

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ Massive MIMO в сетях 5G

И. Степанец, менеджер проектов мобильной связи
Deutsche Telekom / stepanets.irina@gmail.com,
Г. Фокин, к.т.н., доцент СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича

УДК 621.396.4, DOI:10.22184/2070-8963.2018.70.1.46.52

Представлены особенности реализации технологии Massive MIMO в сетях мобильной связи 5-го поколения, сформулированы ее количественные и качественные показатели.

ВВЕДЕНИЕ

Продолжение тенденции увеличения спроса на услуги мобильной высокоскоростной передачи данных, с одной стороны, и уровень развития технологий мобильной связи – с другой, определяют основные требования к сетям мобильной связи поколения 5G и формируют их облик. Характерной особенностью требований к сетям мобильной связи 5G является реализация следующих целевых показателей эффективности [1, 2]:

- достижение пиковой скорости передачи данных до 20 Гбит/с на линии вниз – от базовой станции (БС) к абонентской станции (АС) – DL, и 10 Гбит/с на линии вверх от АС к БС – UL;
- обеспечение скорости передачи данных 100 Мбит/с одновременно для многих пользователей в условиях мегаполисов;
- повышение спектральной эффективности до 30 бит/с/Гц для DL и 15 бит/с/Гц для UL;
- одновременное подключение нескольких сотен тысяч беспроводных датчиков;
- достижение сверхвысокой надежности сети (в некоторых случаях вероятность успешной доставки пакетов в течение 1 мс должна достигать 99,9999 %);
- снижение времени задержек на уровне управления в мобильной связи до 5 мс; в спутниковой связи – до 600 мс для случая распространения в условиях высокой околоземной орбиты, 180 мс для средней околоземной орбиты и 50 мс для низкой околоземной орбиты;

- сохранение QoS при скорости передвижения мобильных терминалов до 500 км/ч;
- увеличение емкости сети до 1 000 000 терминалов на 1 км².

Одно из главных требований для реализации новых услуг в сетях мобильной связи поколения 5G – существенное увеличение пропускной способности по сравнению с сетями предыдущих поколений. Если в поколениях 3G и 4G это достигалось в основном за счет внедрения новых сигнально-кодовых конструкций, оптимального распределения частотного ресурса (ЧР) и расширения частотного спектра, то в настоящее время наблюдается острый дефицит ЧР, а возможности его расширения весьма ограничены. Развитие технологий мобильной связи в таких условиях заставляет искать новые пути и решать сложные технические задачи, обеспечивающие выполнение требований по увеличению пропускной способности сетей 5G. Одним из эффективных способов повышения пропускной способности является технология пространственного мультиплексирования MIMO (multiple input multiple output). В поколениях 3G и 4G технология MIMO взяла свое начало с применением антенных систем в конфигурациях 2x2 и 4x4 и доказала свою эффективность. Однако этих конфигураций уже недостаточно для реализации представленных выше требований, в связи с чем организации 3GPP [3] и IEEE [4] приняли решение о разработке следующего поколения многоантенных систем – Massive

MIMO (в англоязычной литературе также встречаются термины large-scale antenna system, very large MIMO, hyper MIMO). Эти системы имеют потенциал для значительного улучшения таких показателей, как надежность канала связи, спектральная и энергетическая эффективность [5, 6, 7, 8]. Практическая оценка показателей качества систем Massive MIMO была проведена в работе [9], результаты которой подтвердили реализуемость теоретических преимуществ технологии в условиях реальных каналов. Получение ожидаемого эффекта от применения Massive MIMO при развертывании сетей 5G невозможно без интеллектуальной поддержки со стороны современных специализированных программных средств планирования и оптимизации сетей связи. Одним из таких программных средств является ONEPLAN/ONEGA RPLS [10].

В настоящей работе рассматриваются как преимущества, так и сложности реализации систем Massive MIMO, а также их особенности.

