

# Обзор способов повышения производительности радиорелейных линий связи

Е. В. Рогожников, Е. П. Ворошилин, А. С. Колдамов, А. А. Гельцер

Приведён обзор методов, позволяющих повысить пропускную способность беспроводных систем связи, в частности радиорелейных линий связи при существующих ограничениях частотного ресурса.

*Ключевые слова:* радиорелейная связь, модуляция, пропускная способность, ХРПС, ММО, дуплекс.

## 1. Введение

Системы связи и передачи данных нуждаются в постоянном увеличении пропускной способности и повышении скорости передачи данных. Наиболее сильно эта потребность проявляется в сетях мобильной связи. Начиная с 2008 г. объём трафика передачи данных в сетях подвижной связи увеличился в несколько раз и, по прогнозам, будет расти в будущем [1].

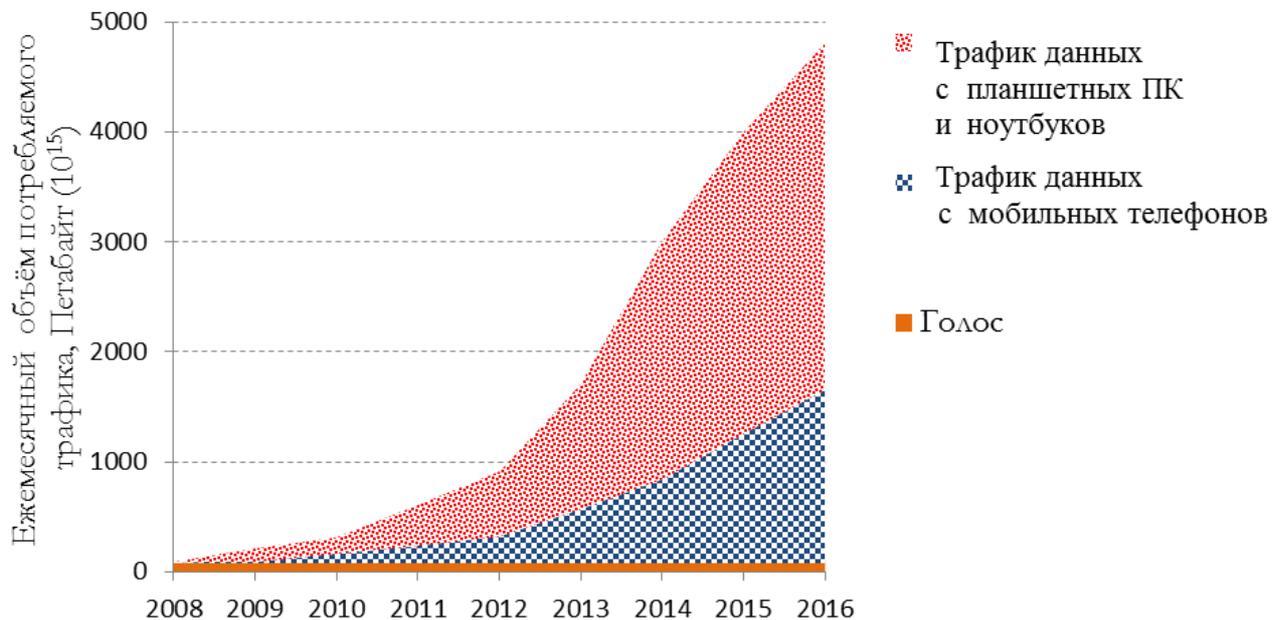


Рис. 1. Рост объёма передачи данных в сетях подвижной связи

Технологии связи четвёртого поколения, такие как Wi-MAX, LTE, предоставляют пользователям всё большие скорости передачи данных, что неизбежно требует всё большей пропускной способности от транспортных сетей. Фундаментальные ограничения на скорость передачи данных обусловлены полосой пропускания системы связи. Международные организации, такие как СЕРТ/ЕСС и ИТУ-R, занимающиеся распределением частотного диапазона, выделяют для работы РРЛ широкий диапазон частот в пределах от 6 ГГц до 86 ГГц. С увеличением частоты значительно возрастает стоимость оборудования, а также возрастает затухание сигналов на приземных трассах [2]. Поэтому большинство радиорелейных линий связи работает в диапазоне частот до 30 ГГц. Стандартные полосы пропускания для магист-

