

# Использование мультантенного решения гибридной точки доступа

для сетей с беспроводной передачей энергии  
питания узлов и кластерной кооперацией  
передачи данных

**В предлагаемой статье рассматривается организация беспроводной сети с одновременной передачей питания, выполненной в виде кластеров, состоящих из совокупности беспроводных устройств с низким собственным энергопотреблением.**

Лина Юань (Lina Yuan)

Сужи Би (Suzhi Bi)

Шэнли Чжан (Shengli Zhang)

Сяохуэй Лин (Xiaohui Lin)

Хуэй Ванг (Hui Wang)

Адаптированный перевод:  
Владимир Рентюк

## Введение

Производительность современных сетей связи в значительной степени ограничена временем автономной работы составляющих их беспроводных устройств. Как только энергия их батарей истощается, они нуждаются в их замене или подзарядке, что обычно выполняется с привлечением обслуживающего персонала. А это может привести к периодическим простоям в работе устройств и серьезным нарушениям в части точности передаваемой информации. В качестве альтернативы была предложена новая сетевая концепция, получившая название «беспроводная сеть с одновременной передачей информации энергии», сокращенно WPCN (Wireless Powered Communications Network) [1, 2, 3]. Ее основа — это недавно разработанная технология беспроводной передачи энергии (Wireless Energy Transfer, WET), в которой для возможности передачи информации беспроводные устройства ячеек сети непрерывно и удаленно питаются микроволновой энергией, передаваемой выделенными для этой цели энергетическими узлами. Использование технологии WET может эффективно снизить затраты на замену/зарядку батарей, а также улучшить качество связи с уменьшением энергозатрат. Имея потенциал для успешного решения остающихся в настоящее время ограничений по использованию WET, можно ожидать, что эта технология скоро станет важным строительным блоком в сетях беспроводной связи следующего поколения.

Что касается базовых принципов построения и организации WPCN, то в настоящее время уже имеются обширные исследования по проблемам их внедрения для таких маломощных приложений, как беспроводные сенсорные сети (Wireless Sensor Network, WSN) и сети с использованием технологии радиочастотной идентификации (Radio Frequency Identity,

RFID) [4]. Здесь организация сети по принципу WPCN дает определенные преимущества по части времени непрерывной работы узлов, выполненных в виде беспроводных устройств с ограниченным питанием, или обеспечивает повышение скорости передачи данных, что также напрямую связано с энергозатратами [5, 6, 7]. В WPCN энергетический узел и точка доступа к информации, которая принимает данные от узлов ячеек сети, могут быть расположены отдельно либо совместно, как гибридная точка доступа (Hybrid Access Point, H-AP), оснащенная несколькими антеннами со специально сформированными диаграммами направленности [5]. В то время как классическая, широко используемая схема организации сети, несомненно, обладает большей степенью свободы при размещении узлов, новый подход может дать определенную экономию в части затрат на развертывание и текущее техническое обслуживание сети, а при использовании H-AP — централизованно координировать передачу и энергии, и информации. В данной статье внимание сфокусировано на изучении WPCN именно с использованием H-AP как средства для обеспечения энергоснабжения и доступа к данным.

Производительность многопользовательской WPCN, координируемой H-AP, впервые была изучена в [8]. В указанной работе предлагается протокол сбора свободной энергии (в англ. терминологии — energy harvesting, а сам процесс именуется harvest energy. — *Прим. перев.*), но в рассматриваемой концепции это не свободная энергия в общем понимании, а специально излучаемая электромагнитная или, вернее, радиочастотная. Именно эта энергия используется H-AP для передачи энергии всем устройствам в нисходящей линии связи. Затем узлы кластера, накопив и сохранив переданную им энергию, используют ее для передачи

своей индивидуальной информации в H-AP. Передача осуществляется с использованием технологии множественного доступа с временным разделением (Time Division Multiple Access, TDMA), а собранная узлами энергия используется уже в восходящей линии связи. В [8] также показано, что такая организация WPCN приведет к серьезной проблеме, вызванной дискриминацией пользователей (в рассматриваемом контексте — узлов кластера), а именно — к проблеме, которую можно выразить как «кто ближе к кухне, тот ест больше», что связано с потерями мощности, как известно, зависящими от расстояния. В частности, скорость передачи данных некоторых устройств может оказаться на два порядка меньше остальных, что непосредственно снижает скорость и точность передачи измерений во всей WPCN. Одним из эффективных способов повышения справедливости распределения энергии, то есть равноприоритетного, без предпочтений, обслуживания пользователя (User Fairness) и, следовательно, оптимизации пропускной способности является оптимальное взаимодействие с узлами — когда узлы, более близкие к H-AP, помогают отправлять сообщения от более удаленных от нее узлов [9, 10, 11], участвуя в том, что мы называем кластерной кооперацией пользователей. Стоит отметить, что в [9] на примере двухпользовательской WPCN показывается, что, помогая удаленному узлу, узел, более близкий к гибридной точке доступа, также может повысить скорость передачи данных, что приводит к беспроигрышной ситуации. Кроме того, двухпользовательская кооперация, о которой мы поговорим позже, дает преимущества и тогда, когда два связанных таким образом узла сети образуют для передачи информации распределенную виртуальную антенную решетку [10]. Такие решения могут быть распространены и на общий сценарий сотрудничества или, как принято в данной статье, кооперации с несколькими пользователями [11].

В приведенных выше исследованиях производительности в части пропускной способности WPCN рассматривается, в основном, использование H-AP с одной антенной и делается акцент на оптимизации распределения времени передачи. Именно это авторы считают основным решением для достижения максимальной пропускной способности сети. Однако такая H-AP с одной передающей энергией антенной значительно теряет из-за крайне низкой эффективности передачи энергии. Это связано с ослаблением мощности излучаемого сигнала при круговой диаграмме направленности передающей антенны, которая в этом случае является изотропным излучателем, передающим энергию во все стороны. А если H-AP оснащена несколькими антеннами и для передачи энергии может применять ту или иную технологию формирования лепестков диаграммы направленности [12], это позволяет сфокусировать энергию в нужных направлениях.

Такой подход позволяет повысить эффективность передачи энергии конкретным устройствам в кластере сети и, следовательно, повысить скорости передачи данных запитанных беспроводным способом устройств. Оптимальная

диаграмма направленности передающей антенны была изучена на нескольких практически реализованных концепциях. В их числе были решения с настраиваемой последовательностью передачи [13], с ограничением сложности аппаратной реализации в части организации обратной связи [14] и ограничением мощности передачи по каждой из антенн [15]. Кроме сказанного выше, необходимо учитывать и то, что использование нескольких антенн может также улучшить и производительность связи. Это проявляется за счет возможности использования пространственного разнесения антенн или за счет увеличения мультиплексирования в восходящей линии связи.

В еще одном ряде недавних работ был рассмотрен вариант решения WPCN с применением в ней мультиантенной H-AP. Так, например, в [16] сначала решается проблема определения оптимальной конфигурации формирования диаграммы направленности для передачи энергии, затем — диаграммы направленности антенн для информационного канала, а также обсуждаются вопросы, связанные с распределением времени передачи по восходящей/нисходящей линии связи. Здесь наглядно показано, что использование нескольких антенн может значительно улучшить пропускную способность по сравнению с одноантенным решением, описанным в [8].

В [17] изучается еще один подход к оптимизации пропускной способности в том случае, когда H-AP имеет большое количество антенн (т. е. представляет собой массив из нескольких передающих и нескольких приемных антенн). Тем не менее здесь при реализации WPCN все еще имеет место упомянутая выше проблема, которую мы назвали «кто ближе к кухне, тот ест больше». Эта проблема существует независимо от количества антенн в H-AP. Поэтому,

когда речь идет о мультиантенном решении, здесь также широко применяются технологии, позволяющие организовать поддерживающие работу сети кооперационные связи между устройствами в ее ячейках, образующих кластеры. Так, например, в [18] рассматривается использование фиксированного одноантенного переключателя (реле) для пересылки сообщения от устройства с беспроводной запиткой в многоканальную H-AP и изучается оптимальное решение формирования диаграммы направленности и распределение времени передачи. В [19] предлагается организовать групповое сотрудничество, в котором две группы взаимодействуют друг с другом при их координации с использованием мультиантенной H-AP.

