

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АДАПТАЦИИ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕТЕВОГО УРОВНЯ AD HOC СЕТИ РАДИОСВЯЗИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-4-4-11

Демин Антон Дмитриевич,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, ademin42@mail.ru

Manuscript received 22 February 2025;
Accepted 10 April 2025

Терешонок Максим Валерьевич,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, m.v.tereshonok@mtuci.ru

Ильина Ольга Викторовна,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, o.v.ilina@mtuci.ru

Ключевые слова: *ad hoc*, моделирование *ad hoc*, физический уровень *ad hoc*, антенные системы, smart антенны, адаптивные антенны

В статье приведены результаты моделирования влияния изменения диаграмм направленности (ДН) адаптивных антенных систем узлов ad hoc сетей радиосвязи на метрики качества функционирования сетевого уровня протокола управления связью. Моделирование проведено с использованием кросс-уровневого подхода, позволяющего совместно рассматривать различные уровни протокола управления связью, в данном случае - физический и сетевой. В настоящем исследовании передача, приём и коллизии пакетов моделируются на физическом уровне, в отличие от традиционного подхода. Кросс-уровневое моделирование обеспечивает большую точность по сравнению с чисто статистическими методами моделирования исключительно сетевого уровня. Рассмотрена ad hoc сеть радиосвязи с одинаковыми узлами, имеющими антенные системы с изменяемыми диаграммами направленности и совершающими псевдослучайные перемещения в заданной области пространства. Методом моделирования показано существование оптимального значения ширины ДН, обеспечивающего наибольшую среднюю вероятность приёма пакета. Дальнейшее сужение ДН приводит к снижению средней вероятности приёма пакета. Полученные результаты можно применять при исследовании, разработке и оптимизации самоорганизующихся беспроводных сетей связи и устройств, применяемых в таких сетях, для анализа и контроля влияния параметров физического уровня на показатели эффективности сетевого уровня протокола управления связью.

Информация об авторах:

Демин Антон Дмитриевич, Московский технический университет связи и информатики, инженер, Москва, Россия. ORCID: 0009-0007-6242-465X

Терешонок Максим Валерьевич, Московский технический университет связи и информатики, начальник научно-исследовательского отдела, д.т.н., доцент, Москва, Россия. 0000-0003-1330-281X

Ильина Ольга Викторовна, Московский технический университет связи и информатики, научный сотрудник, Москва, Россия. ORCID: 0000-0001-5882-1467

Для цитирования:

Демин А.Д., Терешонок М.В., Ильина О.В. Исследование влияния адаптации диаграмм направленности антенн на эффективность сетевого уровня ad hoc сети радиосвязи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №4. С. 4-11.

For citation:

A.D. Dyomin, M.V. Tereshonok, O.V. Ilna, "Influence of antenna pattern adaptation on the efficiency of the network layer of ad hoc radio communication network," T-Comm, 2025, vol. 19, no. 4, pp. 4-11. (in Russian)

1 Введение

В современном мире наблюдается растущий интерес к замене всенаправленных антенн на направленные в беспроводных сетях радиосвязи, в том числе, с топологией ad hoc [1-5]. Этот интерес обусловлен множеством преимуществ, которые обеспечиваются применением направленных антенн, в отличие от всенаправленных аналогов. Эти преимущества включают в себя, в частности, увеличение дальности передачи, снижение уровня помех, снижение потребляемой мощности. Все эти преимущества, естественно, должны привести к общему повышению производительности ad hoc сетей [1, 3, 5]. Однако если рассматривать летающие ad hoc сети (FANET), узлы которых обладают достаточно большой подвижностью, применение узконаправленных антенн может оказать противоположный – негативный эффект [2]. Компромиссом в таких случаях становится применение адаптивных антенных систем, позволяющих изменять характеристики антенны в зависимости от текущей ситуации.

Для эффективного применения адаптивных антенн необходимо, чтобы применяемые алгоритмы маршрутизации учитывали и реализовывали данную возможность. Алгоритмы маршрутизации, учитывающие особенности физического уровня работы системы связи, относятся к кросс-уровневым и их разработка является достаточно трудоемкой задачей [3, 6]. При её решении обычно используются методы имитационного моделирования. Для получения адекватных результатов необходимо тщательным образом подойти к данному вопросу и учесть различные аспекты, оказывающие влияние на результат моделирования. К ним относятся применение правильной модели распространения сигналов, модели связи узлов, модель интерференции сигналов и др.

В данной статье рассматривается вопрос влияния антенных систем на функционирование ad hoc сети. В разделе 2 обобщаются работы других исследователей, посвященные данной тематике. В разделе 3 кратко описывается применяемая в исследовании экспериментальная модель. В разделе 4 приводятся результаты эксперимента и проводится анализ полученных результатов моделирования. В разделе 5 подводятся итог статьи.

2 Связанные работы

В одной из самых первых работ по маршрутизации с направленными антеннами [7] авторы исследуют влияние направленных антенн на реактивную маршрутизацию и предлагают пересылать запрос направленно, используя ограниченный набор узлов. Увеличенная дальность передачи из-за направленности антенн также влияет на применяемые алгоритмы маршрутизации: становится возможным уменьшить количество скачков, что влечёт за собой снижение задержки передачи и уменьшение загрузки линий. Также увеличенная дальность связи позволяет снизить фрагментированность сети.

