АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В СЕТЯХ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

Землянухин С. Ю.[1]

DOI:10.21681/3034-4050-2026-6-13-23

Ключевые слова: *MANET, многоантенные системы MIMO, диаграммообразование, кооперативная ретрансляция, Barrage Relay, устаревание информации о канале, предсказание канала, доплеровский сдвиг, подавление помех, многокритериальная оценка.*

Аннотация

Цель исследования: *определить наиболее эффективные технологии повышения спектральной эффективности радиосетей с подвижными узлами с учётом подвижности абонентов, масштаба сети и помеховой обстановки.*

Метод исследования: *сравнительный анализ документации тактических и гражданских радиосредств, статистическое моделирование многоантенных линий при устаревании сведений о канале и многокритериальная оценка технологий с проверкой устойчивости ранжирования методом Монте-Карло.*

Результат исследования: *показано, что выигрыш многоантенной передачи с обратной связью по каналу достигает 26 % при отношении сигнал/шум 0 дБ и исчезает, когда узел за время задержки смещается на 0,14–0,22 длины волны; при движении обоих узлов допустимая задержка уменьшается ещё примерно на 30 %, а линейное предсказание канала увеличивает её в 1,7–2,6 раза. Наиболее перспективными признаны кооперативная ретрансляция без маршрутизации, пространственное подавление помех и пространственное мультиплексирование.*

Научная новизна: *получена граница целесообразности обратной связи по каналу в зависимости от отношения сигнал/шум, несущей частоты и скорости узлов, предложена воспроизводимая методика интегральной оценки технологий.*

Введение

Радиосети с подвижными узлами и изменяющейся топологией (MANET, mobile ad hoc network) составляют основу тактического звена систем управления и связи, а также применяются в группировках беспилотных аппаратов и при ликвидации чрезвычайных ситуаций [1, 2]. Их частотный ресурс ограничен: полоса, выделяемая сети, нередко составляет единицы мегагерц, а обстановка осложняется преднамеренными помехами [3]. Поэтому спектральная эффективность (СЭ) – объём полезной информации, передаваемый в единицу времени в единице полосы, становится одним из главных показателей качества сети, определяющим пропускную способность.

В обзорах [1] и [2] прослежена эволюция сетевых технологий для систем управления и тактической связи и показана необходимость сочетания нескольких технологий, однако количественного сопоставления технологий по СЭ в них не приводится. Гражданские стандарты наращивают СЭ линии: в IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) введены каналы 320 МГц, модуляция 4096-QAM и многоканальный режим [4], а в разрабатываемом IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8) акцент смещён на надёжность и координацию точек доступа [5]. Для сетей без инфраструктуры интересны стандарт DECT-2020 NR со встроенной ячеистой сетью, превосходящий LTE-M и NB-IoT по допустимой плотности узлов [6], и ретрансляция 5G NR sidelink, для которой в [7] выявлены пробелы спецификаций 3GPP применительно к многоскачковым MANET. Полнодуплексная связь рассматривается как резерв удвоения СЭ, но требует глубокого подавления собственной помехи [8]. Методы противодействия помехам систематизированы в [3], а машинное обучение применяется для маршрутизации в сетях беспилотников [9] и для адаптации параметров Wi-Fi [10].

Для замкнутых многоантенных схем определяющим фактором является устаревание информации о состоянии канала (CSI). В [11] показано, что предсказатели на основе векторного фильтра Калмана и машинного обучения дают существенный выигрыш по сравнению с использованием устаревшей оценки, а в [12] – что изотропная модель рассеяния приводит к пессимистичной оценке потерь по сравнению с неизотропной. Ранее автором сопоставлялись линейные алгоритмы многопользовательского прекодирования для низкоорбитальных спутниковых систем [13], где устаревание CSI также ограничивает СЭ. Однако в перечисленных работах технологии рассматриваются по

1 ***Землянухин Сергей Юрьевич***, начальник лаборатории ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России. Мытищи, Московская область, Россия. E-mail: sergzemlyanukhin@yandex.ru

отдельности. Сопоставление решений реальных тактических радиосредств между собой и с теоретическими пределами, а также оценка целесообразности обратной связи по каналу при движении обоих узлов, характерном для MANET, в открытой литературе практически не представлены.

Постановка задачи

Рассматривается сеть из N подвижных узлов, работающих в общей полосе B, топология которой меняется из-за перемещения узлов, а связь удалённых узлов поддерживается ретрансляцией. Требуется для множества технологий, представленных на рисунке 1, оценить вклад в спектральную эффективность линии и сети с учётом подвижности, масштабируемости, помехоустойчивости и зрелости и выделить наиболее перспективные. Показателями служат СЭ линии и сети и число узлов на единицу полосы:

$$\eta = \frac{R}{B},\ \eta_\Sigma = \frac{1}{B}\sum_{k=1}^{K} R_k,\ \nu = \frac{N}{B}, \quad (1)$$

где R – пропускная способность линии, бит/с; R_k – полезная скорость k-го из K одновременных потоков с учётом потерь на передачу служебной информации. Величина η_Σ учитывает пространственное повторное использование частот и накладные расходы протоколов, а ν характеризует предельный размер сети в заданной полосе.

Верхняя граница СЭ линии при отношении сигнал/шум (ОСШ) γ определяется формулой Шеннона[2]. Если та же СЭ достигается передачей N_s параллельных потоков по ортогональным пространственным каналам с равным делением мощности, минимально необходимое ОСШ равно

$$\eta \le \log_2(1+\gamma),\ \gamma_{\min}(N_s) = N_s(2^{\eta/N_s} - 1). \quad (2)$$

Так, для η = 6,5 бит/с/Гц (высший режим радиостанций Silvus с двумя потоками) одиночный поток требует 19,5 дБ, два потока – 12,3 дБ, четыре – 9,2 дБ. Рост СЭ за счёт порядка модуляции оплачивается экспоненциальным ростом мощности, а за счёт числа потоков – линейным. Эргодическая ёмкость линии с N_t передающими и N_r приёмными антеннами при известной на приёме матрице канала H и асимптотика при высоком ОСШ составляют[3]

$$C = \mathbb{E}[\log_2\det(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\gamma}{N_t}\mathbf{H}\mathbf{H}^H)],\ C \simeq \min(N_t, N_r)\log_2\gamma. \quad (3)$$

Классификация и анализ технологий

Технологии сгруппированы по уровням, на которых происходит повышение СЭ (рис. 1): физическому (плотность упаковки информации и число пространственных каналов), кооперативному (совместное излучение сигнала узлами), сетевому (доля ресурса, расходуемая на служебный обмен) и спектральному (использование частотного ресурса в присутствии помех). Межуровневые методы, такие как предсказание канала и адаптация на основе методов искусственного интеллекта и машинного обучения (ИИ/МО), повышают эффективность технологий всех уровней.