В данной статье рассматриваются проблемы взаимодействия узлов, составляющих кластер WPCN, как показано на рис. 1. На примере беспроводной сенсорной сети показано, что мультиантенная H-AP использует технологию WET для питания кластера удаленных ячеек сети и используется для приема передаваемых ими данных. Такой вариант вполне может соответствовать практическому сценарию в реальных беспроводных сенсорных сетях (Wireless Sensor Networks, WSN), в которых мобильная H-AP останавливается на своем маршруте и используется для передачи посредством высокочастотных электромагнитных волн питания кластеру из близко развернутых датчиков, контролирующей конкретную область. Как и в обычной WSN, выполненной на основе кластеров и точек доступа, здесь мы также называем один из элементов рассматриваемого кластера как его главное устройство, которое используется для передачи информации от других элементов этого кластера в H-AP. Если даже смотреть просто в общем плане, то

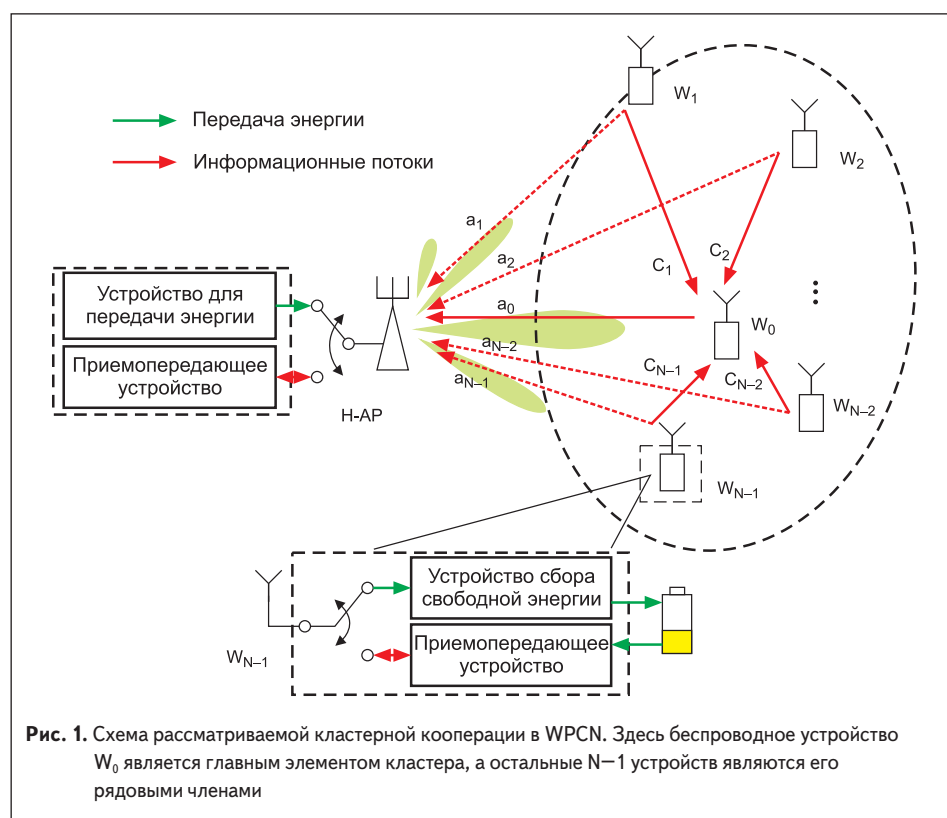


Рис. 1. Схема рассматриваемой кластерной кооперации в WPCN. Здесь беспроводное устройство  $W_0$  является главным элементом кластера, а остальные  $N-1$  устройств являются его рядовыми членами

благодаря такой кооперации производительность по пропускной способности некоторых отдаленных узлов кластера может быть в той или иной мере улучшена.

Однако, как и в случае кластерной кооперации в традиционных WSN (например, описанной в [20]), назначенное устройство (в нашем случае  $W_0$ ) неизбежно отличается более высоким потреблением энергии, причем часто в значительной мере, поскольку оно должно передавать сообщения от всех рядовых узлов кластера плюс свои собственные, так как оно играет роль не только репитера, но и датчика. Для кластера с большим количеством беспроводных узлов ограниченная по емкости батарея назначенного устройства станет узким местом сети. Чтобы решить проблему такого энергетического дисбаланса, авторы предлагают использовать в Н-АР возможности, которые дает нам формирование диаграммы направленности с несколькими антеннами при излучении энергии для питания беспроводных устройств кластера. В этом случае такая Н-АР может сконцентрировать больше передаваемой мощности на назначенный элемент кластера, что устранит дисбаланс потребления энергии при его кооперации с другими элементами. Подробные преимущества описываемого в настоящей статье решения заключаются в следующем:

- Для решения проблемы высокого энергопотребления назначенным устройством в обычном решении кооперации на основе кластеров мы предлагаем использовать технологию формирования диаграммы направленности при передаче энергии на основе мультиантенной Н-АР. Такой подход позволяет решить вопрос дисбаланса передачи мощности для элементов кластера с различными уровнями потребления энергии.
- В предлагаемом авторами статьи методе кооперации сформулированы подходы к организации такой кооперации при проектировании диаграммы направленности, распределение времени передачи между Н-АР и отдельными элементами кластера, а также распределение мощности передачи для назначенного устройства. Все это в совокупности требуется для того, чтобы увеличить минимальную скорость передачи данных, достигаемую среди совокупности всех элементов кластера. Другими словами, авторы ставят задачу повысить равноприоритетное, без предпочтений в пропускной способности

отдельных ячеек (пользователей) обслуживание, достигнув, таким образом, максимальной пропускной способности всей сети. Авторами предложен эффективный оптимальный алгоритм решения проблемы невыпуклой оптимизации. (*Задача безусловной гладкой глобальной (невыпуклой) оптимизации сводится к нахождению одного из экстремумов, как правило, с использованием прямого градиентного метода. Оптимизация — в данном контексте — это решение задачи нахождения экстремума (здесь — максимума/минимума) целевой функции в некоторой области конечномерного векторного пространства, ограниченной набором линейных и/или нелинейных равенств и/или неравенств. — Прим. перев.*)

- Для изучения влияния различных системных установок на эффективность предлагаемого метода авторами статьи проводится численный анализ. По сравнению с другими решениями в части оценки производительности авторы показывают, что именно предлагаемая ими кооперация может наиболее эффективно повысить производительность. Однако предлагаемый метод кооперации наиболее эффективен только в том случае, когда в качестве назначенного элемента выбирается устройство, расположенное наиболее близко к центру кластера. В этом случае оно максимально тесно связано с остальными элементами и сможет формировать эффективные внутрикластерные каналы передачи данных. Если число взаимодействующих элементов является разумным, то такое решение сможет в достаточной мере эффективно поддерживать кластерную кооперацию.

## Модель системы

### Модель канала

Как показано на рис. 1, мы рассматриваем WPCN-сеть, кластер которой представляет собой гибридную точку доступа с  $N$  узлами в виде беспроводных устройств. Н-АР оснащена  $M$  антеннами (на практике  $M \ll N$ ), в то время как каждый узел кластера оснащен одной-единственной антенной. Как уже было сказано, Н-АР передает высокочастотную электромагнитную энергию, которая накапливается, сохраняется и используется для питания беспроводных устройств, а также принимает информацию от узлов данного кластера. При этом сама Н-АР имеет стабильное постоянное

питание, а каждое беспроводное устройство, представляющее узел кластера, имеет собственную встроенную перезаряжаемую батарею, осуществляющую накопление и хранение собранной путем беспроводной передачи энергии от Н-АР. И точка, и все узлы кластера работают в одном и том же диапазоне частот, а для передачи данных используется схема временного дуплексирования с разделением каналов [21]. Такое временное разделение реализовано как в решении непосредственно самой Н-АР, так и во всех распределенных устройствах кластера, что позволяет разделить во времени фазу приема энергии и фазы передачи информации.

Как уже говорилось, одно из устройств (любой узел) кластера выбрано как назначенное главное устройство, которое осуществляет ретрансляцию данных, принятых от других беспроводных устройств данного кластера, которые принимаются как его рядовые члены. Влияние на производительность системы подходов в выборе назначенного устройства, будет обсуждаться далее. Назначенное устройство, как составляющая часть кластера, индексируется как  $W_0$ , а его рядовые члены индексируются как  $W_1, \dots, W_{N-1}$ . Все каналы считаются независимыми и однотипными и соответствуют квазистатической модели радиоканала с равномерным затуханием. Таким образом, все коэффициенты, описывающие работу каналов связи, остаются постоянными в течение одного цикла передачи информационного блока, обозначаемого  $T$ , но могут варьироваться при передаче других блоков. Вектор коэффициента связи канала между Н-АР и узлом ячеек кластера обозначается как

$$a_i \in C^{M \times 1}, \text{ где } a_i \sim (0, \sigma_i^2 I),$$

где  $\sigma_i^2$  означает среднее усиление канала  $i = 0, 1, \dots, N-1$ . Коэффициенты связи канала между  $i$ -м элементом и назначенным устройством обозначаются как  $c_i \sim CN(0, \delta_i^2)$ , здесь  $i = 1, \dots, N-1$ .

Для обозначения соответствующих коэффициентов канала, где  $|\cdot|$  обозначает оператор второй нормы матрицы, мы используем равенства по определению

$$h_i \triangleq |a_i|^2 \text{ и } g_i \triangleq |c_i|^2.$$

(Знак  $\triangleq$  означает «равно по определению», в литературе встречаются иные обозначения для этого понятия, например  $\equiv$  (идентично, тождество),  $\stackrel{\text{def}}{=}$  и: =, последний, наравне с указанными знаками, часто используется для обозначения оператора присваивания. — Прим. перев.)