ральных линий – 3,5, 7, 14, 28 и 56 МГц [3]. Из-за ограниченности частотного ресурса возникает необходимость более эффективного использования выделенной полосы частот; также оператор связи должен иметь возможность увеличения пропускной способности линии связи без изменения частотного планирования.

В данной статье рассматриваются способы повышения эффективности использования частотного ресурса, следовательно, и скорости передачи данных; основные методы графически поясняются на рис. 2.

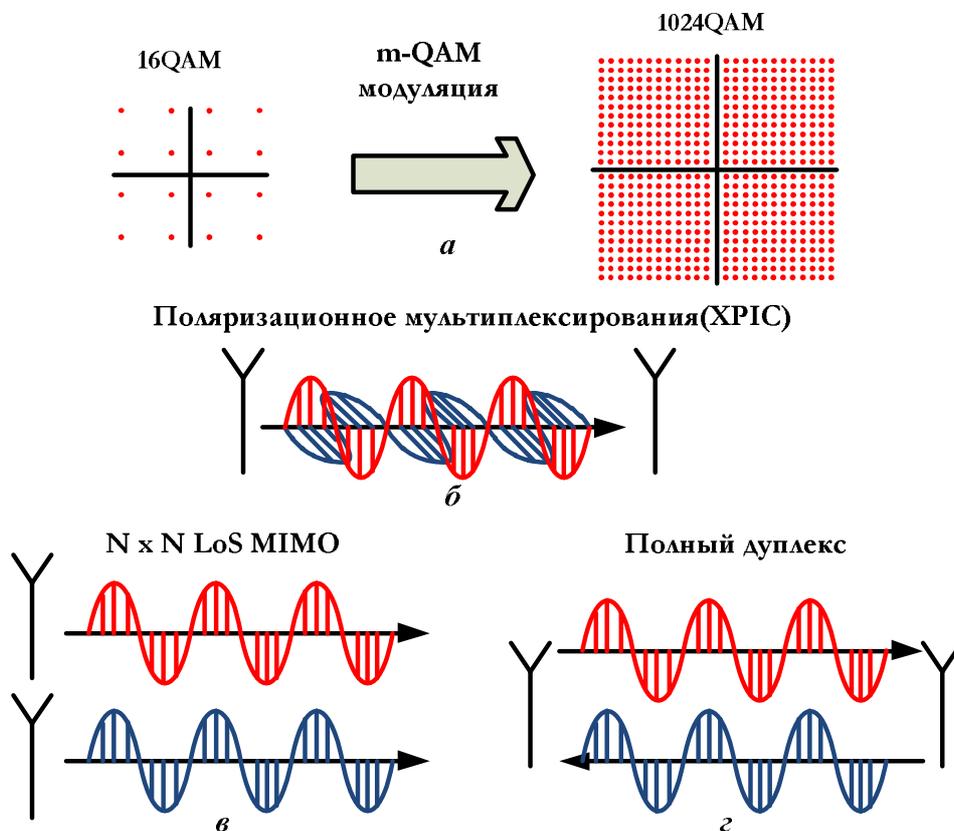


Рис. 2. Способы повышения пропускной способности линии связи:  
а) повышение позиционности модуляции; б) поляризационное мультиплексирование;  
в) технология LOS MIMO; г) полнодуплексная связь

Рассмотрим следующие способы повышения пропускной способности линии связи:

- 1) повышение позиционности модуляции;
- 2) применение кросс-поляризационного мультиплексирования и технологии XPIC (cross-polarization interference cancellation);
- 3) применение пространственного мультиплексирования, технология LOS (line of sight) MIMO (many input many output);
- 4) применение полного дуплекса.

