

УДК 621.396.24

ПРЕДЕЛЬНО ДОСТИЖИМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСОВ ДКМВ РАДИОСВЯЗИ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЮ МІМО, ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ РАЗНЕСЕНИЯ

А. В. Оглоблин, командир войсковой части, г. Москва; homealeks@mail.ru

Рассмотрены типовые антенные решения, применяемые в стационарных и полевых комплексах ДКМВ радиосвязи. Проанализирована предельно достижимая пропускная способность каналов с применением технологии МІМО. Сформулированы рекомендации по применению антенных систем в комплексах радиосвязи, реализующих технологию МІМО.

Ключевые слова: ДКМВ-диапазон, полевой комплекс, МІМО.

Введение. Современные и перспективные требования к системам, сетям и радиолиниям диапазона декаметровых волн (ДКМВ) связаны прежде всего с необходимостью повышения надежности, устойчивости, помехозащищенности и оперативности связи, что обеспечивается использованием цифровых технологий в сочетании с эффективными помехозащищенными сигнально-кодowymi конструкциями, комплексной автоматизации оборудования, оперативной автоматизированной адаптации и т.д. [1]. Одновременно стала очевидной настоятельная потребность в расширении номенклатуры предоставляемых ДКМВ радиосвязью услуг, вплоть до возможности синхронной и/или пакетной передачи мультимедиа.

В данный момент, как показывают результаты эксплуатации оборудования ДКМВ радиосвязи, при коэффициенте ошибок, равном 10^{-2} , в стандартном ТЧР ДКМВ канале (ширина полосы 3,1 кГц) среднего качества обеспечивается рабочая скорость не более 4800 бит/с, а в канале хорошего качества (отношение сигнал/шум порядка 22 дБ) при прочих равных условиях — до 9600 бит/с. С учетом современных реалий (необходимости обеспечения высокоскоростного мультисервисного цифрового канала, позволяющего передавать не только сервисы телефонии и телеграфа, но и данные мультимедиа в пакетном режиме) таких скоростей оказывается недостаточно.

Применение технологии множественной передачи и приема (Multi Input Multi Output, МІМО) является одним

из перспективных путей повышения качества и пропускной способности (скорости передачи информации) радиоканалов диапазона ДКМВ [2–4]. При этом, как показали результаты исследований [2, 5], достаточный уровень декорреляции парциальных каналов может быть обеспечен не только пространственным, но и поляризационным разнесением антенн.

В целом в состав систем и сетей радиосвязи диапазона ДКМВ входят следующие основные виды объектов (рис.1):

- стационарные радиоцентры (разнесенные, реже совмещенные) с антенными полями значительной площади;
- совмещенные приемопередающие радиоцентры и отдельные радиостанции с компактным (вследствие ограниченности занимаемой площади) размещением антенн;
- радиостанции на малых и больших подвижных объектах, а также носимые;
- радиостанции в составе мобильных быстроразворачиваемых полевых узлов связи.

Радиолинии, вообще говоря, могут формироваться между любыми объектами как одного, так и разных видов, однако с учетом применения технологии МІМО должны быть рассмотрены возможности обеспечения согласования взаимодействующих радиосредств по кратности множественных приема и передачи.

Рассмотрим кратко основные особенности перечисленных выше объектов и возможности размещения на них тех или иных типов антенн (антенных систем).

Стационарные радиоцентры. В большинстве случаев мощные стационарные радиоцентры ДКМВ — разнесенные, причем расстояние между передающим и приемным центром может составлять десятки-сотни километров. В составе тех и других имеется значительное количество антенн (передающих и приемных), обычно направленных; они размещаются на антенных полях большой площади.

Возможности «традиционного» мощного радиоцентра по использованию имеющихся антенн для организации МІМО с пространственным разнесением, несмотря на значительное количество антенн, весьма ограничены, поскольку наличие двух или более направленных антенн, рассчитанных на работу строго в одном направлении и в одном частотном диапазоне, как правило, не предусматривается. Возможности организации МІМО с поляризационным разнесением также имеют свои пределы, поскольку традиционная номенклатура антенн дальней связи не предполагает разнообразия поляризационных характеристик. Биортогональную структуру и управление видом горизонтальной поляризации имеют, в лучшем случае, антенны зенитного излучения [1], а антенны вертикальной поляризации используются в основном на трассах «земной волны». Тем не менее поляризационное разнесение по передаче или/и приему, в принципе, возможно на основе совместного использования упомянутых типов антенн.

