслуживаться независимо. Поскольку размер каждой группы меньше общего числа пользователей, то отношение сигнал/шум в каждой группе повышается, однако для каждой из групп необходимо выделять различные ортогональные частотно-временные ресурсы. Поэтому алгоритм группировки пользователей при разбиении пользователей на группы должен найти баланс между количеством групп и отношением сигнал/шум в каждой группе. В литературе представлен ряд работ (см., например, [6–8]), рассматривающих задачу выбора параметров передачи и группировки пользователей при многоадресной передаче. В этих работах предлагаются эвристические алгоритмы группировки пользователей, позволяющие повысить среднюю спектральную эффективность пользователей и/или минимальную спектральную эффективность пользователей, имеющих наихудшие каналные условия в группе. В данной же работе в качестве ключевого показателя эффективности рассматривается суммарное потребление канальных ресурсов. В случае ненасыщенного трафика, каковым является периодическая передача коротких срочных сообщений, повышение средней или минимальной спектральной эффективности не всегда влечет снижение потребления канальных ресурсов, поэтому возникает необходимость разработки нового алгоритма, направленного на повышение эффективности сети с точки зрения рассматриваемого показателя. В данной работе исследуется семейство алгоритмов разбиения пользователей на группы, основанных на методе кластеризации K-means. Анализируются существующие метрики добавления пользователей в группы, а также предложена новая метрика, учитывающая суммарное потребление канальных ресурсов. С помощью имитационного моделирования показано, что использование новой метрики позволяет снизить объем потребляемых канальных ресурсов. Кроме того, исследовано влияние выбора центров кластеров на производительность алгоритмов.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 описывается исследуемый алгоритм управления радиоресурсами, т.е. выбор прекодера, частотно-временных ресурсов и СКК. В разделе 3 описываются исследуемые алгоритмы группировки пользователей. В разделе 4 приводятся численные результаты, полученные при моделировании работы исследуемых алгоритмов в среде имитационного моделирования NS-3 [9]. В разделе 5 формулируются основные выводы работы.

2 Алгоритм назначения радиоресурсов

Рассмотрим сценарий, в котором на базовую станцию периодически поступают пакеты данных, которые должны быть доставлены K пользователям. В работе предполагается, что базовая станция использует для передачи N

антенн ($N \gg 1$), тогда как все пользователи используют одну антенну. Каждый слот длительностью τ базовой станции доступны R частотных подканалов (ресурсных элементов), каждый из которых может быть назначен для передачи данных. Как отмечено в разделе 1, для снижения объёма потребляемых канальных ресурсов пользователи могут быть разбиты на M групп $\{G_1, G_2, \dots, G_M\}$ (исследуемые алгоритмы разбиения пользователей на группы подробно описаны в разделе 3). Каждая группа G_i включает в себя $|G_i|$ пользователей, и для всех пользователей, принадлежащих данной группе, осуществляется передача данных с использованием одних и тех же частотно-временных ресурсов (подмножества ресурсных элементов $R_i \subset \{1, \dots, R\}$), СКК, а также прекодеров w_i^r в каждом назначенном для передачи ресурсном элементе $r \in R_i$. При этом для разных групп назначаются различные параметры передачи и ресурсные элементы. В работе также используются следующие обозначения: h^H – эрмитово-сопряженный вектор к вектору h , c^H – комплексно-сопряженное число к числу c , $\|h\|$ – норма¹ комплексного вектора h , $|c|$ – модуль комплексного числа. Далее подробно рассматриваются задачи выбора прекодера для каждой группы G_i , распределения ресурсных элементов между группами и выбора единой СКК для всех пользователей в группе G_i с учётом назначенных этой группе ресурсных элементов.