Физический уровень

Адаптивная модуляция и кодирование, QAM высокого порядка. Канальная спектральная эффективность на пространственный поток в стандартах Wi-Fi выросла с 3,75 бит/с/Гц (802.11n) до 9,0 бит/с/Гц (802.11be, 4096-QAM, 320 МГц) [4], но каждый шаг требует роста ОСШ. В таблице

2 Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27, no. 3. – Pp. 379–423.

3 Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels // European Transactions on Telecommunications. – 1999. – Vol. 10, no. 6. – Pp. 585–595.



Рис. 1. Классификация технологий повышения спектральной эффективности в MANET

режимов Silvus переход от 0,33 до 3,25 бит/с/Гц (один поток, 20 МГц) ухудшает чувствительность с –96 до –78 дБм[4]. В подвижной сети такие режимы применимы лишь на коротких линиях.

MIMO без обратной связи. Переход от режима MCS 7 к MCS 15 в таблице режимов радиостанций Silvus StreamCaster SC3500/SC3800 (волновая форма MN-MIMO, полоса 20 МГц) удваивает канальную скорость с 65 до 130 Мбит/с ценой ухудшения чувствительности всего на 3 дБ, тогда как рост скорости в 2,5 раза внутри одного потока при переходе от MCS 3 к MCS 7 требует 11 дБ. Эти значения получены на кабельном стенде. При корреляции антенн разница возрастает, и тогда применяется пространственно-временное кодирование Аламоути[5], дающее разнесение на передаче без увеличения скорости.

Замкнутый MIMO. При известной на передатчике CSI и одной приёмной антенне вектор весов согласуется с каналом, а средний выигрыш диаграммообразования и увеличение дальности равны

$$G_{\text{ДО}} = \mathbb{E}\|h\|^2 = N_t,\ \frac{d_2}{d_1} = 10^{\Delta G/(10n)}, \qquad (4)$$

где: h – вектор коэффициентов передачи с единичной дисперсией; ΔG – выигрыш, дБ; n – показатель затухания. Зависимость подтверждают данные производителя, так при включении диаграммообразования эффективная мощность растёт с 4 до 8 Вт у двухантенной SC4200 и с 8 до 32 Вт у четырёхантенной SC4400, т.е. ровно в N_t раз. При N_t = 4 и n = 2 дальность удваивается, что согласуется с заявленным «до 2 раз». Многопользовательское прекодирование (MU-MIMO) в рассмотренных радиосредствах не заявлено.

Ключевым ограничением замкнутых схем является устаревание CSI. Для модели Джейкса[6] при неподвижном втором узле и для канала «подвижный – подвижный»[7] коэффициент корреляции канала за время задержки τ равен

$$\rho = J_0(2\pi f_D\tau),\ \rho = J_0(2\pi f_{D1}\tau)\,J_0(2\pi f_{D2}\tau),$$
$$f_D = \frac{vf_c}{c}(vf_c)/\text{c}, \qquad (5)$$

где: J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка; f_D – максимальный доплеровский сдвиг; v – скорость узла; f_c – несущая частота; c – скорость света; f_{D1}, f_{D2} – сдвиги, обусловленные движением каждого из узлов. Произведение $f_D\tau = v\tau / \lambda$ – путь узла за время τ в длинах волн λ.

Устаревший канал описывается авторегрессионной моделью первого порядка[8], из которой следует выигрыш диаграммообразования по мощности:

$$\mathbf{h}_\tau = \rho\hat{\mathbf{h}} + \sqrt{1-\rho^2}\mathbf{e},\ G(\rho) = \mathbb{E}|\mathbf{h}_\tau^T\mathbf{w}|^2 = 1 + \rho^2(N_t - 1), \qquad (6)$$

где: $\hat{\mathbf{h}}$ – оценка канала; $\mathbf{e} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ – независимая составляющая; $\mathbf{w} = \hat{\mathbf{h}}^* / \|\hat{\mathbf{h}}\|$ – вектор весов. При $\rho \to 0$ выигрыш исчезает. Линейный предсказатель по p прошлым оценкам, полученным с интервалом T_s и дисперсией шума σ^2, обеспечивает эффективный коэффициент корреляции[9]

$$\rho^2_{\text{эф}} = \mathbf{r}^T(\mathbf{R} + \sigma^2\mathbf{I})^{-1}\mathbf{r}, \qquad (7)$$

где: $r_k = J_0(2\pi f_D(\tau + kT_s))$ и $R_{kl} = J_0(2\pi f_D(k-l)T_s)$, $k,l = 0, \ldots, p-1$. Векторный фильтр Калмана с авторегрессионной моделью является рекуррентной реализацией такого предсказателя [11].

Полнодуплексная связь теоретически удваивает СЭ линии, но требует подавления собственной помехи до уровня шума:

$$A_{SI} \geq P_t - (-174 + 10\lg B + F), \qquad (8)$$

где P_t – мощность передатчика, дБм; F — коэффициент шума, дБ. Для P_t = 36 дБм, B = 20 МГц и F = 5 дБ требуется A_{SI} ≥1 32 дБ, что остаётся серьёзной проблемой для широкополосных многоантенных подвижных узлов [8].

Кооперативный и сетевой уровни

Кооперативная ретрансляция Barrage Relay (TrellisWare TSM, Thales AN/PRC-170) использует кадр с временным разделением каналов, что означает, что все узлы, декодировавшие пакет в данном слоте, повторно излучают его в следующем, причём каждый узел ретранслирует пакет лишь однажды[10]. Одновременные передачи не требуют фазовой синхронизации, поскольку случайный фазовый джиттер превращает взаимные помехи в замирания, из которых помехоустойчивое кодирование и эквалайзирование извлекают выигрыш разнесения[11]; этот принцип синхронных передач развивается и в маломощных сетях[12]. Маршрутные таблицы не нужны, поэтому служебные расходы почти не зависят от топологии. Число одновременных потоков

4 StreamCaster SC3800, SC3822, SC4200, SC4200EP, SC4400, SC4400X: datasheets; StreamCaster MIMO Radio User Manual (doc. 10017C000); StreamCaster 4000 Series User Manual v4.0.3.11; Spectrum Dominance 2.0: capabilities profile. Los Angeles: Silvus Technologies.

5 Alamouti S. M. A simple transmit diversity technique for wireless communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1998. – Vol. 16, no. 8. – P. 1451–1458.

6 Jakes W. C. (ed.) Microwave mobile communications. New York: Wiley, 1974. – 642 p.

7 Akki A. S., Haber F. A statistical model of mobile-to-mobile land communication channel // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 1986. – Vol. 35, no. 1. – P. 2–7.

8 Baddour K. E., Beaulieu N. C. Autoregressive modeling for fading channel simulation // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2005. – Vol. 4, no. 4. – P. 1650–1662.

