

3. Borisov S.R., Vasil'ev V.N. *Fundamentals of Entrepreneurship and Organization of Production*. Moscow: Mashinostroenie-1, 2000, 752 p. (In Russ.)
4. Volchkevich I.L. Investigation of the actual performance of modern high-performance CNC equipment. *Mashinostroenie i tehnosfera XXI veka: mat. XVII mezhd. nauchn.-tehn. konf.*, Donetsk, 2011, pp. 144–145. (In Russ.)
5. Ivanova A.S. *Integrated Production Management Systems for Machine-Building Enterprises*. Samara: AS Gard, 2011, 312 p. (In Russ.)
6. Matveeva E.A., Dijazitdinova A.R. *Business Systems Management Concepts: Monograph*. Samara: Izd. PGUTI, 2018, 172 p. (In Russ.)
7. Matveeva E.A., Simagina S.G. Modeling and optimization of the production capacity utilization of an enterprise with a small-scale production type. *Othody i resursy*, 2019, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.15862/16ECOR219> (In Russ.)
8. Control and monitoring of industrial equipment using the MindSphere platform from Siemens. URL: <https://isup.ru/articles/2/13235> (accessed: 12.09.2020). (In Russ.)
9. *NIAT System of Maintenance and Repair of Machine Tools with PU*. Kaluga: Izd. NIAT, 1986, 48 p. (In Russ.)
10. Hansen R.C. Unleashing the power of OEE. *Maintenance Technology Articles*, 1998. URL: <http://www.mt-online.com>

Received 22.11.2020

ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

УДК 621.396.24

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АНТЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ МІМО С ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ РАЗНЕСЕНИЕМ

Беспалов А.Н.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: andreybepalov@mail.ru*

Увеличение количества передаваемой информации в беспроводных сетях вызывает необходимость поиска и разработки технологий, позволяющих повышать спектральную эффективность. Одной из таких технологий является МІМО, которая успешно применяется в системах сотовой связи и сетях Wi-Fi. Актуальной задачей является повышение спектральной эффективности в сетях специального назначения. На основе проведенных исследований разработан порядок проектирования антенных комплексов в системах МІМО. Выполнено экспериментальное исследование составных частей антенных комплексов с поляризационным разнесением. В частности, был разработан антенный комплекс, состоящий из двух ортогональных логопериодических антенн, совмещенных на одной траверсе. Показано, что измеренные характеристики находятся в качественном и количественном согласии с характеристиками, полученными при помощи разработанной электродинамической модели антенного комплекса с поляризационным разнесением.

Ключевые слова: антенный комплекс, поляризация, МІМО, спектральная эффективность

Введение

На сегодняшний день радиочастотный диапазон разделен между государственными и частными организациями, однако объем передаваемой информации с каждым годом растет. Возникает необходимость в более эффективном использовании имеющихся диапазонов частот. Одним из актуальных решений для повышения спектральной эффективности является использование технологии МІМО (Multiple Input Multiple Output)

с поляризационным или пространственным разнесением, основанной на одновременной передаче сигналов в одной полосе частот по слабокоррелированным каналам [1–4].

Технология МІМО активно применяется в сетях общего пользования, сетях сотовой подвижной связи, технологиях Wi-Fi, WiMax. В то же время планируется использование МІМО в профессиональных системах связи, в том числе в сетях связи специального назначения.

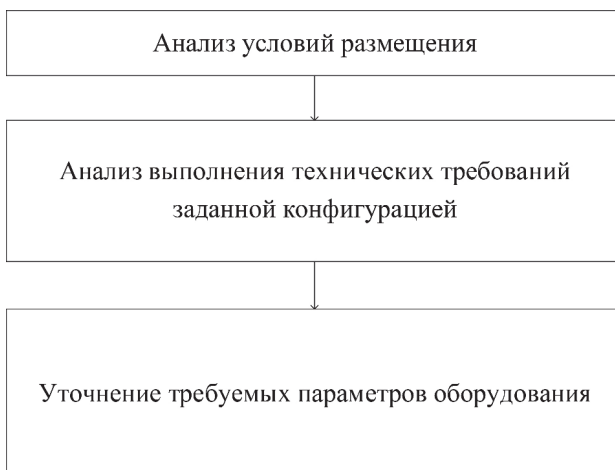


Рисунок 1. Порядок проектирования АК для ММО

В системах связи с ММО используются многоэлементные антенные решетки, в результате чего обеспечивается расширение зоны покрытия радиосигналами и сглаживание в ней мертвых зон. Многолучевое распространение сигнала в сетях с ММО уменьшает влияние замираний и переотражений в условиях плотной городской застройки или сложного рельефа местности.