2.1 Выбор прекодера

Пусть в ресурсном элементе r матрица канала для каждого пользователя k из группы G_i равна h_k^r . Так как базовая станция использует для передачи N антенн, а все пользователи имеют одну антенну, то матрица канала h_k^r представляет собой вектор размерностью $1 \times N$, а прекодер w_i^r для группы G_i – вектор размерностью N . Поскольку при многоадресной передаче данных важно обеспечить выполнение требований к качеству обслуживания для всех пользователей, в данной работе прекодер для группы пользователей выбирается таким образом, чтобы максимизировать минимальное среди пользователей отношение сигнал/шум

$$\min_{k \in G_i} \frac{\|(w_i^r)^H h_k^r\|^2}{\sigma^2} \rightarrow \max,$$

где σ^2 – мощность теплового шума.

Задача выбора прекодера в такой постановке часто рассматривается в литературе [10–15], и впервые возникла в работе [10]. Было показано, что задача является NP-трудной. Для решения задачи в этой работе предложен алгоритм на основе полуопределенного программирования (англ.: semidefinite

¹ Норма вектора $h = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ вычисляется как $\|h\| = \sqrt{h_1^H h_1 + h_2^H h_2 + \dots + h_n^H h_n}$.

programming, SDP), позволяющий найти решение, близкое к оптимальному. Однако предложенный алгоритм обладает высокой вычислительной сложностью, что не позволяет его использовать в сценариях многоадресной передачи срочных сообщений множеству пользователей, таких как сценарии интеллектуальных транспортных систем. В данной работе для выбора прекодера используется итеративный алгоритм, предложенный в [15], обладающий низкой вычислительной сложностью и высокой эффективностью в смысле обеспечиваемого отношения сигнал-шум. В качестве начального значения прекодера алгоритм выбирает оптимальный прекодер для пары пользователей, после чего на каждой итерации обновляет его таким образом, чтобы увеличить отношение сигнал/шум для пользователя с наихудшими канальными условиями. В данной работе число итераций выбрано равным 50.

2.2 Назначение ресурсов и выбор СКК

В каждом слоте на базовой станции для передачи данных доступны R ресурсных элементов. Для каждой группы пользователей G_i необходимо выбрать ресурсные элементы, в которых будет осуществляться передача пакета, а также единую для всех пользователей в группе СКК. Назначение ресурсных элементов и выбор СКК выполняются согласно следующему алгоритму.

1. В каждом ресурсном элементе $r \in R$ для каждого пользователя $k \in G_i$ во всех группах $G_i, i = 1 \dots M$ оценивается отношение сигнал/шум $SNR_k^r = \frac{\|(w_i^r)^H h_k^r\|^2}{\sigma^2}$.
2. Для каждой группы G_i вычисляется метрика:

$$\mu(G_i) = \frac{1}{R} \sum_{r \in R} \log \left[\min_{k \in G_i} SNR_k^r \right],$$

соответствующая отношению сигнал/шум (измеренному в децибелах) для пользователя с наихудшими канальными условиями, усреднённая по всем ресурсным элементам.

3. Группы рассматриваются в порядке возрастания величины $\mu(G_i)$. Для каждой группы последовательно назначаются ресурсные элементы до тех пор, пока пакет не будет передан полностью, либо пока не будут исчерпаны все ресурсные элементы. Для текущего множества назначенных ресурсных элементов R_i СКК для группы выбирается согласно следующей процедуре.

(а) Для каждого пользователя $k \in G_i$ выбирается СКК как функция отношений сигнал/шум этого пользователя в выбранных ресурсных

элементах так, чтобы обеспечивалась заданная вероятность доставки пакета $bler$: $СКК_k = F(\{SNR_k^r, r \in R_i\}, bler)$.

(б) Для группы G_i выбирается СКК, соответствующая СКК пользователя с наихудшими канальными условиями, т.е. $СКК_i = \min_{k \in G_i} СКК_k$.

3 Группировка пользователей

Для разбиения пользователей на M групп в данной работе исследуется семейство алгоритмов, основанных на методе кластеризации K-means. Работу этих алгоритмов можно разделить на два этапа: выбор центров кластеров (т.е. групп) и разбиение пользователей по кластерам. Опишем каждый из этапов.

