

Раздел IV. Связь, навигация и наведение

УДК 621.391.825

DOI 10.23683/2311-3103-2018-1-220-227

П.В. Комысов, А.В. Надымов

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ СТАНДАРТА LTE-A

Целью данной работы является исследование интерференции в гетерогенных сетях стандарта LTE на примере макропикосценария в зависимости от расположения абонентов в рамках зоны макропикопокрывтия. В гетерогенных сетях LTE-A пикоБС развернуты для адекватной разгрузки трафика из макроуровня и сокращения расстояния между базовой и мобильной станцией. Однако макроБС вызывает сильные помехи для пикоМС из-за её более высокой мощности передачи. Следовательно, межсетевые помехи являются самой большой проблемой в LTE-A. Для изучения интерференции в гетерогенных сетях был проанализирован как материал российских ученых, так и зарубежные статьи. Сначала выбирается местоположение пикоМС внутри макросети. Так как чем ближе пикоМС к пикоБС, тем меньше интерференции наблюдается. Следовательно, пикоМС размещены на границе зоны обслуживания пикоБС для исследования интерференции в гетерогенной сети. Далее, для каждой БС производятся расчеты по своей модели потерь на трассе. Для макроБС применяется модель Окамуры-Хата. К пикоБС применяется особая модель, которая учитывает потери при многократном прохождении сигнала через пол, от стен, что позволяет предусмотреть такие характеристики, как повторное использование частоты на различных этажах здания, дистанционный коэффициент потерь мощности. После выводится общая формула для расчета параметра отношения сигнал/шум и интерференция. На основании расчетов при различных параметрах БС приведены графики для выявления оптимального случая, когда интерференция будет наименьшей. В ситуациях, когда размер пикосоты увеличивается и когда пикосота приближается к макросоте, большее количество пикоМС расположено на краю пикосоты. Для каждой пикоМС вычисляется расстояние между её местоположением и расположением пикоБС, а также расстояние между местоположением пикоМС и расположением макроБС. Затем два расстояния используются для расчета уровня сигнала, принимаемого от желаемого источника (пикоБС), и уровня интерференции, полученной от макроБС. Кроме того, пикоМС распределяются согласно их SINR от высшего к низшему. В заключение представлены рекомендации по улучшению интерференционной картины в макропикосценарии и отображены некоторые основные аспекты технологии гетерогенных сетей, а также будут сделаны выводы из неблагоприятных сценариев гетерогенной развертки сети и даны рекомендации по оптимизации гетерогенного планирования.

LTE; гетерогенные сети; макросота; пикосота; макробазовая станция (макроБС); пикобазовая станция (пикоБС); интерференция; улучшенная координация межсетевой интерференции (eICIC); отношение сигнал/шум и интерференции (SINR).

P.V. Komysov, A.V. Nadymov

INVESTIGATION OF INTERFERENCE IN THE HETEROGENEOUS NETWORKS OF THE LTE-A STANDARD

The aim of this paper is to investigate interference in heterogeneous networks of the LTE standard using the example of the Macro-Picot scenario, depending on the location of subscribers within the Macro-Picot coverage area. In heterogeneous LTE-A networks, pico-BSs are deployed to adequately discharge traffic from the macro-level and to reduce the distance between the base

station and the mobile station. However, the macro-BS causes strong interference to the pico-MS due to its higher transmit power. Therefore, inter-cell interference is the biggest problem in LTE-A. To study the interference in heterogeneous networks, both the material of Russian scientists and foreign articles were analyzed. First, the location of the pico-MS within the Macro network is selected. Because the closer the pico-MS to the pico-BS, the less interference there is. Therefore, pico-MSs are located on the border of the pico-BS service area to investigate interference in a heterogeneous network. Further, for each BS, calculations are made for its model of path loss. For Macro-BS, the Okamura-Hata model is applied. A special model is applied to the pico-BS, which takes into account losses during repeated passage of the signal through the floor, from the walls, which allows to provide such characteristics as frequency reuse at different floors of the building, remote power loss factor. After, a general formula is derived for calculating the signal-to-noise ratio and interference. Based on the calculations for various parameters of the BS, graphs are given for identifying the optimal case when the interference is minimal. In situations where the size of the picocell increases and when the picocell approaches the macrocell, more pico-MS is located at the edge of the picocell. For each pico-MS, the distance between its location and the location of the pico-BS is calculated, as well as the distance between the pico-MS position and the location of the macro-BS. Then, two distances are used to calculate the level of the signal received from the desired source (pico-BS), and the interference level obtained from the macro-BS. In addition, pico-MS is distributed according to their SINR from top to bottom. In conclusion, recommendations for improving the interference pattern in the Macro-Picocell scenario are presented, and some of the main aspects of heterogeneous network technology are displayed, and outputs from the unfavorable scenarios of the heterogeneous network sweep are made and recommendations for optimizing heterogeneous planning are given.