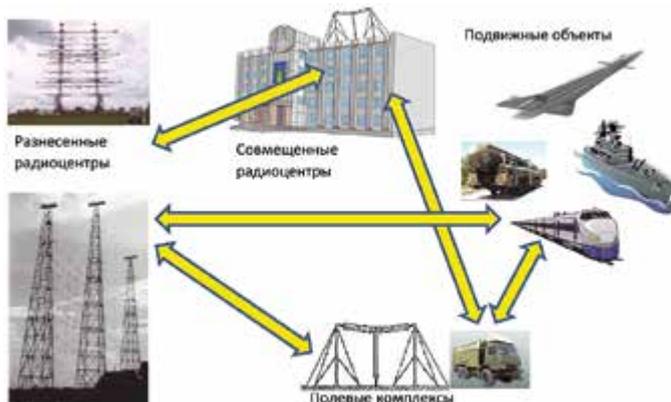


Рис. 1. Состав систем и сетей радиосвязи диапазона ДКМВ

Более перспективным, однако, представляется путь модернизации антенного хозяйства радиоцентров за счет введения передающих и приемных антенн, специально рассчитанных на использование технологии ММО, и их включения в единый антенный комплекс и систему антенной коммутации объекта. В качестве передающих антенн при пространственном разнесении могут использоваться традиционные полноразмерные широкополосные вибраторы [6], при поляризационном — би- и триортогональные излучатели и антенные решетки на их основе [7]. Весьма перспективными со временем могут оказаться активные передающие триортогональные излучатели и решетки на основе укороченных вибраторов [8], хотя в настоящее время серьезные проблемы, связанные с их реализацией, еще ждут своего решения.

Приемные антенные системы для ММО целесообразно строить в виде активных приемных триортогональных антенных элементов (ТАЭ) и кольцевых антенных решеток (КАР) на их основе [9, 10], что позволит обеспечить как поляризационное (за счет триортогональности), так и пространственное (за счет разнесенных ТАЭ или разноса по угломестному направлению главного излучения решетки) разнесение по приему.

Компактные совмещенные радиоцентры. Приемопередающие ДКМВ радиоцентры и ДКМВ радиостанции в составе многофункциональных центров связи размещаются, как правило, в условиях существенно ограниченной площади, занимаемой антеннами, очень часто — в городских зданиях (сооружениях) относительно небольших размеров. Передающие и приемные антенны ДКМВ диапазона при этом удается установить только на крыше здания, площадь которого, особенно с учетом присутствия антенн радиосредств других диапазонов, практически не оставляет возможностей для размещения нескольких пространственно разнесенных антенн. Для организации связи по технологии ММО в данном случае должно применяться поляризационное разнесение на основе использования би- или триортогональных передающих систем из полноразмерных излучателей и малогабаритных приемных ТАЭ.

Радиостанции подвижных объектов как возможная область применения ММО, по-видимому, могут стать объектом исследования в ближайшем будущем, если будут решены задачи обеспечения быстродействующей адаптации соответствующих алгоритмов пространственно-временного кодирования к изменению положения и ориентации быстро перемещающегося объекта. В случае антенн для ММО проблемы те же (если не более острые), что и для компактного стационарного объекта. Соответственно, должно использоваться поляризационное разнесение на основе применения ТАЭ. С учетом относительно малых размеров большинства подвижных объектов весьма перспективными могут оказаться ТАЭ с компактными магнитными (рамочными) излучателями.

Радиостанции ДКМВ в составе мобильных быстроразворачиваемых полевых узлов связи играют исключительно важную роль, поскольку именно они призваны решить проблему обеспечения связи в особые периоды и при чрезвычайных ситуациях, в том числе из неподготовленных районов, а также в тех случаях, когда все другие виды связи отсутствуют или вышли из строя. В современных условиях, помимо требований, общих для всех типов радиостанций и радиоцентров, к ним предъявляются требования [1, 11]:

- универсальности (возможность использования в составе различных сетей, предоставления современных ка-

чественных инфокоммуникационных услуг, организации устойчивой качественной связи при встречной работе с радиоцентрами и радиостанциями различных типов на трассах различной протяженности);

- тактической и функциональной гибкости (гибкость по типу и протяженности трасс, обеспечение соответствующим частотным ресурсом, гибкость среды взаимодействия составных частей комплекса);

- мобильности и оперативности развертывания.

Радиостанции быстроразворачиваемых полевых узлов устанавливаются в мобильные аппаратные различного назначения, которые размещаются в кузовах-фургонах на транспортной базе автомобилей и в кузовах-контейнерах.