## 2. Повышение позиционности модуляции

Одним из очевидных путей увеличения скорости передачи данных является повышение позиционности модуляции. При повышении позиционности модуляции, большее количество битов информации может быть передано в одно и то же время, в той же полосе частот. Применение m-QAM модуляции позволяет закодировать  $\log_2(m)$  бит информации в каждом чипе. При переходе от QPSK к QAM 16 мы имеем двукратное увеличение скорости передачи данных, однако при повышении позиционности модуляции с QAM 512 до QAM 1024, увеличение скорости передачи составит только 11%. С другой стороны, чем больше позиционность, тем большее число уровней амплитуды сигнала будет расположено близко друг к другу, по-

вышая тем самым вероятность того, что под действием шумов уровни сигнала будут ошибочно демодулированы, что приводит к повышенной чувствительности системы к шуму. Таким образом, высокие значения номера QAM более требовательны к параметру SNR (Signal Noise Ratio – отношение сигнал/шум) [4].

На рис. 3 приведены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при использовании различных видов модуляции.

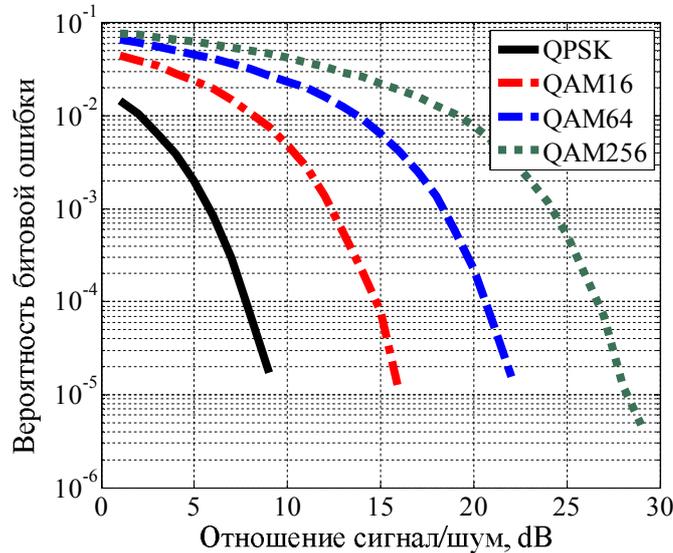


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от вида модуляции

Как видно из рис. 3, для сохранения работоспособности системы при увеличении позиционности модуляции необходимо увеличение отношения сигнал/шум на 4 – 5 дБ, что может быть достигнуто за счёт улучшения характеристик оборудования, повышения мощности передаваемого сигнала, либо уменьшением расстояния между передающим и приёмным пунктами. Применение высоких позиционностей модуляции оправдано на таких участках линии связи, где требуется высокая скорость передачи данных, но нет необходимости в большой протяжённости. К примеру, это могут быть вставки в оптоволоконную линию связи, проходящую через русло реки, где нет возможности проложить оптоволокно.

### 3. Применение поляризационного мультиплексирования

Данная технология позволяет удвоить скорость передачи данных без расширения полосы сигнала. Увеличение скорости достигается за счёт создания передатчиком двух потоков, работающих в одной полосе, но на ортогональных поляризациях (вертикальной и горизонтальной).

При прохождении сигнала через канал распространения происходит деполяризация сигнала [5], в результате чего нарушается ортогональность, что приводит к необходимости дополнения системы связи устройствами поляризационной компенсации. Технология XPIC позволяет скомпенсировать негативное влияние «соседнего» сигнала и увеличить уровень развязки сигналов в приёмнике [6]. Структурная схема, поясняющая принцип работы технологии XPIC, приведена на рис. 4.