### Протокол взаимной кооперации на основе кластера

Распределение времени в блоке передачи при кластерном взаимодействии проиллюстрировано на рис. 2. В начале блока передачи выполняется анализ канала (интервал CE). Этот анализ занимает фиксированный временной интервал длительности  $\tau_0$ . Во время промежутка CE все устройства данного кластера по очереди транслируют свои пилот-сигналы, так что Н-АР получает коэффициент  $a_i$ , где  $i = 0, 1, \dots, N-1$ , а назначенное устройство узнает

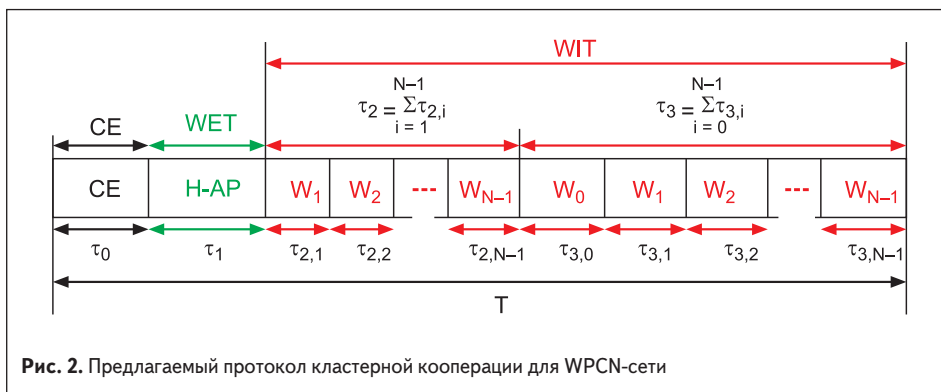


Рис. 2. Предлагаемый протокол кластерной кооперации для WPCN-сети

свои коэффициенты  $c_i$ , где  $i = 1, \dots, N-1$  соответственно. Затем назначенное устройство отправляет свою оценку  $c_i$  в Н-АР, так что она будет иметь полную информацию о состоянии канала для рассматриваемого кластера беспроводной сети.

После завершения интервала СЕ система работает в трех фазах. В первой фазе с продолжительностью времени  $\tau_1$  Н-АР гибридная точка доступа передает беспроводным путем энергию (интервал WET) с фиксированной мощностью передачи  $P$ . В следующих двух фазах в интервале  $T - \tau_0 - \tau_1$  (интервал WIT)  $N$  устройств, входящих в кластер, используя собранную ими энергию во время фазы WIT, передают подготовленные и запасенные ими данные в Н-АР. В частности,  $N-1$  устройств сначала передают поочередно информацию в назначенное устройство, при этом каждое  $i$ -е устройство передает ее в интервале  $\tau_{2,i}$ , где  $i = 1, \dots, N-1$ . На третьей фазе назначенное устройство передает декодированные сообщения от  $N-1$  устройств вместе со своим собственным сообщением в Н-АР. Время, затрачиваемое на передачу сообщения от каждого  $i$ -го устройства, обозначено как  $\tau_{3,i}$ , где  $i = 0, 1, \dots, N-1$ . Очевидно, что распределения времени удовлетворяют следующему неравенству:

$$\tau_0 + \tau_1 + \sum_{i=1}^{N-1} \tau_{2,i} + \sum_{i=0}^{N-1} \tau_{3,i} \leq T. \quad (1)$$

Обратите внимание, что интервал  $\tau_0$  является известным параметром. Без учета общих потерь будем считать, что в решении, рассматриваемом в данной статье,  $T = 1$ . Основываясь на детальной информации о состоянии канала, Н-АР может рассчитать оптимальное распределение времени блока, а затем транслировать указания о нем на все узлы ячеек кластера так, чтобы они смогли синхронизировать уже свои схемы разделения времени по фазам приема энергии и передачи информации. Обратите внимание, что, помимо передачи данных в третьей фазе, Н-АР во второй фазе может также принимать и декодировать сообщение от каждого узла кластера, хотя этот временной интервал не выделен специально для этой цели. Однако такая предусмотренная возможность может быть использована для повышения общей скорости передачи по сравнению с принятием и расшифровкой сообщения только лишь в третьей фазе блока. В следующем разделе мы выведем пропускную способность предлагаемого протокола кооперации и сформулируем задачу оптимизации пропускной способности по критерию минимума/максимума.

### Анализ пропускной способности из расчета на узел кластера WPCN

Оценим пропускную способность каждого узла ячеек кластера, достигнутую в рамках предлагаемого протокола кластерной кооперации. Результаты оценки будут использованы в следующем разделе для оптимизации и допущения равноприоритетного, без предпочтений, распределения пропускной способности в WPCN.

### Фаза I: передача и прием энергии

Еще раз напомним, что назначенное главное устройство в кластере ячеек сети должно быть в состоянии передавать  $N$  сообщений, и таким образом оно априори будет потреблять значительно больше энергии, чем другие рядовые устройства данного кластера. Эта особенность назначенного устройства делает его узким местом в сети. Для его расшивки, с целью сбалансировать потребляемую и собранную каждым устройством данного кластера энергию, в Н-АР предлагается использовать специально сформированную диаграмму направленности ее излучателей (антенн). Такой подход к решению проблемы вызван необходимостью передачи различной мощности для отдельных ячеек сети, которые могут быть расположены в разных направлениях относительно рассматриваемой нами точки доступа. Для реализации предлагаемого решения на первом этапе времени в фазе  $\tau_1$  Н-АР передает  $w(t) \in C^{M \times 1}$  сигналы случайной энергии с использованием всех  $M$  антенн, а непосредственно мощность передачи точки доступа ограничена следующим выражением:

$$E[|w(t)|^2] = \text{tr}(E\{w(t)w(t)^H\}) \triangleq \text{tr}(Q) \leq P, \quad (2)$$

где  $\text{tr}(\cdot)$  обозначает след матрицы,  $(\cdot)^H$  обозначает комплексно сопряженный оператор, а  $Q \Phi 0$  — матрица формирования луча. Таким образом, принятый сигнал передачи энергии на  $i$ -е беспроводное устройство кластера сети равен:

$$y_i^{(1)}(t) = a_i^T w(t) + n_i^{(1)}(t), \quad i = 0, \dots, N-1, \quad (3)$$

где  $n_i^{(1)}(t)$  обозначает мощность собственных шумов приемника. Если игнорировать шумы приемника, то количество энергии, собираемое беспроводным устройством, согласно [7], может быть выражено как:

$$E_i = \eta \tau_1 E[|y_i^{(1)}(t)|^2] = \eta \tau_1 \text{tr}(A_i Q). \quad (4)$$

Здесь  $A_i \triangleq a_i a_i^H$ ,  $\eta \in (0;1)$  обозначает эффективность сбора энергии, которая считается равной для всех ячеек кластера WPCN.

### Фаза II: внутрикластерная передача данных

Если мы предполагаем, что рядовые беспроводные устройства рассматриваемого кластера сети на второй фазе во время передачи данных на назначенное устройство исчерпывают собранную ими энергию, то тогда мощность передачи  $i$ -го устройства кластера равна:

$$P_{2,i} = \frac{E_i}{\tau_{2,i}} = \eta \frac{\tau_1}{\tau_{2,i}} \text{tr}(A_i Q), \quad i = 1, \dots, N-1. \quad (5)$$

Пусть  $s_i^{(2)}(t)$  обозначает сигнал основной полосы  $i$ -го беспроводного устройства, переданный во второй фазе с  $E[|s_i^{(2)}(t)|^2] = 1$ , тогда принятый сигнал в назначенном устройстве выражается как:

$$y_{0,i}^{(2)}(t) = c_i \sqrt{P_{2,i}} s_i^{(2)}(t) + n_i^{(2)}(t), \quad (6)$$

где  $n_i^{(2)}(t)$  обозначает собственные шумы приемника с мощностью  $E[|n_i^{(2)}(t)|^2] = N_\sigma$ .

Затем назначенное устройство может декодировать  $i$ -й принятый от рядовых устройств кластера сигнал со скоростью, заданной формулой:

$$R_i^{(2)} = \tau_{2,i} \log_2 \left( 1 + \frac{g_i P_{2,i}}{N_\sigma} \right), \quad i = 1, \dots, N-1. \quad (7)$$

Между тем не забываем, что Н-АР также может принимать передачу данных от рядовых беспроводных устройств обслуживаемого ею кластера. Принятый сигнал в точке доступа во время передачи от  $i$ -го устройства выражается следующим образом:

$$y_{H,i}^{(2)}(t) = a_i \sqrt{P_{2,i}} s_i^{(2)}(t) + n_{H,i}^{(2)}(t), \quad (8)$$

где  $i = 1, \dots, N-1$  и  $n_{H,i}^{(2)}(t) \sim CN(0; N_\sigma I)$ .

Для простоты здесь мы пренебрегаем потреблением энергии на декодирование и рассматриваем только передачу данных на основе использования собранной в фазе I энергии. Однако предлагаемый способ можно легко распространить и на случай с ненулевым потреблением энергии декодирования, включив в расчет еще и потребляемую схемой декодирования мощность, необходимую для выполнения этой операции.

### Фаза III: передача данных от кластера к гибридной точке доступа

После декодирования сообщений рядовых членов кластера сети назначенное устройство последовательно передает в Н-АР вместе со своим собственным сообщением  $N-1$  сообщений, полученных от рядовых членов. Пусть  $s_0^{(3)}(t)$  обозначает сигнал от назначенного устройства, а  $s_i^{(3)}(t)$  обозначает повторно кодированный сигнал  $i$ -го рядового члена кластера, переданный ему в третьей фазе. Кроме того, предположим, что  $E[|s_i^{(3)}(t)|^2] = 1$ , где  $i = 0, \dots, N-1$ . Пусть  $P_{3,i}$  обозначает мощность, используемую для передачи сообщения  $i$ -го беспроводного устройства в третьей фазе. Тогда принятый сигнал, содержащий все сообщения, передается в Н-АР и выражается как:

$$y_i^{(3)}(t) = a_0 \sqrt{P_{3,i}} s_i^{(3)}(t) + n_i^{(3)}(t), \quad (9)$$

где  $i = 0, 1, \dots, N-1$ .

