

МЕТОД МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ ПО МОЩНОСТИ

В статье рассмотрен метод неортогонального множественного доступа с разделением пользовательских каналов по мощности PD-NOMA для многоканальных систем связи беспроводного широкополосного доступа. Приведено сравнение характеристик пропускной способности и помехоустойчивости каналов связи PD-NOMA и OFDMA, полученных в результате расчета и математического моделирования. Рассмотрен метод последовательного подавления помех SIC, который применяется для демодуляции PD-NOMA сигнала. Продемонстрирована эффективность метода PD-NOMA и объясняется целесообразность его использования на физическом уровне беспроводных систем связи широкополосного доступа.

Ключевые слова: неортогональный множественный доступ, уплотнение каналов, широкополосный беспроводной доступ, помехоустойчивость, пропускная способность.

Введение. Технологии множественного доступа развиваются по двум направлениям — OMA (Orthogonal Multiple Access — ортогональный (квазиортогональный) метод множественного доступа) и NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access — неортогональный метод множественного доступа). Используя ортогональный (квазиортогональный) метод множественного доступа, частотно-временной ресурс связи распределяется между пользователями с помощью ансамбля ортогональных (квазиортогональных) сигналов. Основным принципом всех OMA систем является максимально возможное исключение межканальной интерференции. При прохождении сигнала через канал распространения радиоволн практически всегда возникает неконтролируемая межканальная интерференция, что является помехой при разделении каналов и демодуляции сигнала.

В 2015 году на Всемирной конференции радиосвязи (ВКР-2015) [1, 2] разработчиками были предложены новые технологии множественного доступа, которые предлагается заложить в основу физического уровня новых беспроводных широкополосных систем связи: SCMA (Sparse Code Multiple Access) [3–5], MUSA (Multi User Shared Access), PDMA (Pattern Division Multiple Access) и NOMA.

В настоящий момент одним из наиболее перспективных методов разделения каналов является группа методов NOMA, в которой используется контролируемая межканальная интерференция для увеличения спектральной эффективности. В работе рассматривается метод PD-NOMA (Power Division

NOMA), который принадлежит к группе NOMA и является одним из наиболее перспективных.

На период 2013–2016 годов пришелся основной объем обзорных публикаций, в которых присутствовали концепция и обоснование эффективности NOMA [6–16]. Более глубокие научные работы публикуются с 2016 года и по сей день. Целью настоящей работы является оценка эффективности PD-NOMA по сравнению с методами из группы OMA.

Метод PD-NOMA. В технологии неортогонального множественного доступа с разделением каналов по мощности PD-NOMA для уплотнения пользовательских каналов в едином частотно-временном ресурсе используется мощностной домен. Другими словами, несколько абонентских каналов одновременно занимают одну и ту же полосу частот, но имеют отличную друг от друга мощность. Мощности каждого канала должно быть достаточно для обеспечения требуемого качества передачи. Недостаток выделенной мощности приведет к росту ошибок демодуляции канальных символов, а переизбыток мощности приведет к увеличению межканальной интерференции и уменьшению помехоустойчивости соседних каналов.

Рассмотрим формирование сигнала PD-NOMA нисходящего потока (Downlink), который содержит в себе K пользовательских каналов. Пусть X_k — вектор канальных символов k -го канала, а p_k — парциальная мощность k -го канала. Назовем каналы с мощностью-каналами верхнего уровня, а каналы с мощностью-каналами нижнего уровня относительно k -го канала. Тогда общий транспорт-

ный сигнал S формируется по следующему правилу:

$$S = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \cdot X_k.$$

Структурная схема канала связи PD-NOMA изображена на рис. 1. Сигнал Z_k на входе приемника k -го абонента представляет собой транспортный сигнал S , прошедший через k -й индивидуальный канал распространения радиоволн:

$$Z_k = H_k \otimes S + N_k,$$

где Z_k — сигнальный вектор на входе k -го приемника, S — сигнальный вектор на выходе передатчика, H_k — вектор значений импульсной характеристики канала передачи, N_k — вектор отчетов аддитивной помехи, а \otimes — операция свертки.

Демодуляция принятого сигнала осуществляется методом последовательного подавления помех SIC (Serial interference cancellation) [17], который заключается в последовательной демодуляции, регенерации (воссоздание изначальной формы сигнала) и компенсации (вычитание регенерированного сигнала) наиболее мощных сигналов для дальнейшей демодуляции наименее мощных. Первым демодулируется сигнал пользователя с наибольшей мощностью, который регенерируется и устраняется из принятого сигнала (устраняется интерференционная помеха первого канала), после чего становится возможной демодуляция второго по уровню мощности пользовательского сигнала. По цепочке осуществляется демодуляция всех каналов. Структура SIC представлена на рис. 2.