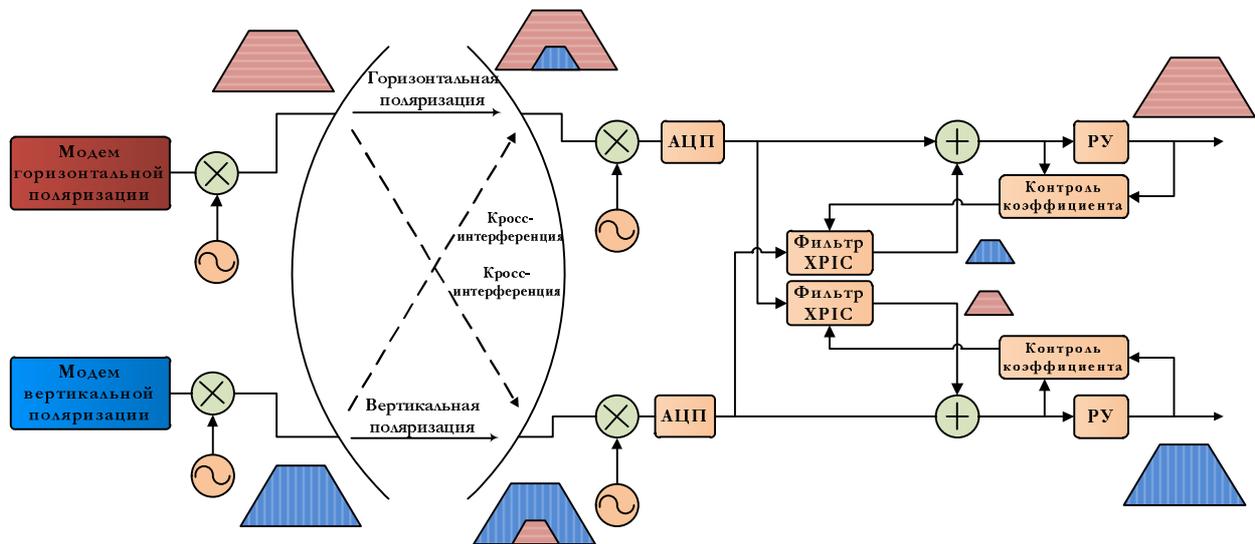


Рис. 4. Структурная схема кросс-поляризационного мультиплексирования с ХРПС

Принцип работы системы связи с технологией ХРПС заключается в следующей последовательности операций. В передающей части системы формируется два потока данных, производится перенос обоих потоков на несущую частоту, после чего сигналы поступают в антенну, один с горизонтальной, другой с вертикальной поляризацией. Пройдя через канал распространения, сигналы принимаются приёмной антенной. Разделение сигналов производится по поляризационному признаку, однако при передаче через канал связи происходит деполаризация сигналов, таким образом, в каждом приёмном тракте оказываются сигналы обеих поляризаций. По пилот-сигналам производится оценка мощности «сигнала-помехи» (сигнала соседней поляризации) и формируются весовые коэффициенты фильтров. На выходе фильтров формируются компенсирующие сигналы, которые складываются с принятыми сигналами для подавления «сигнала-помехи». При изменении уровня кроссполаризационной помехи производится адаптация фильтров для максимального уровня развязки. На сегодняшний день технология ХРПС применяется ведущими производителями радиорелейного оборудования, такими как NEC, Ericson, Huawei и др.