Суммарная энергия, потребляемая назначенным устройством, ограничена сверху за счет собранной энергии  $E_\Phi$  и должна отвечать неравенству, а именно:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \tau_{3,i} P_{3,i} \leq \eta \tau_1 \text{tr}(A_0 Q). \quad (10)$$

Мы предполагаем, что Н-АР использует суммирование дифференциально взвешенных сигналов каждого канала, что позволяет максимизировать отношение сигнал/шум (SNR), где SNR выходного сигнала — сумма

шумов каждого  $i$ -го беспроводного устройства данного кластера:

$$\gamma_i^{(3)} = \frac{|a_0|^2 P_{3,i}}{N_0} = \frac{h_0 P_{3,i}}{N_0}, \quad (11)$$

где  $i = 0, 1, \dots, N-1$ .

Обозначим распределение времени как  $\tau = [\tau_1, \tau_{2,1}, \dots, \tau_{2,N-1}, \tau_{3,0}, \tau_{3,1}, \dots, \tau_{3,N-1}]'$ , а мощность передачи как  $P = [P_{3,0}, P_{3,1}, \dots, P_{3,N-1}]'$ . Так что скорость передачи данных от назначенного устройства к Н-АР равна:

$$R_0(\tau, P) = \tau_{3,0} \log_2(1 + \frac{h_0 P_{3,0}}{N_0}). \quad (12)$$

Однако, как уже было сказано, сообщения от рядовых членов кластера принимаются как на второй, так и на третьей фазах. В этом случае Н-АР может совместно декодировать каждое сообщение от рядовых устройств по двум фазам со скоростью, указанной в [8]:

$$R_i(\tau, P, Q) = \min \{R_i^{(2)}(\tau, Q), V_i^{(2)}(\tau, Q) + V_i^{(3)}(\tau, P)\}, \quad (13)$$

где  $i = 1, \dots, N-1$ , а  $R_i^{(2)}(\tau, Q)$  приведено в (7), а  $V_i^{(2)}(\tau, Q)$ , в свою очередь, обозначает информацию, которая может быть извлечена Н-АР из принятого сигнала согласно (6) (во второй фазе) с использованием дифференциально взвешенных сигналов каждого канала приемника. Она задается формулой:

$$V_i^{(2)}(\tau, Q) = \tau_{2,i} \log_2(1 + \eta \frac{\tau_1}{\tau_{2,i}} \frac{h_i \text{tr}(A_i Q)}{N_0}). \quad (14)$$

Здесь  $V_i^{(3)}(\tau, P, Q)$  обозначает достижимые скорости передачи от назначенного устройства до соответствующей Н-АР, которые определяются по формуле:

$$V_i^{(3)}(\tau, P) = \tau_{3,i} \log_2(1 + \frac{h_0 P_{3,i}}{N_0}). \quad (15)$$

Важным показателем эффективности WPCN является пропускная способность по критерию минимум/максимум, определяемая как:

$$S = \min_{0 \leq i \leq N-1} R_i. \quad (16)$$

То есть, необходимо определить минимально достижимую максимальную пропускную способность для каждого беспроводного устройства кластера, что отвечает принципу равноприоритетного, без предпочтения, распределения пропускной способности между беспроводными устройствами, выступающими здесь в качестве пользователей. Максимальная пропускная способность имеет важные практические последствия. Например, пропускная способность по критерию максимум/минимум в беспроводных сенсорных сетях отражает точность данных, сообщаемых датчиком «узкого места», которые могут напрямую влиять на общую точность считывания сети.

## Оптимизация пропускной способности по методу максимума/минимума

### Постановка задачи

В этом разделе нас интересует максимизация минимально возможной (по критерию максимум/минимум) пропускной способности всех беспроводных устройств в каждом временном блоке методом совместной оптимизации передачи энергии путем формирования диаграммы направленности  $Q$ , распределения интервалов времени  $\tau$  и распределения мощности передачи  $P$ , а именно:

$$(P1): \max_{\tau, P, Q} S = \min_{0 \leq i \leq N-1} R_i(\tau, P, Q).$$

См. выше (1) и (10), при условии:

$$\begin{aligned} \tau_1 &\geq 0, \tau_{2,i} \geq 0, \quad i = 1, \dots, N-1, \\ \tau_{3,i} &\geq 0, P_{3,i} \geq 0, \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \\ \text{tr}(Q) &\leq P, Q \succeq 0, \tau \geq 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Вводя переменную  $\bar{S}$ , задачу (17) можно условно преобразовать к ее эпиграфическому (описательному) виду:

$$(P2): \max_{\tau, P, Q, \bar{S}} \bar{S}.$$

См. выше (1) и (10), при условии

$$\begin{aligned} R_0(\tau, P) &\geq \bar{S}, \\ V_i^{(2)}(\tau, Q) + V_i^{(3)}(\tau, P) &\geq \bar{S}, \\ R_i^{(2)}(\tau, Q) &\geq \bar{S}, \quad i = 1, \dots, N-1, \\ \text{tr}(Q) &\leq P, Q \succeq 0, \tau \geq 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Согласно принятой нами концепции кооперации узлов кластера, которые мы ранее идентифицировали как пользователей сети, формирование диаграммы направленности антенн для оптимизации передачи энергии, скорость передачи данных с использованием внутрикластерной коммуникации (а именно:  $R_i^{(2)}(\tau, Q)$  и  $V_i^{(2)}(\tau, Q)$ ), а также связь между элементами кластера и Н-АР (а именно  $R_0(\tau, P)$  и  $V_i^{(3)}(\tau, P)$ ) не являются вогнутыми функциями. То есть они не имеют экстремума в минимуме. Кроме того, условие (10) также не является и выпуклой функцией, т. е. не имеет экстремума в максимуме. Следовательно, задача определения (P2) в текущей форме также не является выпуклой, и здесь отсутствует явный и эффективный алгоритм ее оптимизации. В следующем подразделе мы предлагаем алгоритм для оптимального решения (P2).

### Оптимальный алгоритм по отношению к (P2)

Сначала мы определим  $W \triangleq \tau_1, Q \Phi 0$ . С ограничением мощности передачи, определенной в (2), имеем:

$$\text{tr}(W) = \text{tr}(\tau_1 Q) \leq \tau_1 P. \quad (19)$$

Соответственно, для  $i = 0, \dots, N-1$  мы меняем переменные как:

$$z_i @ \text{tr}(A_i Q) = \text{tr}(A_i W). \quad (20)$$

Таким образом,  $R_i^{(2)}(\tau, Q)$  и  $V_i^{(2)}(\tau, Q)$  в (7) и (14) можно переформулировать как функции от  $\tau$  и  $z = [z_1, \dots, z_{N-1}]'$ ,

$$R_i^{(2)}(\tau, z) = \tau_{2,i} \log_2(1 + \frac{z_i}{\tau_{2,i}}), \quad (21)$$

$$V_i^{(2)}(\tau, z) = \tau_{2,i} \log_2(1 + \rho_i \frac{z_i}{\tau_{2,i}}), \quad (22)$$

где

$$i = 1, \dots, N-1, a \bar{r}_i @ h \frac{g_i}{N_0} \text{ и } r_i @ h \frac{h_i}{N_0}$$

являются коэффициентами.

Теперь мы определяем

$$q_{3,i} @ \frac{t_{3,i} P_{3,i}}{h} \text{ для } i = 1, \dots, N-1.$$

Тогда  $R_0(\tau, P)$  и  $V_i^{(3)}(\tau, P)$  в формулах (12) и (15) можно переформулировать как функции от  $\tau$  и  $\theta = [\theta_{3,0}, \dots, \theta_{N-1}]'$ , т. е.:

$$R_0(\tau, \theta) = \tau_{3,0} \log_2(1 + \rho_0 \frac{\theta_{3,0}}{\tau_{3,0}}), \quad (23)$$

$$V_i^{(3)}(\tau, \theta) = \tau_{3,i} \log_2(1 + \rho_0 \frac{\theta_{3,i}}{\tau_{3,i}}). \quad (24)$$

Здесь, как и ранее,

$$i = 1, \dots, N-1, a r_0 @ h \frac{h_0}{N_0}.$$

Таким образом, ограничение мощности, указанное в (10), может быть повторно выражено уже как:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \theta_{3,i} \leq z_0. \quad (25)$$

Соответственно, проблему, определенную в (18), можно преобразовать в следующую эквивалентную задачу:

$$(P3): \max_{\tau, \theta, z, S, W} \bar{S}$$

См. выше:

$$R_0(\tau, \theta) \geq \bar{S}$$

при следующих условиях:

$$\begin{aligned} V_i^{(2)}(\tau, z) + V_i^{(3)}(\tau, \theta) &\geq \bar{S}, \\ R_i^{(2)}(\tau, z) &\geq \bar{S}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \\ \tau_0 + \tau_1 + \sum_{i=1}^{N-1} \tau_{2,i} + \sum_{i=0}^{N-1} \tau_{3,i} &\leq 1, \\ z_i &= \text{tr}(A_i W), \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \\ \sum_{i=0}^{N-1} \theta_{3,i} &\leq z_0, \tau \geq 0, \\ \text{tr}(W) &\leq \tau_1 P, W \Phi 0. \end{aligned}$$

Прежде чем решать проблему (P3), мы должны рассмотреть лемму 1, необходимую для дальнейшего доказательства.

