

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ДКМВ РАДИОСВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИИ МИМО С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ РАЗНЕСЕНИЕМ

*Букашкин С.А., д.т.н., генеральный директор ОАО «Концерн «Автоматика», e-mail: fgup@nii.ru;
Оглоблин А.В., заместитель командира войсковой части, e-mail: homealeks@mail.ru.*

Ключевые слова: ДКМВ радиосвязь, технологии МИМО, многолучевое распространение, пространственное, поляризационное разнесение, антенные системы, программный комплекс.

Рассмотрены существующие технологии МИМО с пространственным и поляризационным разнесением. Проанализированы достигнутые результаты. Сформулированы основные задачи и пути создания комплексов ДКМВ радиосвязи с использованием технологий МИМО.

Введение

Роль радиосвязи в диапазоне ДКМВ уже ни у кого не вызывает сомнений, поэтому в настоящее время наметилась тенденция по интенсивному совершенствованию и развитию этого вида радиосвязи. К несомненным достоинствам ДКМВ радиосвязи относятся высокая гибкость и мобильность, относительно слабая зависимость от инфраструктуры, возможность организации связи в кратчайшие сроки и при минимальных затратах, в том числе из неподготовленных районов, высокая живучесть, способность функционировать в условиях частичных отказов, включая условия боевых действий и чрезвычайные ситуации [1, 2].

Недостатки ДКМВ радиосвязи также общеизвестны [1, 2]. Это, прежде всего, относительная узкополосность (а следовательно низкая пропускная способность) и относительно невысокое качество отдельного ДКМВ радиоканала, связанное с нестабильностью физических параметров ионосферы и сложной помеховой обстановкой, особенно в условиях постановки преднамеренных помех.

Проблема повышения пропускной способности и помехозащищенности ДКМВ радиосвязи при ограниченности частотного ресурса в настоящее время является одной из самых острых и актуальных. Применение цифровой обработки сигналов позволяет перейти к передаче информации в дискретной форме в сочетании с использованием помехозащищенных сигнально-кодовых конструкций, в связи с чем становится возможным внедрение технологии автоматизированной оперативной адаптации радиолиний к изменению параметров среды распространения [2].

Данная статья посвящена обсуждению путей разработки методики создания современных быстро разворачиваемых полевых комплексов ДКМВ радиосвязи с применением новых технологий, обеспечивающих повышение надежности и устойчивости радиосвязи.

Одним из перспективных путей повышения пропускной способности и помехозащищенности ДКМВ радиосвязи является использование технологии множественной передачи и приема (Multi Input Multi Output – MIMO). Исследования различных вариантов реализации техно-

логии ведутся достаточно давно и описаны в литературе. В частности, рассмотрены возможности реализации быстро разворачиваемых комплексов, использующих схему Аламоути и пространственное разнесение передатчиков [3, 4].

Дальнейшее развитие этого направления может быть связано с использованием увеличенного (более двух) числа передатчиков и приемников в сочетании с различными видами разнесения (пространственное, поляризационное, комбинированное). Реализация этого подхода связана с решением ряда частных задач, в числе которых следует выделить разработку математических моделей канала МИМО для различных типов трасс, видов разнесения, типов антенных систем; выбор (разработку) антенных систем для различных вариантов построения комплексов оборудования МИМО; разработку решений по построению комплексов различного назначения, включая быстро разворачиваемые, с учетом основных тактико-технических и технико-экономических факторов (требований).

Технология МИМО является методом кодирования сигнала, позволяющим повысить скорость передачи данных путём использования нескольких приемных или передающих систем. Таким образом, технология МИМО предполагает изначально многолучевое распространение сигнала. При этом необходимым условием является низкий уровень корреляции между информацией, передаваемой по разным каналам.

Анализ литературы выявил, что исследования технологии МИМО в настоящее время сосредоточены в области СВЧ. В первую очередь эта технология применяется на частотах мобильной радиосвязи в составе технологий WiFi и LTE [5, 6].