За счет использования различных видов разнесения каналов достигается повышение спектральной эффективности, тем самым технология ММО позволяет либо увеличить скорость передачи информации при фиксированной помехозащищенности, либо улучшить помехозащищенность при сохранении заданной пропускной способности [5–7].

Порядок проектирования антенных комплексов в системах ММО

При разработке антенных комплексов (АК) для систем с ММО необходимо учитывать множество технических требований к антенным системам с учетом особенностей технологии ММО.

На основе анализа характеристик антенных элементов был разработан порядок проектирования антенных комплексов в системах ММО, включающий три основных этапа (см. рисунок 1).

На первом этапе производится анализ условий размещения и конфигурации проектируемого антенного комплекса системы ММО.

Второй этап включает в себя анализ выполнения технических требований антенного комплекса и оценку качества связи. Одним из вариантов повышения спектральной эффективности в системах ММО является использование АК с поляризационным разнесением. Оценка спектральной эффективности канала системы ММО 2×2 производится согласно [8–10].

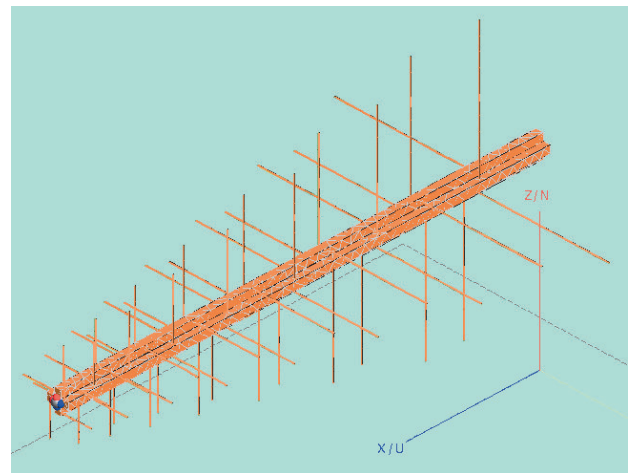


Рисунок 2. Модель антенного комплекса ММО с поляризационным разнесением

На третьем этапе производится корректировка модели по месту установки путем проведения экспериментальных исследований характеристик синтезируемого антенного комплекса.

Антенные комплексы ММО с поляризационным разнесением

Как правило, антенны размещаются на специально выделенных антенных площадках на башнях теле- и радиовещания, на крышах домов либо на специально выделенном этаже высотного здания. Такие площадки являются весьма ограниченными по площади, и вопросы рационального размещения антенн и соответствующего оборудования являются очень важными.

В связи с этим было проведено исследование характеристик широкополосного антенного комплекса с поляризационным разнесением, который представляет собой два ортогональных логопериодических излучателя, совмещенных на одной траверсе (см. рисунок 2).

Антенный комплекс имеет достаточно хороший уровень согласования, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в диапазоне 200–550 МГц не превышает требуемых значений (см. рисунок 3), что позволяет использовать его в нескольких системах радиосвязи.

Частотные зависимости спектральной эффективности системы ММО при использовании антенных комплексов как с поляризационным, так и с пространственным разнесением приведены на рисунке 4.

Из приведенного графика видно, что такие антенные комплексы с поляризационным разнесением за счёт достаточно большой развязки между излучателями позволяют повысить спектральную эффективность систем ММО.