9 Duel-Hallen A. Fading channel prediction for mobile radio adaptive transmission systems // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol. 95, no. 12. – Pp. 2299–2313.

10 Blair A., Brown T., Chugg K. M., Johnson M. Barrage relay networks for cooperative transport in tactical MANETs // Proc. IEEE MILCOM. San Diego, 2008; Brown T. A., Halford T. R., Johnson M. L. Method and system for coordinating access to a barrage relay network: US Patent 8,873,391 B2. 2014.

11 Talarico S., Valenti M. C., Halford T. R. Unicast barrage relay networks: outage analysis and optimization // arXiv:1408.5928. – 2014.

12 Zimmerling M., Mottola L., Santini S. Synchronous transmissions in low-power wireless: a survey of communication protocols and network services // ACM Computing Surveys. – 2020. – Vol. 53, no. 6. – Pp. 1–39. – DOI: 10.1145/3410159.

при локальном и равномерном трафике масштабируется как[13]

$$K_{\text{loc}}(n) = \Theta\left(\frac{n}{\ln n}\right),\ K_{\text{unif}}(n) = \Theta\left(\sqrt{n}\right), \quad (9)$$

где n – число узлов. При этом достигается порядок транспортной ёмкости Гупты–Кумара[14]. Когерентное излучение N ретрансляторов (распределённое диаграммообразование) повышает эквивалентную изотропно излучаемую мощность в N^2 раз[15] и такой режим заявлен как опция Barrage Beamforming[16].

Сетевое кодирование сокращает двусторонний обмен через ретранслятор с четырёх интервалов до трёх (сложение пакетов по модулю 2) или до двух (физическое сетевое кодирование)[17], повышая спектральную эффективность обмена в 4/3 и 2 раза, но в рассмотренных радиосредствах оно не заявлено.

Накладные расходы маршрутизации. В проактивных протоколах каждый из N узлов рассылает служебный пакет длиной L_b бит с периодом T_b на скорости R_b, занимая долю эфирного времени

$$\alpha = \min\left(1,\ \frac{NL_b}{R_bT_b}\right). \quad (10)$$

При $\alpha \le 0{,}1$, L_b = 800 бит, R_b = 1,625 Мбит/с (5 МГц) и T_b = 1 с, предельный размер сети составляет 203 узла, а при T_b = 0,1 с, предельный размер сети составляет 20. Решением проблемы служит групповая рассылка: в испытании Silvus с 559 узлами позиционные данные занимали менее 35 % эфирного времени[18]. Методы ИИ/МО позволяют прогнозировать разрывы маршрутов по данным о движении узлов [9].

Спектральный уровень

Радиостанции Silvus реализуют пространственное подавление помех (MAN-IC: решётка из N_r антенн подавляет до $N_r - 1$ источников), перестройку сети на свободный канал, в том числе в другой диапазон (MAN-IA), и двухчастотную линию. Режим MAN-IA отключает диаграммообразование на передаче, т.е. выигрыши технологий не всегда суммируются[19]. Функция Spectrum Pipelining TrellisWare объединяет два несмежных канала и удваивает пропускную способность многоскачкового маршрута[20]. Сравнение этих методов с расширением спектра и скачкообразной перестройкой частоты приведено в [3].

Анализ радиосредств

Заявленные характеристики радиосредств сведены в таблице 1. Пиковая спектральная эффективность $\eta_{\text{пик}}$ вычислена как отношение заявленной скорости к максимальной полосе. Данные получены из документации производителей[21] и описаний стандартов[22].

Внешний вид радиостанций, в которых реализованы рассмотренные технологии, показан на рисунке 2: многоантенные радиостанции Silvus и Persistent Systems с пространственным мультиплексированием и диаграммообразованием, радиостанция Thales AN/PRC-170 с кооперативной ретрансляцией Barrage Relay и радиостанции L3Harris с волновыми формами ANW2 и WREN-TSM. Наличие носимых исполнений и OEM-модулей показывает, что многоантенная обработка реализуема в малогабаритных изделиях: масса носимой SC4200EP составляет 425 г, OEM-модуля – 137 г.

Заявленная спектральная эффективность у радиосредств с двумя антеннами составляет 4–5 бит/с/Гц, у радиосредств без пространственного мультиплексирования (ANW2, TSM) – 2–2,5 бит/с/Гц, а рекордные значения (Rajant, Wi-Fi 7) относятся к широким каналам и статичным условиям (рис. 3а). По масштабируемости картина обратная: TSM поддерживает более 660 узлов на 1 МГц, Silvus SM4210 – 112–224 узла на 1 МГц (рис. 3б). Рынок подтверждает эту тенденцию: развёрнуто более 200 000 радиостанций с волновой формой TSM[23], её поддержка (WREN-TSM) заявлена в AN/PRC-158[24], а компания Silvus в 2025 г. вошла в состав Motorola Solutions[25]. Из гражданских стандартов многоскачковую передачу поддерживают DECT-2020 NR [6] и NR sidelink начиная с Rel-19[26], однако с ограниченным числом скачков [7].

13 Halford T. R., Courtade T. A., Turck K. A. The user capacity of barrage relay networks // Proc. IEEE MILCOM. – 2012.

14 Gupta P., Kumar P. R. The capacity of wireless networks // IEEE Transactions on Information Theory. – 2000. – Vol. 46, no. 2. – Pp. 388–404.

15 Mudumbai R., Brown D. R., Madhow U., Poor H.V. Distributed transmit beamforming: challenges and recent progress // IEEE Communications Magazine. – 2009. – Vol. 47, no. 2. – Pp. 102–110.

16 TSM Waveform: datasheet. TrellisWare Technologies; AN/PRC-170 Javelin V2: data sheet. Thales Defense & Security.

17 Katti S., Rahul H., Hu W., Katabi D., Médard M., Crowcroft J. XORs in the air: practical wireless network coding // Proc. ACM SIGCOMM. – 2006. – Pp. 243–254; Zhang S., Liew S. C., Lam P. P. Hot topic: physical-layer network coding // Proc. ACM MobiCom. – 2006. – Pp. 358–365.

18 Silvus pushes the limits of MANET scalability and capacity with 559 node network demonstration: press release. Silvus Technologies, 11.10.2022.

19 См. сноску 4.

20 См. сноску 16.

21 MPU5 Spec Sheet 03EN070 Rev. R; MPU5 Operator Manual v2.11. Persistent Systems; RF-7800M-MP, RF-7850M-HH, AN/PRC-158: datasheets. L3Harris Technologies; Turner M., Dingman K. Developing SCA based wideband networking waveforms // WInnForum SDR'11 Conference, 2011; Bittium Tactical Wireless IP Network (TAC WIN): brochure. Bittium, 2025; Helix Mesh Rider Radio (2×2 MIMO): datasheet. Doodle Labs; Peregrine BreadCrumb: spec sheet. Rajant Corporation, 2025.