При развертывании полевого узла связи под антенные системы выделяется площадка (не менее 150×100 м), удаленная от пункта управления радиоцентром.

С учетом возможности выбрать, в большинстве случаев, для развертывания полевого комплекса площадку достаточных размеров может применяться как поляризационное, так и пространственное разнесение с использованием быстроразворачиваемых передающих и приемных антенн, в том числе быстроразворачиваемых КАР на основе ТАЭ.

Развертывание ТАЭ при использовании в составе КАР или изолированно требует опор относительно небольшой высоты (3–4 м), что не вызывает затруднений. Что касается передающих антенн, особенно триортогональных, то могут потребоваться опоры высотой до 20–30 м, для чего в состав быстроразворачиваемого комплекса должны быть включены оперативно развертываемые складные или телескопические мачты с механическим, электромеханическим или пневматическим приводом.

Как известно [2], пропускная способность канала ММО ограничивается не только канальной матрицей и отношением сигнал/шум, но и взаимным импедансом приемных и передающих антенн:

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

где D_N — мощность шума; \mathbf{Z}_{RX} , \mathbf{Z}_{TX} — взаимный импеданс приемной и передающей антенн соответственно; \mathbf{H} — матрица канальных коэффициентов; \mathbf{R} — корреляционная матрица входного сигнала; символом H обозначена операция эрмитового сопряжения.

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 поляризационного разнесения необходим учет влияния опор и подстилающей поверхности, поскольку они способны значительно исказить взаимный импеданс и, как следствие, ухудшить кроссполяризационную развязку.

Рассмотрим предельно достижимую пропускную способность ММО-системы, построенной над применяемыми в ДКМВ антенными системами.

Сравним системы, реализующие каналы ММО 3×3 с пространственным и поляризационным разнесением. Для обеспечения равных условий будем считать, что имеет место идеальный, некоррелированный сигнал с единичной корреляционной матрицей, а каждый элемент канальной матрицы будем полагать составленным из независимых гауссовых случайных величин с нулевым средним и дисперсией, равной 0,1. Таким образом, результирующее распределение комплексных канальных коэффициентов является распределением Рэлея. Для обеспечения равенства энерге-

тических характеристик взаимный импеданс будем нормировать следующим образом:

$$\mathbf{Z}_n = \frac{\mathbf{Z}}{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{Z}\mathbf{Z}^H)}}. \quad (2)$$

Соотношение сигнал/шум положим равным 10 дБ, что соответствует каналу «среднего» качества.

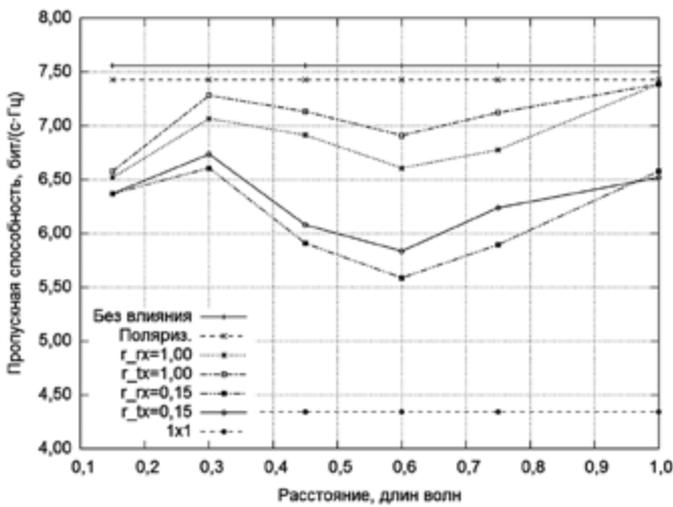
Для передающей антенной системы выберем совокупность полуволновых вибраторов, в качестве приемной антенной системы будем рассматривать совокупность вибраторов — как полуволновых, так и электрически коротких активных.

Пространственные конфигурации будем анализировать для случаев линейной решетки, а также расположения вибраторов в вершинах равностороннего треугольника. При поляризационном разнесении будем рассчитывать предельно достижимую пропускную способность для трех взаимно ортогональных вибраторов с общим фазовым центром (рис. 2).