Использование адаптивных узконаправленных антенн в ad hoc сетях позволяет снизить потребление энергии, увеличить пространственное переиспользование ресурсов, уменьшить внутриканальную интерференцию, повысить расстояние передачи, увеличить ёмкость ad hoc сети и снизить сквозную задержку доставки пакетов [8-14]. Направленные антенны

могут также использоваться для повышения помехоустойчивости линий связи [15]. Исследования [11, 16] показывают, что использование направленных антенн для маршрутизации позволяет уменьшить задержку и повысить пропускную способность сети. В работе [16] показано, что можно получить повышение пропускной способности порядка $2\pi/\sqrt{\alpha\beta}$ в полностью случайных сетях, где α и β – ширина диаграммы направленности (ДН) передающей и приёмной антенны соответственно.

Использование узконаправленных антенных систем для повышения пропускной способности сети оказывается намного выгоднее по сравнению с другими вариантами. В [11] выведена верхняя граница $\Theta(\sqrt{\log n / n})$ и нижняя граница $\Omega(1/\sqrt{n \log n})$ для ad hoc сети с случайно распределёнными узлами, где n – количество узлов в сети. В [17-19] повышения пропускной способности ad hoc сети достигают за счёт увеличенной задержки, оценки канала связи и инфраструктурных вложений.

В отличие от данных методов, использование узконаправленных антенных систем позволяет уменьшить задержку и не требует оценки канала. В работе [20] была проанализирована максимально достижимая пропускная способность в ad hoc сетях, когда каждый узел оборудован направленными антеннами. В работе предложено аналитическое решение для максимально достижимой пропускной способности при заданной ширине диаграммы направленности антенны и решение для оптимального значения ширины диаграммы направленности, чтобы достичь максимальной пропускной способности. В работе [21] исследован компромисс между направленными и всенаправленными антеннами в виде повышения пропускной способности и уменьшения сквозной задержки. В работе показано, что благодаря узконаправленным антеннам можно уменьшить количество скачков маршрутов и сквозную задержку. В [22] показано, что, используя одновременно направленные и ненаправленные антенны в сети и алгоритм кратчайшего пути, можно достичь лучших результатов по сравнению с использованием двух подсетей с направленными и ненаправленными антеннами.

В [15] было показано повышение пропускной способности и уменьшение задержки благодаря адаптации диаграммы направленности и контролю мощности. В [10] предложена изменённая версия протокола HSLs для направленных антенн. Канальный уровень включает в себя информацию о местоположении передатчика, угле и мощности передачи. Показано значительное снижение задержки и повышение пропускной способности. В [23] предложена модификация протокола DSR для направленных антенн. В работе [24] было проведено исследование влияния направленных антенн на протокол DSR. Изначально данный протокол был разработан для сетей связи, использующих всенаправленные антенны. Авторы исследования предлагают разделять принимающие узлы по их удаленности от передающего: узлы, связь с которыми можно организовать с помощью всенаправленных антенн, и узлы, для связи с которыми необходимо применять направленные антенны.

Применение узконаправленных антенн в самоорганизующихся сетях позволяет значительно усовершенствовать используемые алгоритмы маршрутизации [25-27]. Протоколы маршрутизации, рассчитанные на применение

узконаправленных антенн, позволяют формировать направленные в пространстве запросы, учитывая предполагаемое местоположение получателя. В случае многопутевой маршрутизации при использовании всенаправленных антенн, формируемые маршруты передачи данных начинают мешать друг другу, что сильно снижает эффективность использования множества путей для повышения пропускной способности и увеличения вероятности доставки пакетов. Но в случае использования узконаправленных антенн можно создавать несвязанные маршруты, не мешающие друг другу [28, 29]. На маршрутизацию влияет также планирование очередности передачи пакетов в разных направлениях.

3 Экспериментальная модель

1. Моделирование антенных систем

Фундаментальное свойство антенных систем – излучение и прием электромагнитных волн в пространстве – характеризуется диаграммой направленности (ДН) антенной системы. Соответственно, выделяют два типа антенн, зависящих от данной характеристики – всенаправленные и направленные. Всенаправленные антенны характеризуются одинаково эффективным излучением электромагнитных волн во всех направлениях. Направленные антенны обладают свойством излучать электромагнитные волны в одних направлениях более эффективно, чем в других.

Наибольший интерес при исследовании антенных систем представляет амплитудная ДН, так как она характеризует направленные свойства антенны. Для оценки направленных свойств обычно используют нормированные диаграммы направленности F . Тогда для угловых координат θ и ϕ :

$$F(\theta, \phi) = \frac{E(\theta, \phi)}{E_{max}}$$

где E_{max} – максимальное значение напряженности электрического поля, $E(\theta, \phi)$ – электрическая составляющая поля антенной системы. При анализе антенной системы важным параметром является коэффициент направленного действия (КНД) D , так как он позволяет определить коэффициент усиления антенны G . Для угловых координат θ и ϕ , КНД будет определяться как:

$$D(\theta, \phi) = \frac{4\pi \cdot F^2(\theta, \phi)}{\oint F^2(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\phi}$$

Коэффициент усиления антенны определяется как:

$$G(\theta, \phi) = \eta_{ant} \cdot D(\theta, \phi)$$

где η_{ant} – коэффициент эффективности антенны (КПД антенны).

