

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ ИНФОРМАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ СТАНДАРТА IEEE 802.11 С MIMO

Рассмотрены способы повышения доступности информации в беспроводных системах стандарта IEEE 802.11. Первый основан на использовании дополнительного элемента — ускоряющей металлопластинчатой линзы (УМЛ), фокусирующей излучение в нужном направлении. Экспериментально установлено, что одна УМЛ позволяет повысить мощность сигнала в точке приема на 5–7 дБ. Для систем MIMO с двумя антеннами предложена методика выбора универсального профиля УМЛ, оценены ее диапазонные свойства и выработаны рекомендации по применению. Второй способ — разнесенный по поляризации прием при неоднородной поляризации поля, вызванной хаотически ориентированными отражающими предметами. Предпочтительным является использование на обеих сторонах трех штатных антенн, разнесенных по поляризации на 45 градусов.

Ключевые слова: доступность, беспроводный доступ, системы с MIMO, ускоряющая металлопластинчатая линза, фазовое распределение, скорость передачи информации, поляризация.

Постановка задачи

Доступность информации является ключевым требованием к защищенным информационным технологиям. В системах с беспроводным доступом обеспечение этого требования в решающей степени зависит от отношения мощности сигнала к мощности шума на входе приемных устройств пользователя и точки доступа. Системы стандарта IEEE 802.11 функционируют в достаточно сложной окружающей обстановке, что приводит к неоднородному распределению интенсивности и поляризации поля в зоне обслуживания. Поэтому некоторые пользователи оказываются в неблагоприятных условиях. Кроме того, в ряде случаев может возникать необходимость обеспечить доступ к сети отдельного сравнительно удаленного абонента (например, в корпоративных сетях в удаленной точке здания, когда установка дополнительного роутера нецелесообразна). Для обеспечения доступности информации в подобных условиях предлагается использовать два способа.

Первый основан на использовании в качестве дополнительного автономного элемента ускоряющей металлопластинчатой линзы (УМЛ), фокусирующей излучение в нужном направлении [1, 2]. Такая линза легка и проста в изготовлении по сравнению с замедляющей. Устанавливать ее можно как около точки доступа, так и около пользователя. Использование УМЛ в системах MIMO с двумя и более излучателями приводит к формированию системой, соответственно, двух и более рассогласованных по углам диаграмм направленности (ДН), так как излучатели неизбежно придется разносить относительно фокуса линзы. В системах MIMO это приведет либо к снижению уровня сигналов в каждом из приемных каналов (при расположении приемных антенн симметрично относительно равносигнального направления), либо к заметным отличиям уровней сигналов в приемных каналах. В обоих случаях может нивелироваться смысл применения MIMO. Возможные пути преодоления указанной проблемы рассматриваются в статье.

Второй способ предусматривает разнесенный по поляризации прием [2, 3]. В системах MIMO его использование представляется целесообразным наряду с применением дублирования каналов для повышения качества передачи информации. Технические предпосылки для этого обусловлены наличием одновременно работающих радиоканалов, а радиофизической основой является то, что в характерных для их функционирования помещениях имеется множество разнообразно ориентированных переотражающих элементов, приводящих к появлению составляющих поля с различной поляризацией. Если при этом все антенны в системе будут иметь одинаковую поляризацию, то неизбежна потеря части энергии сигналов и, как следствие, снижение уровня доступности из-за роста кратности ошибок. Спрогнозировать поляризационную структуру поля в точке приема весьма сложно. Поэтому решено было теоретически и экспериментально исследовать влияние различных сочетаний поляризации приемных и передающих антенн на

информационные характеристики системы. Еще одним направлением, представляющим интерес и связанным с поляризацией излучений, является исследование возможности разделения информационных каналов (абонентов) путем ортогонализации их излучений по поляризации.

Анализ последних исследований и публикаций

Применение указанных способов повышения доступности применительно к системам ММО не нашло широкого отражения в научно-технической литературе. В частности, использованию УМЛ в системах беспроводного доступа посвящены лишь первоначальные работы авторов этой статьи [1, 2]. Следует отметить, что общая теория ускоряющих линз подробно изложена в литературе по антенной тематике [4—8]. Есть сведения об ускоряющих линзовых антеннах со сканированием диаграммы направленности [6, 7]. Но для систем ММО, как отмечено выше, необходима фокусировка излучения всех излучателей в одном направлении. В такой постановке задача в литературе не рассматривалась.