Следует отметить, что наиболее часто вышеупомянутые технологии применяются в городских условиях, где множественные переотражения приводят к многолучевому распространению сигнала естественным образом. В этих условиях, с целью повышения декорреляции сигнала, целесообразным оказывается применение нескольких антенных систем. Сравнительно малая рабо-

чая длина волны делает особенно удобным использование пространственного разнесения каналов. Применение же поляризационного разнесения ограничено.

Вместе с тем, на технологию MIMO не накладываются непосредственно ограничения по частотному диапазону. Однако, оценивая возможности и перспективы применения MIMO в ДКМВ диапазоне, следует учитывать особенности трасс распространения радиоволн данных частот.

Как известно [1, 7], ДКМВ-радиосвязь на значительные расстояния осуществляется по одно- или многоскачковым ионосферным трассам, а на относительно небольшие расстояния – по ионосферным трассам зенитного излучения или земной волной. В последнем случае дальность связи невелика, однако, при деструкции ионосферы в результате боевых действий этот вариант может оказаться единственно доступным. Следует отметить, что в реальных условиях работы возможен и часто наблюдается прием «паразитного» зенитного либо приземного излучения.

С учетом основных обстоятельств, трассы распространения характеризуются [7] нестационарностью (ввиду нестационарного характера электрофизических характеристик ионосферы), возникновением многолучевости (ввиду наличия отражений от различных слоев ионосферы или наложении волн различных трасс) и существенным изменением вида и характеристик поляризации (за счет вращения плоскости поляризации при отражении от слоев ионосферы, суперпозиции различных, нормальных и аномальных отраженных волн и т.п.), причем различные лучи характеризуются существенно различными значениями времени задержки и характеристиками деполяризации.

С учетом последнего, а также опубликованных результатов экспериментальных исследований [8], декорреляция при использовании различных видов поляризации для различных парциальных каналов распространения представляется достаточно существенной, что в свою очередь обуславливает перспективность использования в данном случае MIMO с поляризационным и комбинированным (пространственно-поляризационным) разнесением.

При этом может быть обеспечена гибкость системных решений: в качестве передающих и приемных антенных систем могут использоваться в различных сочетаниях одиночные вибраторы, би- и триортогональные излучатели [9, 10], системы из нескольких разнесенных в пространстве подобных излучателей, кольцевые решетки и т.п. В зависимости от назначения и тактических особенностей конкретного комплекса: стационарный для радицентра, стационарный для ограниченной площадки, бортовой, быстро разворачиваемый и т.п. – может быть выбран наиболее приемлемый вариант.

Укрупненная схема фрагмента радиолинии, использующей технологию MIMO, приведена на рис. 1.

Рабочий сигнал от передающей части оконечного модемного оборудования поступает на вход цифровой передающей каналообразующей системы (КОС ПРД), которая по соответствующему алгоритму кодирует информацию для передачи и формирует ансамбль из m

(по числу передатчиков) парциальных сигналов MIMO.



Рис. 1. Укрупненная схема фрагмента радиолинии с MIMO

С выходов КОС ПРД сигналы поступают на входы передатчиков (ПРД), а с их выходов – на входы m -входовой передающей антенной системы (АС ПРД) и излучаются.

Принятые n -входовой приемной антенной системой (АС ПРМ) сигналы поступают на входы приемников (ПРМ), а с их выходов – на входы цифровой приемной каналообразующей системы (КОС ПРМ), которая по соответствующему алгоритму декодирует информацию и восстанавливает рабочий сигнал.

Выбор способа кодирования/декодирования сигналов должен быть темой отдельного рассмотрения.

Антенные системы АС ПРД и АС ПРМ, как было отмечено выше, могут представлять собой комплексы различных антенных устройств, реализующие пространственное, поляризационное или комбинированное разнесение.

Совокупность АС ПРД, АС ПРМ и ансамбля парциальных каналов распространения в дальнейшем имеет смысл рассматривать как некий единый канал MIMO.

Действительно, полагая, что между каждой парой антенн существует парциальный двухлучевой канал (рис. 2), можем рассматривать канал MIMO на рис. 1 как многополюсник.