При рассмотрении ДН в плоскости мы понимаем, что в идеальном случае всенаправленная ДН – окружность, а направленная ДН – сектор окружности, именуемый главным лепестком.

Представление ДН направленной антенны в виде сектора окружности является упрощенным относительно реальных ДН, так как не учитывается наличие боковых лепестков, осуществляющих излучение по нежелательным направлениям. Ширина основного лепестка ДН является одним из основных параметров, характеризующих антенную систему.

Данная величина определяется как угол между двумя направлениями, в которых интенсивность излучения равна половине максимальной (по всем направлениям) интенсивности излучения.

2. Моделирование распространения сигналов

Результаты моделирования в большой степени зависят от применяемой модели распространения сигналов. В данном исследовании предполагается, что передача сигналов осуществляется в условиях прямой видимости между узлами без учета переотражений. Такой крайний случай соответствует ситуации в сетях FANET. В подобной сети мощность принимаемых сигналов каждым из узлов определяется следующим образом [20]:

$$P_{rec} = \frac{P_{tr} G_{tr} G_{rec} C}{d^\eta}$$

где P_{tr} – мощность сигнала от передающего узла, G_{tr} – коэффициент усиления антенны передающего узла, G_{rec} – коэффициент усиления антенны приемного узла, C – константа, определяемая параметрами антенной системы, d – расстояние между передающим и приемным узлом, η – показатель потерь при распространении сигнала (в большинстве случаев ≥ 2).

3. Моделирование интерференции сигналов

При моделировании беспроводных сетей связи большое внимание необходимо уделить применяемой модели интерференции сигналов, так как от неё в значительной степени зависит адекватность получаемых результатов. Модель определяет, что происходит при одновременном приеме нескольких сигналов от разных источников. На рисунке в качестве примера 1 приведена временная диаграмма распространения сигналов (пакетов данных) в беспроводной сети, состоящей из нескольких узлов.

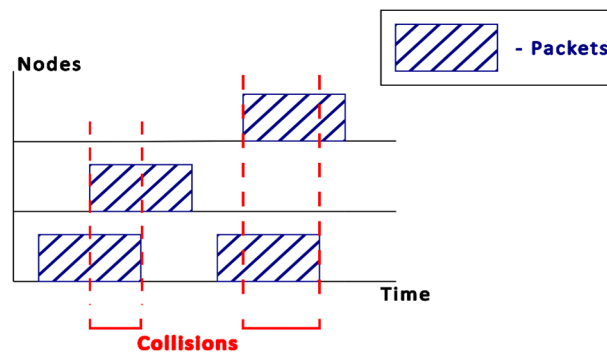


Рис. 1. Демонстрация эффекта интерференции пакетов в беспроводной сети с несколькими узлами связи

Распространённым подходом при моделировании интерференции пакетов в ad hoc сетях связи является применение статистических методов. Наибольшее распространение получила статистическая модель физической интерференции [20].

Данная модель учитывает различные мощности передатчиков сети и шумовую обстановку в канале связи, зависящую от мощности передачи интерферирующих сигналов. В такой модели условие принятия пакета определяется следующим образом:

$$\frac{\frac{P_i}{|X_i - X_R|^\eta}}{\sum_{j \in T, j \neq i} \frac{P_j}{|X_j - X_R|^\eta}} > \beta,$$

где β – пороговый уровень, необходимый для успешного принятия пакета, T – множество интерферирующих узлов, $P_{r,j}$ – мощность принимаемого пакета от мешающего узла, $P_{r,i}$ – мощность принимаемого пакета от передающего узла (где i – номер передающего узла, $P_{r,i}$ – номер интерферирующего узла), X_i – позиция передающего узла, X_R – позиция принимающего узла, $|X_i - X_R|$ – евклидово расстояние между узлами сети. Полученное выражение описывает модель сигнал-интерференция (SIR, *Signal to Interference Ratio*). Из данной модели можно получить модель сигнал-интерференция-шум (SINR, *Signal to Interference and Noise Ratio*), путем учета мощности шума N в канале:

$$N + \frac{\frac{P_i}{|X_i - X_R|^\eta}}{\sum_{j \in T, j \neq i} \frac{P_j}{|X_j - X_R|^\eta}} > \beta$$

Подобная статистическая модель не способна учитывать определенные характеристики передаваемых сигналов, например, спектральные: так как интерферирующие сигналы не являются белым гауссовским шумом, рассматривать их идентично окружающему шуму может быть не совсем корректно в ряде случаев.