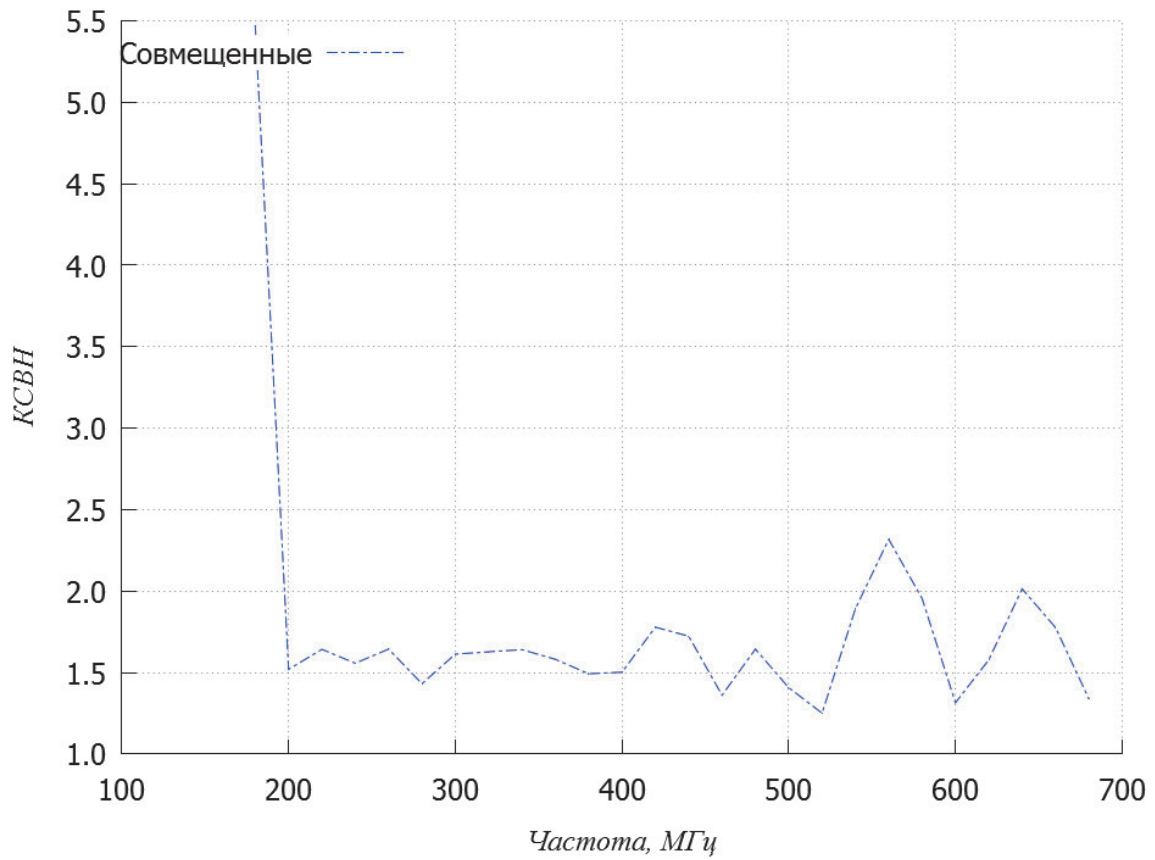


Рисунок 3. КСВН антенного комплекса ММО с поляризационным разнесением

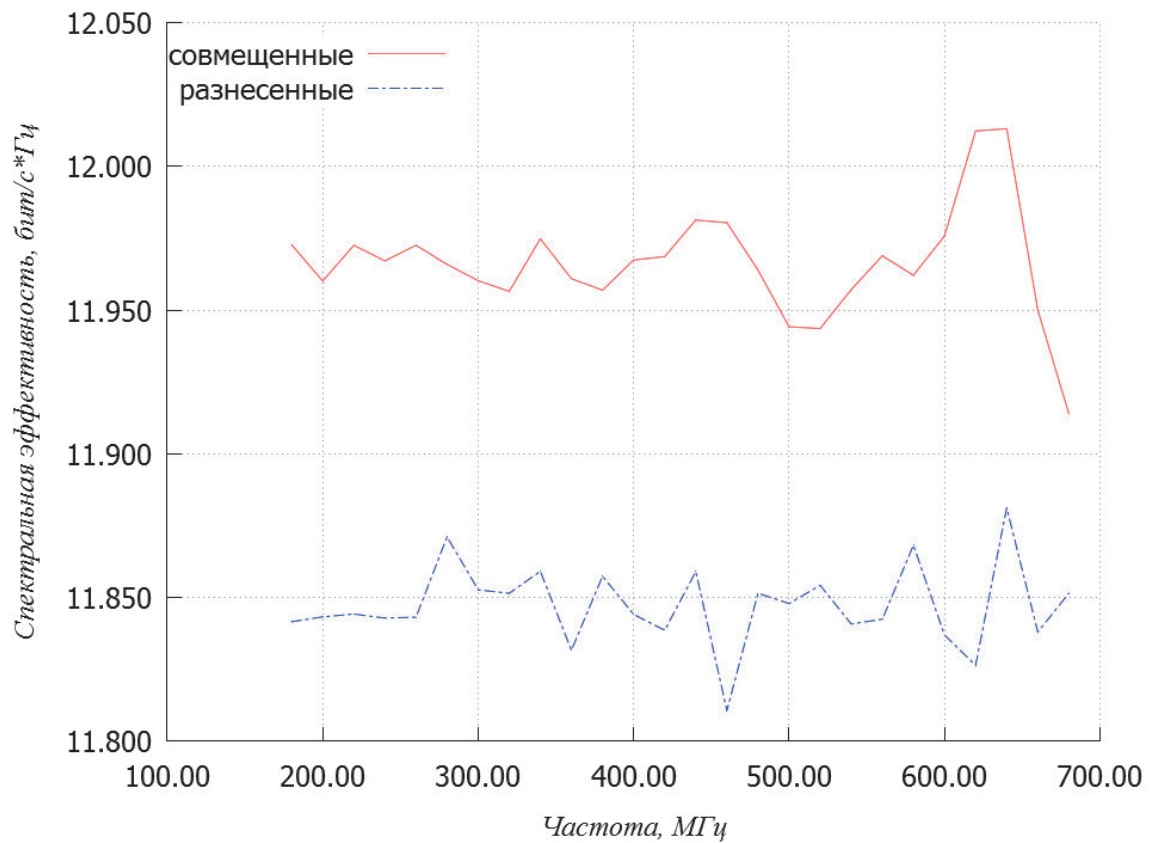


Рисунок 4. Спектральная эффективность ММО

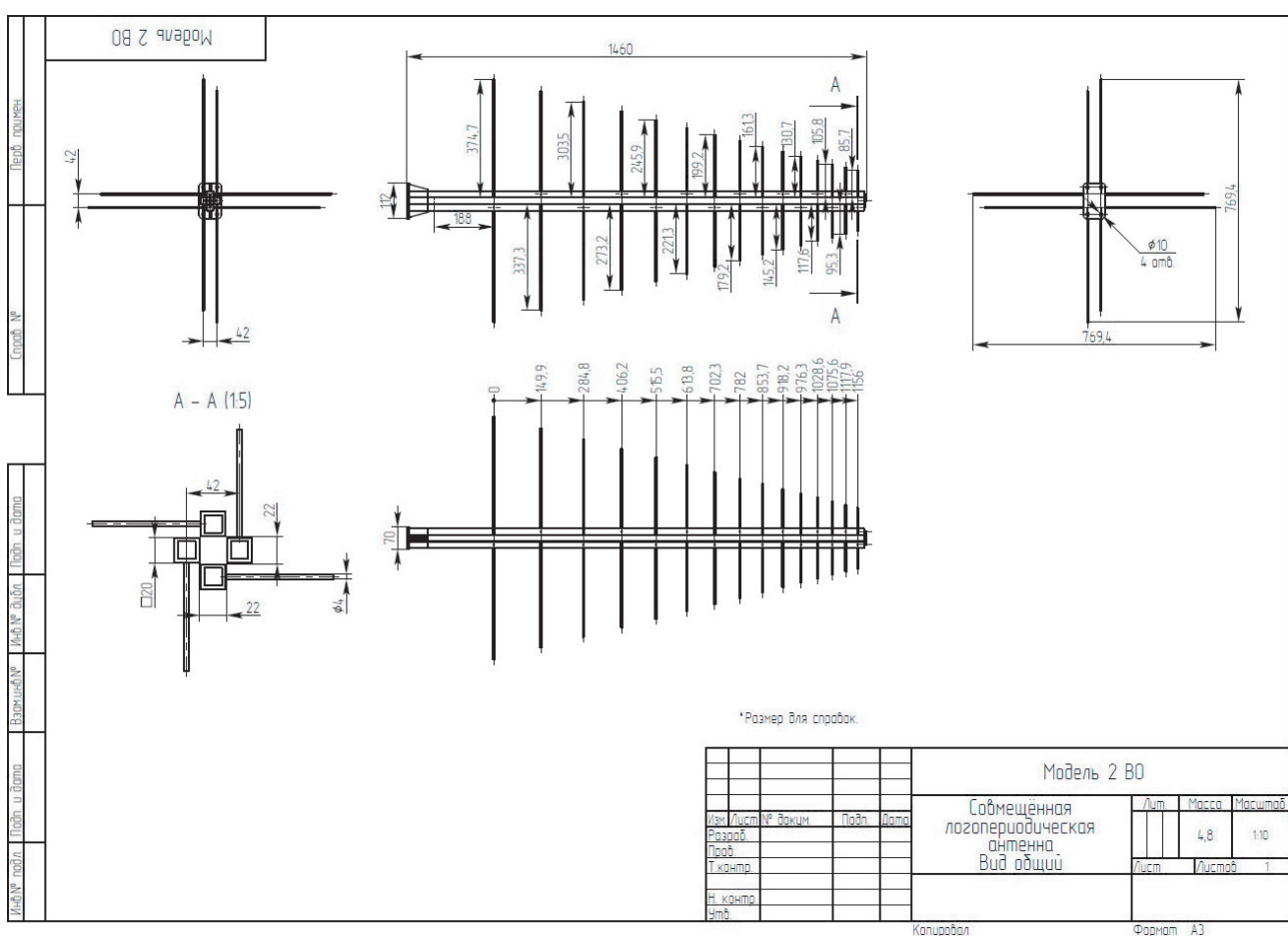


