

УДК 621.396.41

Шифр специальности ВАК: 2.2.13

В. Чжан, Т.Р. Газизов

Применение алгоритма адаптивной экспоненциальной минимальной суммы для декодирования в системе связи низколетящих беспилотных летательных аппаратов

Актуальность. Затухания Рэлея снижают надёжность связи низколетящих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), приводя к росту вероятности битовых ошибок (BER). Коды с низкой плотностью проверок на чётность (LDPC-коды), высокоэффективные для канального кодирования, уменьшают влияние помех, вызванных такими затуханиями. Однако общая производительность системы зависит не только от схемы кодирования, но и от алгоритма декодирования. Алгоритм смещённой минимальной суммы (OMS) хотя и обладает низкой вычислительной сложностью, демонстрирует недостаточно малую BER. В то же время алгоритм адаптивной экспоненциальной минимальной суммы (AEMS), сохраняя низкую сложность, повышает помехоустойчивость благодаря адаптивному механизму коррекции. **Цель исследования** – сравнить BER алгоритмов AEMS и OMS в канале БПЛА с затуханиями Рэлея. **Методы.** Использованы модель канала затуханий Рэлея для БПЛА и имитационное моделирование. **Результаты.** Представлено снижение средней BER AEMS по сравнению с OMS при разных отношениях сигнал/шум (SNR) и порядках квадратурной амплитудной модуляции (QAM). Оно значительно, особенно при высоких SNR: почти до 12 раз при SNR=16 дБ для 8-QAM. **Практическая значимость.** Хотя алгоритм AEMS имеет более высокую вычислительную сложность, чем OMS, он улучшает декодирование. Следовательно, для БПЛА с достаточными вычислительными ресурсами AEMS эффективен для повышения надёжности канала связи. Полученные результаты можно использовать при разработке БПЛА.

Ключевые слова: алгоритм декодирования, LDPC-коды, БПЛА, затухания Рэлея, вероятность битовой ошибки.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-40-45

Введение

Массовое использование БПЛА в различных областях стало реальностью. Между тем особое беспокойство вызвало их неконтролируемое использование, что вновь обострило проблему противодействия БПЛА вплоть до их функционального поражения, например, излучениями [1]. С началом специальной военной операции эта проблема особенно обострилась и, к большому сожалению, не решена эффективно по сей день. Причинами этого могли быть различные «сопутствующие» проблемы, например, электромагнитная совместимость со своими средствами [2]. Однако одной из основных причин стало совершенствование защиты БПЛА от средств функционального поражения. Например, комплексный подход к такой защите представлен в работе [3].

Свежий обзор проблемы обеспечения помехоустойчивости бортовой электроники БПЛА при мощных электромагнитных воздействиях представлен в работе [4], а методология проектирования их критичных узлов на печатных платах – в работе [5].

Практика показала особую критичность именно системы связи БПЛА. Например, весьма показательно появление БПЛА со связью на оптоволокне, позволившее невозможное при связи по радиоканалу. Но далеко не всегда можно отказаться от радиосвязи. Поэтому широко используют помехоустойчивое кодирование, позволяющее значительно снизить влияние опасных воздействий. При этом универсальное моделирование такого влияния оказывается возможным через затухания Рэлея.

Затухания Рэлея снижают надёжность связи низколетящих БПЛА, приводя к росту BER. LDPC-коды,

высокоэффективные для канального кодирования [6–8], уменьшают влияние помех, вызванных такими затуханиями [9]. Однако общая производительность системы зависит не только от схемы кодирования, но и от алгоритма декодирования. Алгоритм OMS хотя и обладает низкой вычислительной сложностью, демонстрирует недостаточно малую BER. В то же время алгоритм AEMS, сохраняя низкую сложность, повышает помехоустойчивость благодаря адаптивному механизму коррекции [10]. Цель работы – сравнить BER алгоритмов AEMS и OMS в канале БПЛА с затуханиями Рэлея.