В настоящем исследовании используется модель посимвольной интерференции сигналов [30], основанной на реализации полноценной демодуляции передаваемых в ad hoc сети пакетов. В такой модели полезный сигнал (комплексные символы) $s(t)$ передается по каналу связи с аддитивным шумом от окружения и интерферирующих узлов $n(t)$. Тогда узлы сети получают на вход сигнално-шумовую смесь $z(t)$:

$$z(t) = s(t) + n(t)$$

Оптимальный прием сигнала при подобных условиях осуществляется с помощью метода максимального правдоподобия. Условие максимума апостериорной вероятности принятия символа s_i в таком случае:

$$P(s_i / z) > P(s_j / z), j = 0, 1, \dots, M - 1, j \neq i$$

где M – количество возможных символов при заданной модуляции, $P(s_i / z)$ – апостериорная вероятность символа s_i , $P(s_j / z)$ – апостериорная вероятность символа s_j . Если воспользоваться формулой Байеса, то получим:

$$P(s_i / z) = \frac{P(s_i) p(z / s_i)}{p(z)},$$

где $p(z)$ – плотность вероятности сигнала $z(t)$, $p(z / s_i)$ – условная плотность вероятности сигнала $z(t)$ при условии $z(t) = s_i(t) + n(t)$. С учетом равновероятности сигналов:

$$P(s_i) = \frac{1}{M}$$

С учетом всего вышеописанного можно получить правило максимума правдоподобия, используемое при демодуляции принимаемых сигналов:

$$p(z / s_i) > p(z / s_j), j = 0, 1, \dots, M - 1, j \neq i$$

Из правила следует, что при демодуляции полученного сигнала принимается решение о принятии символа s_i в том случае, если максимальна условная плотность вероятности $p(z / s_i)$.

В отличие от других статистических способов моделирования интерференции пакетов, дающих оценку математического ожидания частоты коллизии пакетов в моделируемой сети, подобная модель предоставляет возможность анализировать полный объем статистических характеристик коллизий пакетов, в частности, получать многомерную плотность вероятности этого случайного процесса. Вычислительная сложность применяемого подхода не зависит от количества интерферирующих узлов в сети.

4 Результаты моделирования

Для проведения исследования был использован дискретно-событийный симулятор ad hoc сетей, поддерживающий физический уровень [30]. Симулятор получает на вход информацию о моделируемой сети, включающую: расположение узлов в пространстве, модели движения в пространстве, модели создания сообщений, параметры канала связи, параметры используемой антенной системы и применяемой модуляции. В результате работы формируется журнал событий, анализ которого позволяет строить любые необходимые для исследования статистики.

При исследовании самоорганизующейся мобильной сети с узлами, использующими адаптивные антенные решетки, использовалась модель, состоящая из 100 приемо-передающих узлов. На рисунке 2 приведено начальное расположение узлов в пространстве. Вид используемой модуляции – QPSK. Модель движения узлов – модель индивидуальных случайных перемещений. Канал связи – с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ). Отношение сигнал-шум (ОСШ) в канале связи – 10 дБ. Исследовалось влияние относительной мощности передачи сигнала P^* и ширины диаграммы направленности ϕ на число коллизий $n_{к\lambda z}$ и принятых $n_{пр}$ информационных пакетов. Важной ремаркой является рассмотрение именно относительных мощностей излучаемых радиосигналов. Сужение диаграммы направленности, приводящее к увеличению коэффициента усиления и, тем самым, к увеличению эквивалентной излучаемой мощности, не влияет на относительную мощность. Таким образом, использование относительных мощностей позволяет моделировать алгоритм снижения излучаемой мощности узлов, что более реалистично отражает управление системой связи.

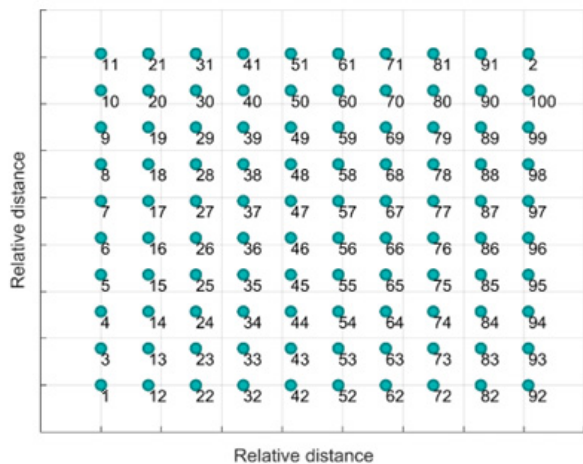


Рис. 2. Расположение узлов в пространстве

С целью оценки влияния ширины диаграммы направленности и мощности передачи на частоту коллизий пакетов и вероятность правильного приёма пакетов была проведена серия модельных экспериментов с различными значениями φ и P' , причём для всех узлов сети значения φ и P' выбирались одинаковыми.

Результаты исследования функционирования сформированной самоорганизующейся сети приведены на рисунках 3 и 4.