#### 4. Пространственное мультиплексирование, технология ММО

ММО (multi input multi output) – известная технология, применяемая для того, чтобы повысить спектральную эффективность системы беспроводной связи [7]. Работа ММО-системы подразумевает использование нескольких передающих и приёмных антенн. Принцип работы ММО основан на том, что сигналы разных антенн будут иметь различные пути распространения между передатчиком и приёмником ввиду многолучёвости канала связи. Многолучёвость в таких системах является необходимым условием её работы и позволяет реализовать разделение сигналов в приёмнике. Однако в некоторых системах связи точка – точка, в частности в радиорелейных линиях, данный подход не применим из-за использования антенн с узкой диаграммой направленности, ориентированных точно друг на друга, что сводит к минимуму многолучевоcть канала связи. Таким образом, прямые и перекрёстные сигналы проходят практически одинаковый путь распространения. Запишем уравнение передаваемых и принимаемых сигналов для случая ММО 2×2:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $r_1, r_2$  – сигналы, принимаемые первой и второй приёмными антеннами;

$s_1, s_2$  – сигналы, передаваемые первой и второй антеннами;

$h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$  – элементы канальной матрицы;

$n_1, n_2$  – аддитивный белый гауссовский шум.

Используя уравнение 1, упростим запись:  $\mathbf{r} = \mathbf{s} \cdot \mathbf{H} + \mathbf{n}$ . Для разделения переданных сигналов в приёмнике производится оценка канальной матрицы  $\mathbf{H}$ . Разделение сигналов невозможно, если элементы оценённой канальной матрицы  $\mathbf{H}$  будут линейной комбинацией друг друга, что имеет место в радиорелейной связи. Для радиорелейных линий предложен другой способ реализации технологии MIMO, получивший название LOS (line of sight) MIMO [8].

Идея LOS MIMO заключается в следующем: передающие и приёмные антенны разносят на определённое расстояние  $d_1, d_2$  (рис. 5), для того чтобы разность фаз между прямыми и перекрёстными сигналами была  $90^\circ$ . Оптимальное разнесение антенн рассчитывается по формуле:

$$h_1 \cdot h_2 = \frac{D \cdot c}{2f}, \quad (2)$$

где  $h_1, h_2$  – высота первой и второй приёмных антенн соответственно;

$D$  – расстояние между передающими и приёмными антеннами;

$f$  – несущая частота.

Передатчик формирует два потока данных, которые модулируются; после переноса на ВЧ сигналы поступают в передающие антенны. Пройдя через канал распространения радиоволн, сигналы поступают в приёмные антенны.

Интерферирующий сигнал может быть устранён за счёт фазового сдвига между прямыми и перекрёстными сигналами. Для компенсации перекрёстных сигналов в каждом приёмном канале, суммарный сигнал, принятый в первом канале, проходит через фазовращатель и суммируется с сигналом во втором приёмном канале. Поворот фазы в фазовращателе рассчитывается таким образом, чтобы скомпенсировать поперечные сигналы и выделить прямые. Работа системы на примере MIMO  $2 \times 2$  поясняется на рис. 5.