22 ETSI TS 103 636-1 V2.1.1 (2024-10). DECT-2020 New Radio (NR); Part 1: Overview. Sophia Antipolis: ETSI, 2024; 3GPP Rel-19 Summary: presentation, 3GPP TSGs#112, June 2026. – URL: https://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations_2026/2026_04_Rel19.pdf (дата обращения: 03.10.2026); LoRa modulation basics: application note AN1200.22. Semtech Corporation, 2015.

23 TrellisWare achieves global deployment of 200,000+ TSM-enabled radios: press release. 08.09.2025. – URL: https://www.trellisware.com/trellisware-achieves-global-deployment-of-200000-tsm-enabled-radios/ (дата обращения: 03.10.2026).

24 См. сноску 21.

25 Motorola Solutions completes acquisition of Silvus Technologies Holding Inc.: press release. 18.08.2025. – URL: https://www.motorolasolutions.com/newsroom/press-releases/motorola-solutions-completes-acquisition-of-silvus-technologies.html (дата обращения: 03.10.2026)

26 См. сноску 22.

Таблица 1.

Характеристики рассмотренных радиосредств и стандартов

Радиосредство, стандарт	Диапазон, полоса	Скорость, Мбит/с	$\eta_{пик}$, бит/с/Гц	Ключевые технологии	Масштаб сети
Silvus SC4200EP / SC4400	0,3–6 ГГц; 1,25–20 МГц	до 100 (PHY 130)	5,0 (6,5)	MIMO 2×2 и 4×4, STC, диаграммообразование, MAN-IC/IA	более 550 узлов
Persistent MPU5	1,35–6 ГГц; 5–20 МГц	более 100 (около 33 на поток)	5,0	MIMO до 3×3, OFDM до 64-QAM, Wave Relay	не указан
TrellisWare TSM, Thales AN / PRC-170	0,225–2,6 ГГц; 1,2–20 МГц	более 50 (один скачок)	более 2,5	Barrage Relay, Spectrum Pipelining	более 800 узлов в 1,2 МГц
L3Harris AN / PRC-158, RF-7800M	0,03–2,5 ГГц; 0,5–10 МГц	около 10 (5 МГц)	около 2,0	ANW2, TDMA/USAP; WREN-TSM (AN/PRC-158)	не указан
Bittium TAC WIN	5–20 МГц	72	около 3,6	MANET-волновая форма	до 400
Doodle Labs Helix	1,6–2,5 ГГц; 3–20 МГц	80	4,0	MIMO 2×2	не указан
Rajant Peregrine	2,4/5 ГГц; 20–80 МГц	866,7 (PHY)	10,8	Wi-Fi 5, MIMO 2×2	не указан
DECT-2020 NR	0,45–5,9 ГГц; 1,7–221 МГц	–	–	OFDM до 1024-QAM, MIMO до 8 потоков	—
5G NR sidelink	лицензируемые	–	–	ретрансляция: 1 скачок (Rel-17/18), до 3 (Rel-19)	многоскачковая с Rel-19
LoRa (SF7, 125 кГц)	868/915 МГц	0,0055	0,044	чирп-модуляция	не указан



Рис. 2. Радиостанции, реализующие рассмотренные технологии[27]

27 Изображения: StreamCaster MANET radios: brochure. Silvus Technologies; MPU5 Spec Sheet 03EN070 Rev. R. Persistent Systems; AN/PRC-170 Javelin: capabilities sheet. Thales Defense & Security; AN/PRC-158, RF-7800M-MP: datasheets. L3Harris Technologies.



Рис. 3. Пиковая спектральная эффективность (а) и масштабируемость (б) радиосредств

Численное исследование

Ёмкость MIMO. Моделирование по 3000 реализациям релеевского канала подтверждает линейный рост ёмкости по $\min(N_t, N_r)$. При ОСШ 20 дБ переход от одной антенны к MIMO 4×4 увеличивает спектральную эффективность с 5,87 до 22,05 бит/с/Гц (рис. 4а). Таблица режимов Silvus (рис. 4б) показывает то же на практике, т.е. пользовательская скорость составляет 73–76 % канальной, а в высших режимах ограничена 75 Мбит/с, т.е. узким местом становится уже не радиоканал.

Устаревание CSI. Для MIMO 2×2 и 4×4 рассчитан выигрыш замкнутой схемы с использованием разложения устаревшей матрицы канала по сингулярным числам и распределение мощности алгоритмом waterfiling над разомкнутой с равномерным распределением мощности для 6000 реализаций канальных матриц и идеальной оценки канала на приёме. При актуальной CSI выигрыш MIMO 4×4 составляет 26 % при ОСШ 0 дБ, 12 % при 5 дБ и 5 % при 10 дБ (рис. 5а) и обращается в нуль при $f_D\tau = 0{,}22$; 0,18 и 0,14 соответственно. Порог $(f_D\tau)^*$ убывает с ростом ОСШ (рис. 5б), а при ОСШ выше 15 дБ выигрыш не превышает 2 %. Отрицательные значения (до –13 %) относятся к прекодеру, не учитывающему недостоверность CSI. Адаптивное переключение режимов по измеренному ρ устраняет эти потери.

Предсказание канала и допустимая задержка. Формула (6) совпадает с результатами моделирования (рис. 6а). Без предсказания выигрыш диаграммообразования при $N_t = 4$ снижается с 6 до 1 дБ при $f_D\tau = 0{,}3$, а предсказатель (7) при $p = 16$, $f_D T_s = 0{,}05$ и ОСШ оценки 20 дБ сохраняет 5,2 дБ. Граница целесообразности обратной связи для MIMO 4×4 при ОСШ 10 дБ смещается с 0,14 до 0,26 (при $p = 4$) и 0,36 (при p=16) при ОСШ оценки 20 дБ и до 0,23 при 10 дБ (при $p = 16$), т.е. предсказание расширяет допустимую задержку

$$\tau_{\max} = \frac{(f_D\tau)^*}{f_D} = \frac{(f_D\tau)^* c}{v f_c} \qquad (11)$$

в 1,7–2,6 раза. При движении обоих узлов с равной скоростью порог снижается до 0,10, т.е. $\tau_{\max}$ уменьшается примерно на 30 % (рис. 6б): на частоте 2,4 ГГц при 108 км/ч $\tau_{\max} = 0{,}57$ мс, а при движении обоих узлов – 0,41 мс; на 300 МГц при 60 км/ч – 8,2 и 5,9 мс. Эти значения сопоставимы со средней задержкой передачи у радиостанций Silvus в полосе 20 МГц (7 мс), поэтому CSI должна формироваться на физическом уровне в пределах кадра, например по взаимности канала при временном дуплексе. Модель Джейкса даёт