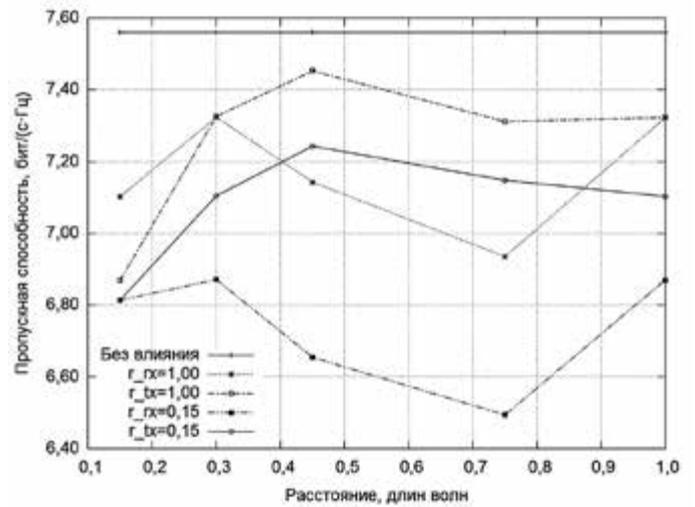
Рассмотрим достижимые характеристики на одной частоте диапазона — 10 МГц. Расчет матриц взаимного им-



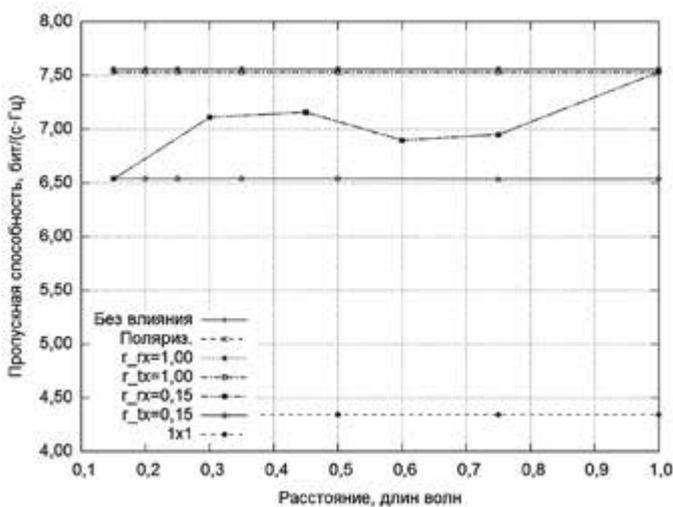
Рис. 2. Внешний вид триортогональной антенной системы



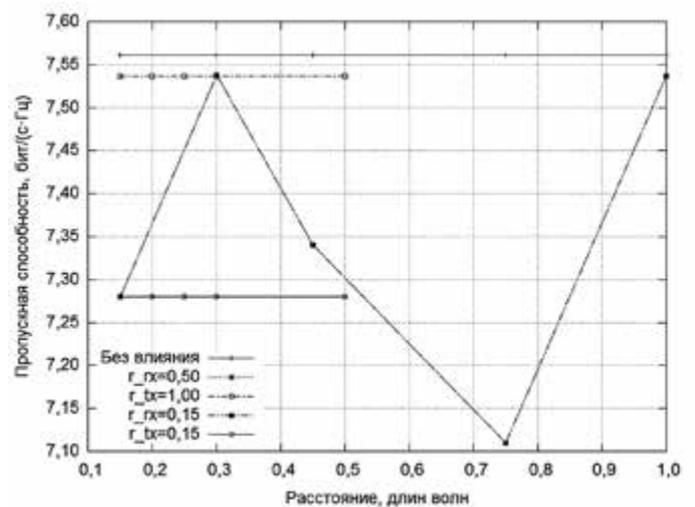
а)



б)



в)



з)

Рис. 3. Пропускная способность канала ММО 3×3 для систем полноразмерных вибраторов, работающих на полноразмерные (а, б) и на короткие (в, з) вибраторы при пространственном (линейная решетка) и поляризационном разнесении (а, в) и при пространственном (треугольник) разнесении (б, з)

педанса антенных систем осуществлен с учетом подстилающей поверхности с использованием строгих электродинамических методов, реализованных в программном комплексе SCATER, разработанном в ОАО «Концерн «Автоматика» [12].

Результаты оценки пропускной способности для каналов среднего качества приведены на рис. 3, где представлены зависимости пропускной способности от расстояний между антенными элементами на приемной и передающей сторонах в случае пространственного разнесения с учетом взаимовлияния, без учета влияния, для случая поляризационного разнесения при той же кратности системы и с использованием тех же антенных элементов, а также пропускная способность системы 1×1 (SISO).