ПРЕИМУЩЕСТВА СИСТЕМ MASSIVE MIMO

Выигрыш в пространственном разнесении. Главное преимущество Massive MIMO перед традиционными системами MIMO состоит в возможности адаптивного диаграммообразования или формирования множества лучей (beamforming) [11] в многопользовательском режиме (multi-user Massive MIMO), при котором потоки данных передаются заранее назначенным пользователям (рис.1) [12]. При этом одной АС выделяются те же самые ресурсные блоки, что и другим АС в пределах одной соты. Посредством такого разнесения в пространстве достигается экономия частотно-временного ресурса или, иными словами, повышение спектральной эффективности. Кроме этого, так как потенциальная точность концентрации направленного луча на заданный мобильный терминал достаточно высока, интерференционные помехи между лучами должны значительно уменьшаться. За счет снижения интерференционных помех более не требуются (или требуются в весьма малых объемах) сложные механизмы ортогонализации сигналов, что значительно упрощает предварительную обработку сигналов и повышает энергетическую эффективность [13]. Ключевые преимущества системы Massive MIMO – энергетическая и спектральная эффективность.

Энергетическая эффективность. Анализ работ [5–8, 11, 14] показывает, что системы Massive MIMO по сравнению с традиционными системами MIMO значительно выигрывают в энергетической



Рис.1. Формирование лучей в системе Massive MIMO для конкретных АС в многопользовательском режиме

эффективности. Энергетическая эффективность характеризуется количеством бит в секунду, приходящихся на 1 Вт мощности сигнала, отнесенной к спектральной плотности шума [15]. Следовательно, чем выше энергетическая эффективность, тем меньшее отношение сигнал/шум требуется для передачи одного бита данных. Применение в системах мобильной связи технологий Massive MIMO, обладающих высокой энергетической эффективностью, позволяет снизить энергопотребление оборудования, улучшить электромагнитную совместимость за счет снижения излучаемой мощности, а также повысить экологическую безопасность передающих радиотехнических объектов, особенно АС [16].

Доказано, что при увеличении на БС количества антенн в системе Massive MIMO до величины M , мощность передачи каждой АС можно уменьшить пропорционально $1/M$ [8]. Данное утверждение справедливо при идеальных измерениях состояния канала на БС, т.е. если индикаторы, содержащиеся в группе информации CSI (channel state information), в полной мере характеризуют состояние радиоканала и известны на БС. Если же индикаторы CSI не идеальны, мощность передачи каждой АС можно снизить пропорционально $1/\sqrt{M}$ [8]. Безусловно, это меньше, чем в первом случае, однако выигрыш существенен и при этих условиях.

Спектральная эффективность характеризуется скоростью передачи данных на единицу ширины

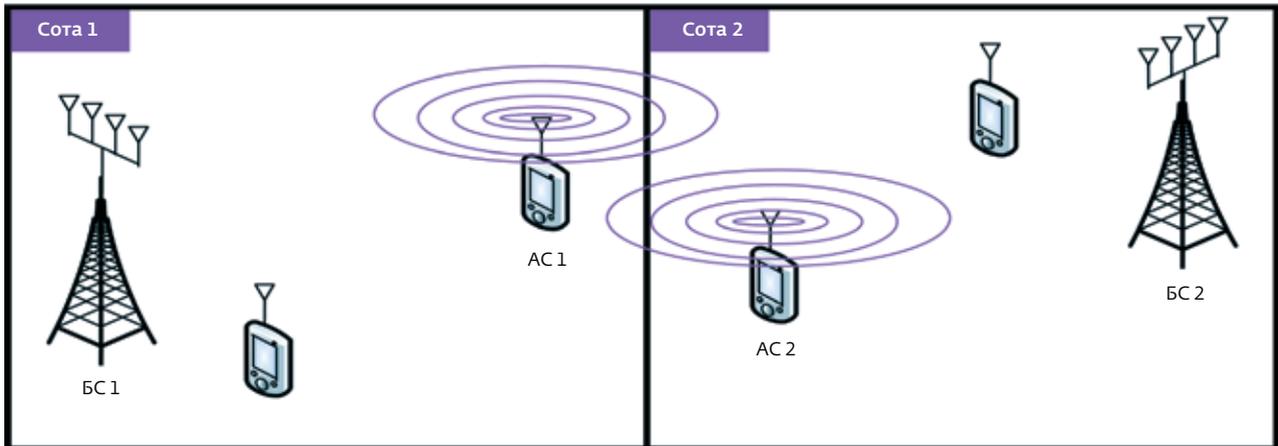


Рис.2. Первый этап "загрязнения" пилот-сигнала в направлении UL

спектра частот и измеряется отношением скорости передачи данных на 1 Гц используемой полосы частот (бит/с/Гц). Пропускная способность системы Massive MIMO увеличивается пропорционально количеству антенных портов в системе.