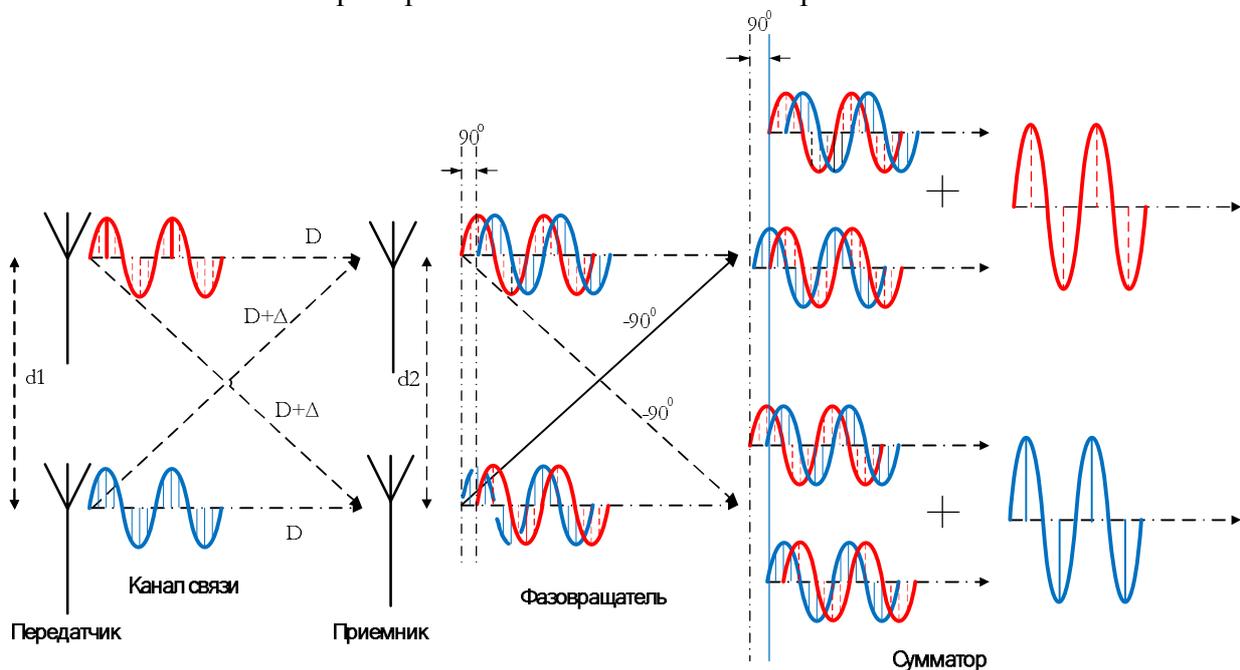


Рис. 5. Принцип работы системы LOS MIMO  $2 \times 2$

На рис. 5 разность фаз между прямыми и перекрёстными сигналами в приёмной антенне составляет  $90^\circ$ ; в приёмном пункте сигналы каждого приёмного тракта доворачиваются на  $-90^\circ$  и складываются, при этом перекрёстные сигналы компенсируют друг друга, а прямые

выделяются. Сочетание технологии LOSMIMO2×2 с технологией XPIС позволит в 4 раза увеличить скорость передачи данных в той же полосе частот.

## 5. Полнодуплексная связь

Ещё одним резервом удвоения скорости передачи данных является полнодуплексная связь. Традиционно системы связи используют дуплексное разделение передаваемой и принимаемой информации, временное либо частотное. При полном дуплексе передача и приём данных производится одновременно, в одной полосе частот. Сложность реализации заключается в том, что мощность сигнала на выходе передающей антенны значительно превышает мощность принимаемого сигнала; таким образом, приёмный тракт приёмо-передающего пункта будет забит собственным передаваемым сигналом. Для нормального функционирования полнодуплексной системы связи необходима развязка порядка 100 дБ между передающей и приёмной антеннами каждого приёмо-передающего пункта. Для того чтобы полнодуплексная связь стала реализуемой, необходимо в каждом приёмо-передающем пункте производить компенсацию собственного передаваемого сигнала в приёмном тракте. Предложены цифровые и аналоговые методы компенсации «сигнала-помехи» [9].

### 5.1 Аналоговая компенсация сигнала

Суть аналоговой компенсации заключается в том, что сигнал из передающего тракта по кабелю поступает в приёмный тракт, в противофазе с сигналом, прошедшим через среду распространения, что позволяет скомпенсировать «сигнал-помеху» в приёмнике. Блок-схема подобной системы представлена на рис. 6.

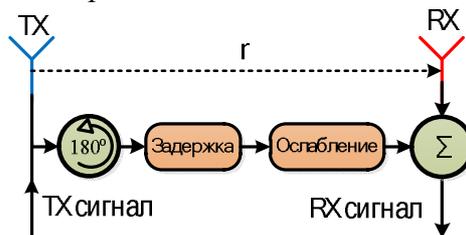


Рис. 6. Блок-схема системы аналогового подавления передаваемого сигнала в приёмнике при помощи дополнительной линии

Проходя через среду распространения, «сигнал-помеха» испытывает ослабление и задержку. Для максимальной компенсации необходимо, чтобы компенсирующий сигнал полностью повторял «сигнал-помеху», поэтому в канал компенсации вводятся блоки задержки и ослабления сигнала.