3.1 Выбор центров кластеров

Для разбиения пользователей на группы с помощью метода K-means могут использоваться различные алгоритмы выбора центров кластеров. В данной работе для выбора центров кластеров используется алгоритм, основанный на алгоритме K-means++, предложенном в работе [6]. Алгоритм K-means++ работает следующим образом. В качестве первого центра произвольно выбирается пользователь $k^{(1)}$. Далее итеративно выбираются остальные $M - 1$ центров. Пусть на текущей итерации выбраны m центров кластеров $k^{(1)}, k^{(2)}, \dots, k^{(m)}$, тогда $m + 1$ -й центр выбирается согласно следующей процедуре.

1. Для всех пользователей k , отличных от уже выбранных центров $k^{(t)}, t = 1 \dots m$, во всех ресурсных элементах r вычисляются корреляции $c_{k, k^{(t)}}^r = \frac{|h_k^{rH} h_{k^{(t)}}^r|}{\|h_k^r\| \|h_{k^{(t)}}^r\|}$.
2. Для каждого пользователя $k \neq k^{(t)}, t = 1 \dots m$ вычисляется метрика
$$c_k = \max_t \frac{\sum_{r=1}^R c_{k, k^{(t)}}^r}{R}.$$
3. Следующий центр кластера выбирается случайно из оставшихся пользователей $k \neq k^{(t)}, t = 1 \dots m$ в соответствии с распределением $P_k = \frac{(1 - c_k)^2}{\sum_{l \neq k^{(t)}, t=1 \dots m} (1 - c_l)^2}$.

Поскольку вероятность выбора пользователя в качестве центра кластера возрастает с уменьшением величины корреляции его вектора канала и векторов каналов уже выбранных центров, описанный алгоритм стремится уменьшить взаимную корреляцию каналов между выбранными центрами.

3.2 Разбиение пользователей по кластерам

После того, как выбраны M центров кластеров, оставшиеся $K - M$ пользователей распределяются по этим кластерам, причем каждый пользователь может быть добавлен только в один из кластеров. Пусть $d(k, i)$ – метрика, характеризующая расстояние между пользователем k и кластером i . Тогда каждый пользователь k добавляется в кластер $\arg\min_i d(k, i)$. В конце работы алгоритма получаем M кластеров, соответствующих выбранному разбиению пользователей на группы. В данной работе в качестве референсных рассматриваются следующие метрики, предложенные в литературе:

1. Средний квадрат разности норм векторов канала в логарифмической

шкале $d_1(k, i) = \frac{\sum_{r=1}^R \|\log \|h_k^r\| - \log \|\tilde{h}_i^r\|\|^2}{R}$, где \tilde{h}_i^r – вектор канала пользователя, соответствующего центру $k^{(i)}$ кластера i . Данная метрика является адаптацией метрики, предложенной в работе [7], для случая разных канальных условий в разных ресурсных элементах. Кроме того, чтобы снизить влияние возможного неоптимального выбора начальных центров, в конце процедуры распределения пользователей по кластерам для каждого кластера пересчитывается эффективная норма вектора канала $\|\tilde{h}_i^r\| = \frac{\sum_{k \in G_i} \log \|h_k^r\|}{|G_i|}$, и все пользователи заново распределяются по кластерам согласно метрике $d(k, i)$. Данная процедура повторяется до тех пор, пока кластеры не перестанут изменяться.

2. Средняя по ресурсным элементам корреляция $d_2(k, i) = 1 - \frac{\sum_{r=1}^R \frac{|h_k^r H h_{k^{(i)}}^r|}{\|h_k^r\| \|h_{k^{(i)}}^r\|}}{R}$.

Похожая метрика была предложена в работе [8]. Поскольку среди всех кластеров выбирается тот, для которого метрика $d(k, i)$ является наименьшей, распределение пользователей согласно данной метрике позволяет группировать пользователей с наиболее скореллированными векторами каналов.