Методы

Граф Таннера выводится из матрицы проверки H LDPC-кода [11]. Алгоритмы декодирования LDPC-кодов выполняют итеративное декодирование на основе графа Таннера, где сообщения многократно обмениваются между переменными и проверочными узлами. После нескольких итераций значения сообщений стабилизируются, что позволяет принять оптимальное решение [12]. Таким образом, его представление в виде графа Таннера и простая модель инициализации итеративного процесса могут быть показаны на рис. 1.

Распространение логарифмического отношения доверия (LLR-BP – log-likelihood ratio belief propagation) и минимальная сумма (MS – min sum) – это два классических алгоритма декодирования для LDPC-кодов [13, 14]. Они немного отличаются друг от друга. MS – это упрощённая версия LLR-BP алгоритма, которая аппроксимирует вероятностные вычисления с помощью операций нахождения минимума. В отличие от LLR-BP MS не требует сложных

расчетов, использующих функции $\tanh/\operatorname{arctanh}$, что снижает вычислительную сложность ценой потери производительности [14].

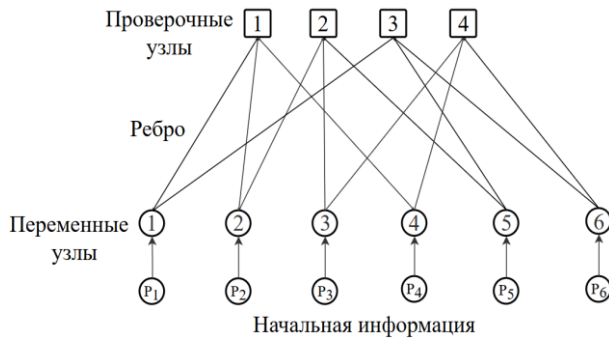


Рис. 1. Вычислительная модель LDPC-кодов

Типичный алгоритм LDPC-кодов включает 5 этапов. Основное различие между алгоритмами декодирования LLR-BP и MS заключается в формулах обновления проверочных узлов [10, 13, 14]. Обозначения в формулах алгоритма приведены в табл. 1.

Процесс вычисления по алгоритмам LLR-BP и MS представлен ниже.

1. Вычислить начальное сообщение переменных узлов, как

$$L(P_i) = \ln \left(\frac{P_i(0)}{P_i(1)} \right) = \ln \left(\frac{p(v_i = 0 | y_i)}{p(v_i = 1 | y_i)} \right). \quad (1)$$

2-1. Вычислить внешнее сообщение, передаваемое от проверочных узлов к переменным LLR-BP алгоритма, как

$$\begin{aligned} L^l h(r_{ji})_{\text{LLR-BP}} &= \\ &= 2 \tan h^{-1} \left(\prod_{i' \in V(j) \setminus i} \left(\tan h \frac{L^{l-1}(q_{ij})}{2} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.1)$$

Таблица 1

Обозначения в формулах (1)–(4)

Параметр	Значение
v_i	i -й переменный узел
c_j	j -й проверочный узел
$r_{ji}^l(b)$	Внешняя информация, передаваемая от проверочного узла j к переменному узлу i на l -й итерации, $b = 0, 1$
$q_{ij}^l(b)$	Внешняя информация, передаваемая от переменного узла i к проверочному узлу j на l -й итерации, $b = 0, 1$
$C(i)$	Множество проверочных узлов, связанных с i -м переменным узлом
$V(j)$	Множество переменных узлов, связанных с j -м проверочным узлом
$C(i) \setminus j$	Множество проверочных узлов, связанных с i -м переменным узлом, за исключением узла j
$V(j) \setminus i$	Множество переменных узлов, связанных с j -м проверочным узлом, за исключением узла i
$P_i(b)$	Апостериорная вероятность приёма y_i на приёмной стороне, соответствующая биту $c_i = b$ на передающей стороне, $b = 0, 1$
$q_i^l(b)$	Апостериорная вероятностная информация об i -м переменном узле на l -й итерации, $b = 0, 1$