Лемма 1: если  $x > 0$  и  $y > 0$ , то  $z = x \log_2(1+y/x)$  является совместной вогнутой функцией по  $(x, y)$ .

Доказательство: гессиан, т. е. определитель матрицы Гессе, используемой в статистическом анализе, по  $(x, y)$  равен:

$$\nabla^2 z(x, y) = \frac{1}{\ln 2(x+y)^2} \begin{bmatrix} -\frac{y^2}{x} & y \\ y & -x \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Когда  $x, y > 0$ , для любого произвольного вектора  $d = (d_1, d_2)'$  мы имеем:

$$d' \cdot \nabla^2 z \cdot d = - \frac{\left( \frac{d_1 y}{\sqrt{x}} - d_2 \sqrt{x} \right)^2}{\ln 2(x+y)^2} \leq 0. \quad (27)$$

Следовательно,  ${}^2z$  — это отрицательная полуопределенная матрица, что и завершает наше доказательство.

Из леммы 1 следует, что и  $R_i^{(2)}$  в (21), и  $V_i^{(2)}$  в (22) являются вогнутыми функциями в области  $(\tau, z)$ . Кроме того,  $R_0$  в (23) и  $V_i^{(3)}$  в (24) также являются вогнутыми функциями в области  $(\tau, \theta)$ . Поэтому первые три набора ограничений для (P3) являются выпуклыми ограничениями. Между тем остальные ограничения являются аффинными, т. е. сходными.

Соответственно, из этого следует, что наша цель и все ограничения, наложенные на (P3), являются выпуклыми, поэтому (P3) является выпуклой задачей оптимизации, которая может быть эффективно решена с помощью уже имеющихся алгоритмов оптимизации. Например, используя метод внутренней точки (метод, позволяющий решать задачи выпуклой оптимизации с условиями, заданными в виде неравенств, сводя исходную задачу к задаче выпуклой оптимизации), описанный в [22]. С этой целью обозначим оптимальное решение (P3) как  $\{\tau^*, \theta^*, z^*, -S^*, W^*\}$ . Тогда оптимальное решение  $\tau^*$  от (P1) будет аналогичным, как и в (P3). Оптимальные значения  $Q^*$  и  $P^*$  от (P1) можно восстановить, если  $Q^* = W^*/\tau_i^*$ , а  $P_{3,i}^* = \eta \theta_{3,i}^*/\tau_{3,i}^*$  для  $i = 1, \dots, N-1$ .

**Сопоставительный анализ на основе эталонных показателей (Benchmark Method)**

Для сравнения производительности мы рассматриваем два типичных эталонных метода. Для простоты предположим, что интервал SE в начале блока — время ( $\tau_0$ ) передачи, затраченное на выполнение анализа канала, для всех рассматриваемых вариантов решений одинаково.

**Кластерная кооперация без формирования диаграммы направленности антенн гибридной точки доступа**

Единственное отличие данного метода от предлагаемой кооперации заключается в том, что в Н-АР не применяется формирование специфической для кластера диаграммы направленности. Вместо этого энергия на все беспроводные устройства кластера во время фазы WET (см. рис. 1) излучается изотропно.

В этом случае оптимальное распределение времени  $\tau^*$  и распределение мощности передачи  $P^*$  могут быть получены путем фиксации  $Q^* = P/M \times I_B(P1)$ , где  $I$  обозначает единичную матрицу.

**Независимая передача с формированием оптимальной диаграммы направленности антенн Н-АР**

В этом случае все беспроводные устройства в узлах ячеек кластера передают данные в Н-АР независимо по протоколу сбора энергии и передачи данных, как это указано в [8]. В частности, в Н-АР сначала, для выполнения фазы WET, на интервале времени  $\tau_i'$  времени для каждого беспроводного устройства для передачи энергии питания используется антенна с той или иной диаграммой направленности. Затем узлы данного кластера по очереди передают свои сообщения в Н-АР, при этом каждая передача от таких узлов принимает значение  $\tau_{2,i}'$  (где  $i = 0, 1, \dots, N-1$ ). Кроме того, Н-АР для декодирования сообщения каждого пользователя использует суммирование дифференциально взвешенных сигналов каждого канала, что позволяет максимизировать отношение сигнал/шум (SNR).<sup>1</sup>

Скорость передачи данных  $i$ -го пользователя определяется как:

$$R_i'(\tau', Q') = \tau_{2,i}' \log_2(1 + \gamma_i'), \quad \text{для } i = 0, 1, \dots, N-1. \quad (28)$$

Здесь

$$\gamma_i' = \frac{\eta \tau_i' h_i r(A_i Q')}{N_0 \tau_{2,i}'}, \quad (29)$$

и обозначает значение SNR на выходе,  $Q'$  обозначает матрицу формирования луча, а  $\tau' \triangleq [\tau_1', \tau_{2,0}', \dots, \tau_{2,N-1}']'$ . Тогда максимальную пропускную способность можно получить, решая следующую задачу:

$$\max_{\tau', Q'} \min_{i=0, \dots, N-1} R_i'(\tau', Q')$$

см. выше

$$\tau_0 + \tau_1' + \sum_{i=0}^{N-1} \tau_{2,i}' \leq 1, \quad (30)$$

при условии

$$\tau_1' \geq 0, \quad \tau_{2,i}' \geq 0 \quad \text{для } i = 0, 1, \dots, N-1, \quad tr(Q') \leq P \quad \text{при } Q \succeq 0.$$

Оптимальное решение этой задачи можно получить аналогичным образом, как это было выполнено для (P3), детали здесь опущены для краткости.

**Результаты моделирования**

В этом разделе представлена оценка эффективности реализации предлагаемого метода кооперации. Во всех вариантах моделирования в качестве передатчика энергии в Н-АР

был использован передатчик TX91501-3W с выходной мощностью  $P = 3$  Вт от компании Powercast. А в качестве сборщика энергии на каждом из беспроводных устройств кластера использовались модули сбора энергии P2110 той же компании, выпускаемые под торговой маркой RF Powerharvester Receiver. Приемники этого типа имеют эффективность сбора энергии  $\eta = 0,51$ .

Без учета общих потерь, положим, что количество антенн гибридной точки доступа  $M = 5$ , а мощность шума  $N_0$  в рассматриваемой полосе пропускания составляет  $10^{-10}$  Вт для всех приемников мощности.

Как известно, среднее усиление канала между любыми двумя узлами, такими как Н-АР или беспроводные устройства кластера, является следствием затухания, зависящего от расстояния. Например, пусть  $d_{H,i}$  обозначает расстояние между точкой доступа и  $i$ -м беспроводным устройством — узлом ячейки этого кластера. Тогда среднее усиление канала определяется как:

$$\delta_i^2 = G_A \left( \frac{3 \times 10^8}{4\pi d_{H,i} f_c} \right)^\alpha,$$

где  $G_A$  — усиление антенны;  $\alpha$  — коэффициент затухания распространения электромагнитной волны;  $f_c$  — несущая частота. Также предполагалось, что:  $G_A = 2$ ,  $\alpha = 3$ , а  $f_c = 915$  МГц. Кроме того, 15 узлов кластера в виде беспроводных устройств равномерно распределены внутри круга с радиусом, равным  $r$  (в метрах), а центр этого круга находится в  $d$  метрах от точки доступа. Каждая точка на приведенных рисунках представляет собой в среднем 20 независимых мест размещения беспроводных устройств — узлов кластера.

На рис. 3 продемонстрировано влияние метода выбора назначенного устройства кластера на его производительность в части пропускной способности. В частности, были рассмотрены три метода выбора назначенного устройства: выбор в виде беспроводного устройства, ближайшего к центру кластера<sup>2</sup>; ближайшего к Н-АР; или узел, выбранный случайным образом<sup>3</sup> из всех беспроводных устройств данного кластера. Здесь было зафиксировано расстояние  $d$  на уровне 6 м, а изменялся только  $r$  (радиус кластера). Были рассмотрены два разных подхода к организации кластера — с предложенным нами методом внутрикластерной кооперации и без использования ононого, т. е. кооперация без формирования в точке доступа оптимальной диаграммы направленности. Как и ожидалось, скорости передачи данных трех методов выбора назначенного устройства уменьшаются по мере увеличения радиуса ячейки.

<sup>1</sup> Пространственное мультиплексирование путем использования направленных антенн Н-АР здесь не используется, поскольку количество беспроводных устройств в ячейках кластера зачастую намного превышает реально возможное число антенн, которые можно разместить в точке доступа. Если же даже пойти по этому пути, то, когда беспроводные устройства начнут одновременно передавать свои данные в точку доступа, мы столкнемся со значительными взаимными помехами устройств. Кроме того, здесь потребуются и высокая вычислительная способность. Все это приведет к чрезмерному усложнению реализации системы снятия данных в целом.