Поскольку обе метрики не учитывают влияние выбранного разбиения на потребление ресурсов, мы предлагаем в качестве метрики использовать суммарное потребление ресурсов всеми группами пользователей $d_3(k, i)$, которое вычисляется как общее число ресурсных элементов, необходимое базовой станции для передачи данных всем группам пользователей. При добавлении пользователя в один из кластеров пересчитываются прекодеры для соответствующей группы во всех R ресурсных элементах согласно алгоритму, описанному в разделе 2.1, после чего оценивается требуемое число ресурсных элементов для каждой из групп в соответствии с алгоритмом, описанном в разделе 2.2.

4 Численные результаты

4.1 Описание сценария

Для исследования эффективности алгоритмов группировки пользователей используется среда имитационного моделирования NS-3 [9] и рассматривается следующий сценарий. Пользователи равномерно располагаются внутри шестиугольной соты, в одном из углов которой расположена базовая станция. Базовая станция использует для передачи 64 антенны, а все пользовательские устройства используют одну антенну. Для моделирования беспроводного канала используется платформа QuaDRiGa [16], в которой реализована модель канала согласно спецификации 3GPP TR 38.901 [17]. Во всех экспериментах, если не указано иное, рассматривается канал в отсутствие луча прямой видимости (англ.: non line of sight, NLOS).²

Поток данных, доставляемых пользователям, представляет собой поток постоянной интенсивности: пакеты размером 200 байт генерируются с периодом 20 мс. Длительность слота $\tau = 0,5$ мс. Число ресурсных элементов, доступных для передачи в каждом слоте, $R = 64$.

В рассматриваемых в работе экспериментах эффективность алгоритмов группировки исследуется с точки зрения объема потребляемых канальных ресурсов в зависимости от общего количества пользователей. Кроме того, в качестве дополнительных показателей эффективности рассматриваются средняя спектральная эффективность пользователей, а также среднее отношение сигнал/шум и спектральная эффективность среди пользователей с наихудшими канальными условиями в каждой группе. Длительность эксперимента составляет 10 секунд. Результаты усредняются по 10 независимым прогонам модели.

4.2 Сравнение одноадресной и многоадресной передачи

Сравним сначала два полярных подхода к рассылке одних и тех же данных множеству пользователей – одноадресную передачу каждому пользователю и многоадресную передачу без разбиения пользователей на группы. Отметим, что первый подход соответствует числу групп, равному числу пользователей, а второй – одной группе. На рис. 1(а) представлена зависимость среднего числа используемых ресурсных элементов от общего числа пользователей. Видно, что с увеличением числа пользователей потребление ресурсов в случае одноадресной передачи растет значительно быстрее, чем в случае многоадресной, так как в первом случае каждому пользователю необходимо выделять различные ресурсные элементы. Так, при обслуживании

² Отметим, что для случая канала при наличии луча прямой видимости (англ.: line of sight, LOS) наблюдаются схожие эффекты.

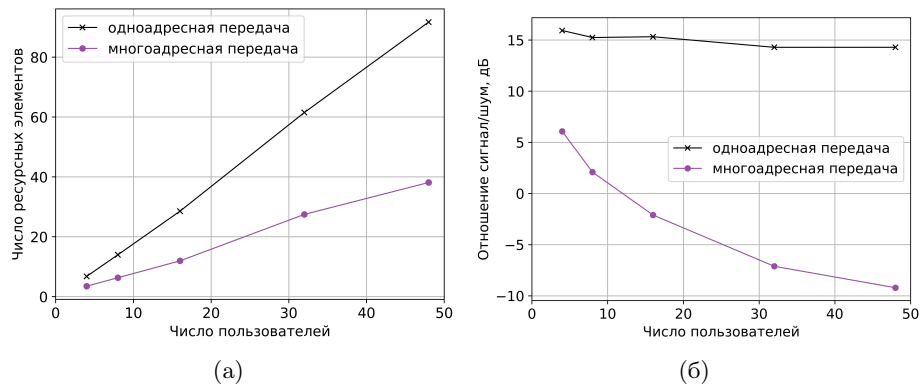


Рис. 1. Сравнение эффективности одноадресной и многоадресной передачи (а) потребление ресурсов, (б) среднее отношение сигнал/шум пользователя с наихудшими канальными условиями в группе.