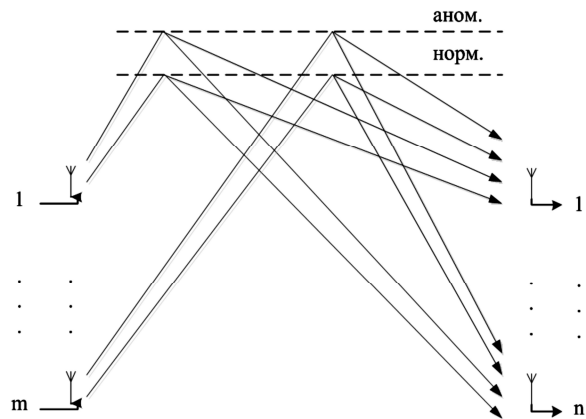
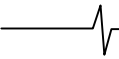


Рис. 2. Парциальные каналы в составе канала MIMO

Лучи в составе канала, вообще говоря, отличаются величиной задержки и видом поляризации благодаря эффектам вращения плоскости поляризации при отражении слоями ионосферы, суперпозиции различных, нормальных и аномальных отраженных волн, суперпозиции волн, пришедших по различным трассам (например, комбинированный тип канала, в котором распространяется земная и пространственная волна) и т.п.

В конечном итоге, в результате такого подхода канал MIMO может быть описан прямоугольной канальной



матрицей \mathbf{H} размером $m \times n$, в которой каждый элемент $h_{m,n}$ представляет собой комплексный коэффициент передачи в парциальном канале.

В случае канала ММО 3x3 с поляризационным разнесением канальную матрицу можно представить в виде [11, 12]:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h^{xx} & h^{xy} & h^{xz} \\ h^{yx} & h^{yy} & h^{yz} \\ h^{zx} & h^{zy} & h^{zz} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где h^{xx}, h^{yy}, h^{zz} – комплексные коэффициенты передачи в каналах с одинаковой поляризацией, а прочие представляют собой коэффициенты передачи в кросс-поляризационных каналах. Обычно последний тип распространения считается паразитным и нежелательным. В идеальном случае канальная матрица должна быть единичной.

После определения канальной матрицы становится возможной следующая оценка качества канала (скорости передачи) ММО [13]:

$$S = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{D_N} \mathbf{Z}_{\text{RX}}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{Z}_{\text{TX}} \mathbf{R} \mathbf{Z}_{\text{TX}}^H \mathbf{H}^H (\mathbf{Z}_{\text{RX}}^{-1})^H \right), \quad (2)$$

где D_N – мощность шума, $\mathbf{Z}_{\text{RX}}, \mathbf{Z}_{\text{TX}}$ – взаимный импеданс приемной и передающей антенн соответственно, \mathbf{H} – матрица канальных коэффициентов, \mathbf{R} – корреляционная матрица входного сигнала, символом (H) обозначена операция эрмитова сопряжения.

Скорость передачи в канале ограничивается не только канальной матрицей и отношением сигнал/шум, но и взаимным импедансом приемных и передающих антенн. Как и в случае с канальной матрицей, идеальным было бы отсутствие взаимовлияния в антенных системах. При пространственном виде разнесения сигналов это достигается увеличением расстояния между элементами системы, в случае же поляризационного разнесения необходим учёт влияния опор и подстилающей поверхности, поскольку последние способны значительно исказить взаимный импеданс и, как следствие, ухудшить кросс-поляризационную развязку.

В литературе оценка влияния взаимного импеданса антенн на скорость передачи проведена лишь для случаев с пространственным разделением сигнала. В контексте данной работы её следует дополнить оценкой для поляризационного и смешанного типа разнесения.