Пусть $SINR_{m,k}$ — (Signal-to-interference-plus-noise ratio) отношение мощности сигнала к мощности шума и интерференционной помехи, при котором происходит демодуляция m -го канала пользователя в приемнике k -го пользователя. Все возможные вариации $SINR$ представлены в виде матрицы на рис. 3. Если $m=k$, то k -й пользователь демодулирует собственный канал (диагональ матрицы). Будем считать, что для каждого абоненту достаточно демодулировать собственный канал, при этом требуется обязательная демодуляция каналов верхнего уровня $m < k$, но не требуется демодуляция каналов нижнего уровня $m > k$. Примем допущение, что каналы верхнего уровня демодулируются и компенсируются безошибочно, а системная помеха interfering каналов нижнего уровня представляет собой АБГШ.

Первый пользователь сразу может демодулировать свой собственный канал на фоне системной помехи каналов $2...K$ нижнего уровня, при этом $SINR_{1,1}$:

$$SINR_{1,1} = \frac{\alpha_1 \cdot P_1}{\alpha_1 \cdot \sum_{i=2}^K P_i + n_1}$$

где α_1 — коэффициент ослабления в канале UE_1 , P_1 — мощность канала UE_1 , n_1 — мощность АБГШ в канале UE_1 , P_i — мощность каналов нижнего уровня.

Второй пользователь для демодуляции собственного канала должен сначала демодулировать канал первого пользователя с $SINR_{1,2}$:

$$SINR_{1,2} = \frac{\alpha_2 \cdot P_1}{\alpha_2 \cdot \sum_{i=2}^K P_i + n_2}$$

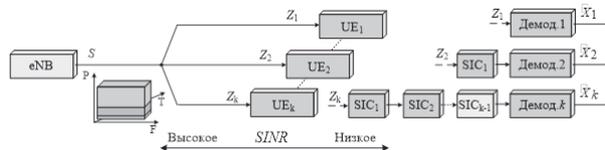


Рис. 1. Передача и прием PD-NOMA сигнала

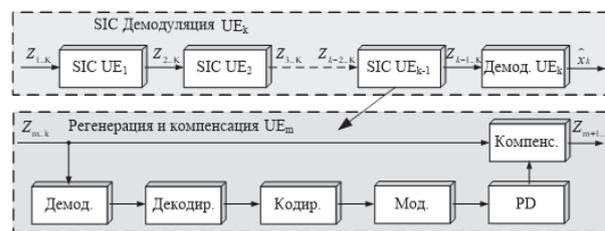


Рис. 2. Структурная схема SIC приемника

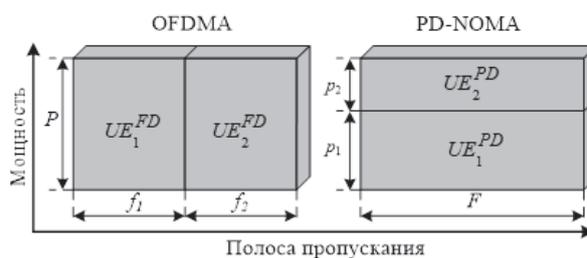


Рис. 3. Мультиплексирование каналов в PD-NOMA и OFDMA

Демодулированный сигнал UE_1 регенерируется и удаляется из общего принятого сигнала, после чего становится возможной демодуляция собственного канала UE_2 с $SINR_{2,2}$ на фоне системной помехи каналов $3...K$:

$$SINR_{2,2} = \frac{\alpha_2 \cdot P_2}{\alpha_2 \cdot \sum_{i=3}^K P_i + n_2}$$

Для демодуляции последним K -м пользователем своего канала требуется последовательно демодулировать и компенсировать каналы верхнего уровня $m < K$ с $SINR_{m,k}$:

$$SINR_{m,k} = \frac{\alpha_k \cdot P_m}{\alpha_k \cdot \sum_{i=m+1}^K P_i + n_k}, m < k.$$