48 пользователей многоадресная передача позволяет более чем в два раза снизить потребление канальных ресурсов. На рис. 1(б) представлен график зависимости минимального отношения сигнал/шум среди всех пользователей в группе, усредненного по группам, от числа обслуживаемых пользователей. Можно видеть, что в случае многоадресной передачи отношение сигнал/шум значительно уменьшается с увеличением числа пользователей, так как при построении прекодера необходимо перераспределить суммарную мощность передачи между всеми пользователями, что снижает долю мощности для пользователя с наихудшими канальными условиями.

Поскольку в рассматриваемом сценарии многоадресная передача данных обеспечивает меньшее потребление ресурсов по сравнению с одноадресной при всех значениях числа пользователей, далее будем рассматривать только многоадресную передачу.

4.3 Анализ эффективности алгоритмов группировки пользователей

Сравним эффективность алгоритмов группировки пользователей при многоадресной передаче данных, использующих метрики, описанные в разделе 3.2. На рис. 2 представлены результаты для фиксированного числа групп $M = \{2, 4, 10\}$. Согласно этим результатам, использование предложенной в данной работе метрики d_3 , которая оценивает суммарное потребление канальных ресурсов, позволяет снизить потребление канальных ресурсов до 20% по сравнению с известными из литературы метриками d_1 [7] и d_2 [8]. Поскольку метрика d_3 обеспечивает наименьшее потребление ресурсов при

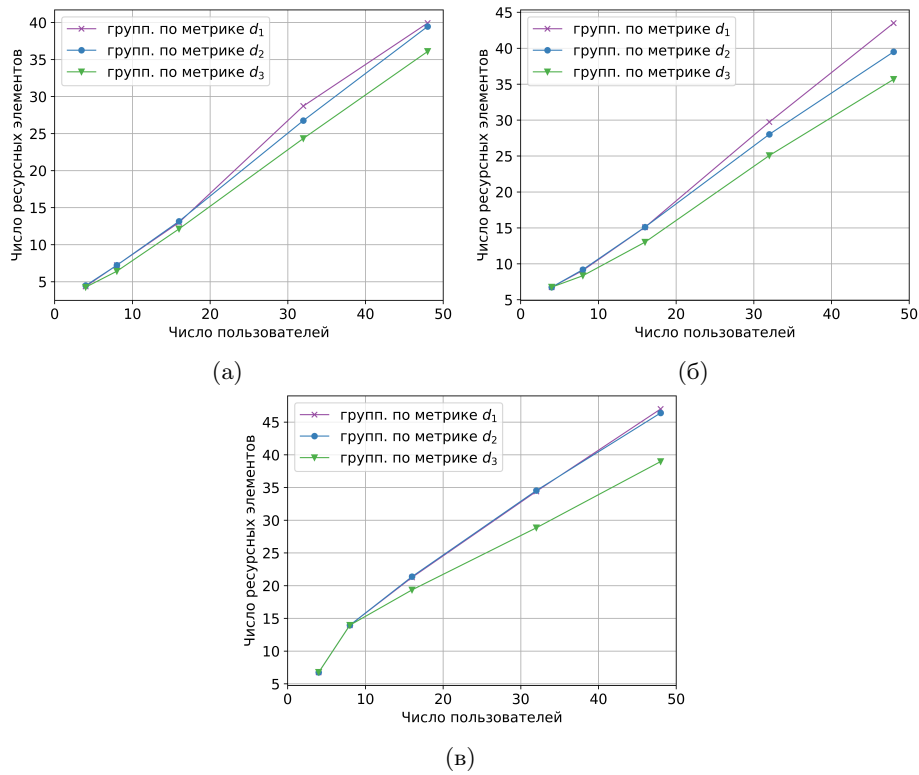


Рис. 2. Сравнение алгоритмов группировки с разными метриками для (а) 2 групп, (б) 4 групп, (в) 10 групп.