2-2. Вычислить внешнее сообщение, передаваемое от проверочных узлов к переменным MS алгоритма, как

$$L^l(r_{ji})_{\text{MS}} = \prod_{i' \in V(j) \setminus i} \operatorname{sgn}(L^{l-1}(q_{ij})) \min_{i' \in V(j) \setminus i} |L^{l-1}(q_{ij})|. \quad (2.2)$$

3. Вычислить внешнее сообщение, передаваемое от переменных узлов к проверочным, как

$$\begin{aligned} L^l(q_{ij}) &= \ln \left(\frac{P_i(0) \prod_{j' \in C(i) \setminus j} r_{ji'}^l(0)}{P_i(1) \prod_{j' \in C(i) \setminus j} r_{ji'}^l(1)} \right) = \\ &= L(P_i) + \sum_{j' \in C(i) \setminus j} L^l(r_{ji'}^l). \end{aligned} \quad (3)$$

4. Вычислить апостериорную вероятность переменных узлов после итерации: если вероятность 0 больше вероятности 1, то v_i определяется как 0, иначе – как 1.

$$L^l(q_i) = \ln \left(\frac{P_i(0) \prod_{j \in C(i)} r_{ji}^l(0)}{P_i(1) \prod_{j \in C(i)} r_{ji}^l(1)} \right) = L(P_i) + \sum_{j \in C(i)} L^l(r_{ji}^l). \quad (4)$$

5. Декодирующее решение: если $\forall \mathbf{H}^T = 0$ или число итераций достигает максимума, то декодирование прекращается, иначе возврат к шагу 2.

По сравнению с алгоритмом LLR-BP второй шаг алгоритма MS приводит к гораздо большей сложности вычисления $L^l(r_{ji})_{\text{MS}}$. Для сокращения этого разрыва предложен алгоритм OMS [15]. OMS добавляет коэффициент смещения β на втором этапе алгоритма декодирования:

$$\begin{aligned} L^l(r_{ji})_{\text{OMS}} &= \prod_{i' \in V(j) \setminus i} \operatorname{sgn}(L^{l-1}(q_{ij})) \times \\ &\times \max \left(\min_{i' \in V(j) \setminus i} |L^{l-1}(q_{ij})| - \beta, 0 \right). \end{aligned} \quad (5)$$

OMS несколько улучшает BER MS [13, 14], но все еще не достигает уровня LLR-BP. Неспособность коэффициента смещения β адаптивно изменяться в процессе итераций алгоритма является основной причиной ограничений OMS [10].

Модель связи

Оптимизация алгоритма MS заключается в изменении вычисления $L^l(r_{ji})_{\text{MS}}$, чтобы его значение было ближе к $L^l(r_{ji})_{\text{LLR-BP}}$. $|L^{l-1}(q_{ij})_{\min 1}|$ сильно влияет на $L^l(r_{ji})$. Введение только $|L^{l-1}(q_{ij})_{\min 1}|$ позволяет MS улучшить декодирование, хотя и уступая LLR-BP. Значение $|L^{l-1}(q_{ij})_{\min 2}|$ само адаптивно изменяется в процессе итераций. Чтобы позволить $|L^{l-1}(q_{ij})_{\min 2}|$ уменьшать $L^l(r_{ji})_{\text{MS}}$ с учетом большого числа нелинейных операций $\tanh$ в вычислении $L^l(r_{ji})_{\text{LLR-BP}}$, $|L^{l-1}(q_{ij})_{\min 2}|$ может использоваться как адаптивный экспоненциальный корректирующий коэффициент (AECF – adaptively exponential correction factor) для снижения $L^l(r_{ji})_{\text{MS}}$. Поскольку $|L^{l-1}(q_{ij})_{\min 1}|$ и $|L^{l-1}(q_{ij})_{\min 2}|$ используются, обозначая первый и второй минимумы во внешней информации, для упро-