Поляризационные эффекты применительно к системам ММО затронуты в ряде работ [9—14], однако речь там идет лишь о влиянии степени согласования поляризации передающих и приемных антенн на уровень принятого сигнала. Информационные показатели системы не анализировались, а экспериментальные результаты получены лишь для двух взаимно ортогональных (вертикального и горизонтального) вибраторов.

Цель статьи – исследовать теоретические и прикладные аспекты использования УМЛ и учета поляризационной структуры поля для повышения доступности информации в беспроводных системах стандарта IEEE 802.11 с ММО.

Основная часть

Первый способ применим в ситуациях, когда известно взаимное угловое расположение абонента, доступность которого требует улучшения, и точки беспроводного доступа (ТБД). При этом УМЛ можно располагать около абонента и (или) около точки беспроводного доступа. Она минимально затеняет остальных пользователей по сравнению с зеркальной антенной (при использовании последней в точке доступа).

На первом этапе исследований оценивалась работоспособность метода применительно к системе с одновибраторным оборудованием. Линза была рассчитана по методике [4] для диапазона 2,4 ГГц и изготовлена из фольгированного картона на диэлектрическом каркасе.

В эксперименте использовалась ТБД Asus RT-N16 с несимметричным вибратором и внешнее беспроводное устройство IDU-2850UG-G2000 с аналогичным вибратором. Анализ спектра сигнала проводился анализатором Ubiquiti AirView 2. Результаты эксперимента показали, что при наличии линзы среднее усиление сигнала в полосе передачи (10 МГц) возрастает на 5–7 дБ (рис. 1).

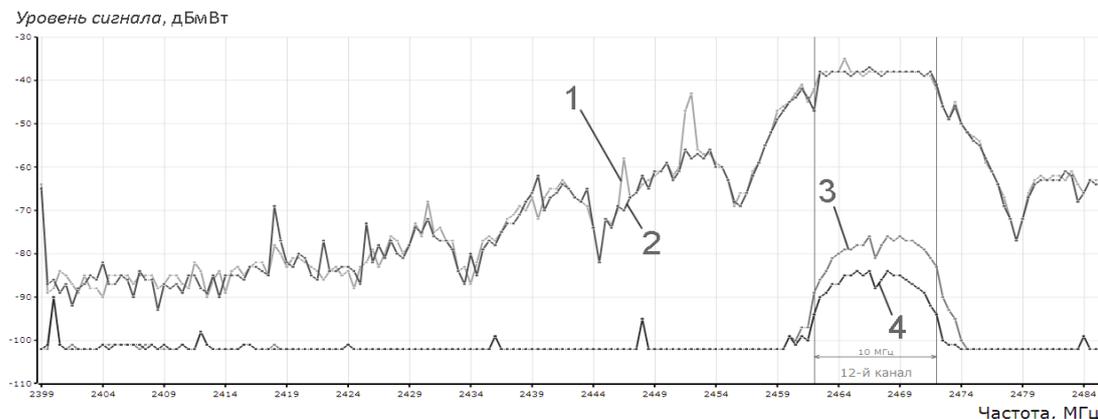


Рис. 1. Спектр сигналов. Кривая максимума: 1 — с линзой, 2 — без линзы; кривая медианы: 3 — с линзой, 4 — без линзы

Это позволяет увеличить дальность связи в 1,8–2,2 раза. Кроме того, при передаче одного и того же потока данных средняя скорость передачи без линзы составляла 680 кБ/с; а с линзой — 710 кБ/с [2].

Сложнее применять УМЛ для систем ММО, в которых используются две антенны (и более). При этом возникает проблема выбора параметров линзы, которые позволяли бы повысить показатели доступности информации в обоих каналах, антенны которых имеют поперечный пространственный разнос и не могут располагаться в фокусе линзы [5]. Решение этой проблемы может достигаться двояко: а) увеличением фокусного расстояния линзы; б) модификацией профиля линзы таким образом, чтобы он удовлетворял требованию одинакового положения диаграмм направленности, формируемых при использовании смещенных как влево, так и вправо от фазового центра линзы, излучателей.