всех значениях числа пользователей, результаты представленные далее получены с использованием данной метрики.

Исследуем влияние числа групп на объем потребляемых канальных ресурсов. Из рис. 3(а) можно видеть, что в зависимости от общего числа пользователей в сети, их необходимо разбивать на разное количество групп. При малом числе пользователей использование одной группы обеспечивает минимальное потребление канальных ресурсов, так как отношение сигнал/шум для всех пользователей внутри одной группы достаточно велико (см. рис. 3(г)). С увеличением числа пользователей отношение сигнал/шум для пользователя с наихудшими канальными условиями уменьшается, что приводит к выбору более надежной сигнально-кодовой конструкции и, как следствие, к росту потребления канальных ресурсов. При определенном числе пользователей возникает ситуация, когда разбиение пользователей на две или более группы позволяет снизить объем потребляемых ресурсов. Так, на-

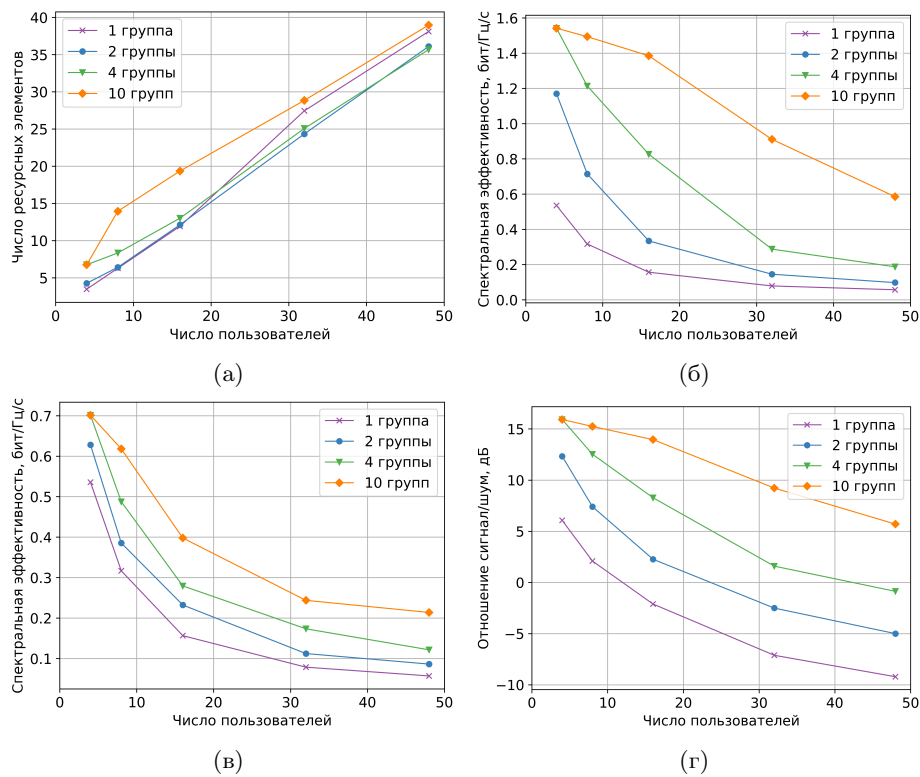


Рис. 3. Анализ эффективности алгоритма группировки (а) потребление ресурсов, (б) средняя спектральная эффективность пользователей, (в) средняя спектральная эффективность пользователя с наихудшими канальными условиями в группе, (г) среднее отношение сигнал/шум пользователя с наихудшими канальными условиями в группе.

пример, при 32 пользователях разбиение на две группы позволяет снизить потребление ресурсов на 10%.