щения они обозначены как EI_{m1} и EI_{m2} соответственно. Формулы обновления CN для AEMS, соответственно

$$\begin{cases} L^l(r_{ji})_{AEMS} = \prod \operatorname{sgn}(EI) EI_{m1}^\lambda & EI_{m2} \leq 1, \\ L^l(r_{ji})_{AEMS} = \prod \operatorname{sgn}(EI) EI_{m1} & EI_{m2} > 1. \end{cases} \quad (6)$$

$|L^{l-1}(q_{ij})_{\min 2}|$ не может быть использован напрямую как AECF, чтобы его влияние на $\min 1$ оставалось в разумных пределах и могло играть роль оптимизации. AECF λ для AEMS может быть определён как

$$\lambda = 2 - (EI_{m2} - EI_{m1}). \quad (7)$$

Ключевым фактором улучшения работы AEMS является введение в процесс обновления CN экспоненциального весового коэффициента λ , основанного на втором минимальном значении. Это даёт адаптивную корректировку и, как следствие, значительно повышает точность информации на выходе CN. Математический вывод AEMS и описание его параметров есть в [10].

Среди многочисленных преимуществ систем связи БПЛА (рис. 2) – большой радиус покрытия и возможность экстренной связи при ликвидации последствий стихийных бедствий [16–18]. В сценариях с БПЛА на малой высоте в городской или горной местности при наличии выраженной многолучевости, отсутствии явной прямой видимости и преобладании рассеяния принимаемый сигнал обычно может моделироваться с помощью распределения Рэлея [19]. QAM позволяет передавать данные с высокой скоростью в беспроводных системах связи [20, 21]. QAM привлекла значительное внимание не только из-за основных её достоинств, но и потому, что используемые с ней дополнительные технологии позволяют снижать влияние помех в канале связи. Здесь вся связь рассматривается в рамках схемы модуляции QAM, где многолучевое затухание моделируется с помощью быстрого затухания Рэлея в различных условиях канала.

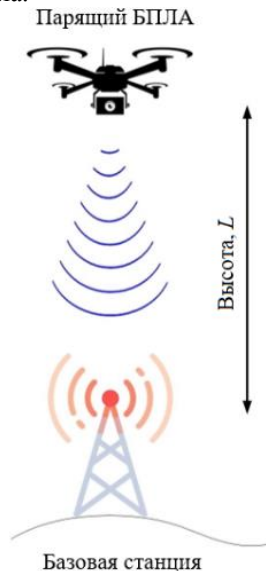


Рис. 2. Модель связи БПЛА с наземной базовой станцией (БС)

Для коррекции ошибок между передатчиками и приёмниками используется DVB-S2 QC-LDPC-кодирование. Таким образом, принимаемые сигналы через канал Рэлея на БС на рис. 2 могут быть записаны как

$$y(t) = \sqrt{\frac{P}{L\tau}} \eta h_{\text{Ray}}(t) x(t) + n(t), \quad (8)$$

где L – высота БПЛА, τ – коэффициент распространения, P – мощность сигнала, η – коэффициент полезного действия передатчика, $h_{\text{Ray}}(t)$ – коэффициент затухания Рэлея, $x(t)$ – передаваемые бинарные данные, $n(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

Результаты

На основе работы [9], где использован OMS, здесь применяется AEMS и сравниваются их BER. Для корректного сравнения с результатами OMS из [9] в моделировании использованы полностью идентичные среда связи и набор параметров. В рамках этой конфигурации для декодирования применен AEMS. Получены результаты для предложенной модели системы связи БПЛА с 4-, 8-, 16-, 32-QAM и QC-LDPC в условиях канала с затуханиями Рэлея. Минимальная высота БПЛА принята на уровне моря, а максимальная – 300 м. При этом нормирующая высота 7,35 км, а преломляемость на уровне моря – 315. В моделировании используется DVB-S2 QC-LDPC-код с матрицей $\mathbf{H}$ (32 400, 10 800) и кодовой скоростью 2/3. В настоящем моделировании число итераций декодирования для обоих алгоритмов установлено равным 10. Подробные пояснения для этих параметров приведены в работе [9].