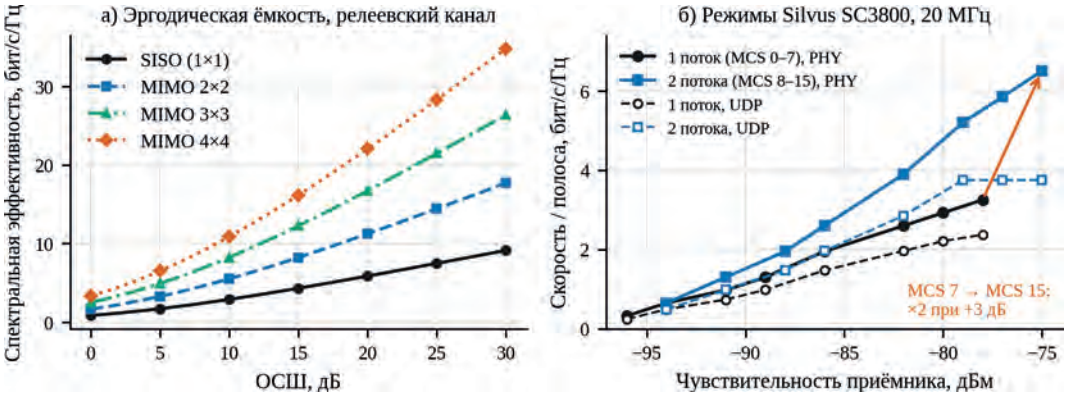

Рис. 4. Эргодическая ёмкость MIMO (а) и режимы Silvus SC3800 в полосе 20 МГц (б)

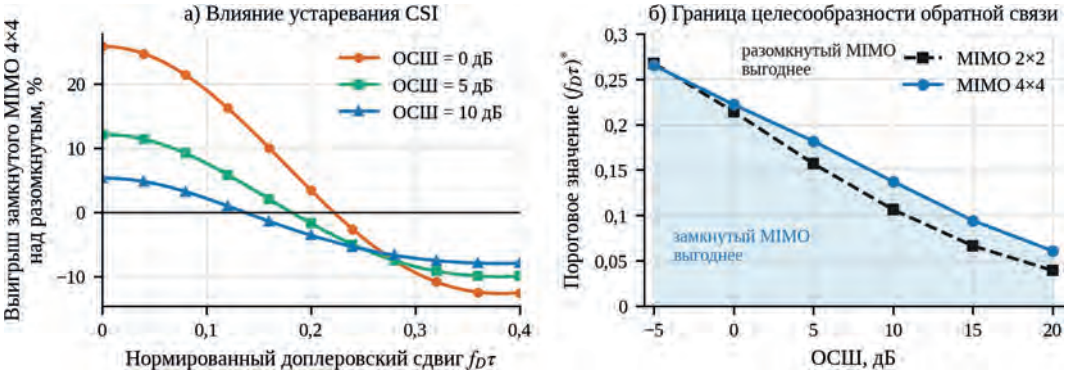

Рис. 5. Выигрыш замкнутого MIMO при устаревании CSI (а) и граница целесообразности обратной связи (б)

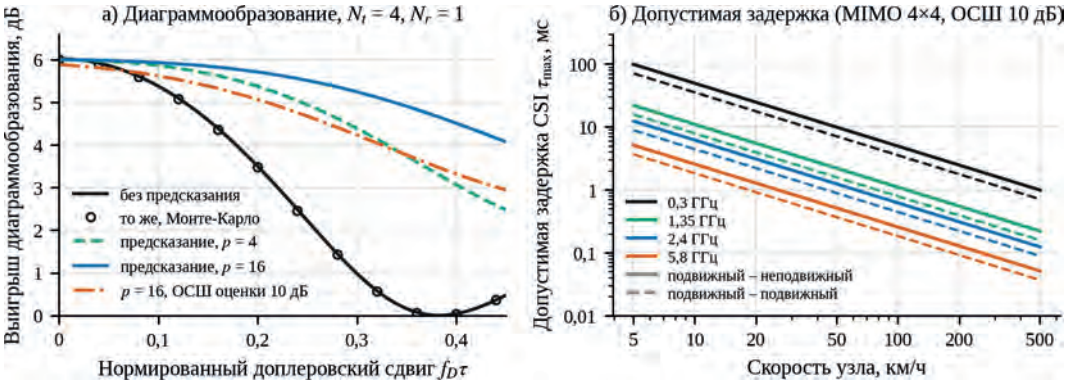

Рис. 6. Выигрыш диаграммообразования с предсказанием канала (а) и допустимая задержка CSI (б)

консервативную оценку, т.е. при неизотропном рассеянии потери от устаревания меньше [12].

Накладные расходы и Barrage Relay. По формуле (10) при L_b = 800 бит, T_b = 100 мс и 6,5 Мбит/с (20 МГц) служебные пакеты занимают 12, 25 и 69 % эфирного времени при N = 100, 200 и 559, а в канале 5 МГц эфир полностью занят уже при N около 200 рис. 7а). Аппроксимации числа одновременных потоков в сети Barrage Relay ($0{,}29\, n / \ln n$ и $0{,}46\sqrt{n}$)[28] дают 26 и 11 потоков при n = 559 (рис. 7б).

Реализованная доля предела Шеннона. Измерения MPU5 в режиме SISO на частоте 2,412 ГГц[29] сопоставлены с формулой (2) при полосе 20 МГц. При 10 МГц и параметрах OFDM, аналогичных IEEE 802.11, измеренная скорость превысила бы канальную скорость высшего SISO-режима. Доля предела

$$\kappa = \frac{R_{\text{изм}}}{B\log_2(1+\gamma)} \qquad (12)$$

имеет медиану 16 % (6–22 %), максимальная спектральная эффективность составляет 1,73 бит/с/Гц при ОСШ 36,5 дБ (рис. 8). При мощности 29 дБм и ОСШ 23 дБ скорость составила 22,0 Мбит/с, а при 17 дБм – 33,0 Мбит/с. По данным отчёта, 17 дБм – наибольшая мощность, при которой передатчик остаётся достаточно линейным для высшего режима. Следовательно, резерв повышения СЭ заключён в линейности тракта, алгоритмах адаптации и MAC-уровне.

Интегральная оценка технологий

Технологии оценены по шести критериям: K_1 – выигрыш по спектральной эффективности линии, K_2 – устойчивость к подвижности и динамике топологии, K_3 – масштабируемость, K_4 – помехоустойчивость при сохранении СЭ, K_5 – технологическая зрелость, K_6 – простота реализации с учётом массы, габаритов и энергопотребления. Баллы $s_{ij} \in \{1, \ldots, 5\}$ выставлены по результатам предыдущих разделов (табл. 2). Интегральная оценка и модель анализа чувствительности при 20 000 реализаций имеют вид:

$$S_j = \sum_{i=1}^{6} w_i s_{ij},\ \mathbf{w} \sim \mathrm{Dir}(20\mathbf{w}_0),$$
$$\tilde{s}_{ij} = \min(5, \max(1, s_{ij} + u_{ij})), \qquad (13)$$

где $\mathbf{w}_0$ = (0,25; 0,20; 0,20; 0,15; 0,10; 0,10) – базовые веса (сценарий А); $u_{ij} \sim U(-0{,}5; 0{,}5)$ – возмущение оценок. Сценарий В выдвигает на первый

28 См. сноску 13.