УМЛ со смещенными относительно фокуса излучателями рассмотрена в [6], но для целей сканирования ДН и без указания методики вычислений профиля линзы и фазового распределения (ФР) в апертуре. В нашем случае требование противоположное: ДН должны минимально отклоняться и минимально искажаться при использовании каждого из излучателей. Поэтому была разработана методика расчетов искажений ФР в раскрыве цилиндрической УМЛ и отклонения максимума ДН, обусловленных смещением положения излучателей относительно фазового центра линзы перпендикулярно оси линзы в горизонтальной плоскости (рис. 2).

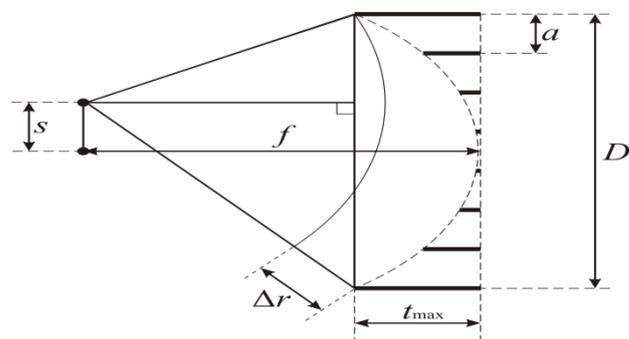


Рис. 2. Смещение излучателя из фокуса линзы

Для линзы с классическим профилем (при расположении излучателя в фокусе), оценивалось отличие в геометрическом пути (Δr) волны от смещенного влево на величину свибратора до облучаемой поверхности линзы по формуле:

$$\Delta r(d) = \sqrt{[f - t(d)]^2 + (d - s)^2} - \sqrt{(f - t_{max})^2 + \left(\frac{D}{2} - s\right)^2}, \quad (1)$$

где f – фокальное расстояние; D – раскрыв линзы; d – текущий раскрыв, $d \in \left[-\frac{D}{2}, +\frac{D}{2}\right]$; s – смещение излучателя от фокуса; t_{max} – максимальная глубина линзы.

Профиль линзы t представляет собой функцию от положения пластины в раскрыве d :

$$t(d) = \frac{f}{n+1} - \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 - \frac{d^2}{1-n^2}}, \quad (2)$$

где n – коэффициент преломления [4, 7].

На противоположной смещению излучателя стороне апертуры линзы имеет место отставание по фазе, приводящее к смещению максимума ДН в сторону, противоположную смещению излучателя. При двух излучателях (один смещен влево, а второй — вправо)

система будет иметь два максимума ДН, смещенные, соответственно, вправо и влево. Величина Δr является определяющей для оценки смещения максимума ДН.

В рамках второго подхода было проведено вычисление профилей линз для левого и правого излучателя отдельно, полагая их расположенными в фокусах соответствующих линз. После этого выполнено усреднение глубин отдельных пластин. Относительный сдвиг линз в поперечной плоскости составлял $2a$.

Для линзы с усреднением профиля величины отклонений среднего значения от требуемых классических профилей для правого и левого излучателя сравнивалось с допустимой ошибкой выбора глубины линзы, обусловленной допуском на отклонение ФР в апертуре линзы от линейного [4]. Оказалось, что указанные отклонения соизмеримы либо меньше допустимой величины для линзы с фокусным расстоянием $f = 3D$, при $n = 0,5$. При $f = 1,6D$ только для первой от центра пластины. То есть, с увеличением фокусного расстояния линза с усредненным профилем становится менее чувствительной к ошибкам выбора профиля линзы.

Для обоих типов линз в пределах излучающей поверхности ФР оказалось нелинейным с вогнутостью. На рис. 3 показаны профили линз и ФР, построенные по (1), (2).