<sup>2</sup> Расположение центра кластера можно получить, взяв среднее значение координат местоположения всех составляющих кластер беспроводных устройств.

<sup>3</sup> Здесь производительность — это среднее значение пяти случайных значений выбора назначенного устройства для каждого размещения узлов кластера.

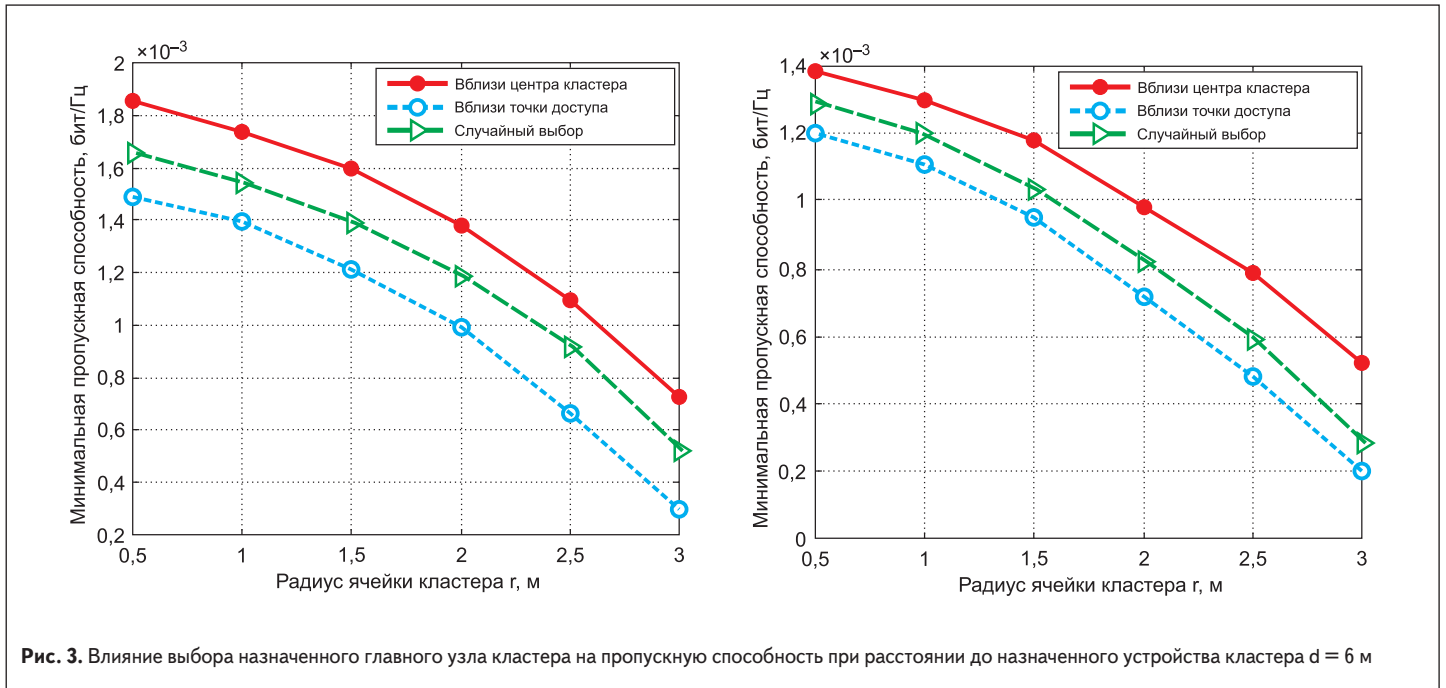


Рис. 3. Влияние выбора назначенного главного узла кластера на пропускную способность при расстоянии до назначенного устройства кластера  $d = 6$  м

Между тем, независимо от того, используется или нет в N-AP формирование диаграммы направленности ее антенн, выбор в качестве назначенного устройства узла, ближайшего к центру кластера, обеспечивает наилучшую производительность в части пропускной способности канала связи. Интересно, что мы здесь также видим и то, что выбор в качестве назначенного устройства узла, ближайшего к N-AP, дает еще худший результат, чем выбор в качестве назначенного устройства случайного узла кластера. Это связано с тем, что в среднем наибольшее расстояние между рядовыми членами кластера и назначенным устройством оказывается в случае предыдущего решения больше, чем для только что рассмотренного. Аналогичный результат наблюдается и на рис. 4, когда мы фиксируем радиус ячейки  $r$  на уровне 3 м и изменяем

расстояние  $d$ . Как на рис. 3, так и на рис. 4 показано, что для достижения высокой справедливости в части пропускной способности, или, как мы это обозначили в начале статьи, равноприоритетного без предпочтения распределения пропускной способности между пользователями, требуется эффективное внутрикластерное сотрудничество. Так что расстояние между рядовыми членами кластера и назначенным устройством должно быть минимизировано, например, путем выбора в качестве назначенного устройства узла, ближайшего к центру кластера. Поэтому, когда кластерная кооперация рассматривается в следующих симуляциях, мы принимаем ближайшее к центру кластера беспроводное устройство как назначенное.

На следующем этапе нашего исследования сравнивалась пропускная способность двух

предлагаемых вариантов кластерной кооперации на основе эталонных показателей, которые были рассмотрены выше. В частности, сравниваются как максимальная/минимальная пропускная способность (по критерию равноприоритетного без предпочтения распределения пропускной способности между пользователями), так и суммарная пропускная способность (эффективность использования спектра). На рис. 5 продемонстрированы результаты влияния внутрикластерных линий связи на общую (суммарную) пропускную способность, с фиксированием расстояния  $d$  до центра кластера на уровне 6 м и изменением радиуса  $r$  ячейки. Здесь мы видим, что все предложенные варианты решения проблемы очень чувствительны к деградации внутрикластерных линий связи. Когда радиус  $r$  ячейки увеличивается от одного

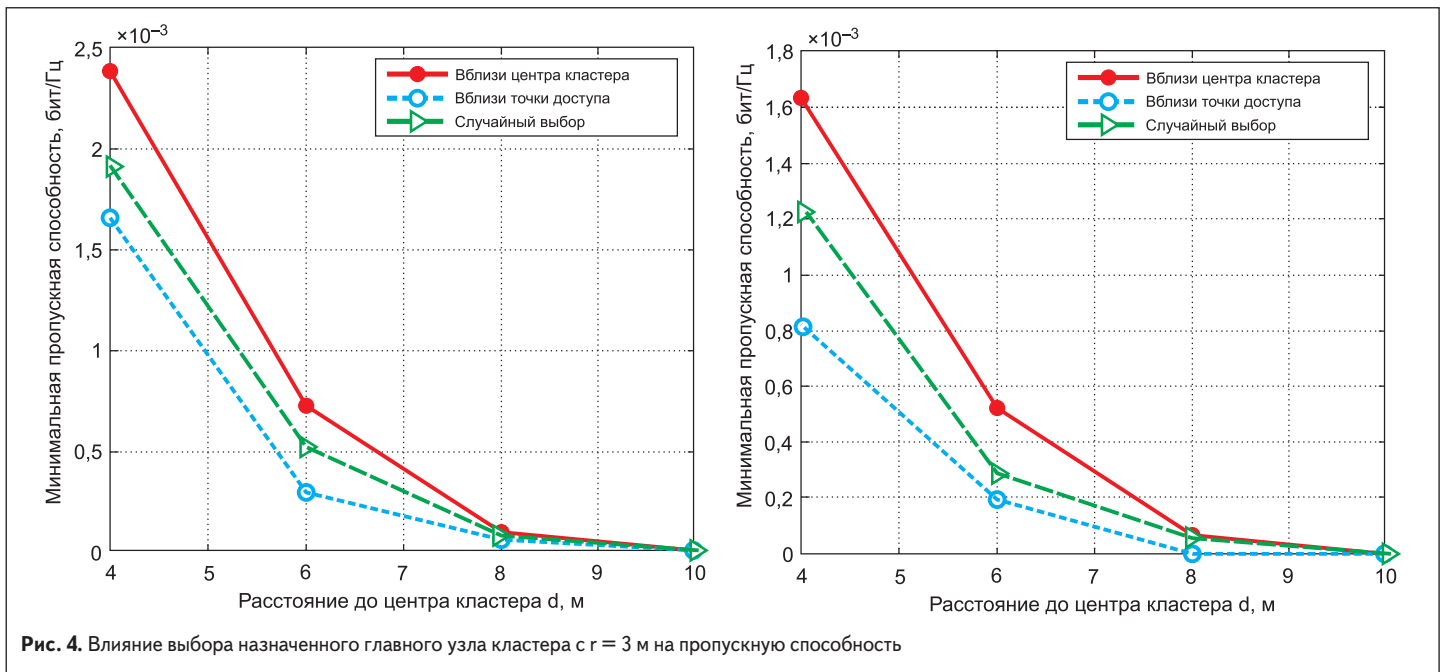


Рис. 4. Влияние выбора назначенного главного узла кластера с  $r = 3$  м на пропускную способность