29 Persistent MPU5. Link margin enhancement using S-band 25W BDAs: test report TRT-6718, v1.0. East Brunswick: Triad RF Systems, 2018.

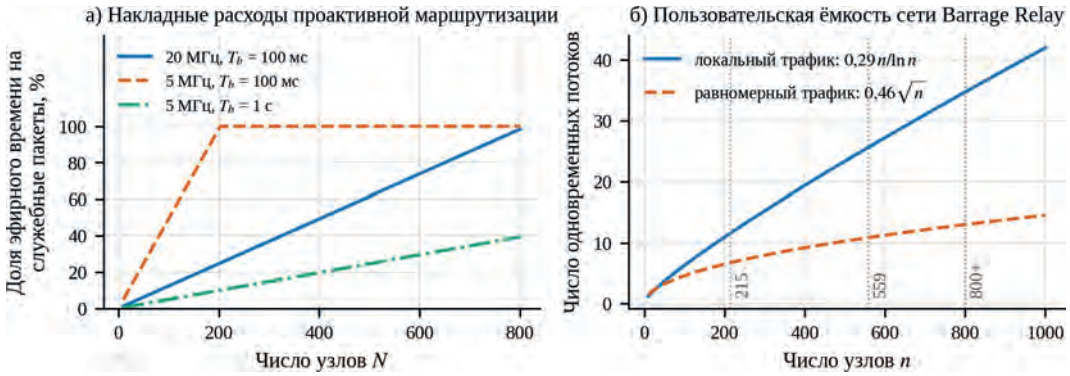

Рис. 7. Накладные расходы проактивной маршрутизации (а) и число одновременных потоков в сети Barrage Relay (б)

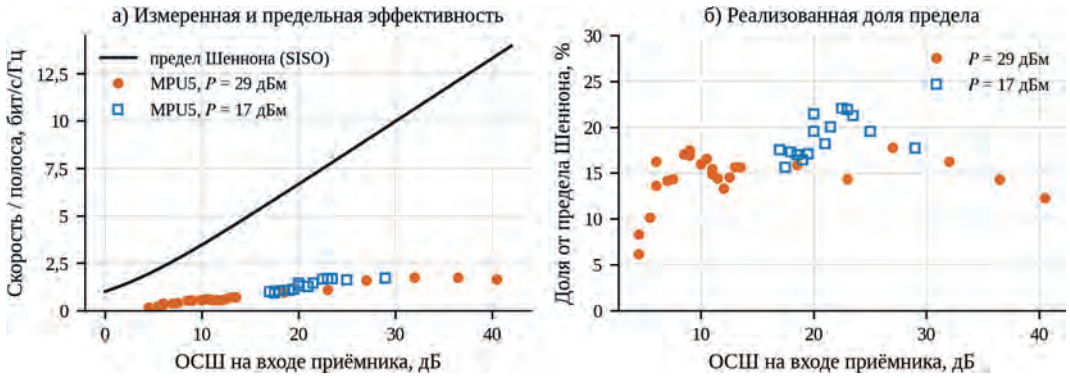

Рис. 8. Измеренная скорость радиостанции MPU5 и предел Шеннона (а); реализованная доля предела (б)

Таблица 2.

Оценки технологий по критериям (баллы 1–5) и интегральная оценка S_j

№	Технология	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	S_j
1	Адаптивная модуляция, OFDM, QAM высокого порядка	2	4	2	2	5	5	3,00
2	MIMO без обратной связи: мультиплексирование, STC	5	3	2	3	5	3	3,50
3	Замкнутый MIMO: диаграммообразование, MU-MIMO	4	2	3	4	4	3	3,30
4	Кооперативная ретрансляция (Barrage Relay)	3	5	5	3	5	4	4,10
5	Пространственное подавление помех, когнитивный доступ	3	4	3	5	4	3	3,60
6	Эффективные MAC и маршрутизация	2	4	4	2	4	4	3,20
7	Полнодуплексная связь	4	2	2	2	2	1	2,40
8	Направленные и адаптивные антенные решётки	4	2	4	4	3	2	3,30
9	ИИ/МО: адаптация, предсказание канала	3	5	3	3	2	3	3,30
10	Агрегация спектра, двухчастотные линии	3	3	3	4	3	3	3,15

план СЭ линии (w_1 = 0,45), сценарий С – подвижность, масштаб и помехоустойчивость (w_2 = 0,25, w_3 = 0,30, w_4 = 0,25).

Оценка K_1 = 5 у технологии 2 следует из формулы (2) и таблицы режимов, K_1 = 5 у технологии 4 – из отсутствия маршрутных таблиц и потребности в CSI на передатчике, у технологии 9 – из расширения допустимой задержки CSI (рис. 6), K_2 = 2 у технологий 3, 7 и 8 – из чувствительности к порогу $(f_D\tau)^*$, K_3 = 5 у технологии 4 – из числа узлов на МГц. Технология 4 лидирует с S_4 = 4,10 и входит в тройку лучших в 98 % реализаций (в 86 % — на первом месте), технология 5 – в 72 %, технология 2 – в 47 % (рис. 9). Технологии 3, 6, 8, 9 и 10 образуют плотную группу (S_j = 3,15 … 3,30), полнодуплексная связь замыкает рейтинг. Лидерство технологии 2 в сценарии В таблице 3 закономерно, так как пространственное мультиплексирование даёт наибольший выигрыш на линии, но плохо масштабируется.

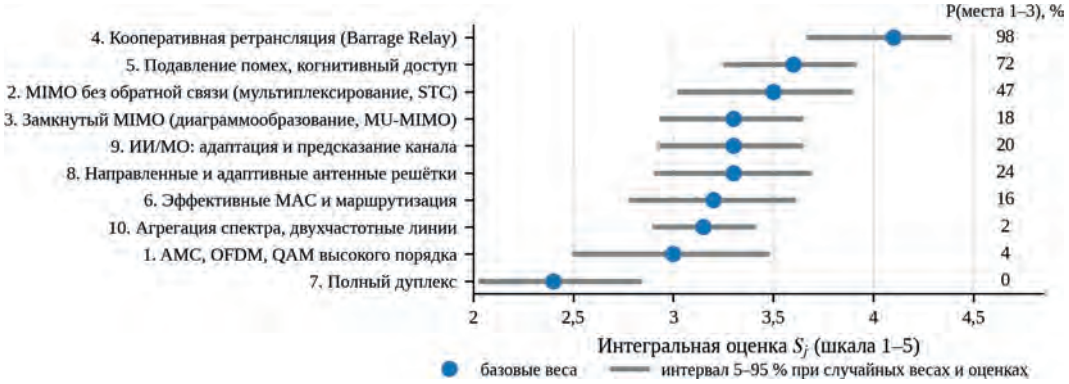

Рис. 9. Интегральные оценки технологий и вероятность попадания в тройку лучших при вариации весов и оценок

Таблица 3.