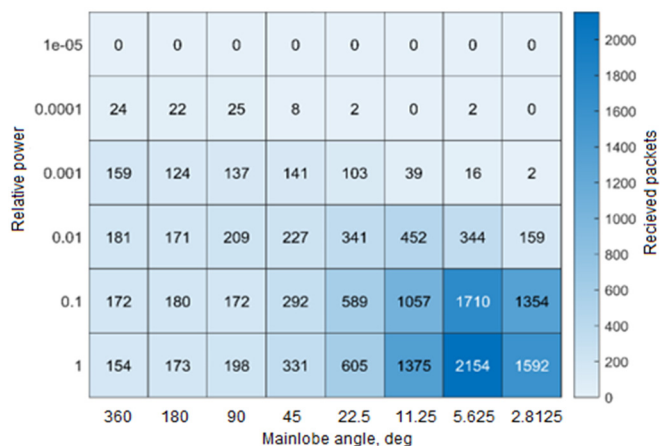


Рис. 3. Зависимость количества принятых пакетов от ширины ДН и мощности сигнала

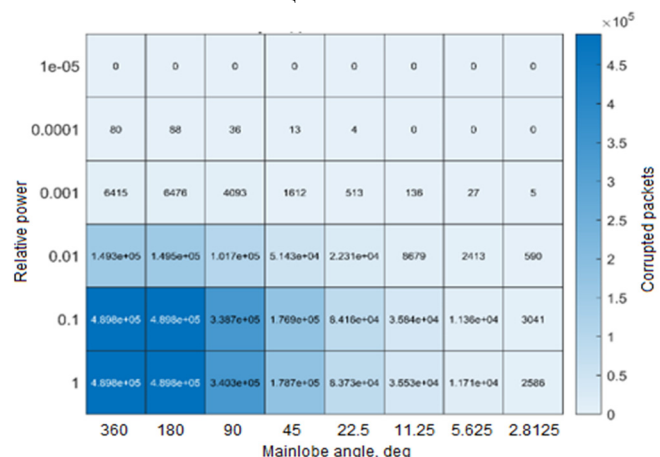


Рис. 4. Зависимость количества повреждённых пакетов от ширины ДН и мощности сигнала

Для анализа полученные результаты приведены в таблице.

Результаты моделирования ad hoc сети

φ , град	P'	$n_{\text{кол}}$	$n_{\text{пр}}$
≥ 180	$\geq 0,1$	$4,9 \cdot 10^5$	170
	0,01	$1,5 \cdot 10^5$	176
	0,001	6446	142
11,25	0,001	136	39
	0,01	8679	563
5,625	0,001	27	16
	0,01	2413	344
2,8125	0,001	5	2
	0,01	590	159
11,25	$\geq 0,1$	$3,6 \cdot 10^4$	1216
5,625		$1,2 \cdot 10^4$	1932
2,8125		2814	1473

Из рассмотрения таблицы следует, что в случае применения антенных систем с широкой диаграммой направленности ($\varphi \geq 180^\circ$) при больших значениях относительной мощности ($P' \geq 0,1$) количество коллизий пакетов достигает максимума при том, что количество принятых пакетов практически не изменяется. Анализируя результаты, полученные при использовании ДН такой же ширины, но при меньшей относительной мощности, можно заметить, что число коллизий значительно уменьшается, а число принятых пакетов изменяется в весьма незначительных пределах. Из данных результатов можно сделать вывод, что применение антенн с широкой ДН в мобильных ad hoc сетях при большой относительной мощности передачи негативно влияет на качество функционирования сети, так как при значительно возрастающем числе коллизий пакетов (в 23 раза) число принимаемых пакетов практически не изменяется (увеличение в 1,2 раза).

Рассмотрим результаты моделирования при применении узких диаграмм направленности ($\varphi \leq 11^\circ$). Сразу можно отметить, что при малых величинах относительной мощности ($P' = 0,001$) при сужении диаграммы направленности наблюдается значительное уменьшение числа принятых пакетов при таком же уменьшении числа коллизий. Характер данной зависимости сохраняется и при увеличении мощности до $P' = 0,01$. Наблюдаемая тенденция объясняется тем, что узлы мобильной сети являются подвижными, из-за чего уменьшение числа коллизий не обязательно приводит к пропорциональному увеличению числа принятых пакетов, так как передающий узел может просто «промахнуться», пытаясь передать пакет.

При увеличенной относительной мощности передачи ($P' \geq 0,1$) с уменьшением ширины диаграммы направленности можно заметить, что число принятых пакетов достигает максимального значения при $\varphi \approx 5,6^\circ$, после чего снова уменьшается. При этом число коллизий снижается гораздо сильнее и достигает своего минимума при $\varphi \approx 2,8^\circ$. Из данных результатов можно сделать вывод, что при организации ad hoc сети связи без применения каких-либо алгоритмов маршрутизации и с одинаковыми условиями передачи для всех узлов сети (одинаковые мощности передачи и применяемые антенные системы) существует оптимальное значение ширины диаграммы направленности ($\varphi \approx 5,6^\circ$ в рассмотренном случае). Данная ширина ДН обеспечивает наибольшую

вероятность приёма пакета. Дальнейшее сужение ДН ($\varphi < 5,6^\circ$) приводит к снижению вероятности приёма пакета.

5 Заключение

Моделирование беспроводных ad hoc сетей является весьма сложной задачей, в которой необходимо тщательно подходить к вопросу выбора модели физического уровня.