На рис. 3(б) и (в) представлены зависимости средней спектральной эффективности пользователей и минимальной спектральной эффективности среди пользователей внутри одной группы, усредненной по всем группам, соответственно. Согласно полученным результатам спектральная эффективность растет с увеличением числа групп, так как при большем числе групп уменьшается размер каждой группы и, как следствие, увеличивается отношение сигнал/шум (см. рис. 3(г)). Однако следует отметить, что увеличение числа групп и, соответственно, средней спектральной эффективности не приводит к снижению суммарного потребления канальных ресурсов и даже, напротив, может увеличить его. Например, увеличение числа групп с

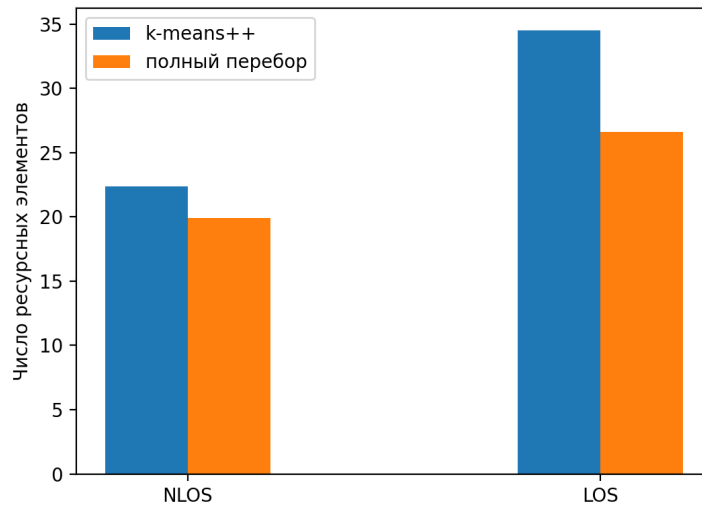


Рис. 4. Влияние выбора центров кластеров на потребление ресурсов.

двух до десяти повышает среднюю спектральную эффективность в 2–6 раз и при этом до двух раз увеличивает суммарное потребление канальных ресурсов. Это связано с тем, что для различных групп необходимо выделять различные канальные ресурсы. Таким образом, как было отмечено в разделе 1, применяемый во многих работах показатель средней спектральной эффективности не может быть использован напрямую для оценки производительности алгоритмов группировки пользователей в случае передачи ненасыщенных потоков данных.

4.4 Влияние выбора центров кластеров

В представленных выше результатах для выбора центров кластеров использовался алгоритм K-means++, описанный в разделе 3.1. Исследуем влияние выбора центров кластеров на объем потребляемых канальных ресурсов в двух сценариях – при отсутствии луча прямой видимости (NLOS-канал) и при его наличии (LOS-канал). Для этого сравним потребление ресурсов при использовании алгоритма K-means++ с наименьшим потреблением ресурсов, полученным полным перебором по всем возможным назначениям центров кластеров. Поскольку время выполнения полного перебора очень велико, ограничимся только случаем двух групп и общим числом пользователей, равным 32, а также сократим время эксперимента до 0.5 с. На рис. 4 представлены результаты для среднего потребления ресурсов при работе

алгоритма группировки. Видно, что оптимальный выбор центров кластеров позволяет дополнительно снизить потребление канальных ресурсов до 20%.

5 Заключение

В данной работе исследовано семейство алгоритмов группировки пользователей, основанных на методе кластеризации K-means. Рассмотрены различные метрики, предложенные в литературе, согласно которым пользователи добавляются в кластеры, а также предложена новая метрика, соответствующая оценке суммарного потребления канальных ресурсов. С помощью имитационного моделирования в среде NS-3 проведено сравнение эффективности алгоритмов группировки с различными метриками. Численные результаты показали, что предложенная метрика обеспечивает до 20% меньшее потребление канальных ресурсов. Также было проведено исследование влияния выбора центров кластеров на производительность алгоритмов. Согласно результатам оптимальный выбор центров кластеров, полученный полным перебором, позволяет дополнительно снизить объем потребляемых канальных ресурсов. В дальнейшем планируется разработать алгоритм выбора центров кластеров, а также провести исследование других алгоритмов группировки пользователей, отличных от K-means.