LTE; heterogeneous networks; macro cell; picocell; macro base station (macro-BS); pico base station (pico-BS); interference; enhanced inter-cell interference coordination (eICIC); signal-to-noise ratio and interference (SINR).

Введение. Постоянно растущие требования к пропускной способности систем беспроводного широкополосного доступа стимулировали бурный рост и практическое развёртывание неоднородных LTE сетей связи [1, 2]. Основная особенность гетерогенных сетей состоит в том, что в широкой зоне покрытия макроБС дополнительно разворачиваются маломощные пико- и фемтоБС. Данный подход позволяет значительно увеличить плотность расположения точек доступа и тем самым увеличить пропускную способность сети связи, а также значительно снизить уровень интерференции для абонентов, находящихся на границе зоны обслуживания сот [14].

Поскольку операторы внедряют малые соты с использованием тех же частот, что и у макросот, малые соты и макросоты сталкиваются с интерференцией, которая негативно влияет на пропускную способность и емкость беспроводной сети [12]. Но в LTE-A предусматривается внедрение технологии, которая управляет радиоинтерференцией – eICIC (англ. Enhanced Inter-Cell Interference Coordination – улучшенная координация межсотовой интерференции). eICIC предназначена для улучшения координации между сотами и снижения интерференции [16].

Задача технологии eICIC стандарта LTE-A состоит в том, чтобы эффективно вернуть и использовать пикосоты в интерферирующей макросети; чтобы увеличить пропускную способность сети и качество обслуживания пользователя и в значительной степени разгрузить макроуровень при помощи распределения абонентов по пикосотам; чтобы сбалансировать загруженность сети [15].

В стандарте LTE-A технология eICIC использует распределение ресурсов во временной области между макро- и пикоуровнями. Во время определенных субкадров макроБС прекращает передавать трафик или передает его с пониженной мощностью. В таких субкадрах пикоБС может осуществлять передачу данных МС, наиболее подверженным воздействию внутриканальных помех со стороны макроБС. Эти субкадры называются «Почти пустыми» субкадрами (Almost Blank Sub-

frames, ABS) [16]. ABS предполагают специальный формат субкадров, в которых либо отсутствует передача опорных сигналов, либо их заменяют сигналами демодуляции, передаваемыми с низкой мощностью. Другими словами, технология eICIC позволяет пикоБС использовать субкадры с ограниченной активностью на краю соты, в то время как обслуживание пользователей макроБС прекращается во всех субкадрах ABS, что позволяет сократить влияние помех от макроБС на краю пикосоты [17]. На рис. 1 раскрыто понятие eICIC между макроБС и пикоБС с использованием ABS.

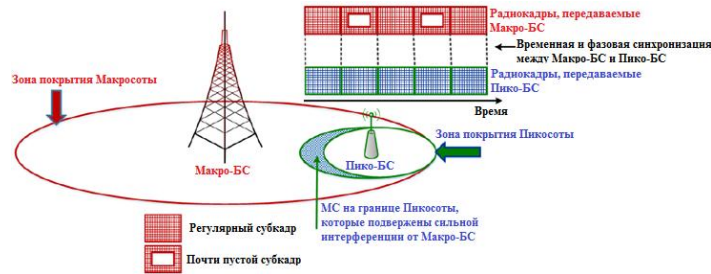


Рис. 1. Концепция ABS

Развёртывание макропикосети. В качестве простого сценария выбрана макропикосеть (рис. 2). МС размещена случайным образом между обеими базовыми станциями. МакроБС тщательно спланирована оператором сотовой связи с учетом требований покрытия и находится в точке начала координат (0;0) декартовой плоскости (x;y). Пикосота связана с макросотой, помещенной в точке доступа, где имеется более плотная популяция. Как было сказано ранее, пикосота находится в зоне охвата макросоты, что увеличивает ёмкость сети и повышает скорость передачи данных [8].