Рисунок 5. Чертеж общего вида совмещенной двухвходовой логопериодической антенны

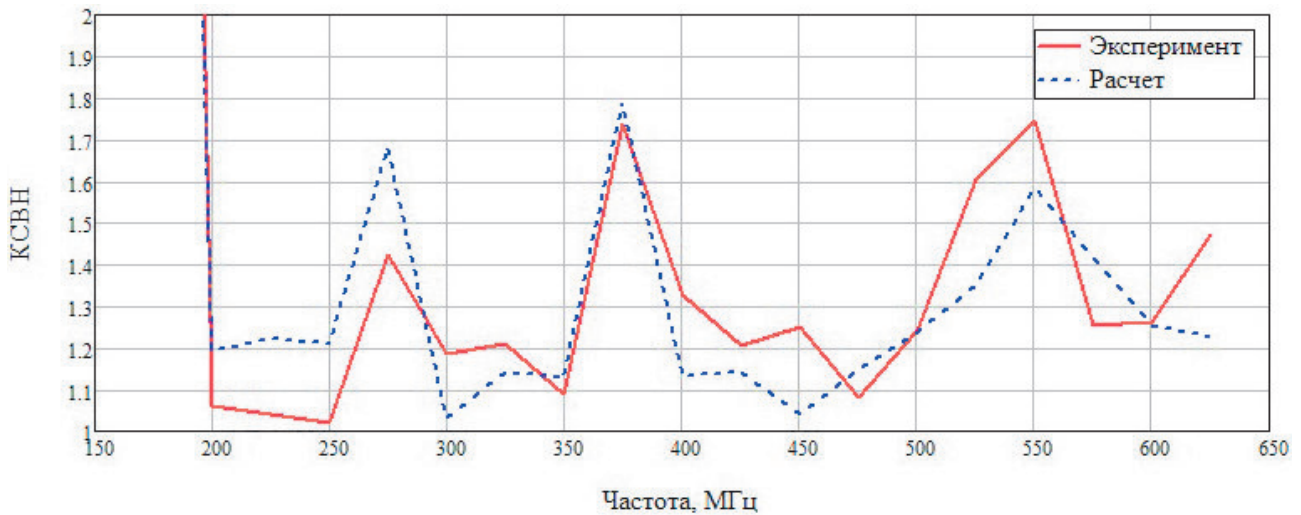


Рисунок 6. КСВН уединенной логопериодической антенны

Экспериментальное исследование совмещенных антенных комплексов с поляризационным разнесением

В целях верификации характеристик АК, полученных с помощью разработанной электродинамической модели, было проведено экспериментальное исследование, в ходе которого был

разработан антенный комплекс, состоящий из двух ортогональных логопериодических антенн, совмещенных на одной траверсе (см. рисунок 5).