Согласно моделированию и оценке в [5, 8], можно отметить значительные преимущества систем Massive MIMO по показателю спектральной эффективности. Например, для случая использования полосы частот 20 МГц были получены следующие результаты: каждый абонентский терминал в соте имеет возможность получить скорость передачи данных до 17 Мбит/с; общая пропускная способность соты составляет 730 Мбит/с, что соответствует спектральной эффективности 36,5 бит/с/Гц.

Практические измерения спектральной эффективности в [17] показали высокие на сегодняшний день результаты: 79,4 бит/с/Гц (при наличии 128 антенн на БС и полосе частот 20 МГц), что эквивалентно скорости передачи данных 1,59 Гбит/с.

Если сравнить эти показатели со средним значением для технологии MIMO 4x4 в LTE-Advanced [18], составляющим 3,7 бит/с/Гц, то превосходство Massive MIMO по спектральной эффективности становится очевидным.

Улучшение надежности канала (**channel hardening**) является еще одним отличительным достоинством систем Massive MIMO [13], основанным на пространственном разнесении. Термин **channel hardening** (дословно "укрепление канала") уже встречался в англоязычной литературе в [19] для описания свойства улучшения

надежности каналов связи в классических системах MIMO и в настоящее время используется для систем Massive MIMO. Известно, что пространственное разнесение способствует снижению неблагоприятных влияний быстрых замираний на канал передачи. $P_{\text{всe}}$, вероятность того, что все разнесенные в пространстве каналы подвержены влиянию быстрых замираний для случая независимости и статистической однородности каналов, может быть описана выражением [20]: $P_{\text{всe}} = P_1^M$, где P_1 – вероятность подверженности одноканальной системы связи быстрым замираниям, M – количество антенн в системе.

Пусть, например, риск того, что один канал в одноантенной системе может быть поражен быстрыми замираниями, равен $P_1 = 0,1$; тогда, введя в систему передачи разнесение путем увеличения количества антенн до $M = 128$, снизим вероятность того, что все каналы в системе окажутся пораженными быстрыми замираниями, до ничтожно малой величины: $P_{\text{всe}} = 0,1^{128}$.

СЛОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

Помимо преимуществ, системы Massive MIMO отличаются и сложностью технической реализации.

Затраты канального ресурса на заголовки CSI. Построение сети радиодоступа 5G планируется осуществить на имеющейся в LTE структуре ресурсных блоков и служебных индикаторов [21], поэтому необходимо учитывать ограничения, которые она накладывает. Так как число антенн