С практической точки зрения интересна не только максимальная скорость передачи информации, но и вероятность, с которой канал сможет её обеспечить. Обычно предполагается, что коэффициенты передачи в канале могут быть описаны случайными величинами с гауссовым распределением. Тогда, в предположении о независимости коэффициентов передачи и равенстве коэффициентов передачи в кросс-поляризационных каналах некоторому значению X , можно получить следующую функцию распределения [11]:

$$F(y) = (1 - e^{-y})^3 (1 - e^{-yX})^6. \quad (3)$$

Вероятность снижения реализуемой скорости передачи ниже установленного порогового значения S можно оценить следующим образом:

$$P(C < S) = \int_0^{\eta} W(y) dy, \quad (4)$$

где $W(y)$ – плотность вероятности случайной величины, построенной над матрицей канальных коэффициентов, η – значение коэффициента передачи, при котором достигается S в (2).

В составе АС ПРД и АС ПРМ, в зависимости от назначения оборудования и конкретных требований к нему, могут применяться самые различные антенны и антенные решетки. Однако, применительно к антеннам ДКМВ диапазона, следует отметить два существенных момента. Во-первых, конструкции излучателей и антенных систем на их основе таковы, что, как правило, антенны могут с высокой степенью точности моделироваться как проволочные структуры [14]. Во-вторых, в обязательном порядке должно быть учтено влияние земли, причем как на характеристики направленности антенных систем, так и на импеданс антенн. Последнее соображение особенно существенно при использовании би- и триортогональных излучателей [9, 10], поскольку влияние земли на кроссполяризационные характеристики весьма значительно и его игнорирование неизбежно приведет к грубым ошибкам при расчете $\mathbf{Z}_{\text{RX}}, \mathbf{Z}_{\text{TX}}$ в формуле (2).

Учёт проводников в составе излучающих систем, подстилающей поверхности и опор антенных систем должен выполняться путём электродинамического анализа. Поскольку, как уже было отмечено выше, антенны в данном случае описываются проволочными моделями, в качестве метода электродинамического моделирования предполагается использовать метод, основанный на интегральном уравнении Фредгольма 1-го рода, имеющем вид [14]:

$$E_0(l) = \int_L K(l, l') I(l') dl', \quad (5)$$

где $K(l, l')$ – ядро интегрального уравнения, $I(l, l')$ – ток, а $E_0(l)$ – напряжённость электромагнитного поля.

В качестве контура, на котором локализованы линейные токи, в (5) фигурирует вся совокупность проводников анализируемой системы, т.е. в нашем случае – все проводники, входящие в АС ПРМ или АС ПРД.

Уравнение (5) обычно решается в тонкопроволочном приближении методом Бубнова-Галеркина в кусочно-синусоидальном базисе [14]:

$$b_k(l) = \begin{cases} 0, & l \notin [l_{k-1}, l_{k+1}] \\ \sin(\beta(l - l_{k-1})) / \sin(\beta |l_k - l_{k-1}|), & l_{k-1} \leq l \leq l_k, \\ \sin(\beta(l_{k+1} - l)) / \sin(\beta |l_{k+1} - l_k|), & l_k \leq l \leq l_{k+1} \end{cases} \quad (6)$$

$$k = 1, 2, \dots, N.$$

Решением данного уравнения является распределение напряжённости электрического поля (\mathbf{E}), которое связано с токами в вибраторах (\mathbf{I}) системой уравнений Кирхгофа:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z} \mathbf{I}. \quad (7)$$

Полученный таким образом взаимный импеданс \mathbf{Z} может быть использован для оценки качества канала (2).

Для реализации методики создания современных

комплексов ДКМВ радиосвязи с применением технологии MIMO а также для оценки достижимых характеристик MIMO канала предполагается использовать программный комплекс SAMANT, разработанный в ОАО «Концерн «Автоматика» [15]. Однако, его возможности должны быть расширены с целью учета влияния подстилающей поверхности на характеристики импеданса антенных систем. Существует несколько возможных путей решения указанной проблемы. Первый из них заключается в совершенствовании метода включением некоего дополнительного (эквивалентного) источника, описывающего влияние земли с конечной электропроводностью. Второй путь состоит в учёте электрофизических свойств подстилающей поверхности в виде сеточной структуры в рамках прежней электродинамической модели.