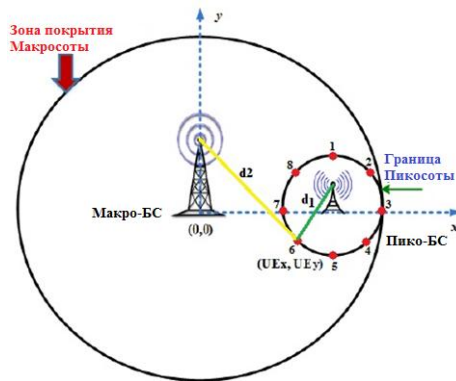


Рис. 2. Местоположение абонентов в макропикосети

На рис. 2 d_1 – расстояние между МС и пикоБС, d_2 – расстояние между МС и макроБС. Они определяются математически, используя формулу евклидова расстояния между двумя точками в пространстве:

$$d_1 = r_p; \tag{1}$$

$$d_2 = \sqrt{(MeNB_x - UE_x)^2 + (MeNB_y - UE_y)^2}, \tag{2}$$

где r_p – радиус покрытия пикоБС, м; $MeNB_x$, $MeNB_y$ – координаты макроБС; UE_x , UE_y – координаты мобильной станции (МС).

В начале примера выбран город средних размеров, где находится макроБС, расчет производится в совмещенном канале «вниз», пикоБС находится внутри помещения (в офисе) на 2 этаже, макроБС является интерферирующей. Следует отметить, что для макроБС и пикоБС применяются разные модели потерь на трассе. Для макроБС применяется модель Окамуры–Хата. К пикоБС применяется особая модель, которая учитывает потери при многократном прохождении сигнала через пол, от стен, что позволяет предусмотреть такие характеристики, как повторное использование частоты на различных этажах здания, дистанционный коэффициент потерь мощности.

Основная модель для расчета потерь внутри строения, согласно рекомендаций МСЭ-R P.1238-5, имеет следующий вид:

$$L = 20 \lg(f) + N \cdot \lg(R) + L_f(n) - 28 \text{ дБ}, \quad (3)$$

где R – расстояние от пикоБС до МС, м; N – дистанционный коэффициент потерь мощности; f – несущая частота, МГц; L_f – коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через пол, дБ; n – количество этажей между базовой станцией и переносным терминалом ($n \geq 1$).

Результирующая формула отношения сигнал/(шум+интерференция), с помощью которой будет производиться исследование интерференции в макропикосети:

$$SINR = \frac{P_{TX, \text{пико}} + G_{\text{пико}} - (56,36 + 30 \lg(d_1))}{P_{TX, \text{макро}} + G_{\text{макро}} - (162,25 - 13,82 \lg(h_{\text{БС}}) + (44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}})) \lg(d_2) - 2,88 \cdot h_{\text{МС}}) + P_{\text{ш}}}, \quad (4)$$

где $P_{TX, \text{макро}}$ – мощность излучения макроБС; $P_{TX, \text{пико}}$ – мощность излучения пико-БС; $P_{\text{ш}}$ – мощность шума; $G_{\text{пико}}$ – коэффициент усиления антенны пикосоты; $G_{\text{макро}}$ – коэффициент усиления антенны макросоты; $h_{\text{БС}}$ – высота макроБС; $h_{\text{МС}}$ – высота МС.

Интерференционный анализ. По соотношению (4) произведен расчет, результаты которого представлены на рис. 3. Согласно общепринятому отображению SINR-CQI, в данной работе рассматриваются 3 случая: приёма нет; переход от QPSK на 16QAM; переход от 16QAM на 64QAM. В данном случае, если $SINR \geq (-6,7)$ дБ, то пикоБС может обслуживать МС, иначе приёма нет.