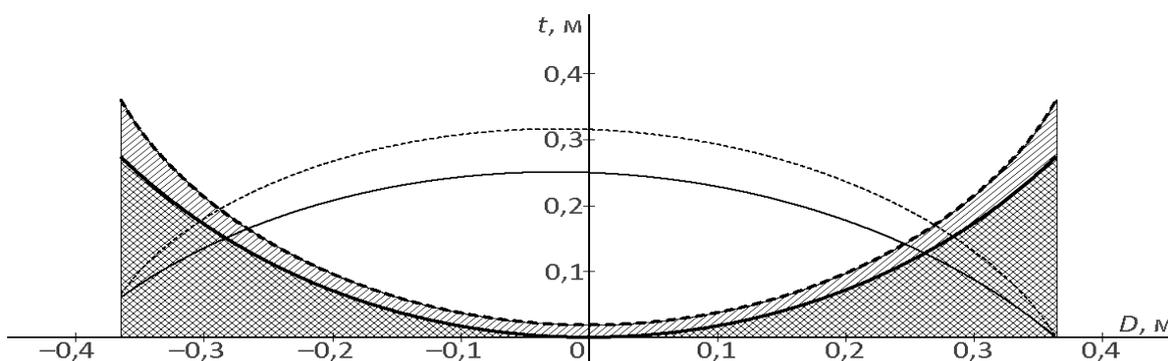


Рис. 3. Профили линз (заштрихованные области): классической (сплошная линия) и с усреднением (штриховая), а также фазовые распределения в раскрыве

На рис. 4 приведены графики смещения максимума ДН от нормали, а на рисунке 5 — максимума вогнутости ФР в зависимости от фокусного расстояния линзы и от коэффициента преломления. (Сплошные линии относятся к линзам с классическим профилем, а штриховые — для линз с усредненным профилем.)

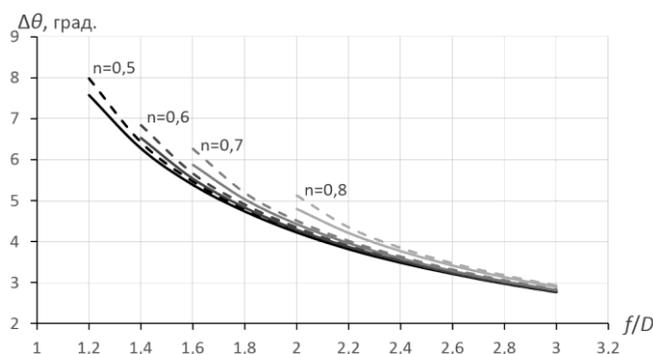


Рис. 4. Смещение максимума ДН от нормали

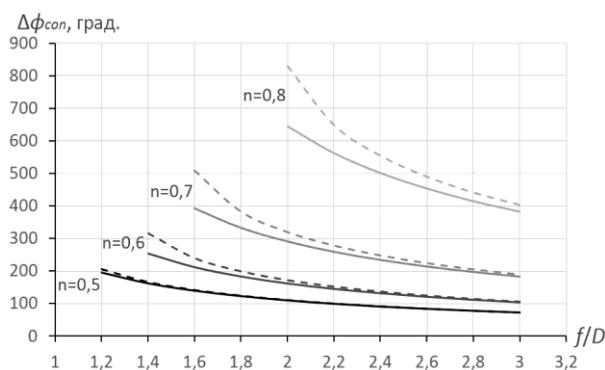


Рис. 5. Максимум вогнутості фазового розподілення

Из графиков (рис. 4) следует, что с увеличением отношения f/D уменьшаются угловые смещения максимумов ДН, то есть растет уровень сигналов, принимаемых абонентом от каждой антенны БТД (абонент находится на линии, совпадающей с осью линзы). Уменьшению угловых смещений ДН также способствует уменьшение коэффициента преломления. Особенно это ощутимо при малых значениях f/D . Такая закономерность сохраняется и для линзы с усредненным профилем. При этом как отклонение ДН, так и вогнутость ФР для линзы с усредненным профилем имеют бóльшие значения. Это указывает на нецелесообразность выбора усредненного профиля.

При $f/D = 1,2$ отклонение ДН не превышает 8 град. (что является максимальным значением для рекомендуемого диапазона коэффициента преломления линзы $0,5 \leq n \leq 0,7$). Для линзы с $D = 7a$ ширина ДН может составлять порядка 20 град. В таком (худшем) случае указанное смещение максимума ДН приведет к снижению коэффициента усиления (КУ) в равносигнальном направлении (в месте расположения абонента) менее, чем на 3 дБ. При $f/D = 2$ отклонение не превышает 5 град., что приведет к снижению КУ не более, чем на 2 дБ. Если же абонент находится на некотором отклонении от оси линзы, то он будет в лучшей степени принимать сигнал от одного излучателя, но хуже от другого (угловое отклонение его местоположения от оси линзы не должно превышать величины отклонения ДН). При этом окажется, что ситуация будет близка к случаю работы в одном канале.