Проведенный эксперимент продемонстрировал следующие особенности применения адаптивных антенных систем в самоорганизующихся сетях мобильной связи:

1) при отсутствии адаптации диаграмм направленности (полная ширина ДН при большой относительной мощности передачи), наблюдается наибольшее число коллизий пакетов сообщений $\bar{n}_{клз} = 4,9 \cdot 10^3$;

2) при уменьшении мощности передаваемого пакета на выходе антенной системы при широкой ДН наблюдается значительное уменьшение числа коллизий ($\bar{n}_{клз}(0,01) / \bar{n}_{клз}(0,001) = 23$) при практически неизменном числе принятых пакетов ($\bar{n}_{пр}(0,01) / \bar{n}_{пр}(0,001) = 1,2$);

3) при уменьшении ширины основного лепестка ДН наблюдается уменьшение частоты коллизий пакетов при любой мощности передачи;

4) при уменьшении ширины основного лепестка ДН при малых относительных мощностях передачи наблюдается значительное уменьшение числа принятых пакетов ($c_{n_{пр}} = 32$ до $n_{пр} = 2$ при $P' = 0,001$, $c_{n_{пр}} = 452$ до $n_{пр} = 159$ при $P' = 0,01$);

5) при чрезмерном уменьшении ширины основного лепестка ДН наблюдается уменьшение числа принятых пакетов в 1,3 раза. При этом частота коллизий также уменьшается в 4 раза;

6) существует оптимальное значение ширины ДН, обеспечивающее наибольшую вероятность приёма пакета. Дальнейшее сужение ДН приводит к снижению вероятности приёма пакета. Для рассмотренной ad hoc сети без применения алгоритмов маршрутизации оптимальное значение ширины ДН составило $\varphi = 5,6^\circ$.

Подводя итог, можно заключить, что в общем случае увеличение мощности передаваемого пакета приводит к росту частоты коллизии пакетов, особенно сильно при применении широких диаграмм направленности, но увеличенная мощность позволяет обеспечить связь между далеко расположенными узлами, благодаря чему растёт общее число принятых пакетов в сети. Данный момент необходимо учитывать при разработке и выборе алгоритмов маршрутизации трафика в ad hoc сетях, особенно если узлы сети обладают большой подвижностью. Можно предположить, что оптимальным вариантом является применение узконаправленных антенных систем с малой относительной мощностью передачи для связи между близко расположенными или медленно перемещающимися узлами, а для связи между далеко расположенными узлами необходимо применять алгоритмы маршрутизации. Применение широко направленных антенн имеет смысл только при малых относительных мощностях передачи на близкие расстояния.

Данные результаты могут быть использованы при разработке сетей связи класса FANET, VANET и MANET и исследовании кросс-уровневых алгоритмов маршрутизации и организации для ad hoc сетей.

Литература

1. Biomo J. D. M. M., Kunz T. St-Hilaire M. Directional antennas in FANETs: A performance analysis of routing protocols // 2017 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (MoWNeT). IEEE, 2017. С. 1-8.
2. Khan M. A. et al. On the performance of flying ad-hoc networks (FANETs) with directional antennas // 2018 5th international multi-topic ICT conference (IMTIC). IEEE, 2018. С. 1-8.
3. Ivanov V., Tereshonok M. Cross-Layer Methods for Ad Hoc Networks – Review and Classification // Future Internet. 2024. Т. 16. № 1. С. 29.
4. Mok T. S. C. Implementation and performance analysis of wireless Ad-hoc Mesh networks : дис. UTAR, 2024.
5. Agrawal R. et al. Classification and comparison of ad hoc networks: A review // Egyptian Informatics Journal. 2023. Т. 24. № 1 С. 1-25.
6. Mansour H. S. et al. Cross-Layer and Energy-Aware AODV routing protocol for flying Ad-hoc networks // Sustainability. 2022. Т. 14. № 15. С. 8980.
7. Nasipuri A. et al. On-demand routing using directional antennas in mobile ad hoc networks // Proceedings Ninth International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No. 00EX440). IEEE, 2000. С. 535-541.
8. Lahsen-Cherif I., Zitoune L., Vèque V. Energy efficient routing for wireless mesh networks with directional antennas: When Q-learning meets ant systems // Ad Hoc Networks. 2021. Т. 121. С. 102589.
9. Ahmad K. S. F. et al. Improved power optimization techniques in mobile ad hoc network // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2024. Т. 102. № 24.
10. Ramanathan R. et al. Ad hoc networking with directional antennas: a complete system solution // IEEE Journal on selected areas in communications. 2005. Т. 23. № 3. С. 496-506.
11. Laarhuis J., Chiumento A. Capacity and delay analysis of multi-hop wireless networks // Ad Hoc Networks. 2025. Т. 169. С. 103750.
12. Zhang J. L., Liew S. C. Capacity improvement of wireless ad hoc networks with directional antennae // ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review. 2006. Т. 10. № 4. С. 17-19.
13. Reyna A. et al. Virtual Antenna Arrays with Frequency Diversity for Radar Systems in Fifth-Generation Flying Ad Hoc Networks // Applied Sciences. 2024. Т. 14. № 10. С. 4219.
14. Xiang L. et al. Energy-Efficient Dynamic Array-Steering and Beamforming for UAV-Aided Communications. 2024.
15. Lu X. et al. Minimizing detection probability routing in ad hoc networks using directional antennas // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2009. Т. 2009. С. 1-8.
16. Yi S. et al. How is the capacity of ad hoc networks improved with directional antennas? // Wireless Networks. 2007. Т. 13. № 5. С. 635-648.
17. El Gamal A. et al. Optimal throughput-delay scaling in wireless networks-part I: The fluid model // IEEE Transactions on Information Theory. 2006. Т. 52. № 6. С. 2568-2592.
18. Grossglauser M., Tse D. N. C. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks // IEEE/ACM transactions on networking. – 2002. Т. 10. № 4. С. 477-486.
19. Ozgur A., Lévêque O., David N. C. Hierarchical cooperation achieves optimal capacity scaling in ad hoc networks // IEEE Transactions on information theory. 2007. Т. 53. № 10. С. 3549-3572.
20. Chen Y. et al. Throughput analysis in mobile ad hoc networks with directional antennas // ad hoc networks. 2013. Т. 11. № 3. С. 1122-1135.
21. Dai H. N., Zhao Q. On the delay reduction of wireless ad hoc networks with directional antennas // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2015. Т. 2015. С. 1-13.
22. Pottinger T., Yousefi'zadeh H., White A. Integrating directional links with omni-directional tactical MANET stack: An experimental analysis // MILCOM 2006-2006 IEEE Military Communications conference. IEEE, 2006. С. 1-7.
23. Gharavi H., Hu B. Directional antenna for multipath ad hoc routing // 2009 6th IEEE Consumer Communications and Networking