Первые пять технологий при различных сценариях весов (номер, оценка S_j)

Место	A (базовый)	B (СЭ линии)	C (подвижность и масштаб)
1	4 (4,10)	2 (4,00)	4 (4,25)
2	5 (3,60)	4 (3,80)	5 (3,80)
3	2 (3,50)	3 (3,50)	9 (3,45)
4	3 (3,30)	5 (3,45)	8 (3,35)
5	8 (3,30)	8 (3,40)	6 (3,30)

Обсуждение и рекомендации

Полученные результаты дополняют обзоры [1, 2] количественными оценками. Для сетей с сотнями узлов в полосе в единицы мегагерц определяющей оказывается не пиковая спектральная эффективность линии, а доля ресурса, расходуемая на служебный обмен и повторные передачи. Гражданские стандарты [4, 5] достигают рекордной СЭ линии в широких каналах и статичных условиях, а DECT-2020 NR [6] и NR sidelink [7] пока ограничены малым числом скачков, поэтому для тактического звена они интересны прежде всего как источник отдельных решений, таких как многоканального режима, координации передатчиков и ячеистой маршрутизации.

Практические рекомендации для максимизации спектральной эффективности:

1) сочетать MIMO 2×2 с мультиплексированием и пространственно-временным кодированием, кооперативную ретрансляцию и пространственное подавление помех;
2) в узкополосных каналах с сотнями узлов применять схемы без маршрутизации или с групповой рассылкой служебных данных;
3) включать замкнутый MIMO только ниже порога для медленных узлов и на низких частотах, а для быстрых узлов дополнять его предсказанием канала на основе фильтра Калмана или методов МО [11];
4) учитывать, что полнодуплексная связь в подвижных радиостанциях в ближайшие годы выигрыша не даст [8], а защиту от помех строить на сочетании пространственной фильтрации и перестройки частоты, методы которых систематизированы в [3].

Выводы

В работе решена задача сравнительной оценки технологий повышения спектральной эффективности в радиосетях с подвижными узлами применительно к военным системам связи. Сформирована классификация технологий, сопоставлены характеристики тактических и гражданских радиосредств, получены количественные оценки эффектов подвижности и накладных расходов и предложена интегральная оценка с анализом чувствительности.

Наиболее перспективными признаны кооперативная ретрансляция без маршрутизации, пространственное подавление помех и MIMO с пространственным мультиплексированием – единственная зрелая технология кратного роста СЭ линии. Выигрыш замкнутого MIMO 4×4 достигает 26 % при ОСШ 0 дБ и исчезает при $f_D\tau$ в пределах 0,14 … 0,22. При движении обоих узлов допустимая задержка CSI уменьшается примерно на 30 %, а линейное предсказание канала увеличивает её в 1,7–2,6 раза. Поэтому обратную связь по каналу целесообразно включать адаптивно – по измеренному коэффициенту корреляции канала, а для быстрых узлов дополнять предсказанием. Испытанная радиостанция реализует около 16 % предела Шеннона, и значительная часть потерь вносится линейностью тракта и MAC-уровнем. Полнодуплексная связь остаётся наименее зрелой технологией.

Достоверность результатов подтверждается совпадением аналитической зависимости (6)

с моделированием методом Монте-Карло, соответствием рассчитанной ёмкости MIMO известной асимптотике (3), совпадением N_t-кратного выигрыша диаграммообразования с паспортными данными радиостанций SC4200 и SC4400, а также устойчивостью ранжирования к вариации весов и оценок. Ограничения: использованы заявленные производителями данные, эффект предсказания оценён для модели Джейкса с известной статистикой, оценки критериев экспертные. Дальнейшие исследования: предсказание канала для скоростных объектов, совместная оптимизация MIMO и кооперативной ретрансляции, полевая проверка выводов.

Литература

1. Gomes J., Ehlert R. R., Boesche R. M., de Lima V. S., Stocchero J. M., Barone D. A. C., Wickboldt J. A., de Freitas E. P., dos Anjos J. C. S., de Araujo Fernandes R. Q. Surveying emerging network approaches for military command and control systems // ACM Computing Surveys. – 2023. – Vol. 56, no. 6. – Pp. 1–38. – DOI: 10.1145/3626090.
2. Patel Z., Khanpara P., Valiveti S., Raval G. The evolution of ad hoc networks for tactical military communications: trends, technologies, and case studies // Lecture Notes in Networks and Systems. Singapore: Springer, 2023. – Pp. 331–346. – DOI: 10.1007/978-981-19-7874-6_24.
3. Pirayesh H., Zeng H. Jamming attacks and anti-jamming strategies in wireless networks: a comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, no. 2. – Pp. 767–809. – DOI: 10.1109/COMST.2022.3159185.
4. García-Rodríguez A., López-Pérez D., Galati Giordano L., Geraci G. IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 strikes back // IEEE Communications Magazine. – 2021. – Vol. 59, no. 4. – Pp. 102–108. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2000711.
5. Galati Giordano L., Geraci G., Carrascosa M., Bellalta B. What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability // IEEE Communications Magazine. – 2024. – Vol. 62, no. 8. – Pp. 126–132. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2300728.
6. Kovalchukov R., Moltchanov D., Pirskanen J., Säe J., Numminen J., Koucheryavy Y., Valkama M. DECT–2020 New Radio: the next step toward 5G massive machine-type communications // IEEE Communications Magazine. – 2022. – Vol. 60, no. 6. – Pp. 58–64. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2100375.
7. Shyy D. J., Luu C., Xu J. D., Liu L., Erpek T., Gabay D., Bate D. Multi-hop UE to UE relays for MANET/mesh leveraging 5G NR sidelink // Proceedings of the Eighth ACM/IEEE Symposium on Edge Computing. New York: ACM, 2023. – Pp. 341–346. – DOI: 10.1145/3583740.3626813.
8. Smida B., Sabharwal A., Fodor G., Alexandropoulos G. C., Suraweera H. A., Chae C.-B. Full-duplex wireless for 6G: progress brings new opportunities and challenges // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2023. – Vol. 41, no. 9. – Pp. 2729–2750. – DOI: 10.1109/JSAC.2023.3287612.
9. Rovira-Sugranes A., Razi A., Afghah F., Chakareski J. A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: trends, challenges, and future outlook // Ad Hoc Networks. – 2022. – Vol. 130. – Art. 102790. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2022.102790.
10. Szott S., Kosek-Szott K., Gawłowicz P., Torres Gómez J., Bellalta B., Zubow A., Dressler F. Wi-Fi meets ML: a survey on improving IEEE 802.11 performance with machine learning // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, no. 3. – Pp. 1843–1893. – DOI: 10.1109/COMST.2022.3179242.
11. Kim H., Kim S., Lee H., Jang C., Choi Y., Choi J. Massive MIMO channel prediction: Kalman filtering vs. machine learning // IEEE Transactions on Communications. – 2021. – Vol. 69, no. 1. – Pp. 518–528. – DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3027882
12. Li H., Ding L., Wang Y., Wu P., Wang Z. Impact of channel aging on massive MIMO vehicular networks in non-isotropic scattering scenarios // Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – 2021. – Pp. 1–6. – DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685998.
13. Землянухин С. Ю. Сравнительный анализ линейных алгоритмов прекодирования в низкоорбитальных спутниковых системах // Радиотехника, электроника и связь (РЭиС-2025): тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции. (Омск, 7–8 октября 2025 г.). Омск: ОНИИП, 2025. – С. 181.