Наличие вогнутого ФР, близкого к симметричному по отношению к наклону ФР, приводит к сужению главного лепестка ДН. Графики (рис. 5) показывают, что во всем диапазоне условий как по n , так и по f/D , указанная вогнутость имеет глубину более $\pi/8$, то есть пренебречь ею нельзя. И лишь при $n = 0,5$ и $f/D = 3$ вогнутость близка к $\pi/2$, что сужает ДН в пределах, с которыми можно мириться. В качестве меры преодоления указанного недостатка профиль линзы желательно делать более плоским (глубину линзы уменьшать по сравнению с классической).

Для улучшения диапазонных свойств линзы целесообразно ее зонирование, которое, в свою очередь, может компенсировать вогнутость ФР [8]. Последнее требует дальнейшей детальной проработки.

Таким образом, наличие нескольких, например, двух излучателей в системах ММО приводит к определенным сложностям в части применения УМЛ для улучшения доступа удаленному абоненту.

В качестве рекомендуемой меры, способствующей достижению положительного эффекта от применения УМЛ в системе ММО, следует считать увеличение отношения f/D . Это приводит к уменьшению отклонения ДН от нормали и уменьшению вогнутости ФР. С увеличением фокусного расстояния профиль линзы становится ближе к плоскому, что облегчает конструктивное выполнение такой линзы и использование ее в рассматриваемом варианте ее предназначения. Кроме того, увеличение f/D уменьшает сектор затенения других пользователей, что способствует сохранению доступа большему числу абонентов. Но при этом пользователи, находящиеся в области боковых лепестков линзы, будучи формально вне

области тени могут оказаться в ситуации, когда сигнал будет приходить к ним по двум путям: прямому (вне тени линзы) и от бокового лепестка линзы. То есть, будет иметь место двухлучевой прием, который обусловлен именно наличием линзы. В помещениях и на местности, где так или иначе присутствуют отражающие поверхности, это будет в определенной степени усложнять интерференционную картину.

Стенд для экспериментальной проверки полученных результатов включает наборную металлопластинчатую линзу из отдельных элементов, две из трех антенн промышленного роутера Asus N16 (2×3:2 MIMO), которые извлечены из корпуса и дополнительно разнесены на расстояние $2a$. Сам роутер предварительно модифицирован: добавлен внутренний жесткий накопитель, система охлаждения и прочие незначительные изменения, стандартная прошивка заменена на DD-WRT K2.6 Big Generic rev. 14896. В качестве приемного оборудования входит сетевая карта на основе микросхемы Atheros AR9287 (2×2:2 MIMO), а в роли датчиков поля использованы программируемые беспроводные модули Pololu Wixel на микросхеме CC2511F32. Для обработки данных выбрано специальное программное обеспечение MDRV, которое собирает данные с датчиков и в режиме реального времени отображает результат в сводной форме.

Указанных выше нежелательных явлений, вызванных сдвигом излучателей относительно фокуса линзы, можно избежать ориентируя оси излучателей вдоль пластин линзы и увеличив ее длину. При этом потребуются определенное конструктивное изменение оборудования систем MIMO. Такое расположение не требует изменения профиля линзы (излучатели располагаются в фокусе и профиль остается классическим), хотя и увеличивает ее протяженность. Количество излучающих антенн должно соответствовать протяженности линзы. Взаимное торцевое расположение излучателей минимизирует их взаимное влияние и улучшает интегральные информационные характеристики канала. Ориентировать линзу можно вертикально или горизонтально.

Такая конструкция системы способствует локализации поля, например, для поэтажного покрытия зданий по технологии бесшовного роуминга и может служить альтернативой систем, основанных на стандарте IEEE 802.11g. Для развертывания подобной сети оборудование можно устанавливать только на торцах здания и фокусировать поле внутри него. Линзы при этом ориентируются в соответствующей плоскости. Данная система жестко привязана к конструкции здания, потому требует более детального проектирования, но позволит достаточно точно покрыть необходимые зоны. Для одной излучающей системы не исключено использование нескольких ускоряющих линз.