Измерения проводились с использованием измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения (векторного анализатора цепей) ОБЗОР-304/1. На рисунке 6 представлены результаты измерений сконструированной уединенной

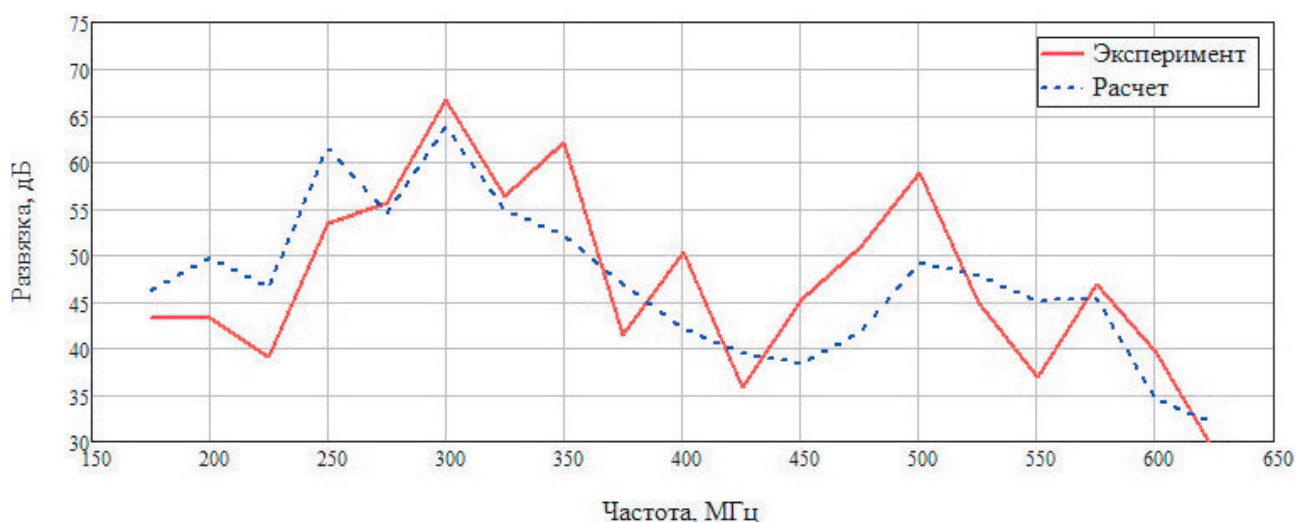


Рисунок 7. Развязка между входами системы совмещенных логопериодических антенн

логопериодической антенны. Видно, что расчетные данные достаточно точно совпадают с измеренными. Разработанный антенный комплекс является широкополосным и имеет высокий уровень согласования в диапазоне частот 200–600 МГц.

Достаточный уровень развязки (см. рисунок 7) позволяет сделать вывод о том, что данные антенные системы могут быть использованы при проектировании антенных комплексов повышенной эффективности, которые могут найти применение в системах ММО.

Кроме того, измеренные значения развязки и КСВН находятся в хорошем качественном и количественном согласии с характеристиками, полученными с помощью разработанной электродинамической модели антенного комплекса с поляризационным разнесением.

Заключение

В работе приведены результаты исследований различных АК для систем ММО. Приведен порядок проектирования таких АК и представлены характеристики АК с поляризационным разнесением. Показано, что АК с поляризационным разнесением за счет достаточно большой развязки между излучателями, позволяет повысить спектральную эффективность систем ММО.

Выполнено экспериментальное исследование составных частей АК с поляризационным разнесением. В частности, был разработан АК, состоящий из двух ортогональных логопериодических антенн, совмещенных на одной траверсе. Показано, что измеренные характеристики находятся в хорошем качественном и количественном согласии с характеристиками, полученными с помощью разработанной электродинамической модели АК с поляризационным разнесением.