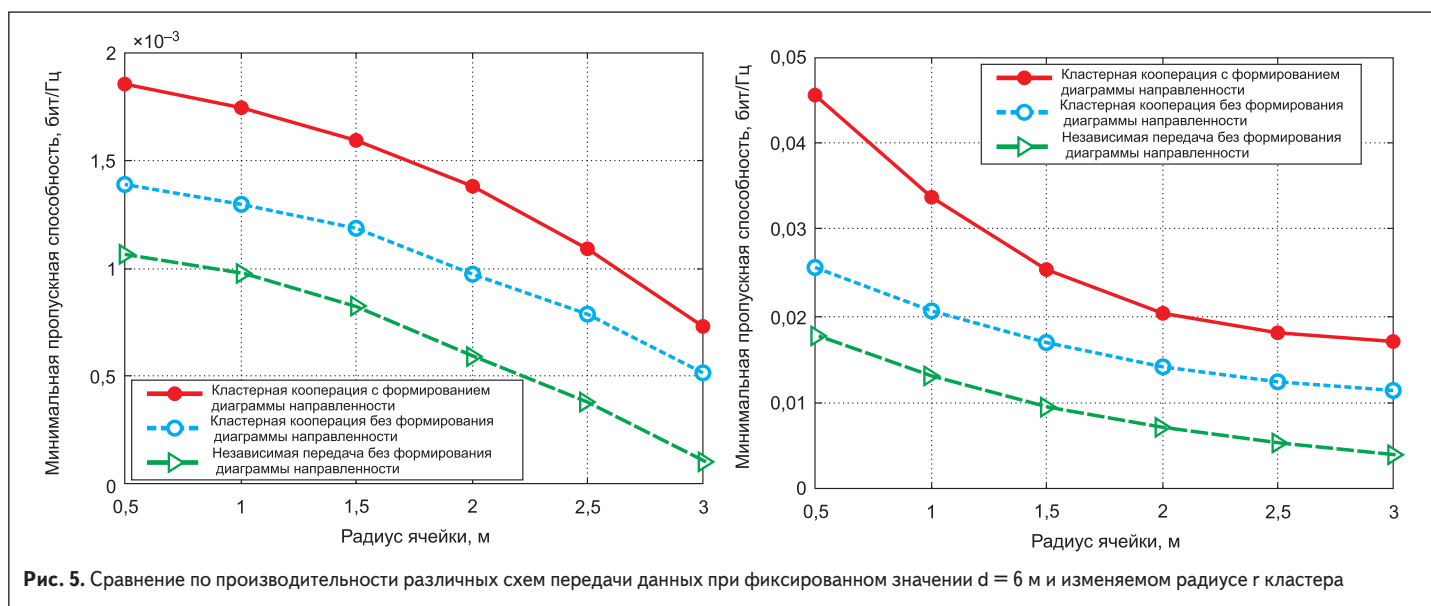


Рис. 5. Сравнение по производительности различных схем передачи данных при фиксированном значении  $d = 6$  м и изменяемом радиусе  $r$  кластера

до трех метров, то и максимальная пропускная способность, и суммарная пропускная способность снижаются более чем на 50%, независимо от особенностей той или иной реализации конечного решения.

Тем не менее мы все же можем заметить, что пропускная способность канала по критерию максимум/минимум падает быстрее, чем суммарная пропускная способность при увеличении радиуса  $r$ , поскольку пропускная способность напрямую определяется именно пользователями, близкими к краю кластера. По рис. 5 мы можем видеть очевидное преимущество предложенного нами метода по сравнению с двумя другими предлагаемыми вариантами кластерной кооперации на основе эталонных показателей, когда отсутствует либо кластерная кооперация, либо не используется формирование диаграммы направленности луча антенн для передачи энергии. В среднем предлагаемый метод кооперации дает примерно на 40% больше повышение максимальной пропускной способности, чем кооперация без формирования

диаграммы направленности, и более чем на 200% повышение максимальной пропускной способности, чем у независимого метода передачи. Более того, это преимущество еще более очевидно в случае оценки суммарной производительности.

На рис. 6 показаны результаты исследования влияния коммуникационных каналов «кластер–точка доступа» на общую производительность пропускной способности путем фиксации радиуса на уровне  $r = 3$  и изменения расстояния  $d$ . По графикам, приведенным на рисунке, можно видеть, что предлагаемый нами метод кооперации обеспечивает очевидные преимущества в части производительности по сравнению с двумя прочими традиционными методами, особенно в том случае, когда расстояние от центра кластера до гибридной точки доступа является малым и умеренным, например, если  $d < 8$  м. Однако по мере дальнейшего увеличения расстояния  $d$  (от назначенного устройства в центре кластера до точки доступа) всем решениям свойственны крайне

низкие скорости передачи данных. Причина этого кроется в резком затухании сигнала по мере увеличения расстояния между его источником и приемником.

Результаты исследований, полученные в результате моделирования решений, показывают, что эффективный рабочий диапазон рассматриваемого метода сотрудничества в основном ограничен относительно низкой эффективностью передачи энергии. Фактически беспроводная связь с питанием эффективна только тогда, когда расстояние для передачи мощности не слишком велико, так чтобы беспроводные устройства смогли собрать достаточную энергию для последующей передачи данных. На практике мы можем улучшить производительность в части пропускной способности несколькими способами, например увеличивая количество антенн гибридной точки доступа, оптимизируя маршрут или увеличивая ее мощность передачи. Из-за ограничения объема этой статьи мы опускаем моделирование этих методов повышения производительности. Результаты на рис. 5 и 6

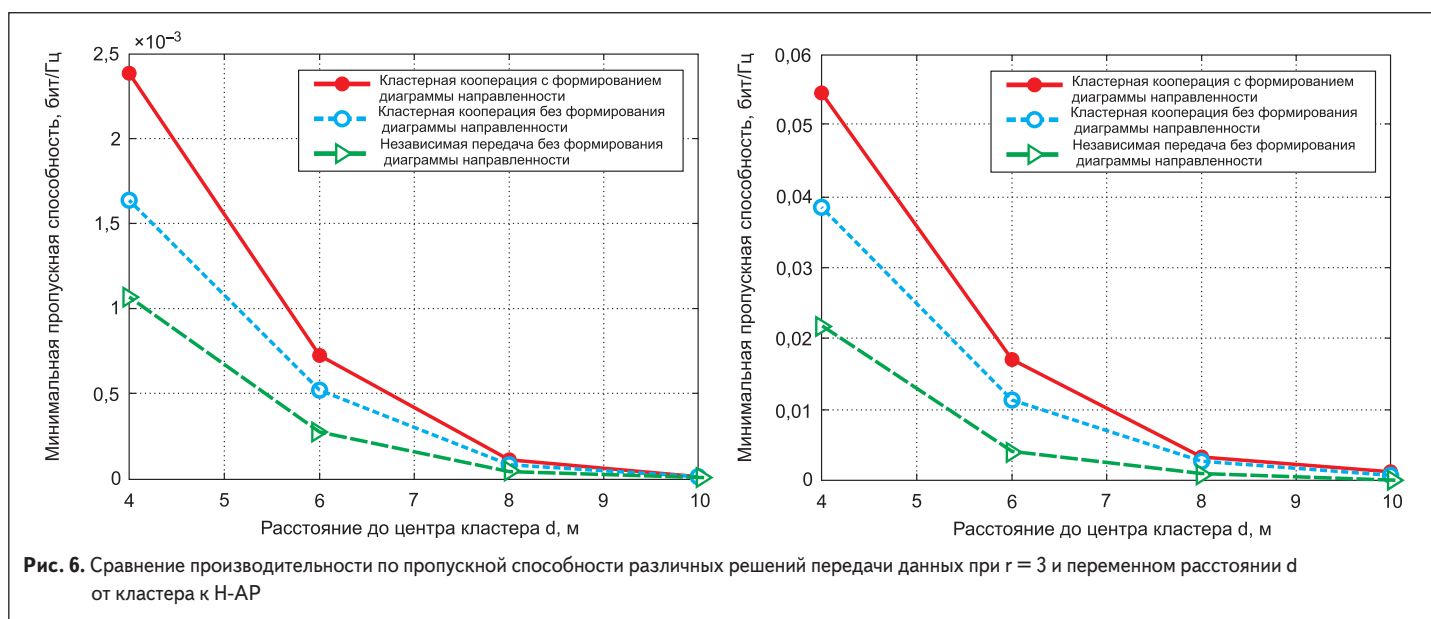


Рис. 6. Сравнение производительности по пропускной способности различных решений передачи данных при  $r = 3$  и переменном расстоянии  $d$  от кластера к Н-АР