Кроме того, система может быть дополнена экраном для устранения излучения за пределы зданий (актуально для стран с законодательным ограничением излучения в диапазоне 2,4–2,5 ГГц).

Однако такая конфигурация системы требует дополнительных исследований относительно влияния длины пластин линзы и степени когерентности излучений отдельных каналов роутера на диаграммы направленности, формируемые каждым из излучателей при наличии УМЛ с учетом их неодинакового расположения относительно торцов линзы.

Еще одним вариантом, требующим изучения, является расположение излучателей роутера вдоль фокальной оси линзы.

В целом применение УМЛ позволяет повысить доступность информации в системах беспроводного доступа, что экспериментально подтвердилось и проявляется в увеличении дальности связи в 1,8–2,2 раза при фиксированном качестве связи, либо в увеличении скорости передачи при фиксированной дальности. Применение УМЛ в системах MIMO требует модификации профиля линзы. Разработанная методика расчета линз для случая двух поперечно разнесенных излучателей позволяет оценить допустимые углы смещения ДН для левого и правого излучателей системы и указывает на целесообразность располагать двухантенную точку доступа на расстоянии порядка трех поперечных размеров линзы. В

этом случае при расположении линзы около точки доступа сокращается степень затенения соседних абонентов.

Одним из направлений последующего исследования является расширение частотного диапазона подобных конструкций.

Второй способ предполагает учет поляризации электромагнитной волны для повышения информационных возможностей систем с ММО в помещениях с неоднородной структурой отражающих объектов, ориентированных различным образом относительно вектора \mathbf{E} излученной волны, что приводит к искажению поляризации поля в точке приема.

В представляемой статье рассматриваются два направления использования поляризационных свойств волн: а) для организации разнесенного по поляризации приема с целью увеличения пропускной способности и помехоустойчивости системы, что предопределяет повышение доступности информации; б) для разделения абонентов за счет ортогонализации по поляризации используемых ими сигналов.

Проведено математическое моделирование пропускной способности системы ММО с учетом поляризации по методике [10] для трех передающих и приемных антенн, а также сравнение с результатами соответствующих экспериментальных исследований. Экспериментально определены элементы канальной матрицы \mathbf{H} . Удельная информационная пропускная способность непрерывного канала оценивалась по модифицированной формуле Шеннона [13, 14]:

$$C = \log_2 \det \left(I_N + \frac{\rho}{N} \cdot \mathbf{H}\mathbf{H}^T \right), \quad (3)$$

где I_N - единичная матрица размерностью N , ρ - отношение сигнал/шум, \mathbf{H}^T - транспонированная канальная матрица. За уровень сигнала принята его величина при параллельном расположении антенн, а за уровень шума принят минимальный рабочий уровень чувствительности приемника минус 68 дБмВт для режимов передачи (54÷270) Мб/с, на которых проводилась экспериментальная передача данных.

Величина C (табл. 1) зависит, в первую очередь, от взаимной ориентации вибраторов передающего и приемного оборудования и в меньшей мере от количества используемых вибраторов. Средние результаты характерны для взаимно параллельной ориентации антенн, наилучшие (в среднем 35 бит/символ) - при комбинации наклонов антенн.

Таблица 1

Пропускная способность в зависимости от ориентации антенн

Количество антенн	Взаимное расположение антенн	Пропускная способность, бит	Количество антенн	Взаимное расположение антенн	Пропускная способность, бит
1 (1:0)	: ×	3,4594	6 (3:3)	\ / :	16,8784
3 (3:0)	: ×	4,9542	4 (3:1)	\ / :	17,9065
3 (2:1)	\ / :	12,7500	6 (3:3)	:	18,1946
4 (2:2)	\ / :	13,7432	4 (2:2)	\ / : \ /	30,0445
2 (1:1)	:	15,0272	5 (3:2)	\ / : \ /	30,8029
4 (3:1)	:	16,6099	6 (3:3)	\ / : \ /	44,4410

Экспериментальные исследования проводились в таких помещениях: 1) сравнительно однородное и малонасыщенное переотражающими элементами; 2) неоднородное, с большим количеством металлических предметов и конструкций [3]. Для исследований применен канал связи в составе двух ТБД типа TP-Link TL-WR1043ND, которые поддерживают режим работы ММО 3×3 на несимметричных вибраторах с линейной поляризацией. Уровень сигналов оценивался с помощью анализатора спектра NetStumbler версии 0.4.0. Пример взаимного расположения излучателей приведен на Рис. 6.