Из графиков следует, что поляризационное разнесение при выбранных предположениях о некоррелированных сигналах и конкретных конфигурациях антенных систем оказывается не хуже пространственного. Вместе с тем из графиков видно превосходство технологии MIMO как с пространственным, так и с поляризационным разнесением каналов над одиночным каналом.

На практике, по-видимому, следует рассчитывать на меньшую декорреляцию сигналов с поляризационным разнесением, что может существенно уменьшить достижимые характеристики пропускной способности.

Также, по мнению автора, графики показывают, что в случае использования пространственного разнесения более эффективно увеличивать разнесение на передающей стороне. Особенно ярко это проявляется в ситуации, когда в качестве приемной стороны выступает антенная система из электрически коротких активных вибраторов (см. рис. 3, θ): линия, соответствующая разнесению антенн на передаче при фиксированном расстоянии между антеннами на приеме ($r_{rx} = 0,15$), всюду выше линии, соответствующей разнесению антенн на приемной стороне при фиксированном расстоянии между антеннами на передающей ($r_{tx} = 0,15$).

При этом расстановка вибраторов в вершинах треугольника показывает сопоставимые результаты с линейной расстановкой при равных расстояниях между соседними антенными элементами.

Проведенный анализ особенностей основных видов объектов, входящих в состав систем и сетей радиосвязи диапазона ДКМВ, показал, что применительно к разнесенным радиостанциям организация поляризационного разнесения по передаче или/и приему, в принципе, возможна на основе совместного использования антенн, имеющих на радиостанциях. Однако более перспективным является введение дополнительных передающих и приемных антенн, рассчитанных специально на использование технологии MIMO,

и их включение в единый антенный комплекс и систему антенной коммутации объектов. При этом в качестве передающих антенн при пространственном разнесении могут использоваться традиционные полноразмерные широкополосные вибраторы, а при поляризационном — би- и триортогональные излучатели на их базе. Приемные антенные системы для MIMO целесообразно строить в виде активных приемных ТАЭ и КАР на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минкин М.А. Проблемы и перспективы модернизации и развития систем ДКМВ радиосвязи // Вестник СОНИИР.— 2006.— № 4 (14).— С.4–10.
2. Букашкин С.А., Оглоблин А.В. Перспективы создания комплексов ДКМВ радиосвязи, использующих технологии MIMO с пространственным и поляризационным разнесением // Цифровая обработка сигналов.— 2014.— № 4.
3. 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, 15–17 May 2012.
4. Сухарев А.С. Оценка эффективности применения пространственно-временного кодирования OFDM для двукратной передачи данных по ДКМВ радиоканалу // Радиотехника.— 2006.— № 10.
5. Habib A. Multiple polarized MIMO with antenna selection // Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), 2011. 18th IEEE Symposium on, 22–23 Nov. 2011.
6. Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М. и др. Коротковолновые антенны.— М.: Радио и связь, 1985.
7. Кольчугин И.Ю. Излучающая система кольцевых и многокольцевых антенных решеток на основе биортогональных излучателей // Радиотехника.— 2014.— № 4.— С. 60–63.
8. Барабошин А.Ю., Бузов А.Л., Красильников А.Д. Перспективы реализации технологии MIMO в ДКМВ диапазоне на основе использования передающих кольцевых антенных решеток // Радиотехника.— 2012.— № 6.
9. 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.
10. Бузов А.Л., Красильников А.Д., Оглоблин А.В. Исследования триортогональных антенных элементов ДКМВ диапазона для систем радиосвязи, использующих технологию MIMO // Радиотехника.— 2015.— № 4.
11. Бузов А.Л., Сухарев А.С. Вопросы создания универсальных быстроразворачиваемых комплексов технических средств ДКМВ радиосвязи // Вестник СОНИИР.— 2006.— № 2 (12).
12. Свидетельство о государственной регистрации № 2013614027 от 23.04.2013. Программный комплекс «SCATER» / ОАО «Концерн «Автоматика».

Получено 24.04.15

Не забудьте подписаться на журнал «Электросвязь»



- во всех почтовых отделениях по каталогам:

«Агентство «Роспечать», индекс 71107; «Пресса России», индекс 41411;

- через альтернативные агентства:

«Урал-Пресс» – www.ural-press.ru;

«МК-Периодика» – www.periodicals.ru;

- в редакции журнала «Электросвязь»

тел. +7(495) 625-84-36, e-mail: tim@elsv.ru.

Подписку можно оформить с любого месяца.