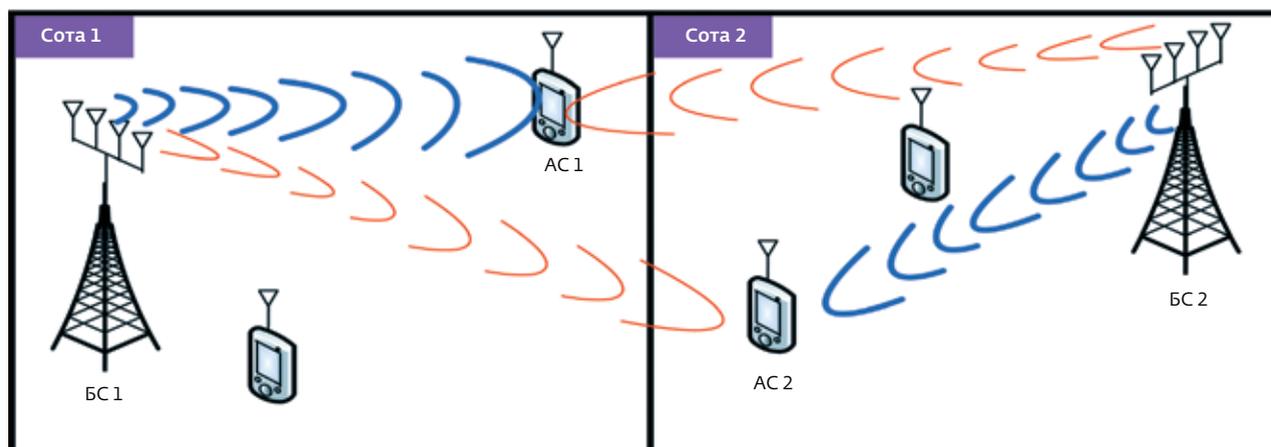


Рис.3. Второй этап "загрязнения" пилот-сигнала в направлении DL

значительно возрастает, увеличивается и количество передающих каналов. Следовательно, чтобы обеспечить необходимое качество передачи и построить корректную матрицу прекодирования (предварительного кодирования) для каналов Massive MIMO, нужно увеличить и число индикаторов PMI (precoding matrix indicator), передаваемых абонентским терминалом по каналу обратной связи вверх. Также потребуется больше ресурса на линии вниз (DL) для передачи сигналов CSI-RS (channel state information - reference signal), необходимых для операций прекодирования на БС. Помимо этого, для корректной работы планировщика БС при использовании режимов multi-user потребуются и большие затраты радиоресурса для передачи сигналов DM-RS (demodulation reference signal), которые отправляются абонентским терминалом вверх в направлении к БС (UL).

Таким образом, значительная часть радиоресурсов уйдет на служебную информацию. Например, при использовании 64 антенных портов более половины элементов одного ресурсного блока уйдет только на передачу CSI-RS сигналов [13].

Ухудшение качества пилот-сигнала при использовании дуплексного режима TDD. Реализация режима Massive MIMO для временного дуплекса имеет определенные преимущества, однако приводит к ухудшению качества пилот-сигналов различных АС из-за негативных влияний друг на друга. Эта проблема получила название в английской литературе pilot contamination (дословно "загрязнение пилот-сигнала").

При использовании режима TDD (time division duplex) в технологии Massive MIMO необходимо учитывать два факта: первый - передача пилот-сигнала в TDD осуществляется по линии вверх

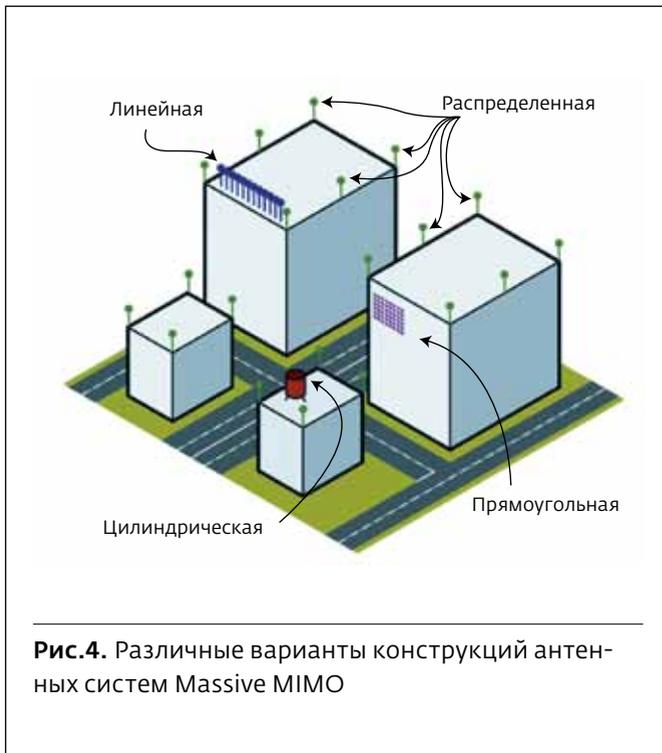


Рис.4. Различные варианты конструкций антенных систем Massive MIMO

от АС; второй – точность измерения состояния канала (информация о состоянии канала содержится именно в пилот-сигнале) в технологии Massive MIMO является ключевым условием для адаптивного диаграммообразования. Эти два факта определяют сложность проблематики "загрязнения пилот-сигнала", которая заключается в следующем: БС получает пилот-сигнал от АС и формирует луч в сторону этой запрашивающей АС, но если этот пилот-сигнал был поражен другой АС, то возникает опасность интерференции между лучами вниз [13]. На рис.2 и 3 данный эффект изображен последовательно в два этапа на примере двух соседних сот.