Conference. IEEE, 2009. С. 1-5.

24. Choudhury R. R., Vaidya N. H. Impact of directional antennas on ad hoc routing // IFIP international conference on personal wireless communications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. С. 590-600.

25. Bedasa M. F., Bedada A. S., Mulatu W. B. Adaptation of smart antenna with AODV routing protocol for ad hoc wireless networks // Open Access Library Journal. 2020. Т. 7. № 7. С. 1-21.

26. Hang Z. et al. A multi-token sector antenna neighbor discovery protocol for directional ad hoc networks // China Communications. 2024.

27. Zhao J. et al. Directional Multicast Routing in Mobile Networks Through Tracking of Directional Interference Dynamics // IEEE Access. 2024.

28. He L. et al. Directional Interference Avoidance with Minimum Inter-Aircraft Interactions for 33Flying Ad Hoc Networks (FANET) With Directional Antennas Through Distributed Multi-Agent Reinforcement Learning // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2024.

29. Okazaki S., Higaki H. Wireless Multihop Transmissions with Concurrent Forwarding without Collisions by Capture Effect // 2024 International Symposium on Parallel Computing and Distributed Systems (PCDS). IEEE, 2024. С. 1-7.

30. Демин А.Д., Терешонок М.В. Моделирование посимвольной интерференции в беспроводных ад хос сетях // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 12. С. 44-50.

INFLUENCE OF ANTENNA PATTERN ADAPTATION ON THE EFFICIENCY OF THE NETWORK LAYER OF AD HOC RADIO COMMUNICATION NETWORK

Anton D. Dyomin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, ademin42@mail.ru

Maxim V. Tereshonok, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, m.v.tereshonok@mtuci.ru

Olga V. Ilina, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, o.v.ilina@mtuci.ru

Abstract

The paper presents the results of modeling the impact of changing the ad hoc radio communication network nodes' adaptive antenna systems radiation pattern (RP) on the quality metrics of the communication protocol network layer. Modeling is carried out using a cross-level approach, which allows to consider various OSI model layers jointly. This paper deals with physical and network layer interaction. Packet transmission, reception and collisions are modeled at the physical layer, contrary to the commonly used approach. Cross-layer modelling provides greater accuracy compared to purely statistical methods of modeling network layer exclusively. We consider an ad hoc radio communication network with identical nodes having antenna systems with variable radiation patterns and making pseudo-random moves in a given region. The simulation method shows that there is an optimal value of the RP width that provides the highest packet receiving probability. Further narrowing of the RP leads to a decrease in the packet receiving probability. The obtained results can be applied to the research, development and optimization of self-organizing wireless communication networks and the equipment for such networks to analyze and control the influence of physical layer parameters on the performance of the communication protocol network layer.

Keywords: ad hoc, ad hoc modeling, ad hoc physical layer, antennas systems, smart antennas, adaptive antennas

References

- [1] J. D. M. M. Biomo, T. Kunz, M. St-Hilaire, "Directional antennas in FANETs: A performance analysis of routing protocols," *2017 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (MoWNeT)*. IEEE, 2017, pp. 1-8.
- [2] M. Khan A. et al., "On the performance of flying ad-hoc networks (FANETs) with directional antennas," *2018 5th international multi-topic ICT conference (IMTIC)*. IEEE, 2018, pp. 1-8.
- [3] V. Ivanov, M. Tereshonok, "Cross-Layer Methods for Ad Hoc Networks-Review and Classification," *Future Internet*. 2024. vol. 16. no. 1, pp. 29.
- [4] T. S. C. Mok, "Implementation and performance analysis of wireless Ad-hoc Mesh networks," UTAR, 2024.
- [5] R. Agrawal et al., "Classification and comparison of ad hoc networks: A review," *Egyptian Informatics Journal*. 2023. vol. 24. no. 1, pp. 1-25.
- [6] H. S. Mansour et al., "Cross-Layer and Energy-Aware AODV routing protocol for flying Ad-hoc networks," *Sustainability*. 2022. vol. 14. no. 15, pp. 8980.
- [7] A. Nasipuri et al., "On-demand routing using directional antennas in mobile ad hoc networks," *Proceedings Ninth International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No. 00EX440)*. IEEE, 2000, pp. 535-541.
- [8] I. Lahsen-Cherif, L/ Zitoune, V. Veque, "Energy efficient routing for wireless mesh networks with directional antennas: When Q-learning meets ant systems," *Ad Hoc Networks*. 2021. vol. 121, pp. 102589.