В итоге решения электродинамической задачи можно определить матрицы Z_{RX} , Z_{TX} и \mathbf{H} , с учетом которых могут быть выполнены необходимые расчеты по формулам (2) – (4), и по их результатам осуществлен выбор вариантов для различных комплексов по критерию сложность/эффект.

Применение описанных подходов и методик открывает возможности создания новых, более совершенных комплексов ДКМВ радиосвязи, которые будут использовать технологии MIMO, что позволит увеличить скорость передачи информации, надежность, стойкость и помехозащищенность ДКМВ радиосвязи.

Литература

1. Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / Под ред. профессора О.В. Головина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006.
2. Минкин М.А. Проблемы и перспективы модернизации и развития систем ДКМВ радиосвязи // Вестник СНИИР. 2006. №4(14). С. 4-10.
3. Бузов А.Л., Сухарев А.С. Вопросы создания универсальных быстроразворачиваемых комплексов технических средств ДКМВ радиосвязи // Вестник СНИИР. – 2006. – №2(12). – С.12.
4. Сухарев А.С. Оценка эффективности применения пространственно-временного кодирования OFDM для сдвоенной передачи данных по ДКМВ радиоканалу // Радиотехника (журнал в журнале). – 2006. – №10.
5. Erceg V.; Soma P.; Baum D.S.; Catreux S., «Multiple-input multiple-output fixed wireless radio channel measurements and modeling using dual-polarized antennas at 2.5 GHz», // *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.3, no.6, pp.2288,2298, Nov. 2004
6. Erceg V.; Soma P.; Baum D.S.; Paulraj A.J., «Capacity obtained from multiple-input multiple-output channel measurements in fixed wireless environments at 2.5 GHz», // *Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on*, vol.1, no., pp.396,400, 2002
7. Долуханов М.П. Распространение радиоволн; изд. 4-е. – М: Связь, 1972. – 336 с.
8. Salous S.; Feeney S.M.; Warrington E.M.; Gunashekar S.D.; Abbasi N.M., «Experimental investigations of MIMO in the HF band», // *Ionospheric Radio Systems and Techniques (IRST 2012)*, 12th IET International Conference on, vol., no., pp.1,4, 15-17 May 2012
9. Кольчугин И.Ю. Излучающая система кольцевых и многокольцевых антенных решеток на основе биортогональных излучателей // *Радиотехника*. – 2014. – №4. – С. 60-63.
10. Капишев А.Н., Красильников А.Д., Невский А.В. Разработка комплекса активных приемных ДКМВ антенн с управляемыми пространственными и поляризационными характеристиками // *Антенны*. – 2012. – № 6. – С. 57-63.
11. Habib, A, «Multiple polarized MIMO with antenna selection», // *Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, 2011 18th IEEE Symposium on , vol., no., pp.1,8, 22-23 Nov. – 2011
12. Mansoor Shafi and Min Zhang and Aris L. Moustakas and Peter J. Smith and Andreas F. Molisch and Fredrik Tufvesson and Steven H. Simon, «Polarized MIMO Channels in 3D: Models, Measurements and Mutual Information» // *IEEE J. Select. Areas Commun on*, vol.24, pp. 514, 527, 2006
13. Паршин Ю. Н., Комиссаров А. В. Пропускная способность MIMO телекоммуникационной системы в условиях изменяющейся пространственной структуры радиотракта с искусственной многолучевостью // *Цифровая обработка сигналов*. - 2012. - № 1. - С. 50-55.
14. Бузова М.А., Юдин В.В. Проектирование проволочных антенн на основе интегральных уравнений: Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Радио и связь, 2005. – 172 с.
15. Программный комплекс «SAMANT» / ОАО «Концерн «Автоматика». – Свидетельство о государственной регистрации № 2013614026 от 23.04.2013.

PERSPECTIVES OF HF-BAND RADIO COMMUNICATION MIMO-ENABLED COMPLEXES, USING SPATIAL AND POLARISATION SEPARATION

Bukashkin S. A., Ogloblin A. V.

Existing MIMO technologies with spatial and polarization separation are listed. Results are analyzed. Main problems and ways to create HF-band radio communication MIMO-enabled complexes are stated.