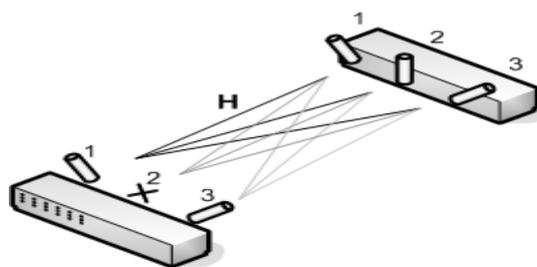


Рис. 6. Пример расположения излучателей

Проверка влияния разнесения по поляризации приемной антенны на уровень сигнала показала, что в помещениях типа 1 при повороте антенн на $\pi/4$ уровень сигнала составляет в среднем минус 23 дБмВт, а при $\pi/2$ - минус 31 дБмВт независимо от наклона влево или вправо. В помещении типа 2 существенного изменения уровня сигнала при повороте антенны в перпендикулярной направлению излучения плоскости не было замечено, что свидетельствует о наличии составляющих поля с разнообразной поляризацией и близкой интенсивностью. По результатам эксперимента оценивалось отношение информационной скорости передачи к пропускной способности непрерывного канала. Наблюдалось существенное увеличение скорости передачи при использовании как на передающей, так и на приемной стороне трех вибраторов, один из которых ориентирован вертикально, а второй и третий наклонены, соответственно, влево и вправо на 45град. в плоскости, перпендикулярной направлению на абонента.

Для режима ММО видно, что в помещениях со сложной конфигурацией, большим количеством препятствий и экранов использование комбинации наклонов передающих и приемных антенн дает значительное улучшение качества связи за счет поляризационного разнесения антенн, позволяющего принимать большую долю составляющих поля с различной поляризацией. Информационная скорость при этом может увеличиваться в два – три раза.

Ортогонализация приемных и передающих антенн дает отличие уровней ортогонально поляризованных сигналов до 15 дБмВт в помещениях первого типа и только до 4 дБмВт – в помещениях второго типа. Поэтому в помещениях первого типа возможно поляризационное разделение абонентов. В благоприятной помеховой обстановке это позволит либо увеличить количество обслуживаемых абонентов, либо вдвое увеличить трафик для одного абонента.

В целом поляризация может использоваться как дополнительный инструмент повышения информационной пропускной способности и доступности информации в беспроводных системах либо самостоятельно или в комбинации с другими технологиями.

Выводы

1. Эксперименты показали, что в одноканальных системах беспроводного доступа стандарта IEEE 802.11. использование УМЛ, фокусирующей излучение в заданном направлении повышает среднее отношение с/ш в полосе передачи (10 МГц) на 5–7 дБ. Это позволяет увеличить дальность связи в 1,8–2,2 раза. При неизменной дальности это привело к увеличению средней скорости передачи с 680 кБ/с (без линзы); до 710 кБ/с с линзой.

2. Применение УМЛ в системах ММО с двумя и более поперечно разнесенными антеннами, расположить которые в фокусе линзы не представляется возможным, требует согласования параметров профиля линзы и расположения антенн роутера. Разработанная методика расчета линз для двух поперечно разнесенных излучателей позволяет оценить допустимые углы смещения ДН для левого и правого излучателей системы и указывает на целесообразность располагать излучатели на расстоянии порядка трех поперечных размеров линзы. В этом случае коэффициент усиления системы уменьшается, но при расположении линзы у точки доступа сокращается степень затенения соседних абонентов.

3. Использование поляризационно разнесенного приема для режима ММО в помещениях со сложной геометрией и большим количеством препятствий и экранов дает заметное улучшение доступности информации за счет приема большей части составляющих поля, имеющих различную поляризацию. Информационная скорость может возрасти в три раза. Наилучшие результаты имеют место в случае использования как на передающей, так и на приемной стороне трех вибраторов: один ориентирован вертикально, а второй и третий наклонены, соответственно, влево и вправо на 45 град в плоскости, перпендикулярной направлению на абонента.