Список литературы

1. Araniti, G., Condoluci, M., Scopelliti, P., Molinaro, A., Iera, A.: Multicasting over Emerging 5G Networks: Challenges and Perspectives. *IEEE Network* 31(2), 80–89 (2017)
2. Calabuig, J., Monserrat, J.F., Gozalvez, D., Klemp, O.: Safety on the Roads: LTE Alternatives for Sending ITS Messages. *IEEE Vehicular Technology Magazine* 9(4), 61–70 (2014)
3. Белогаев, А.: Разработка и исследование методов обеспечения заданного качества обслуживания трафика в сетях интеллектуальных транспортных систем. Ph.D. thesis, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (2020)
4. Striccoli, D., Piro, G., Boggia, G.: Multicast and Broadcast Services over Mobile Networks: A Survey on Standardized Approaches and Scientific Outcomes. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21(2), 1020–1063 (2018)
5. Rinaldi, F., Scopelliti, P., Iera, A., Molinaro, A., Araniti, G.: Delivering Multimedia Services in MBSFN Areas over 5G Networks: A Performance Analysis. 2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). pp. 1–5. IEEE (2018)
6. Yue, G., Qi, X.F.: Adaptive Grouped Physical Layer Multicast and Beamforming for Massive MIMO. *IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. pp. 1–6. IEEE (2020)

7. Tran, T.X., Yue, G.: GRAB: Joint Adaptive Grouping and Beamforming for Multi-Group Multicast with Massive MIMO. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. pp. 1–6. IEEE (2019)
8. De la Fuente, A., Interdonato, G., Araniti, G.: User Subgrouping in Multicast Massive MIMO over Spatially Correlated Rayleigh Fading Channels. *arXiv preprint arXiv:2102.09935* (2021)
9. The ns-3 network simulator, <http://www.nsnam.org/>
10. Sidiropoulos, N.D., Davidson, T.N., Luo, Z.Q.: Transmit Beamforming for Physical-Layer Multicasting. *IEEE Transactions on Signal Processing* 54(6), 2239–2251 (2006)
11. Schwarz, S., Philosof, T., Rupp, M.: Signal Processing Challenges in Cellular-Assisted Vehicular Communications: Efforts and Developments within 3GPP LTE and Beyond. *IEEE Signal Processing Magazine* 34(2), 47–59 (2017)
12. Safiulin, I., Schwarz, S., Rupp, M.: Multicast Beamforming Capabilities of LTE MBSFN for V2X Communications. *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. pp. 1–5. IEEE (2017)
13. Ibrahim, M.S., Konar, A., Sidiropoulos, N.D.: Fast Algorithms for Joint Multicast Beamforming and Antenna Selection in Massive MIMO. *IEEE Transactions on Signal Processing* 68, 1897–1909 (2020)
14. Takabe, S., Wadayama, T.: Deep Unfolded Multicast Beamforming. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. pp. 1–6. IEEE (2020)
15. Hunger, R., Schmidt, D.A., Joham, M., Schwing, A., Utschick, W.: Design of Single-Group Multicasting-Beamformers. *IEEE International Conference on Communications*. pp. 2499–2505. IEEE (2007)
16. Jaeckel, S., Raschkowski, L., Borner, K., Thiele, L.: QuaDRiGa: a 3-D Multi-Cell Channel Model with Time Evolution for Enabling Virtual Field Trials. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 62(6), 3242–3256 (2014)
17. 3GPP: Study on Channel Model for Frequencies From 0.5 to 100 GHz. Technical Report (TR) 38.901, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2020), <http://www.3gpp.org/DynaReport/38901.htm>, version 16.1.0