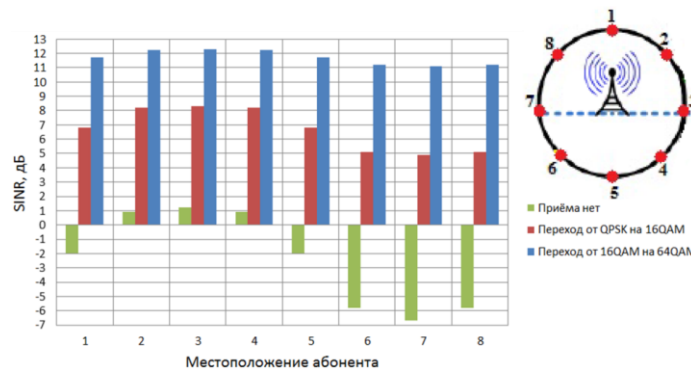


Рис. 3. Диаграмма зависимости SINR от местоположения абонентов

Из графика видно, что с увеличением расстояния между макроБС и пикоБС растёт значение SINR (уменьшается разбег) абонентов, находящихся на границе зоны обслуживания пикосоты. Это говорит о том, что чем выше значение SINR, тем выше CQI, а также пикоБС выбирает для МС лучшую схему модуляции и кодирования для передачи по нисходящему каналу. Отсюда можно сделать вывод:

если радиус покрытия макроБС будет стремиться к бесконечности при неизменном радиусе пикоБС, то SINR абонентов на границе зоны обслуживания пикоБС будет распределено равномерно.

Влияние размера пикосоты. В дальнейшей части работы рассмотрены зависимости распределения SINR от различных размеров пикосот. Уменьшение размера сот может увеличить ёмкость сети сотовой связи. Обычно пикосоты имеют размеры сот до 200 метров в радиусе [12]. Пикосоты развернуты для расширения зоны покрытия в тех районах, где сигнал макросоты не может достичь МС, и увеличения ёмкости в плотных «горячих точках», таких как стадионы. Тем не менее размер пикосот играет важную роль в определении их эффективного покрытия. Влияние различных размеров пикосоты на распределение SINR в пределах пикосоты в макросети сотовой связи анализируется с использованием программного продукта MathCad [3] (рис. 4).

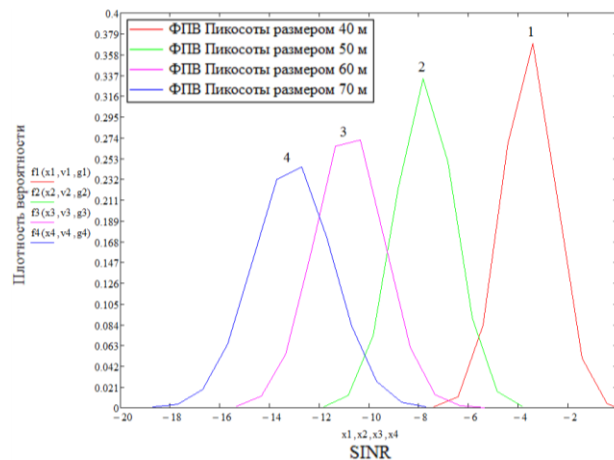


Рис. 4. Распределение SINR в пикосотах с различными размерами сот

Как видно из результатов моделирования, когда пикосота становится больше по величине, SINR значительно падает и пользователи, расположенные близко к краям соты, подвержены сильной интерференции от макроБС. В какой-то момент (кривая 4) становится невозможным обслуживание пикоМС, так как SINR становится ниже порогового значения, соответствующего наименьшему возможному значению CQI. Если пикосоты сделаны слишком большими по сравнению с зоной покрытия макросоты, то согласно сценарию 4, где размер пикосоты составляет 70 метров в радиусе, интерференция преобладает над полезным сигналом. Обоснованные и приемлемые значения SINR могут наблюдаться в пределах пикосоты в диапазоне размеров соты от 40 до 70 метров в макросотовой сети с радиусом покрытия 1 км. Пикосота размером 40 м в радиусе является «лучшей» среди этих случаев, так как она дает значения SINR выше порогового.