4. Ортогонализация приемных и передающих антенн показала, что поляризационное разделение сигналов может составлять 15 дБмВт в помещениях с незначительным количеством отражающих элементов и только 4 дБмВт в помещениях с большим количеством хаотически ориентированных металлических конструкций. Это означает, что для определенной категории сооружений (стадионы, выставочные залы, крытые спортивные сооружения и тому подобное) возможно увеличение числа обслуживаемых абонентов за счет использования ими ортогональных по поляризации сигналов.

Литература

1. Астапеня В.М. Використання прискорюючої лінзи для підвищення ефективності та завадозахищеності мереж IEEE 802.11b. / В.М. Астапеня, В.Ю. Соколов // Науково-виробничий журнал адміністрації зв'язку та радіочастот України «Зв'язок». — 2012. — №2 (98). — С. 33 – 37.
2. Astapenya V.M. Research results of the impact of spatial and polarization value of the antennas on network capacity of wireless channels standard IEEE 802.11 / V.M. Astapenya, V.Yu. Sokolov // ICATT'2013. Proceedings of the IX International Conference on Antenna Theory and Techniques, 16–20 September, 2013: abstracts. — Odessa, IEEE, 2013. — P. 172–174.
3. Астапеня В.М. Підвищення пропускної здатності безпроводових каналів зв'язку за рахунок поляризаційних ефектів у мережах стандарту IEEE 802.11. / В.М. Астапеня, В.Ю. Соколов // Науково-виробничий журнал адміністрації зв'язку та радіочастот України «Зв'язок». — 2012. — №3 (99). — С. 36 – 40.
4. Шифрин Я.С. Антенны / Я.С. Шифрин. — Харьков: ВИРТА, 1976. — 408 с.
5. Astapenya V.M. Modified Accelerating Lens as a Means of Increasing the Throughput, Range and Noise Immunity of IEEE 802.11 Systems / V.M. Astapenya, V.Yu. Sokolov // ICATT'2015. Proceedings of the X Anniversary International Conference on Antenna Theory and Techniques, 21–24 April, 2015: abstracts. — Kharkiv, IEEE, 2015. — P. 267–269.
6. Драбкин А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Драбкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов. — [2-е изд.]. — М.: Сов. радио, 1974. — 536 с.
7. Справочник по радиолокации / Ред. М. Сколник / Пер. с англ. под ред. П.И. Дудника. — Т. 2. — М.: Сов. радио, 1977. — 408 с.
8. Кюн Р. Микроволновые антенны / Р. Кюн / Пер. с англ. под ред. М.П. Долуханова. — Л.: Судостроение, 1967. — 520 с.
9. Kwon S. Extended Ellipse Model for Multi-Polarized MIMO Antennas / S. Kwon, H-W. Moon, J-W. Lim and other // International Symposium on Antennas and Propagation. — ISAP, 2006. — P. 1–5.
10. Dong L. Simulation of MIMO Channel Capacity with Antenna Polarization Diversity / L. Dong, H. Choo, R. W. Heath and other // IEEE Transactions on Wireless Communications. — Vol. 4, no. 4. — July 2005. — P. 1869–1873.
11. Oestges C. Multi-Polarized MIMO Communications: Channel Model, Mutual Information and Array Optimization / C. Oestges, M. Guillaud, M. Debbah // Wireless Communications and Networking Conference. — IEEE, WCNC, 2007. — P. 1057–1061.
12. Gonzalez A.N. Dual Polarized Omnidirectional Array Element for MIMO Systems / A.N. Gonzalez // KTH Signals Sensors and Systems. — Stockholm, 2005. — 67 p.
13. Jensen M.A. MIMO Wireless Channel Modeling and Experimental Characterization / M. A. Jensen, J. W. Wallace // edit. A. B. Gershman, N. D. Sidiropoulos // Space-Time Processing for MIMO Communications. — John Wiley & Sons, 2005. — 39 p.
14. Tse D. Fundamentals of Wireless Communication / D. Tse, P. Viswanath. — Cambridge University Press, 2005. — 564 p.

Надійшла 12.05.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Дудикевич В.Б.