На первом этапе оба абонентских терминала посылают свои пилот-сигналы, используя один и тот же частотный ресурс (рис.2). Приняв пилот-сигнал от АС 1, БС 1 определяет состояние канала. Одновременно к БС 1 приходит пилот-сигнал от АС 2, что приводит к возникновению помех и ухудшению качества пилот-сигнала АС 1. Так как БС 1 получила два пилот-сигнала, то направляет два луча одновременно на две АС: первый луч – на предназначенную для него АС 1 (синий) и второй луч – ошибочно на АС 2, находящуюся в соседней соте (красный). Но так как АС 2 в этот момент обслуживается собственной БС 2, которая также направляет "свой" луч на АС 2 (рис.3), то ошибочное направление луча

с БС 1 на непредназначенный для этого терминал АС 2 служит причиной помех и ухудшения параметров пилот-сигнала. Очевидно, что осуществление Massive MIMO в режиме TDD требует разработки эффективных методов борьбы с этим негативным явлением.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ДУПЛЕКСА В MASSIVE MIMO

Оптимальная схема дуплекса. При реализации Massive MIMO возникает вопрос: какая из схем дуплекса – TDD или FDD (frequency division duplex) – является наиболее подходящей? Для сравнения двух режимов предлагается проанализировать следующие показатели: точность диаграммообразования при направлении луча к АС; затраты канального ресурса на заголовок пилот-сигнала; поддержка высоких скоростей передвижения АС [13].

Так как в схеме TDD передача вниз и вверх осуществляется на одной частоте (но в разные моменты времени), то физическое состояние канала для UL и DL одинаково в обоих направлениях. То есть не важно, в каком направлении связи измеряются индикаторы состояния канала CSI – значения будут с большой вероятностью равны и для канала вверх, и для канала вниз. В отличие от TDD, в режиме FDD такая равнозначность невозможна, потому что каналы вверх и вниз передаются на разных частотах, и, следовательно, измерения параметров CSI для канала вниз должны происходить только в самом канале, а результаты этих измерений для последующей обработки на БС могут передаваться только по каналу вверх. В итоге при таком режиме обмена параметрами CSI возникнет проблема неактуальности принятых по такой обратной связи данных на БС, которые негативно влияют на точность диаграммообразования, т.е. на важнейший атрибут многопользовательского (MU, Multi User) Massive MIMO. Исходя из этого сравнения, можно сделать вывод, что более подходящим методом дуплекса для Massive MIMO является TDD.

Следующий критерий сравнения – затраты канального ресурса на пилот-сигнал. Так как в режиме FDD состояние каналов вниз измеряется на АС, то каждый антенный порт БС должен передавать свой пилот-сигнал вниз, т.е. передач пилот-сигнала вниз будет столько, сколько антенных портов имеется на БС. В режиме TDD, напротив, состояние канала измеряется на БС, основываясь на информации пилот-сигнала, посланного

от антенного порта АС. Но АС имеют, как правило, только один антенный порт. Следовательно, один и тот же пилот-сигнал будет принят всеми антенными портами на БС, что означает: БС сможет измерить состояния всех каналов от одной антенны АС ко многим антеннам БС, используя только одну передачу пилот-сигнала вверх. Из чего следует, что количество передач пилот-сигнала в режиме FDD соответствует количеству антенных портов на БС (порядка сотен для Massive MIMO), в то время как количество передач пилот-сигнала в режиме TDD соответствует количеству антенных портов на АС (как правило, один антенный порт). Поэтому по критерию затрат канального ресурса на передачу пилот-сигнала более предпочтительным оказывается режим TDD.