Влияние удаленности пикосоты от макроБС. Кроме того, исследуется влияние размещения пико-БС в непосредственной близости от макроБС и на границе зоны покрытия макросоты. Проанализированы четыре различных расположения пикосоты вокруг макросоты в ее зоне покрытия с точки зрения распределения SINR пикоМС. Размер пикосоты для данного моделирования составляет 40 метров в радиусе. Во всех четырех расположениях её размер остается таким же.

Результат моделирования дает анализ производительности пикосоты с точки зрения распределения SINR в пикосоте. Четыре кривые графически изображены для различной близости пикосоты от макроБС. Согласно рис. 5, чем ближе пикоБС распо-

ложена к макроБС, тем выше интерференция от макроБС при худших значениях SINR пикоМС. Как видно из рис. 5, SINR ниже допустимого значения, следовательно, пикоМС не будут подключены к соответствующей базовой станции.

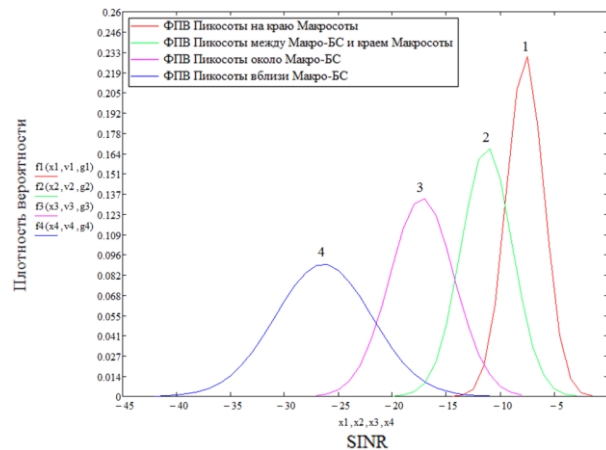


Рис. 5. Распределение SINR в пикосотах при различной отдаленности от макроБС

Можно заметить, что вся кривая (кривая 4) имеет отрицательное значение SINR, т.е. ниже допустимого порогового значения для сценария 4, где пикоБС расположена близко к макроБС. В результате сильной интерференции от макроБС, пикоМС имеют низкие значения SINR, чтобы поддерживать минимальный индекс-MCS (QPSK), который необходим для планирования пользователя. Следовательно, близкое расположение пикоБС к макроБС не пригодно к рассмотрению для целей моделирования. На основе исследований распределения SINR в пикосоте можно сделать вывод о том, что лучшее местоположение пикосоты внутри макросоты на краю зоны покрытия макросоты.

Заключение. Введение пикоБС в гетерогенную сеть может значительно повысить производительность сети. На основании результатов, полученных в ходе исследования в данной работе, можно вынести следующие рекомендации:

- ◆ В макропикосоте пикоБС следует располагать на расстоянии, равном радиусу пикопокрывтия от границы макропокрывтия;
- ◆ Оптимальный размер пикосоты, с точки зрения обеспечения наивысшего значения CQI, должен составлять $R_m/25$, где R_m – радиус макросоты. При таком размере она примет значение SINR выше порогового, которое сможет обеспечить MCS QPSK.

Кроме того, обеспечение лучшего пространственного повторного использования спектра также позволяет снизить интерференцию в макропикосоте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Белявский В.А.* HetNet – настоящее и будущее сетей мобильной связи // Вестник связи. Мобильный мир. – М., 2014. – Вып. 8. – С. 30-37.
2. *Гольдштейн Б.С.* Сети связи пост NGN. – СПб.: БХВ Петербург, 2014. – 160 с.
3. *Дьяконов В.П.* Система MathCAD: Справочник. – М.: Радио и связь, 1993. – 128 с.
4. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Вильямс, 2003. – 1107 с.
5. *Тихвинский О.В.* Сети мобильной связи LTE технологии и архитектура. – М.: ЭкоТрендз, 2010. – 281 с.

6. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: пер с англ. – М.: Радио и связь, 2004. – 1104 с.
7. *Шахнович И.В.* Современные технологии беспроводной связи. – М.: Техносфера, 2007. – 287 с.
8. *Montejo J., Wei Y., Ji T.* A survey on 3GPP Heterogeneous Networks. Qualcomm Inc. // *IEEE Wireless Communications*. – H., 2011. – Vol. 18, no. 3. – P. 10-21.
9. *Ghosh A.* Fundamentals of LTE. – 1st ed. – H.: Prentice Hall, 2011. – 464 p.
10. *Ghosh A., Ratasuk R.* Essentials of LTE and LTE-A. – 1st ed. – H.: Cambridge University Press, 2011. – 492 p.
11. *Hamalainen S.* LTE Self-Organising Networks (SON) Network Management Automation for Operational Efficiency. – 1st ed. – H.: John Wiley & Sons, 2012. – 428 p.
12. JPL's Wireless Communication Reference Website, "Cellular Telephone Networks: Cell Sizes". – Available: <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr04/cellplan/cellsizes.htm>.
13. *Khan F.* LTE for 4G Mobile Broadband. – 1st ed. – H.: Cambridge University Press, 2009. – 249 p.
14. *Pauli V., Naranjo J., Seidel E.* Heterogeneous LTE networks and inter-cell interference coordination // Normor Research GmbH. – H., Dec. 2010. – P. 1-9.
15. *Pedersen K.I., Wang Y., Stanislaw S., Frederiksen F.* Enhanced inter-cell interference coordination in co-channel multi-layer LTE-Advanced networks // *IEEE Wireless Communications*. – 2013. – Vol. 20, No. 3. – P. 120-127.
16. *E. El Shaer* Interference Management in LTE-Advanced Heterogeneous Networks Using Almost Blank Subframes: M.Sc. thesis. – Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2012. – P. 76.
17. *Wang Y., Pedersen K.I.* Performance analysis of enhanced inter-cell interference coordination in LTE-Advanced Heterogeneous Networks // *IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. – H., May 2012. – P. 1-5.
18. *Zarrinkoub H.* Understanding LTE with Matlab. – H.: John Wiley & Sons Ltd, 2014. – 490 p.
19. *Rappaport T.S.* Wireless communications principles and practice. – 2nd ed. – H.: Prentice Hall, 2002.
20. *Mehlfuhrer C., Wrulich M., Ikuno J.C.* Simulating the Long Term Evolution physical layer // in Proc. of 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009). – H.: Glasgow, Scotland, 2009. – P. 1471-1478.

REFERENCES

1. *Belyavskiy V.A.* HetNet – nastoyashchee i budushchee setey mobil'noy svyazi [HetNet-present and future of mobile networks], *Vestnik svyazi. Mobil'nyy mir* [Vestnik svyazi. Mobile world]. Moscow, 2014, Issue 8, pp. 30-37.
2. *Gol'dshteyn B.S.* Seti svyazi post NGN [Communication network NGN post]. Saint Petersburg: BKhV Peterburg, 2014, 160 p.
3. *D'yakonov V.P.* Sistema MathCAD: Spravochnik [The MathCAD Handbook]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 128 p.
4. *Sklyar B.* Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye [Digital communication. The theoretical basis and practical application]. Moscow: Vil'yams, 2003, 1107 p.
5. *Tikhvinskiy O.V.* Seti mobil'noy svyazi LTE tekhnologii i arkhitektura [Mobile network LTE technology and architecture]. Moscow: EkoTrendz, 2010, 281 p.
6. *Feer K.* Besprovodnaya tsifrovaya svyaz'. Metody modulyatsii i rasshireniya spektra: per s angl. [Wireless digital communication. Methods of modulation and spread spectrum: translated from English]. Moscow: Radio i svyaz', 2004, 1104 p.
7. *Shakhnovich I.V.* Sovremennyye tekhnologii besprovodnoy svyazi [Modern technologies of wireless communication]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 287 p.
8. *Montejo J., Wei Y., Ji T.* A survey on 3GPP Heterogeneous Networks. Qualcomm Inc., *IEEE Wireless Communications*. H., 2011, Vol. 18, no. 3, pp. 10-21.
9. *Ghosh A.* Fundamentals of LTE. 1st ed. H.: Prentice Hall, 2011, 464 p.
10. *Ghosh A., Ratasuk R.* Essentials of LTE and LTE-A. 1st ed. H.: Cambridge University Press, 2011, 492 p.