Сравнение AEMS и OMS представлено на рис. 3. Снижение средней BER для AEMS по сравнению с OMS в зависимости от SNR и порядка модуляции QAM приведено в табл. 2.

Видно, что BER AEMS может быть ниже, чем OMS для всех порядков QAM. Снижение BER растёт с ростом SNR (хотя для 4-QAM есть спад улучшения после пика при SNR = 10 дБ).

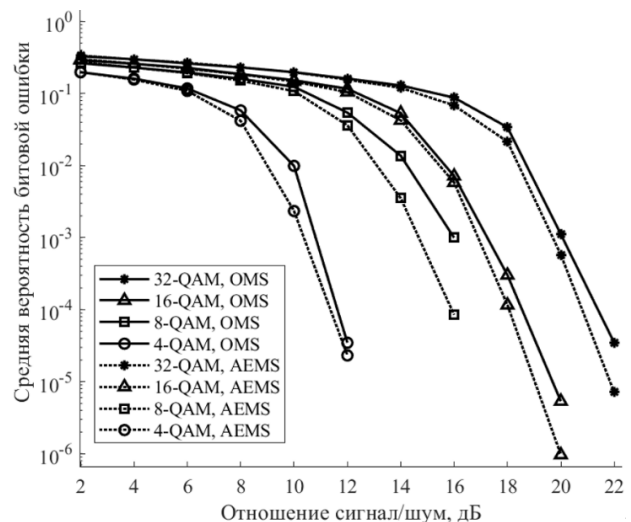


Рис. 3. Зависимости средней BER от SNR для OMS и AEMS в канале с затуханиями Рэлея при 4-, 8-, 16- и 32-QAM

Таблица 2

Снижение средней BER для AEMS относительно OMS (в разях) в зависимости от порядка QAM и SNR (дБ)

SNR, дБ	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
4-QAM	0,99	1,03	1,08	1,39	4,23	1,50	–	–	–	–	–
8-QAM	0,98	1,00	1,02	1,06	1,15	1,50	3,89	11,73	–	–	–
16-QAM	0,97	0,99	1,03	1,01	1,04	1,11	1,26	1,23	2,60	5,54	–
32-QAM	0,98	1,00	0,98	1,00	1,00	1,03	1,08	1,28	1,58	1,92	4,88

В то же время чем выше порядок QAM, тем большее SNR требуется для улучшения BER. Максимальные снижения: 4-QAM при SNR = 10 дБ – 4,23 раза; 8-QAM при SNR = 16 дБ – 11,73 раза; 16-QAM при SNR = 20 дБ – 5,54 раза; 32-QAM при SNR=22 дБ – 4,88 раза.

Заключение

Таким образом, в условиях канала с затуханиями Рэлея в проверенных в работе сценариях моделирования AEMS может давать более низкую BER, чем OMS, в широком диапазоне порядков модуляции и значений SNR: до 11,73 раза при SNR = 16 дБ для 8-QAM. Из этого можно сделать вывод: хотя алгоритм AEMS имеет более высокую вычислительную сложность, чем OMS, он может улучшать декодирование. Следовательно, для БПЛА с достаточными вычислительными ресурсами AEMS может быть эффективным для повышения надёжности канала связи. В заключение отметим, что многие детали этого исследования доступны в работе [22].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 25-29-00139 (<https://rscf.ru/project/25-29-00139/>) в ТУСУР.