- [9] K. S. F. Ahmad et al., "Improved power optimization techniques in mobile Ad-hoc network," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2024. vol. 102. no. 24.
- [10] R. Ramanathan et al., "Ad hoc networking with directional antennas: a complete system solution," *IEEE Journal on selected areas in communications*. 2005. vol. 23. no. 3, pp. 496-506.
- [11] J. Laarhuis, A. Chiumento, "Capacity and delay analysis of multi-hop wireless networks," *Ad Hoc Networks*. 2025. vol. 169, pp. 103750.
- [12] J. L. Zhang, S. C. Liew, "Capacity improvement of wireless ad hoc networks with directional antennae," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. 2006. vol. 10. no. 4, pp. 17-19.
- [13] A. Reyna et al., "Virtual Antenna Arrays with Frequency Diversity for Radar Systems in Fifth-Generation Flying Ad Hoc Networks," *Applied Sciences*. 2024. vol. 14. no. 10, pp. 4219.
- [14] L. Xiang et al., "Energy-Efficient Dynamic Array-Steering and Beamforming for UAV-Aided Communications," 2024.
- [15] X. Lu et al., "Minimizing detection probability routing in ad hoc networks using directional antennas," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2009. vol. 2009, pp. 1-8.
- [16] S. Yi et al., "How is the capacity of ad hoc networks improved with directional antennas?," *Wireless Networks*. 2007. vol. 13. no. 5, pp. 635-648.
- [17] A. El Gamal et al., "Optimal throughput-delay scaling in wireless networks-part I: The fluid model," *IEEE Transactions on Information Theory*. 2006. vol. 52. no. 6, pp. 2568-2592.
- [18] M. Grossglauser, D. N. C. Tse, "Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks," *IEEE/ACM transactions on networking*. 2002. vol. 10. no. 4, pp. 477-486.
- [19] A. Ozgur, O. Leveque, N. C. David, "Hierarchical cooperation achieves optimal capacity scaling in ad hoc networks," *IEEE Transactions on information theory*. 2007. vol. 53. no. 10, pp. 3549-3572.
- [20] Y. Chen et al., "Throughput analysis in mobile ad hoc networks with directional antennas," *Ad hoc networks*. 2013. vol. 11. no. 3, pp. 1122-1135.
- [21] H. N. Dai, Q. Zhao, "On the delay reduction of wireless ad hoc networks with directional antennas," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2015. vol. 2015, pp. 1-13.
- [22] T. Pottinger, H. Yousefi'zadeh, A. White, "Integrating directional links with omni-directional tactical MANET stack: An experimental analysis," *MIL-COM 2006-2006 IEEE Military Communications conference*. IEEE, 2006, pp. 1-7.
- [23] H. Gharavi, B. Hu, "Directional antenna for multipath ad hoc routing," *2009 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*. IEEE, 2009, pp. 1-5.
- [24] R. R. Choudhury, N. H. Vaidya, "Impact of directional antennas on ad hoc routing," *IFIP international conference on personal wireless communications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 590-600.
- [25] M. F. Bedasa, A. S. Bedada, W. B. Mulatu, "Adaptation of smart antenna with AODV routing protocol for ad hoc wireless networks," *Open Access Library Journal*. 2020. vol. 7. no. 7, pp. 1-21.
- [26] Z. Hang et al., "A multi-token sector antenna neighbor discovery protocol for directional ad hoc networks," *China Communications*. 2024.
- [27] J. Zhao et al., "Directional Multicast Routing in Mobile Networks Through Tracking of Directional Interference Dynamics," *IEEE Access*. 2024.
- [28] L. Heet al., "Directional Interference Avoidance With Minimum Inter-Aircraft Interactions for 33Flying Ad Hoc Networks (FANET) with Directional Antennas Through Distributed Multi-Agent Reinforcement Learning," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2024.
- [29] S. Okazaki, H. Higaki, "Wireless Multihop Transmissions with Concurrent Forwarding without Collisions by Capture Effect," *2024 International Symposium on Parallel Computing and Distributed Systems (PCDS)*. IEEE, 2024, pp. 1-7.
- [30] A. D. Dyomin, M. V., "Tereshonok Symbol-Matched Wireless ad hoc Network Physical Layer Modelling," *T-Comm*. 2023. vol. 17, no.12, pp. 44-50.

Information about authors:

Anton D. Dyomin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, engineer, Moscow, Russia. ORCID: 0009-0007-6242-465X

Maxim V. Tereshonok, Moscow Technical University of Communications and Informatics, head of scientific research department, doctor of technical sciences, associated professor, Moscow, Russia. 0000-0003-1330-281X

Olga V. Ilina, Moscow Technical University of Communications and Informatics, scientific researcher, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0001-5882-1467