Переходя к третьему критерию – предоставление связи с заданным QoS на высоких скоростях передвижения АС, до 500 км/ч, необходимо сказать, что время передачи пилот-сигнала при этом должно быть настолько мало, чтобы переданная информация о состоянии канала всегда была актуальна. Но, как показано выше, и без того высокие дополнительные затраты канального ресурса на пилот-сигнал в режиме FDD увеличатся еще больше при быстром передвижении АС вследствие необходимости постоянной актуализации состояния канала. Напротив, режим TDD не требует столь высоких затрат канального ресурса.

Подводя итог о трех рассмотренных выше критериях, можно сделать вывод, что более подходящим режимом дуплекса для технологии Massive MIMO является TDD.

ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИЙ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В MASSIVE MIMO

Как правило, конструктив систем Massive MIMO основан на многоэлементных антенных решетках, построенных по линейной (синий), цилиндрической (красный), прямоугольной (лиловый) или же распределенной (зеленый) топологии (рис.4) [3]. Результаты измерений показали [9], что, используя цилиндрическую конструкцию, можно достичь распознавания входящих сигналов в двух измерениях, однако, применяя линейную конструкцию с таким же количеством антенных элементов, можно добиться большей точности азимутального разрешения, но лишь в одном измерении. В обоих опытах был выбран диапазон 2,6 ГГц, и число антенных портов, расположенных друг от друга на расстоянии половины длины волны, составляло 128.

ПРАВОВЫЕ СЛОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ MASSIVE MIMO

Особенности функционирования адаптивного диаграммообразования могут создать дилемму при подаче заявок на ее использование в надзорные органы, контролирующие как ЭМС радиоэлектронных средств, так и экологическую безопасность по электромагнитному фактору. С одной стороны, если подавать заявку по максимальному значению эффективно излучаемой мощности одного узкого луча, то, во-первых, возможен отказ в разрешении из-за превышения норм ЭМС и экологической безопасности, а, во-вторых, картина будет недостоверной, так как это максимальное значение будет достигаться лишь в определенной точке соты, при этом в большей части соты значение будет гораздо ниже. С другой стороны, если подавать заявку с усредненным значением, при проверке может быть обнаружено нарушение, так как эффективно излучаемая мощность, реально использованная в луче, будет больше заявленной. Поэтому такая неоднозначность потребует в будущем введения новых нормативных актов для получения специального разрешения на использование технологии Massive MIMO.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты анализа показали, что применение технологии Massive MIMO открывает новые возможности и вносит существенный вклад в достижение заявленных требований для сетей мобильной связи 5G. К очевидным достоинствам Massive MIMO следует отнести улучшение надежности канала передачи, повышение спектральной и энергетической эффективности и, как следствие, снижение подверженности замираниям и возникшим по этой причине ошибкам; повышение скорости передачи данных и увеличение емкости сети до значений, необходимых для реализации сетей пятого поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Osseiran A.** et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project // IEEE Communications Magazine. 2014. V. 52. № 5. P. 26-35.
2. **Hussain Sk.S.** et al. An overview of massive MIMO system in 5G // International Science Press, I J C T A. 2016. P. 4957-4968.
3. Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies // 3GPP TR 38.913 V. 0.3. 2016. P. 36.
4. **Larsson E.G.** et al. Massive MIMO for next generation wireless systems //IEEE