### 5.2 Дополнительная цифровая компенсация

При использовании полнодуплексной связи в городской среде либо внутри помещений нельзя исключать многолучевость канала распространения радиоволн (РРВ) между передающей и приёмной антеннами, что будет значительно влиять на уровень помехи, оставшейся в приёмном тракте после аналоговой компенсации. Для устранения влияния канала РРВ предлагается ввести дополнительную цифровую компенсацию помехи, оставшейся после аналоговой компенсации. Предлагаемая блок-схема системы приведена на рис. 7.

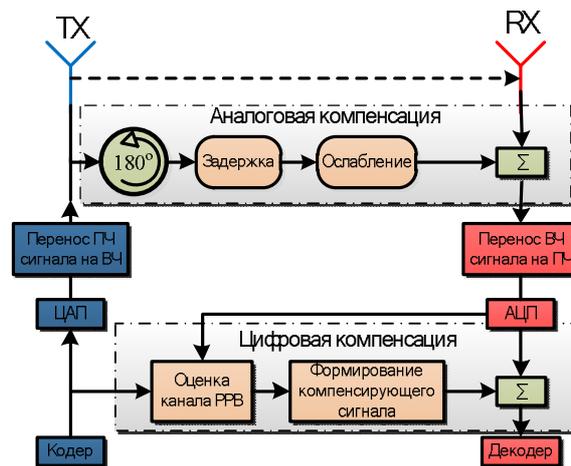


Рис. 7. Блок-схема системы компенсации полнодуплексной системы связи

Оценка канала РРВ может быть проведена любым известным способом, например при помощи метода наименьших квадратов [10]. После оценки канала РРВ формируется компенсирующий сигнал, который складывается с сигналом с выхода АЦП, таким образом производится компенсация помехи, оставшейся после аналоговой компенсации.

Результаты исследования, проведённого в Стэнфордском университете [9], показали, что применение аналоговой компенсации позволяет подавить сигнал передатчика в приёмном тракте на 40 дБ, использование цифровой компенсации добавляет ещё 30 – 33 дБ, таким образом, комбинированная компенсация помехи достигает 75 дБ, рис. 8. Физическое разнесение антенн в пространстве позволяет добавить ещё 25 дБ для достижения необходимой развязки в 100 дБ.

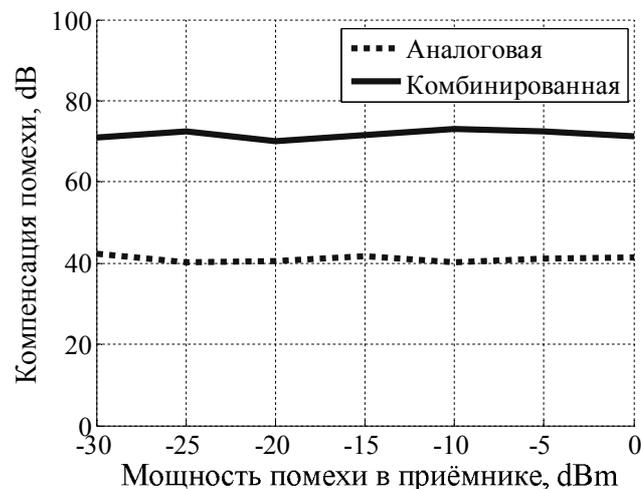


Рис. 8. Зависимость аналоговой, цифровой и комбинированной компенсации помехи от мощности помехи в приёмнике

Для проверки алгоритмов компенсации передаваемого сигнала в приёмном тракте использовался WI-FI сигнал полосой 10 МГц, мощность помехи в приёмнике от -30 дБм до 0 дБм. Ослабление interfering сигнала в среде распространения, при разнесении антенн на 20 см, составило 40 дБ. Таким образом, суммарная компенсация сигнала передатчика в приёмнике составляет 113 дБ, сигнал передатчика мощностью 20 дБм создаст помеху в приёмном тракте в -93 дБм, что близко к уровню собственных шумов в приёмнике.