Литература

1. Gershman A.B., Sidiropoulos N.D. Space-Time Processing for MIMO Communication. New York: John Wiley & Sons, 2006. 369 p.
2. Shaoshi Yang, Lajos Hanzo. Fifty years of MIMO detection: The road to large-scale MIMO // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2015. Vol. 17, No. 4. P. 1941–1988.
3. Карташевский В.Г., Бельский К.А., Слипичук К.С. Прием сигналов OFDM в каналах с рассеянием // Радиотехника. 2015. № 2. С. 62–68.
4. Mehana A.H., Nosratinia A. Performance of linear receivers in frequency-selective MIMO channels // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2013. No. 12 (6). P. 2697–2705.
5. Volker Kuhn. Wireless Communications over MIMO Channels: Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems. New York: John Wiley & Sons, 2006. 388 p.
6. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи. М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.
7. Карташевский В.Г. Обработка пространственно-временных сигналов в каналах с памятью. М.: Радио и связь, 2000. 272 с.
8. Паршин Ю.Н., Комиссаров А.В. Пропускная способность ММО телекоммуникационной системы в условиях изменяющейся пространственной структуры радиотракта с искусственной многолучевостью // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 1. С. 50–55.
9. Микрополосковые антенны на основе биизотропных и бианизотропных киральных метаматериалов в системах ММО / А.Н. Беспалов [и др.] // Радиотехника. 2019. № 3. С. 5–11.

10. Microstrip and fractal antennas based on chiral metamaterials in MIMO systems / D.S. Klyuev [et al.] // 12th Chaotic Modeling and Simulation International Conference, Springer Proceedings in Complexity. 2020. P. 295–306.

Получено 11.01.2021

Беспалов Андрей Николаевич, соискатель Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 203-19-63. E-mail: andreybespalov@mail.ru

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF ANTENNA COMPLEXES FOR MIMO WITH POLARIZATION DIVISION

Bespalov A.N.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: andreybespalov@mail.ru

An increasing increase in the amount of transmitted information in wireless radio networks makes it necessary to search for and develop technologies that can improve spectral efficiency. One of these technologies is MIMO. MIMO technology is successfully used in cellular communication systems and Wi-Fi networks. An urgent task is also to increase the spectral efficiency in special-purpose networks. Based on the conducted research, the procedure for designing antenna complexes in MIMO systems was developed. An experimental study of the components of antenna complexes with polarizing diversity was performed. In particular, an antenna complex consisting of two orthogonal log-periodic antennas combined on one traverse was developed. It is shown that the measured characteristics are in good qualitative and quantitative agreement with the characteristics obtained using the developed electrodynamic model of the antenna complex with polarization diversity.

Keywords: *antenna complex, polarization, MIMO, spectral efficiency*

DOI: 10.18469/ikt.2021.19.1.08

Bespalov Andrey Nikolaevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation. Tel. +7 846 203-19-63. E-mail: andreybespalov@mail.ru

References

1. Gershman A.B., Sidiropoulos N.D. *Space-Time Processing for MIMO Communication*. New York: John Wiley & Sons, 2006, 369 p.
2. Shaoshi Yang, Lajos Hanzo. Fifty years of MIMO detection: The road to large-scale MIMOs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 1941–1988.
3. Kartashevskij V.G., Bel'skij K.A., Slipenchuk K.S. Reception of OFDM signals in scattered channels. *Radiotekhnika*, 2015, no. 2, pp. 62–68. (In Russ.)
4. Mehana A.H., Nosratinia A. Performance of linear receivers in frequency-selective MIMO channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, no. 12 (6), pp. 2697–2705.
5. Volker Kuhn. *Wireless Communications over MIMO Channels: Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems*. New York: John Wiley & Sons, 2006, 388 p.
6. Volkov L.N., Nemirovskij M.S., Shinakov Yu.S. *Digital Radio Communication Systems*. Moscow: Eko-Trendz, 2005, 392 p. (In Russ.)
7. Kartashevskij V.G. *Processing of Space-Time Signals in Channels with Memory*. Moscow: Radio i svjaz', 2000, 272 p. (In Russ.)
8. Parshin Yu.N., Komissarov A.V. The capacity of a MIMO telecommunication system in the context of a changing spatial structure of a radio path with artificial multipath. *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2012, no. 1, pp. 50–55. (In Russ.)