В случае безошибочной компенсации сигналов $m < K$ интерференционная помеха полностью устраняется. Тогда сигнал последнего K -го пользователя в приемнике K -го пользователя демодулируется с $SINR$:

$$SINR_{m=K,K} = \frac{\alpha_K \cdot P_K}{n_K}$$

Обобщенное выражение для расчета $SINR$, с которым k -й пользователь демодулирует собственный сигнал:

$$SINR_k = \begin{cases} \frac{\alpha_k \cdot P_k}{\alpha_k \cdot \sum_{i=k+1}^K P_i + n_k} & 1 \leq k < K \\ \frac{\alpha_k \cdot P_k}{n_k} & k = K \end{cases} \quad (1)$$

По теореме Шеннона [18] теоретическая предельная пропускная способность C канала связи в полосе пропускания F :

$$C = F \cdot \log_2(1 + SINR). \quad (2)$$

Тогда выражение для вычисления предельной пропускной способности может быть получено из (1) и (2). В многоканальной системе из K каналов с разделением по мощности, одновременно использующих единую полосу F при известных парциальных мощностях в каналах p_1, \dots, p_K пропускная способность k -го канала определяется:

$$C_k = \begin{cases} F \cdot \log_2\left(1 + \frac{\alpha_k \cdot p_k}{\alpha_k \cdot \sum_{i=k+1}^K p_i + n_k}\right) & 1 \leq k < K \\ F \cdot \log_2\left(1 + \frac{\alpha_k \cdot p_k}{n_k}\right) & k = K \end{cases} \quad (3)$$

Сравнение PD-NOMA и OMA. Группа методов OMA включает в себя ряд ортогональных и квази-ортогональных методов уплотнения, поэтому для сравнения с PD-NOMA выделим один из наиболее используемых в настоящее время методов — OFDMA, который, условно, можно отнести к частному случаю FDMA.

Рассчитаем суммарную предельную пропускную способность при мультиплексировании обоими методами каналов двух пользователей UE_1 и UE_2 (простейший случай). Предположим, что $UE_{1,2}$ расположены на расстояниях $d_{1,2}$ ($d_1 > d_2$) от передатчика. Рассмотрим распространение сигнала в открытом пространстве, в котором подавляющее влияние на принимаемый сигнал оказывает ослабление α . В первом приближении ослабление сигналов с одинаковой несущей частотой зависит только от расстояния d , поэтому $\alpha_1 < \alpha_2$.

Обозначим $UE_{1,2}^{PD}$ и $UE_{1,2}^{FD}$ за каналы связи PD-NOMA и OFDMA. Пусть F — полоса передачи сигнала, а P — излучаемая мощность сигнала в этой полосе. Оба канала $UE_{1,2}^{PD}$ занимают единый частотный ресурс F , используя для передачи мощности: p_1 — мощность UE_1^{PD} и $p_2 = P - p_1$ — мощность UE_2^{PD} , при этом $p_1 > p_2$ (т.к. $\alpha_1 < \alpha_2$). Для каналов связи OFDMA выделена мощность P и частотный ресурс: f_1 — полоса частот UE_1^{FD} и $f_2 = F - f_1$ — полоса частот UE_2^{FD} . Распределение частотного ресурса и мощности между пользователями представлено на рис. 4.

Воспользуемся (2) и (3) для записи выражения предельной пропускной способности C каналов $UE_{1,2}^{FD}$ и $UE_{1,2}^{PD}$:

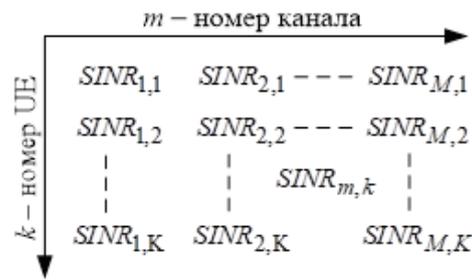


Рис. 4. Комбинация SINR

$$C_1^{FD} = f_1 \cdot \log_2\left(1 + \frac{\alpha_1 \cdot P}{n_1}\right); \quad C_1^{PD} = F \cdot \log_2\left(1 + \frac{\alpha_1 \cdot p_1}{\alpha_1 \cdot p_2 + n_1}\right);$$

$$C_2^{FD} = f_2 \cdot \log_2\left(1 + \frac{\alpha_2 \cdot P}{n_2}\right); \quad C_2^{PD} = F \cdot \log_2\left(1 + \frac{\alpha_2 \cdot p_2}{n_2}\right). \quad (4)$$