Литература

- Макаренко С.И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. – Ч. 4: Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 3. – С. 122–157. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304.
- Белоусов А.О. Подходы к созданию методологии обеспечения электромагнитной совместимости средств функционального поражения электромагнитным излучением с другими радиоэлектронными средствами в составе комплекса противодействия беспилотным летательным аппаратам / А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов // Матер. XI Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов». – г. Москва, 10–11 декабря, 2020. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2020. – С. 1–5.
- Белоусов А.О. Повышение помехозащищенности беспилотного летательного аппарата в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения: комплексный подход / А.О. Белоусов, А.В. Носов // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 1. – С. 10–47. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-010-047.
- Мазунов Д.А. Помехоустойчивость бортовой электроники беспилотных летательных аппаратов при мощных электромагнитных воздействиях: уязвимости, оценка и меры защиты / Д.А. Мазунов, Е.Б. Черникова, Т.Р. Газизов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2026. В печати.
- Газизов Т.Т. Методология проектирования критических узлов печатных плат беспилотных авиационных систем // Инженерное образование. – 2026. – № 40. В печати.
- Chen L. Near-Shannon-limit quasicyclic low-density parity-check codes / L. Chen, J. Xu, I. Djurdjevic, S. Lin // IEEE Transactions on Communications. – 2004. – Vol. 52. – P. 1038–1042.
- Zhang W. On the competitiveness of LDPC codes in wireless / W. Zhang, D.N.K. Jayakody // 2022 2th International Research Conference of SLTC (IRC). – 2022. – P. 93–95.
- Чжан В. LDPC and polar codes in 6G: A comparative study and unified frameworks / В. Чжан, Т.Р. Газизов // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11, № 5. – С. 42–59.
- Чжан В. Применение QC-LDPC-кодов в системе связи БПЛА / В. Чжан, Т.Т. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2025. – Т. 28, № 2. – С. 14–21.
- Чжан В. Разработка адаптивного экспоненциального алгоритма декодирования минимальной суммы / В. Чжан, И. Мухамад, В.М. Саклаков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12, № 4. – С. 1–11.
- Tanner R. A recursive approach to low complexity codes / R. Tanner // IEEE Transactions on Information Theory. – 1981. – Vol. 27. – P. 533–547.
- Jadhav M. Analysis and implementation of soft decision decoding algorithm of LDPC / M. Jadhav, A. Pancholi, A. Sapkal // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2013. – Vol. 4, No. 6. – P. 2380–2384.
- Chen J. Near optimum universal belief propagation based decoding of low-density parity check codes / J. Chen, M.P. Fossorier // IEEE Transactions on Communications. – 2002. – Vol. 50. – P. 406–414.
- Fossorier M.P. Reduced complexity iterative decoding of low-density parity check codes based on belief propagation / M.P. Fossorier, M. Mihaljevic, H. Imai // IEEE Transactions on Communications. – 1999. – Vol. 47. – P. 673–680.
- Chen J. Density evolution for two improved BP-based decoding algorithms of LDPC codes / J. Chen, M.P. Fossorier // IEEE Communications Letters. – 2002. – Vol. 6. – P. 208–210.
- Zeng Y. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges / Y. Zeng, R. Zhang, T.J. Lim // IEEE Communications Magazine. – 2016. – Vol. 54. – P. 36–42.
- Mozaffari M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems / M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, M. Debbah // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21. – P. 2334–2360.
- Ali M.F. Revolutionizing firefighting: UAV-based optical communication systems for wildfires / M.F. Ali, D.N.K. Jayakody, P. Muthuchidambaramanathan // Photonics. – 2024. – Vol. 11. – P. 656.
- Cai X. Characterizing the small-scale fading for low altitude UAV channels / X. Cai, J. Song, J. Rodríguez-Piñeiro // Proc. 17th Int. Conf. Wireless Mobile Commun. – Nice, France: IARIA, 2021. – С. 16–19.
- Singya P.K. A survey on higher-order QAM constellations: Technical challenges, recent advances, and future trends / P.K. Singya, P. Shaik, N. Kumar, V. Bhatia, M.-S. Alouini // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2021. – Vol. 2. – P. 617–655.
- Rybalov D.V. Formation of extended modulation code schemes based on the LDPC codec 5G NR / D.V. Rybalov, A.A. Moiseenko, D.A. Pokamestov, Y.V. Kryukov, A.V. Filatov, and A.M. Zabolotsky // T-Comm. – 2024. – Vol. 18, No. 12. – P. 41–46.
- Чжан Вэйцзя. Оптимизированные алгоритмы декодирования для кодов с низкой плотностью проверок на четность и их применение в системах связи: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2025. – 140 с.