9. Bespalov A.N. et al. Microstrip antennas based on biisotropic and bianisotropic chiral metamaterials in MIMO systems. *Radiotekhnika*, 2019, no. 3, pp. 5–11. (In Russ.)
10. Klyuev D.S. et al. Microstrip and fractal antennas based on chiral metamaterials in MIMO systems. *12th Chaotic Modeling and Simulation International Conference, Springer Proceedings in Complexity*, 2020, pp. 295–306.

Received 11.01.2021

УДК 621.376.6

АЛГОРИТМ СНИЖЕНИЯ ПИК-ФАКТОРА СИГНАЛОВ РАДИОВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DRM МЕТОДОМ ОКОННОГО ВЗВЕШИВАНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И АДАПТИВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ДЛИНЫ ОКНА

Минкин М.А., Морозов К.Ю.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: mky@siprs.ru

Проблема высокого пик-фактора в системах с OFDM-модуляцией, к которым относится система цифрового радиовещания стандарта DRM, вызывает необходимость поиска эффективных методов его снижения. Среди возможных к применению в системе DRM методов снижения пик-фактора выделяется метод на основе оконного взвешивания с обратной связью. Несмотря на то что он является достаточно эффективным, для него, как и прочих методов, характерен эффект повторного роста пик-фактора после фильтрации внеполосных излучений. Для дальнейшей оптимизации данного метода проведены исследования параметров сигнала DRM на предмет корреляции с величиной повторного роста пик-фактора. На основе полученных данных разработан адаптивный алгоритм оконного взвешивания с обратной связью и применением изменяемой длины окна. Выполнен анализ предложенного алгоритма с помощью программы собственной разработки CrestFactorTest. Проведены экспериментальные исследования стандартного алгоритма снижения пик-фактора на основе оконного взвешивания с обратной связью и предложенного адаптивного алгоритма, показавшие эффективность последнего.

Ключевые слова: анализ сигнала, OFDM-символ, радиовещание, модулятор, цифровой фильтр, внеполосные излучения, MER

Введение

Наличие проблемы высокого пик-фактора в модуляторах стандарта DRM (Digital Radio Mondiale) [1; 2], как и в других системах с OFDM-модуляцией (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), вызывает необходимость поисков эффективных методов его подавления. Поскольку в системах с OFDM-модуляцией применяется большое число поднесущих частот, формируемых посредством обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ), сложение их амплитуд приводит к образованию мощных пиков сигнала. Следствием являются сильные нелинейные искажения в радиочастотных узлах передающего оборудования. Поскольку для передачи сигнала без искажений в передатчиках применяют усилители мощности с высокой линейностью, а выход высокочастотного сигнала за границы линейной зоны усилителя приводит к искажению сигнала, происходят рост ошибок модуляции (снижение MER – Modulation Error Ratio) и появление сильных внеполосных

излучений. Если не принимать мер к снижению пик-фактора, невозможно будет обеспечить высокий коэффициент полезного действия передатчика, что приведет к его значительному удорожанию.

Однако не все методы снижения пик-фактора применимы к стандарту DRM [3]. В общем случае метод должен соответствовать следующим критериям:

1. Не нарушать требования стандарта DRM и не предполагать модификаций структуры приемника, скорости передачи данных, применения дополнительных пилотных поднесущих.
2. Не подавлять MER ниже 21 дБ в системе DRM+ и ниже 30 дБ в системе DRM30 [4].
3. Не вызывать рост внеполосных излучений выше маски спектра, установленной в [5; 6].
4. Не ухудшать эффективность синхронизации приемника сигнала DRM.

Проверка методов снижения пик-фактора на соответствие данным критериям оставляет лишь несколько из них, которые могут быть использованы в оборудовании стандарта DRM [7]. К ним относятся методы на основе клиппинга, включающие методы оконного взвешивания, а также ме-