В качестве примера рассчитаем $C_{1,2}^{FD}$ и $C_{1,2}^{PD}$ для конкретных значений $d_{1,2}$ и $n_{1,2}$, а также распределения p и f . Пусть расстояния $d_1 = 450$ м и $d_2 = 150$ м, тогда при несущей частоте сигнала $f_0 = 2$ ГГц коэффициенты ослабления — $\alpha_1 = 4,69e-9$ (−83,28 дБ) и $\alpha_2 = 4,22e-7$ (−73,74 дБ). Уровень спектральной мощности АБГШ приемника $n_1 = n_2 = 10^{-10}$ Вт (−100 дБ/Гц). Пусть общий доступный частотный ресурс F , а доступная мощность излучения $P = 1$ Вт. Частотный ресурс в OFDMA разделен пополам между пользователями $f_1 = f_2 = 0,5F$, а в PD-NOMA мощность между пользователями разделена: $p_1 = 0,9$ Вт и $p_2 = 0,1$ Вт.

Согласно (4), общая пропускная способность системы из двух каналов $C_{\Sigma}^{PD} = 8,5$ (бит/с) больше $C_{\Sigma}^{FD} = 7,15$ (бит/с) в 1,18 раза при выбранных условиях распределения ресурса связи. Результат расчета подтверждает, что PD-NOMA в определенных условиях обладает большей пропускной способностью, чем OFDMA.

Рассчитанное соотношение $C_{\Sigma}^{PD} / C_{\Sigma}^{FD}$ может изменяться при ином распределении ресурса связи и канале РРВ.

Моделирование. Целью моделирования является сравнение характеристик помехоустойчивости каналов передачи данных OFDMA и PD-NOMA при одинаковой пропускной способности и одинаковых условиях канала распространения радиоволн (РРВ). Помехоустойчивость оценивается с помощью зависимости вероятности битовой ошибки BER (Bit Error Rate) от SINR, оценка которого происходит на входе демодулятора приемника.

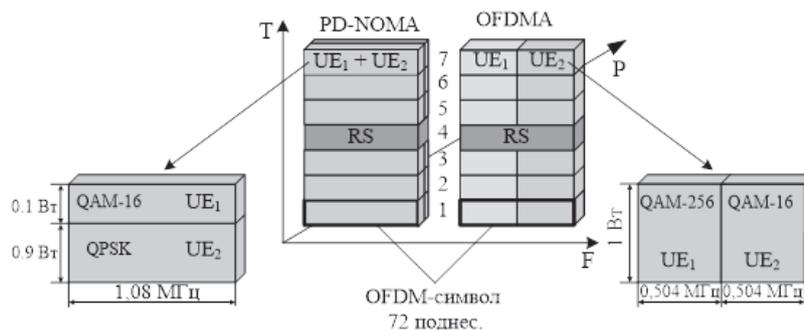


Рис. 5. Конфигурации канала

Конфигурация OFDM-символа

Метод доступа	OFDMA		PD-NOMA	
	UE ₁	UE ₂	UE ₁	UE ₂
Полоса	0,504 МГц	0,504 МГц	1,08 МГц	1,08 МГц
Кол-во поднесущих	36	36	72	72
Мощность	1 Вт	1 Вт	0,1 Вт	0,9 Вт
Модуляция	QAM-256	QAM-16	QAM-16	QPSK

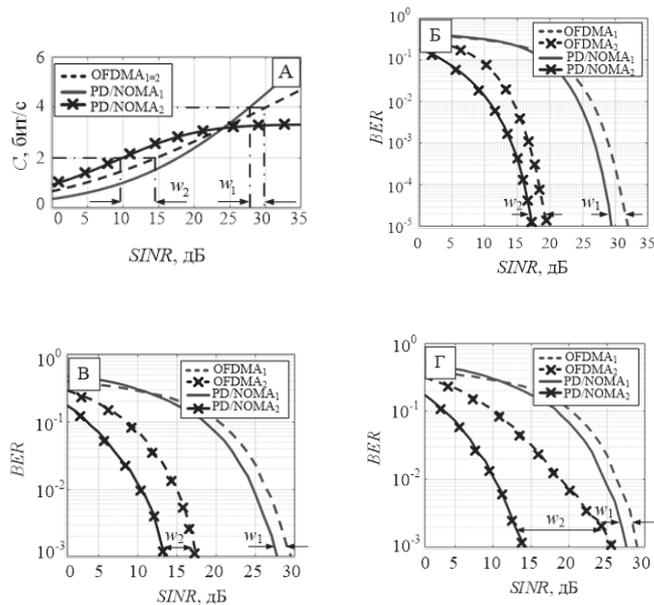


Рис. 6. Результат расчета предельной пропускной способности — (а); моделирования в канале с АБГШ — (б); моделирования в простом многолучевом канале — (в); в сложном многолучевом канале — (г)