11. Hamalainen S. LTE Self-Organising Networks (SON) Network Management Automation for Operational Efficiency. 1st ed. H.: John Wiley & Sons, 2012, 428 p.
12. JPL's Wireless Communication Reference Website, "Cellular Telephone Networks: Cell Sizes". Available: <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr04/cellplan/cellsize.htm>.
13. Khan F. LTE for 4G Mobile Broadband. 1st ed. H.: Cambridge University Press, 2009, 249 p.
14. Pauli V., Naranjo J., Seidel E. Heterogeneous LTE networks and inter-cell interference coordination, *Normor Research GmbH*. H., Dec. 2010, pp. 1-9.
15. Pedersen K.I., Wang Y., Stanislaw S., Frederiksen F. Enhanced inter-cell interference coordination in co-channel multi-layer LTE-Advanced networks, *IEEE Wireless Communications*, 2013, Vol. 20, No. 3, pp. 120-127.
16. E. El Shaer Interference Management in LTE-Advanced Heterogeneous Networks Using Almost Blank Subframes: M.Sc. thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2012, pp. 76.
17. Wang Y., Pedersen K.I. Performance analysis of enhanced inter-cell interference coordination in LTE-Advanced Heterogeneous Networks, *IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. H., May 2012, pp. 1-5.
18. Zarrinkoub H. Understanding LTE with Matlab. H.: John Wiley & Sons Ltd, 2014, 490 p.
19. Rappaport T.S. Wireless communications principles and practice. 2nd ed. H.: Prentice Hall, 2002.
20. Mehlhruer C., Wrulich M., Ikuno J.C. Simulating the Long Term Evolution physical layer, in *Proc. of 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009)*. H.: Glasgow, Scotland, 2009, pp. 1471-1478.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Л.Г. Стаценко.

Комысов Павел Владимирович – Дальневосточный федеральный университет; e-mail: komysopv@gmail.com; г. Владивосток, о. Русский, поселок Аякс - 10, кампус ДВФУ, корпус С; тел.: +79146840315; кафедра электроники и средств связи; магистрант.

Надымов Алексей Владимирович – e-mail: nadymovrts@yandex.ru; тел.: +79502995845; кафедра электроники и средств связи; старший преподаватель.

Komysov Pavel Vladimirovich – FEFU; e-mail: komysopv@gmail.com; Campus 10 Ajax Bay, bld. C, Russky Island Vladivostok Russia; phone: +79146840315; the department of electronics and communications; undergraduate.

Nadymov Aleksey Vladimirovich – e-mail: nadymovrts@yandex.ru; phone: +79502995845; the department of electronics and communications; senior lecturer.

УДК 007.52:004.896:004:942

DOI 10.23683/2311-3103-2018-1-227-241

И.В. Кожемякин, В.А. Рыжов, Н.Н. Семенов, М.Н. Чемоданов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ И ДАЛЬНОСТИ СВЯЗИ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СЕТИ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ К ИЗМЕНЕНИЮ УСЛОВИЙ РАБОТЫ

Целью исследования является изучение влияния параметров связи, таких как скорость и дальность, на устойчивость системы мультиагентного управления сетью подводных роботов. Использование мультиагентного управления группой подводных роботов позволяет существенно расширить круг решаемых задач с использованием мобильных подводных роботов, но в условиях работы таких роботов скорость гидроакустической связи оказывается невелика и существенно зависит от дальности связи (если на десятках метров скорость передачи информации может быть единицами мегабит в секунду, то на расстоянии единиц километров даже в благоприятных гидрологических условиях – не более десятков килобит в секунду, возможны замирания и «зоны акустической тени»). Модельным примером группового применения таких роботов является задача мониторинга об-