Чжан Вэйцзя

Аспирант Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-2252-2750
Тел.: +7-913-804-36-56
Эл. почта: zhangweijia@ieee.org

Газизов Тальгат Рашитович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. телевидения и управления ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-1192-4853
Тел.: +7-913-826-07-24
Эл. почта: talgat.r.gazizov@tusur.ru

Поступила в редакцию: 21.12.2025.

Принята к публикации: 19.05.2026.

Zhang W., Gazizov T.R.

Applying the adaptive exponential min-sum decoding algorithm in a communication system of low-altitude unmanned aerial vehicles

Relevance. Rayleigh fading decreases communication reliability of low-altitude unmanned aerial vehicles (UAVs), thus raising bit error rate (BER). Low-density parity-check (LDPC) codes being high effective for channel coding reduce the impact of interference caused by such fading. However, system performance depends not only on the coding scheme, but also on the decoding algorithm. The offset min-sum (OMS) algorithm, despite its low computational complexity, demonstrates insufficiently small BER. In contrast, the adaptive exponential min-sum (AEMS) algorithm, while retaining the low complexity, enhances noise immunity through its adaptive correction mechanism. Purpose of the study is to compare BERs of AEMS and OMS algorithms in the Rayleigh fading channel.

Methods. A Rayleigh fading channel model for UAVs and simulation were used. **Results.** In contrast to OMS BER, the average AEMS BER decreased for different SNRs and orders of quadrature amplitude modulation (QAM). This reduction was significant, especially at high SNR levels: almost up to a factor of 12 at SNR=16 dB for 8-QAM. **Practical significance.** Even though the AEMS algorithm has higher computational complexity than the OMS algorithm, it enhances decoding. Therefore, for UAVs with sufficiently high computational resources, AEMS effectively raises communication channel reliability. The results of this study can be used in UAV design.

Keywords: decoding algorithm, LDPC codes, UAV, Rayleigh fading, bit error ratio.

Funding. The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation under grant No. 25-29-00139 (<https://rscf.ru/project/25-29-00139/>) at TUSUR.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-40-45

References

1. Makarenko S.I. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 4. Functional Destroying with Microwave and Laser Weapons. Systems of Control, Communication and Security, 2020, no. 3, pp. 122–157. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304 (in Russ.).
2. Belousov A.O., Gazizov T.R. Podkhody k sozdaniyu metodologii obespecheniya elektromagnitnoy sovместимости sredstv funktsional'nogo porazheniya elektromagnitnym izlucheniym s drugimi radioelektronnyimi sredstvami v sostave

kompleksa protivodeystviya bes-pilotnym letatel'nyim apparatam [Approaches to create a methodology for assuring the electromagnetic compatibility of functional destruction means by electromagnetic radiation with other radioelectronic means of a complex for unmanned aerial vehicles countermeasures]. Materialy XI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konfe-rentsii «Problemy sovershenstvovaniya robototekhnicheskikh i intellektual'nykh sistem letatel'nykh apparatov». [«Problems of enhancement of robotic and intellectual systems of aerial vehicles»]. Proceedings of XI International scientific-technical conference, M., MAI-PRINT, Dec. 10–11, 2020, pp. 1–5 (in Russ.).

3. Belousov A.O., Nosov A.V. [Enhancing the Electromagnetic Immunity of the Unmanned Aerial Vehicle under High-Intensity Electromagnetic Radiation: A Comprehensive Approach]. Systems of Control, Communication and Security, 2025, no. 1, pp. 10–47. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-010-047 (in Russ.).

4. Mazunov D.A., Chernikova E.B., Gazizov T.R. [Electromagnetic Immunity of Unmanned Aerial Vehicle Onboard Electronics to High-Power Electromagnetic Disturbances: Vulnerabilities, Assessment, and Protective Measures]. Journal Achievements of Modern Radioelectronics, 2026. In press (in Russ.).

5. Gazizov T.T. [Methodology for Design of Critical Nodes of Printed Circuit Boards of Unmanned Aerial Systems]. Engineering education, 2026, no. 40. In press (in Russ.).