В передатчике формируется слот длительностью 0,5 мс и полосой передачи 1,08 МГц, состоящий из семи OFDM-символов (рис. 5). Шесть символов содержат пользовательские данные, а центральный символ содержит опорный сигнал RS (Reference Signal), который используется для процедуры эквалайзирования на приемной стороне. В OFDM-символе длительностью $T_{OFDM} = 71,4$ мкс используется 72 поднесущие с частотным расстоянием $\Delta f = 15$ кГц, а общая полоса передачи — $F = 1.08$ МГц. Парциальные мощности взяты из примера, который представлен во 2-м разделе: $p_1 = 0,9$ Вт и $p_2 = 0,1$ Вт. Конфигурация пользовательских каналов представлена в табл. 1.

При использовании OFDMA под каждый канал выделено 36 поднесущих (половина от доступных). Таким образом в одном OFDM символе передается 288 бит 1-го абонента (QAM-256) и 144 бита 2-го абонента (QAM-16). При использовании PD-NOMA под оба канала выделено 72 поднесущие, а в OFDM символе так же передается 288 бит 1-го абонента (QAM-16) и 144 бита 2-го абонента (QPSK). В среднем на каждой OFDM поднесущей передается 4 бита первого канала и 2 бита второго канала

($C_1 = 4$ бит/с и $C_2 = 2$ бит/с). Конфигурация мультиплексирования каналов представлена на рис. 5.

На рис. 6а приведены рассчитанные по (4) зависимости $C(SINR)$. Величиной w обозначен выигрыш помехоустойчивости при одинаковой пропускной способности и вероятности битовой ошибки. В первом канале при $C_1 = 4$ бит/с значение $w_1 = 2,5$ дБ, а во втором канале при $C_2 = 2$ бит/с значение $w_2 = 5$ дБ. Стоит отметить, что при расчете, а помеха от интерферирующего пользовательского канала представлена в виде нормальной аддитивной помехи с аналогичной мощностью, что является допущением, сделанным для упрощения.

На рис. 6б–г приведены зависимости $BER(SINR)$, полученные в результате моделирования для однолучевого (в качестве помехи — только АБГШ) и для многолучевого (трассы EPA и ETU [19]) каналов РРВ, а величиной w отмечен выигрыш помехоустойчивости каналов PD-NOMA относительно OFDMA при одинаковой скорости передачи. Результат моделирования показал, что во всех сценариях метод PD-NOMA оказался эффективнее OFDMA, а величины выигрыша помехоустойчивости $w_{1,2}$ оказались не менее 2 дБ.

Заключение. В работе рассмотрен метод неортогонального множественного доступа с разделением пользовательских каналов по мощности PD-NOMA, который способен обеспечить выигрыш пропускной способности многоканальной системы в сравнении с используемыми в настоящее время ортогональными (квазиортогональными) методами множественного доступа в случае, если мультиплексируемые каналы обладают различным друг от друга отношением сигнал/шум за счет отличия трасс РРВ.

Согласно результатам проведенного моделирования, каналы связи PD-NOMA способны обладать лучшей помехоустойчивостью по сравнению с OFDMA при одинаковых характеристиках и условиях канала передачи, поэтому метод PD-NOMA может опционально применяться в беспроводных системах связи широкополосного доступа.