- Communications Magazine. 2014. V. 52. № 2. P. 186-195.
5. **Marzetta T.L.** Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2010. V. 9. № 11. P. 3590-3600.
 6. **Rusek F.** et al. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays // IEEE Signal Processing Magazine. 2013. V. 30. № 1. P. 40-60.
 7. **Larsson E.G.** et al. Massive MIMO for next generation wireless systems // IEEE Communications Magazine. 2014. V. 52. № 2. P. 186-195.
 8. **Ngo H.Q., Larsson E.G., Marzetta T.L.** Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems // IEEE Transactions on Communications. 2013. V. 61. № 4. P. 1436-1449.
 9. **Gao X.** et al. Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2015. V. 14. № 7. P. 3899-3911.
 10. **Одоевский С., Степанец В.** Планировать беспроводную связь с комфортом: программный комплекс ONEPLAN RPLS (ONEGA) // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2013. № 2. С. 34-39.
 11. **Фокин Г.А.** Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.13 "Телекоммуникационные системы и компьютерные сети". – СПб, 2009.
 12. Mitsubishi Electric's New Multibeam Multiplexing 5G Technology Achieves 20 Gbps Throughput // Mitsubishi Electric, <http://www.mitsubishielectric.com/news/2016/0121.html>. – 21 янв. 2016.
 13. Viewson Massive MIMO for New Radio // 3GPP Nanjing, Written Contributions R1-165063. – 2016.
 14. **Lu L.** et al. An overview of massive MIMO: Benefits and challenges // IEEE journal of selected topics in signal processing. 2014. V. 8. № 5. P. 742-758.
 15. **Зюко А.Г.** и др. Теория передачи сигналов. – М.: Радио и связь, 1980.
 16. **Одоевский С., Степанец В., Зибарев Е., Болкунов А., Зайченко А.** Беспроводная связь и принцип "не навреди": ПК ONEPLAN Sazon // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2017. №4. С. 52-57.
 17. **Harris P., Malkowsky S.** Setting a World Record in 5G Wireless Spectrum Efficiency With Massive MIMO // Virtuelle Instrumente in der Praxis. 2016. V. 21. P. 272-277.
 18. **Zhang X., Zhou X.** LTE-advanced air interface technology. – Boca Raton: CRC Press, 2012.
 19. **Hochwald B.M., Marzetta T.L., Tarokh V.** Multiple-antenna channel hardening and its implications for rate feedback and scheduling // IEEE transactions on Information Theory. 2004. V. 50. № 9. P. 1893-1909.
 20. **Björnson E.** Channel hardening makes fading channels behave as deterministic // <https://ma-mimo.ellintech.se/2017/01/25/channel-hardening-makes-fading-channels-behave-as-deterministic/>. – 25 янв. 2017.
 21. Study on New Radio Access Technology Physical Layer Aspects // 3GPP TR 38.802 V.14.2.0-2017.

За повреждение и хищение линий связи к ответу!

В 2017 году в Калужской области выявлены шесть фактов повреждения и хищения линий связи и телекоммуникационного оборудования "Ростелекома". По каждому факту возбуждены уголовные дела. Злоумышленники задержаны и лишены свободы благодаря совместным усилиям правоохранительных органов и сотрудников Калужского филиала оператора связи.

Линии связи находятся под защитой федерального законодательства: их повреждение и хищение регулируется статьей Уголовного кодекса РФ. В этих случаях закон предусматривает наказание в виде лишения свободы на срок до семи лет со штрафом в размере дохода осужденного за период до шести месяцев.

В сентябре прошлого года в Обнинске задержаны граждане, неоднократно повреждавшие

линии связи и похищавшие кабель из телефонной канализации в разных районах города. В результате их преступных действий абоненты в этом наукограде испытывали временные сложности с использованием услуг связи. Правоохранительные органы ведут следствие в рамках уголовного дела.

Ранее в Калуге другой злоумышленник неоднократно совершал хищения телекоммуникационного оборудования, незаконно проникая в подъезды жилых домов и помещения оператора. Преступник задержан и осужден на два года и один месяц лишения свободы. Кроме того, суд обязал его возместить материальный ущерб Калужскому филиалу ПАО "Ростелеком".

Сергей Ванюшин, заместитель директора – технический директор Калужского фили-

ала ПАО "Ростелеком", сообщает: "Мы ведем постоянную работу по защите линейно-кабельных сооружений. Все объекты хранения и эксплуатации телекоммуникационного оборудования оснащены охранной сигнализацией с выводом на пульта охраны предприятий. Предусмотрен выезд групп быстрого реагирования. Для предотвращения краж кабеля в компании реализуется программа системного мониторинга и контроля состояния сооружений связи. Функционируют электронные системы и устройства защиты колодцев телекоммуникационной канализации. "Ростелеком" делает все возможное для обеспечения бесперебойного предоставления услуг".

По информации ПАО "Ростелеком"