ANALYSIS OF PROMISING TECHNOLOGIES FOR INCREASING SPECTRAL EFFICIENCY IN MOBILE NETWORKS WITH DYNAMIC TOPOLOGY

Zemlyanukhin S. Yu.[30]

Keywords: *MANET, multi-antenna MIMO systems, diagramming, cooperative relay, Barrage Relay, channel information obsolescence, channel prediction, Doppler shift, interference suppression, multi-criteria evaluation.*

30 ***Sergey Yu. Zemlyanukhin***, Head of the Laboratory of the 16th Central Research and Testing Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Mytishchi, Moscow Region, Russia. E-mail: sergzemlyanukhin@yandex.ru

Abstract

The purpose of the study *is to determine the most effective technologies for improving the spectral efficiency of radio networks with mobile nodes, taking into account the mobility of subscribers, the scale of the network and the interference environment.*

Research method: *comparative analysis of documentation of tactical and civil radio facilities, statistical modeling of multi-antenna lines in case of obsolescence of channel information and multi-criteria evaluation of technologies with Monte Carlo ranking stability check.*

The result of the study: *it was shown that the gain of multi-antenna transmission with channel feedback reaches 26 % at a signal-to-noise ratio of 0 dB and disappears when the node shifts by 0.14–0.22 wavelengths during the delay; when both nodes are moving, the permissible delay decreases by about 30 %, and linear channel prediction increases it by 1.7–2.6 times.*

Scientific novelty: *the boundary of expediency of feedback on the channel depending on the signal-to-noise ratio, carrier frequency and speed of nodes is obtained, a reproducible method of integral evaluation of technologies is proposed.*

References

1. Gomes J., Ehlert R. R., Boesche R. M., de Lima V. S., Stocchero J. M., Barone D. A. C., Wickboldt J. A., de Freitas E. P., dos Anjos J. C. S., de Araujo Fernandes R. Q. Surveying emerging network approaches for military command and control systems // ACM Computing Surveys. – 2023. – Vol. 56, no. 6. – Pp. 1–38. – DOI: 10.1145/3626090.
2. Patel Z., Khanpara P., Valiveti S., Raval G. The evolution of ad hoc networks for tactical military communications: trends, technologies, and case studies // Lecture Notes in Networks and Systems. Singapore: Springer, 2023. – Pp. 331–346. – DOI: 10.1007/978-981-19-7874-6_24.
3. Pirayesh H., Zeng H. Jamming attacks and anti-jamming strategies in wireless networks: a comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, no. 2. – Pp. 767–809. – DOI: 10.1109/COMST.2022.3159185.
4. García-Rodríguez A., López-Pérez D., Galati Giordano L., Geraci G. IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 strikes back // IEEE Communications Magazine. – 2021. – Vol. 59, no. 4. – Pp. 102–108. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2000711.
5. Galati Giordano L., Geraci G., Carrascosa M., Bellalta B. What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability // IEEE Communications Magazine. – 2024. – Vol. 62, no. 8. P. 126–132. DOI: 10.1109/MCOM.001.2300728.
6. Kovalchukov R., Moltchanov D., Pirskanen J., Säe J., Numminen J., Koucheryavy Y., Valkama M. DECT-2020 New Radio: the next step toward 5G massive machine-type communications // IEEE Communications Magazine. – 2022. – Vol. 60, no. 6. – Pp. 58–64. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2100375.
7. Shyy D. J., Luu C., Xu J. D., Liu L., Erpek T., Gabay D., Bate D. Multi-hop UE to UE relays for MANET/mesh leveraging 5G NR sidelink // Proceedings of the Eighth ACM/IEEE Symposium on Edge Computing. New York: ACM, 2023. – Pp. 341–346. – DOI: 10.1145/3583740.3626813.
8. Smida B., Sabharwal A., Fodor G., Alexandropoulos G. C., Suraweera H. A., Chae C.-B. Full-duplex wireless for 6G: progress brings new opportunities and challenges // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2023. – Vol. 41, no. 9. – Pp. 2729–2750. – DOI: 10.1109/JSAC.2023.3287612.
9. Rovira-Sugranes A., Razi A., Afghah F., Chakareski J. A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: trends, challenges, and future outlook // Ad Hoc Networks. – 2022. – Vol. 130. – Art. 102790. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2022.102790.
10. Szott S., Kosek-Szott K., Gawłowicz P., Torres Gómez J., Bellalta B., Zubow A., Dressler F. Wi-Fi meets ML: a survey on improving IEEE 802.11 performance with machine learning // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, no. 3. – Pp. 1843–1893. – DOI: 10.1109/COMST.2022.3179242.
11. Kim H., Kim S., Lee H., Jang C., Choi Y., Choi J. Massive MIMO channel prediction: Kalman filtering vs. machine learning // IEEE Transactions on Communications. – 2021. – Vol. 69, no. 1. – Pp. 518–528. – DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3027882.
12. Li H., Ding L., Wang Y., Wu P., Wang Z. Impact of channel aging on massive MIMO vehicular networks in non-isotropic scattering scenarios // Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – 2021. – Pp. 1–6. – DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685998.
13. Zemljanuhin S. Ju. Sravnitel'nyj analiz linejnyh algoritmov prekodirovanija v nizkoorbital'nyh sputnikovyh sistemah // Radiotehnika, jelektronika i svjaz' (RJeiS-2025): tezisy dokladov VIII Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. (Omsk, 7–8 oktjabrja 2025 g.). Omsk: ONIIP, 2025. – P. 181.