Библиографический список

- Marcus M. J. 5G and «IMT for 2020 and beyond» [Spectrum Policy and Regulatory Issues] // IEEE Wireless Communications. 2015. Vol. 22, Issue. 4. P. 2–3. DOI: 10.1109/MWC.2015.7224717.
- Soldani D., Manzalini A. Horizon 2020 and Beyond: On the 5G Operating System for a True Digital Society // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2015. Vol. 10, no. 1. P. 32–42. DOI: 10.1109/MVT.2014.2380581.
- Покаместов Д. А., Демидов А. Я., Крюков Я. В. [и др.]. Формирование и обработка сигналов множественного доступа с разреженным кодом // Электросвязь. 2016. № 10. С. 56–61.
- Покаместов Д. А., Демидов А. Я., Крюков Я. В. Влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов // Доклады ТУСУР. 2016. Т. 19, № 3. С. 65–69.
- Pokamestov D. A., Demidov A. Ya., Kryukov Ya. V., Rogozhnikov E. V. Dynamically changing SCMA codebooks // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998451.
- Крюков Я. В. Формирование и обработка сигналов многоканальных систем связи с разделением каналов по мощности: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2017. 127 с.
- Benjebbour A., Saito K., Li A. Non-orthogonal multiple access (NOMA): Concept, performance evaluation and experimental trials // 2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), January 14, 2015. Morocco: Marrakech, 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/WINCOM.2015.7381343.
- Higuchi K., Benjebbour A. Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) with Successive Interference Cancellation for Future Radio Access // IEICE Transactions on Communications. 2015. Vol. 98, no. 3. P. 403–414.
- Saito Y., Benjebbour A., Kishiyama Yo. [et al.]. System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) // 2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2013. P. 611–615. DOI: 10.1109/PIMRC.2013.6666209.
- Saito Y. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access // 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 2013. P. 1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2013.6692652.
- Крюков Я. В., Демидов А. Я., Покаместов Д. А. Метод неортогонального множественного доступа // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 26-й Междунар. конф., 4–10 сент., 2016 г. В 13 т. / СевГУ. Севастополь, 2016. Т. 4. С. 658–665. ISBN 978-966-335-422-4.
- Ding Z., Yang Zh., Fan P. [et al.]. On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users // IEEE Signal Processing Letters. 2014. Vol. 21, Issue 12. P. 1501–1505. DOI: 10.1109/LSP.2014.2343971.
- Dai L., Wang B., Yuan Yi. [et al.]. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and

future research trends // IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53, Issue 9. P. 74–81. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7263349.

14. Timotheou S., Krikidis I. Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems // IEEE Signal Processing Letters. 2015. Vol. 22, Issue 10. P. 1647–1651. DOI: 10.1109/LSP.2015.2417119.

15. Hayashi Yu., Kishiyama Yo., Higuchi K. [et al.]. Investigations on Power Allocation among Beams in Non-Orthogonal Access with Random Beamforming and Intra-Beam SIC for Cellular MIMO Downlink // 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). 2013. P. 1–5. DOI: 10.1109/VTCFall.2013.6692251.

16. Zhang Yi, Wang H.-M., Yang Q. [et al.]. Secrecy Sum Rate Maximization in Non-Orthogonal Multiple Access // IEEE Communications Letters. 2016. Vol. 20, Issue 5. P. 930–933. DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2539162.

17. Patel P., Holtzman J. Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DS/CDMA system // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1994. Vol. 12, Issue 5. P. 796–807. DOI: 10.1109/49.298053.

18. Шеннон К. Э. Работы по теории информации и кибернетике: пер. с англ. / под ред. Р. Л. Добрушина, О. Б. Луланова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 829 с.

19. ETSI TS 36.104: V9.4.0 (2010–07). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 9.4.0 Release 9). France: Valbonne, 2010. 98 p.

КРЮКОВ Яков Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникации и основы радиотехники».

SPIN-код: 3956-3916

AuthorID (РИНЦ): 886523

Адрес для переписки: kryukov.tusur@gmail.com

ДЕМИДОВ Анатолий Яковлевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Телекоммуникации и основы радиотехники».

AuthorID (РИНЦ): 602730

Адрес для переписки: demidovay@tor.tusur.ru

ПОКАМЕСТОВ Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникации и основы радиотехники».

SPIN-код: 7819-9512

AuthorID (РИНЦ): 860831

Адрес для переписки: dmaltomsk@mail.ru

РОГОЖНИКОВ Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникации и основы радиотехники».

SPIN-код: 8830-4593

AuthorID (РИНЦ): 880602

Адрес для переписки: udzhon@mail.ru

АБЕНОВ Ренат Рамазанович, старший преподаватель кафедры «Телекоммуникации и основы радиотехники».

SPIN-код: 7104-4669

AuthorID (РИНЦ): 926863

Адрес для переписки: abenov.rr@gmail.com

Для цитирования

Крюков Я. В., Демидов А. Я., Покаместов Д. А., Рогожников Е. В., Абеннов Р. Р. Метод множественного доступа с разделением каналов по мощности // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 184–188. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-184-188.

Статья поступила в редакцию 01.10.2018 г.

© Я. В. Крюков, А. Я. Демидов, Д. А. Покаместов, Е. В. Рогожников, Р. Р. Абеннов