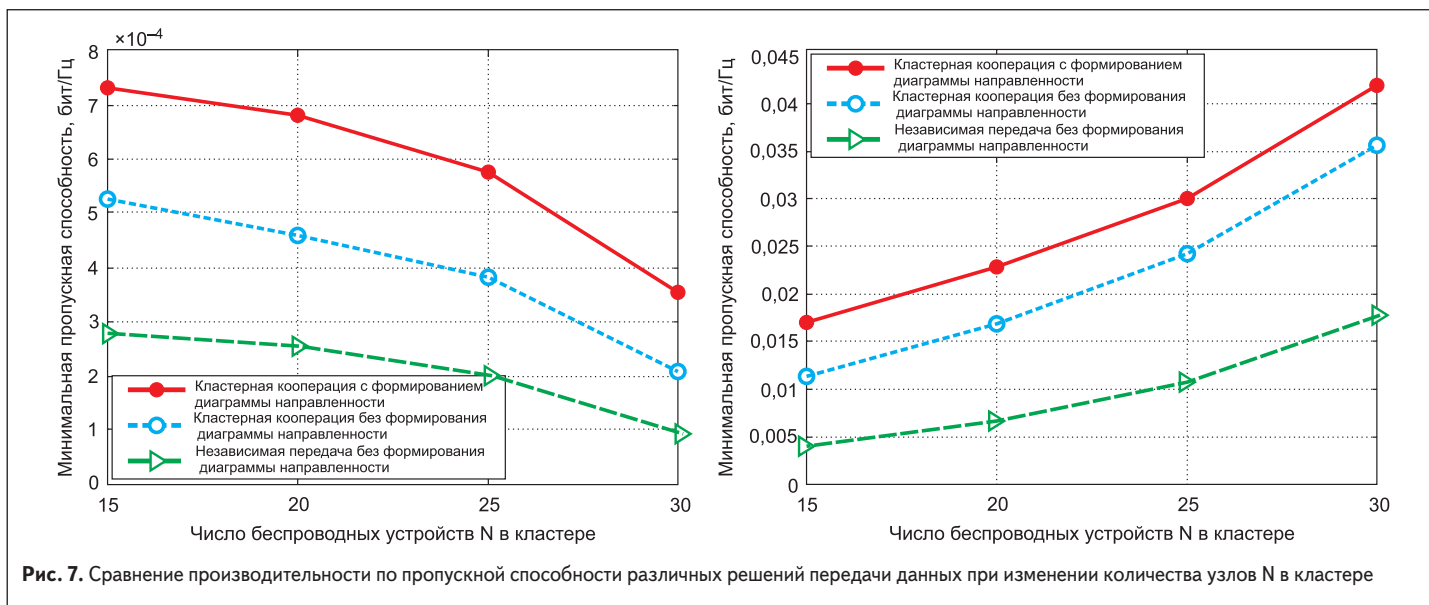


Рис. 7. Сравнение производительности по пропускной способности различных решений передачи данных при изменении количества узлов  $N$  в кластере

наглядно демонстрируют, что предлагаемый нами метод кооперации может эффективно повысить справедливость по отношению к узлам кластера, обеспечив равноприоритетное, без предпочтения, распределение пропускной способности между пользователями, а также суммарную пропускную способность путем повышения эффективности использования частотного спектра.

На рис. 7 мы предлагаем рассмотреть проведенную нами оценку устойчивости пропускной способности, когда число узлов кластера в виде  $N$  беспроводных устройств увеличивается с 15 до 30. Без учета общих потерь мы устанавливали следующие фиксированные условия:  $d = 6$  м и  $r = 3$  м. По рис. 7а видно, что пропускная способность по критерию максимум/минимум уменьшается с ростом количества беспроводных устройств в кластере, что было характерно для всех рассмотренных нами вариантов решений. Это связано с тем, что, в среднем, для каждого узла выделяется более короткий интервал времени передачи. Следовательно, скорость передачи данных от узла, находящегося в наихудших, с точки зрения радиоканала, условиях, уменьшается. Однако стоит отметить, что уменьшение пропускной способности, когда  $N$  увеличивается с 15 до 25, является умеренным, но становится более заметным при дальнейшем увеличении числа устройств.

Однако на рис. 7б мы видим, что суммарная пропускная способность с ростом  $N$  увеличивается, несмотря на то, что скорость передачи данных каждого отдельного узла может уменьшаться. Это указывает на то, что существует компромисс между пропускной способностью каждого отдельного беспроводного устройства (пользователя) и общей пропускной способностью сети. На практике количество беспроводных устройств в одном кластере должно быть умеренным, например не более 25. Тем не менее мы по-прежнему можем наблюдать значительный прирост производительности предлагаемого нами метода по сравнению с двумя другими рассмотренными нами.

В новом решении наихудший узел может поддерживать относительно высокую скорость передачи данных даже тогда, когда кластер сети является достаточно большим (например, при  $N = 30$ ).

## Выводы

В статье предложен метод кластерной кооперации в WPCN, в которых одно из беспроводных устройств кластера обозначается как назначенное (главное) устройство. В частности, для достижения направленной передачи энергии, позволяющей достичь оптимального баланса потребления энергии узлами, имеющими различные скорости передачи данных, предложена технология формирования диаграммы направленности в мультиантенной Н-АР, что особенно эффективно для назначенного устройства, отличающегося более высоким потреблением энергии. Авторами был предложен эффективный алгоритм для достижения оптимальной пропускной способности по критерию максимума/минимума среди узлов кластера путем совместной оптимизации решения в части диаграммы направленности излучателей Н-АР, распределения времени передачи между точкой доступа и беспроводными устройствами узлов кластера, а также распределения мощности передачи назначенного устройства. Детальное моделирование различных вариантов и режимов функционирования при практических сетевых настройках показало, что предлагаемый метод может значительно повысить «справедливость» по отношению к узлам кластера, обеспечив равноприоритетное, без предпочтения, распределение пропускной способности между пользователями, а также суммарную пропускную способность путем повышения эффективности использования частотного спектра, по сравнению с традиционными решениями. Кроме того, было установлено, что предлагаемая кооперация наиболее эффективна при выборе в качестве назначенного устройства узла, наиболее близкого к центру кластера. В этом случае и внутрикластерные

связи, и связь с Н-АР при умеренном числе беспроводных устройств в кластере в части пропускной способности оказываются достаточно эффективными. ■

Оригинал статьи опубликован на сайте [www.ieee.org/](http://www.ieee.org/)

## Литература

1. S. Bi, C. K. Ho and R. Zhang. Wireless powered communication: opportunities and challenges. // IEEE Commun. Mag. 2015. Vol. 53. № 4.
2. X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim and Z. Han. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey // IEEE Commun. Surveys Tuts. 2015. Vol. 17. № 2.
3. S. Bi, Y. Zeng and R. Zhang. Wireless powered communication networks: an overview // IEEE Commun. Mag. 2016. Vol. 23. № 2.
4. L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou and H. D. Sherali Making sensor networks immortal: an energy-renewal approach with wireless power transfer // IEEE/ACM Trans. Netw. 2012. Vol. 20. № 6.
5. S. Bi and R. Zhang. Placement optimization of energy and information access points in wireless powered communication networks // IEEE Trans. Wireless Commun. 2016. Vol. 15. № 3.
6. K. Huang and V. K. N. Lau. Enabling wireless power transfer in cellular networks: architecture, modeling and deployment // IEEE Trans. Wireless Commun. 2014. Vol. 13. № 2.
7. S. Bi and R. Zhang. Distributed charging control in broadband wireless power transfer networks // IEEE J. Sel. Areas in Commun. 2016. Vol. 34. № 12.
8. H. Ju and R. Zhang. Throughput maximization in wireless powered communication networks // IEEE Trans. Wireless Commun. 2014. Vol. 13. № 1.
9. H. Ju and R. Zhang. User cooperation in wireless powered communication networks // Proc. IEEE GLOBECOM. Austin, TX, USA. Dec. 2014.
10. M. Zhong, S. Bi and X. Lin. User cooperation for enhancement throughput fairness in wireless powered communication networks // Wireless Netw. 2017. Vol. 23. № 4.

11. H. Chen, Y. Li, J. L. Rebelatto, B. F. Uchoa-Filho and B. Vucetic. Harvest-then-cooperate: wireless-powered cooperative communications // *IEEE Trans. Signal Process.* 2015. Vol. 63. № 7.
12. R. Zhang and C.-K. Ho. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer // *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2013. Vol. 12. № 5.
13. Y. Zeng and R. Zhang. Optimized training design for wireless energy transfer // *IEEE Trans. Commun.* 2015. Vol. 63. № 2.
14. J. Xu and R. Zhang. Energy beamforming with one-bit feedback // *IEEE Trans. Signal Process.* 2014. Vol. 62. № 20.
15. Z. Rezaei, E. Yazdian, F. Tabataba. Optimal energy beam-forming under per-antenna power constraint. <http://arXiv:1702.07545>
16. L. Liu, R. Zhang and K. Chua. Multi-antenna wireless powered communication with energy beamforming // *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2014. Vol. 62. № 12.
17. G. Yang, C. K. Ho and R. Zhang. Throughput optimization for massive MIMO systems powered by wireless energy transfer // *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2015. Vol. 33. № 8.
18. H. Liang, C. Zhong, H. A. Suraweera, G. Zheng and Z. Zhang. «Optimization and analysis of wireless powered multi-antenna cooperative systems. // to appear in *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2017.
19. K. Xiong, C. Chen, G. Qu, P. Fan, K. Letaief. Group cooperation with optimal resource allocation in wireless powered communication networks // to appear in *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2017.
20. G. Chen, C. Li, M. Ye and J. Wu. An unequal cluster-based routing protocol in wireless sensor networks // *Wireless Netw.* 2009. Vol. 15. № 2.
21. X. Zhou, R. Zhang and C. K. Ho. Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff // *IEEE Trans. Commun.* 2013. Vol. 61. № 11.
22. S. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex Optimization.* Cambridge University Press, 2004.