6. Chen L., Xu J., Djurdjevic I., Lin S. Near-Shannon-limit quasicyclic low-density parity-check codes. IEEE Transactions on Communications, 2004, vol. 52, pp. 1038–1042.

7. Zhang W., Jayakody D.N.K. On the competitiveness of LDPC codes in wireless. SLTC IRC, 2022. pp. 93–95.

8. Zhang W., Gazizov T.R. [LDPC and Polar Codes in 6G: A Comparative Study and Unified Frameworks]. Proceedings of Telecommunication Universities, 2025, vol. 11, no. 5, pp. 42–59 (in Russ.).

9. Zhang W., Gazizov T.T. [Application of QC-LDPC codes in UAV communication system]. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki, 2025, vol. 28, no. 2, pp. 14–21 (in Russ.).

10. Zhang W., Mouhamad I., Saklakov V.M. [Development of adaptive exponential min sum decoding algorithm]. Modeling, optimization and information technology, 2024, vol. 12, no. 4, pp. 1–11 (in Russ.).

11. Tanner R. A recursive approach to low complexity codes. IEEE Transactions on information theory, 2003, vol. 27, pp. 533–547.

12. Jadhav M., Pancholi A., Sapkal A. Analysis and implementation of soft decision decoding algorithm of LDPC. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2013, vol. 4, no. 6, pp. 2380–2384.

13. Chen J., Fossorier M.P. Near optimum universal belief propagation-based decoding of low-density parity check codes. IEEE Transactions on communications, 2002, vol. 50, pp. 406–414.

14. Fossorier M.P., Mihaljevic M., Imai H. Reduced complexity iterative decoding of low-density parity check codes based on belief propagation. IEEE Transactions on communications, 1999, vol. 47, pp. 673–680.

15. Chen J., Fossorier M.P. Density evolution for two improved BP-based decoding algorithms of LDPC codes. IEEE communications letters, 2002, vol. 6, no. 5, pp. 208–210.

16. Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. IEEE Communications Magazine, 2016, vol. 54, pp. 36–42.

17. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y.H., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applica-

tions, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, vol. 21, pp. 2334–2360.

18. Ali M.F., Jayakody D.N.K. Muthuchidambarana-than P. Revolutionizing firefighting: UAV-based optical communication systems for wildfires. *Photonics*, 2024, vol. 11, p. 656.

19. Cai X., Song J., Rodríguez-Piñeiro J., Mogensen P.E., Tufvesson F. Characterizing the small-scale fading for low altitude UAV channels. *ICWMC 2021: The Seventeenth International Conference on Wireless and Mobile Communications*, Nice, France, IARIA, 2021, pp. 16–19.

20. Singya P.K., Shaik P., Kumar N., Bhatia V., Alouini M.-S. A survey on higher-order QAM constellations: Technical challenges, recent advances, and future trends. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, vol. 2, pp. 617–655.

21. Rybalov D.V., Moiseenko A.A., Pokamestov D.A., Kryukov Y.V., Filatov A.V., Zabolotsky A.M. Formation of extended modulation code schemes based on the LDPC codec 5G NR. *T-Comm*, 2024, vol. 18, no. 12, pp. 41–46.

22. Zhang W. Optimizirovannyye algoritmy decodirovaniya dlya kodov s nizkoy plotnost'iy proverok na tsetkost' i ih primeneniye v sistemah svyazi [Optimized Algorithms of Decoding for Low-density Parity-check codes and its Using in Communication Systems], PhD Thesis. Tomsk, TUSUR, 2025, 140 p.

Weijia Zhang

Postgraduate student, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0003-2252-2750

Phone: +7-913-804-36-56

Email: zhangweijia@ieee.org

Talgat R. Gazizov

Doctor of Science in Engineering, Head,

Department of television and control, TUSUR

40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0002-1192-4853

Phone: +7-913-826-07-24

Email: talgat.r.gazizov@tusur.ru

Received: 21.12.2025.

Accepted: 19.05.2026.