## 6. Заключение

Данная статья посвящена обзору современных технологий, которые способны в разы повысить эффективность использования частотного ресурса, а следовательно, увеличить пропускную способность радиорелейных линий связи. Применение пространственного и поляризационного мультиплексирования совместно с высокой позиционностью модуляции позволит достичь скорости передачи данных в несколько гигабит в секунду, что делает применение радиорелейных линий связи ещё более привлекательным.

## Литература

1. Traffic and market report June 2012 on the pulse of the networked society [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ericsson.com/res/docs/2012/traffic\\_and\\_market\\_report\\_june\\_2012.pdf](http://www.ericsson.com/res/docs/2012/traffic_and_market_report_june_2012.pdf), свободный (дата обращения 25.02.2013).
2. В. Вишневецкий, С. Фролов, И. Шахнович Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне: новые горизонты скоростей// Электроника. 2011. № 1. С. 90–97.
3. Microwave capacity evolution [Электронный ресурс]. URL: <http://www-ipv6.ericsson.com/res/docs/review/Microwave-Capacity-Evolution.pdf>, (дата обращения 1.03.2013).
4. Основы передачи QAM [Электронный ресурс]. URL: <http://www.telcogroup.ru/files/materials-pdf/cab/QAM.pdf>, (дата обращения 1.03.2013).
5. Родимов А.П. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех в линиях связи. М. Радио и связь, 1984, 272с.
6. Investigation on the Integration of a cross Polarization Interference Canceller (XPIC) into a Nokia specific Digital Radio System [Электронный ресурс]. URL: <http://alexandria.tue.nl/extral/afstversl/E/549696.pdf>, (дата обращения 9.03.2013).
7. D. Gesbert, M. Sha, D. Shiu, P. J. Smith, and A. Naguib. From theory to practice: An overview of MIMO space time coded wireless systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 21(3):281–302, April 2003.
8. Tryggvi Ingason, Liu Haonan. Line-of-Sight MIMO for Microwave Links Adaptive Dual Polarized and Spatially Separated Systems// Department of Signals and Systems, Chalmers University of Technology, July 2009, 115с.
9. Practical, Real-time, Full Duplex Wireless [Электронный ресурс]. URL: <http://sing.stanford.edu/pubs/mobicom11-duplex.pdf>, свободный (дата обращения 16.02.2013).
10. Channel Models: A Tutorial. 2011. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/channel\\_model\\_tutorial.pdf](http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/channel_model_tutorial.pdf), (дата обращения 16.02.2013).

*Статья поступила в редакцию 19.04.2013;  
переработанный вариант — 30.05.2013*

### **Рогожников Евгений Васильевич**

аспирант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40), тел. (3822) 41-33-98, e-mail: udzhon@mail.ru

**Ворошилин Евгений Павлович**

к.т.н., заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40), тел. (3822) 41-33-98, e-mail: vep@tor.tusur.ru

**Колдамов Александр Сергеевич**

магистрант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40), тел. (3822) 41-33-98, e-mail: udzhon@mail.ru

**Гельцер Андрей Александрович**

к.т.н. старший преподаватель кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40), тел. (3822) 41-33-98, e-mail: udzhon@mail.ru

**Review of microwave link productivity increase methods**

**E.Rogozhnikov, E. Voroshilin, A. Koldamov, A. Vershinin, A. Gelzer**

A review of methods to increase the capacity of wireless communication systems, including microwave links with the existing limitations of the frequency resource is presented.

*Keywords:* microwave link, modulation, capacity, XPIC, MIMO, duplex.