

Раздел III. Связь, навигация и радиолокация

УДК 621.391.01

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-202-209

А.Н. Конев, А.А. Комаров, П.В. Луферчик, П.В. Штро

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОВОГО ФОНА НА ВХОДЕ ПРИЕМНИКА СИСТЕМЫ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СВЯЗИ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Ближнепольная магнитная связь (БПМС) обладает уникальными характеристиками, такими как скрытность, защищенность канала связи, возможность прохождения сигнала через абсолютное большинство препятствий без значимого затухания. БПМС может быть применена в интересах министерств и силовых структур Российской Федерации в таких сценариях использования, где применение традиционной ЭМ связи является невозможным. Одной из задач, в которых актуально применение БПМС, является обеспечение надежной беспроводной связи для спасателей, пожарных, сотрудников МЧС при выполнении их профессиональной деятельности в условиях завалов, вызванных различными разрушениями городских строений. Стоит отметить, что в таких условиях, проводимость строительных материалов и почвы может оказывать влияние на распространение не только электрического, но и магнитного поля. Дело в том, что из-за проводимости таких материалов, при использовании связи на основе МИ, в материалах возникают вихревые токи, что приводит к возникновению вторичного магнитного поля, находящегося в противофазе. При наложении двух полей возникают искажения, приводящие к быстрому затуханию магнитного поля при прохождении через материал. Рассматриваемая система не подвержена описанным выше эффектам. В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение помеховой обстановки в канале БПМС. Были проведены натурные эксперименты по измерению помеховой обстановки. По полученным данным сделан вывод, что применение систем БПМС в городских условиях является достаточно сложной задачей из-за характера помех, распространяющихся в канале такого вида связи. Для эффективного применения БПМС требуется разработка устройств приема, обеспечивающих достаточно сильную фильтрацию сигналов вне выбранной полосы. Применение цифровой фильтрации в таких системах является первоочередной необходимостью. Также, в таких системах, модулированный полезной информацией сигнал должен иметь узкую полосу. Максимальной эффективности при использовании систем БПМС возможно добиться в таких условиях, где наличие электрических кондуктивных помех сведено к минимуму: вдали от электрифицированных поселений, в водной среде, под землей.

Ближнепольная магнитная связь; защищенная связь; помеховая обстановка на низких частотах.

A.N. Konev, A.A. Komarov, P.V. Luferschik, P.V. Shtro

INVESTIGATION OF THE INTERFERENCE BACKGROUND AT THE INPUT OF THE RECEIVER OF THE NEAR-FIELD MAGNETIC COMMUNICATION SYSTEM IN URBAN CONDITIONS

Near-field magnetic communication (NFMC) has unique characteristics, such as secrecy, communication channel security, the ability to pass a signal through the vast majority of obstacles without significant attenuation. NFMC can be used in such use cases where traditional radio is impossible. One of the tasks in which the use of NFMC is relevant is to provide reliable wireless

communication for rescuers, firefighters, employees of the Ministry of Emergency Situations when performing their professional activities in the conditions of blockages caused by various destructions of urban buildings. It should be noted that under such conditions, the conductivity of building materials and soil can affect the propagation of not only electric, but also magnetic fields. The fact is that due to the conductivity of such materials, when using radio coupling, eddy currents arise in the materials, which leads to the appearance of a secondary magnetic field that is in antiphase. The system under consideration is not subject to the effects described above. This article presents the results of experimental studies aimed at studying the interference environment in the NFMC channel. Field experiments were carried out to measure the interference environment. Based on the data obtained, it was concluded that the use of NFMC systems in urban environments is a rather difficult task due to the nature of the interference propagating in the channel of this type of communication. The effective use of NFMC requires the development of receiving devices that provide sufficiently strong filtering of signals outside the selected band. Narrow band and high order filtering is key priority of observed communication system.

Near-field magnetic communication; secure communication; interference environment at low frequencies.

Введение. Задача обеспечения связи в пространстве, имеющем значительное количество препятствий с большой диэлектрической проницаемостью, является актуальной на сегодняшний день. Традиционные методы радиосвязи используют электромагнитные (ЭМ) волны, которые сильно ослабляются при прохождении через толстый слой проводимых материалов, что делает невозможным их эффективно использовать в условиях, когда на пути распространения сигнала имеется большое количество таких препятствий. В отличие от традиционных способов, реализация связи с помощью магнитной индукции (МИ) в такой среде распространения позволяет обеспечить достаточную дальность связи [1], имея при этом малые размеры катушек, использующихся, в качестве антенн [2]. Ближнепольная магнитная связь не восприимчива к отражению, рассеиванию, дифракции сигнала [3, 4]. В отличие от ЭМ связи, в связи на основе МИ подобные эффекты возникают лишь при прохождении через ферромагнитные материалы. Большинство материалов, окружающих нас на планете, такие как почва [5, 6], вода [7–9], строительные материалы, не обладают такими свойствами, имеют магнитную проницаемость, близкую к таковой у вакуума, тем самым обеспечивая беспрепятственное распространение магнитных волн [10, 11].

Постановка задачи. Одной из задач, в которых актуально применение БПМС, является обеспечение надежной беспроводной связи для спасателей, пожарных, сотрудников МЧС при выполнении их профессиональной деятельности в условиях завалов, вызванных различными разрушениями городских строений.

Стоит отметить, что в таких условиях, проводимость строительных материалов и почвы может оказывать влияние на распространение не только электрического, но и магнитного поля. [12] Дело в том, что из-за проводимости таких материалов, при использовании связи на основе МИ, в материалах возникают вихревые токи, что приводит к возникновению вторичного магнитного поля, находящегося в противофазе. При наложении двух полей возникают искажения, приводящие к быстрому затуханию магнитного поля при прохождении через материал.

Однако, описанные выше эффекты не оказывают влияния на работу проектируемой системы БПМС, описываемой в этой статье. [13] Строение приемных и передающих антенн в системе БПМС накладывает ограничения на доступный рабочий диапазон частот – эффективная работа возможна только на низких частотах от единиц до сотен килогерц, в зависимости от используемой антенны. При распространении магнитного поля на таких низких частотах, вихревые токи имеют достаточно низкое значение, чтобы ими можно было пренебречь [14].

Другим применением систем БПМС является обеспечение защищенного канала связи для колонны воинских формирований. Поскольку магнитная энергия убывает достаточно быстро, обратно расстоянию в 6 степени, дистанционный перехват такой связи невозможен, возможность обнаружения колонны по уровню излучаемого сигнала отсутствует.

В приведенных выше областях применения надежность связи вне зависимости от окружающих условий является основным и самым важным параметром. Основной проблемой организации связи системы БПМС в городских условиях являются промышленные и сетевые шумы, излучаемые различной электроаппаратурой, линиями электропередач, другими внешними источниками помех, поскольку магнитные антенны чувствительны к электрической составляющей электромагнитного поля.

В городских условиях в описанном выше рабочем диапазоне частот БПМС наблюдается значительное помеховое загрязнение спектра. Значительную роль оказывают кондуктивные электромагнитные помехи. Согласно [15], кондуктивные электромагнитные помехи, представляют собой общие несимметричные напряжения, в полосе частот от 0 до 150 кГц, подобные тем, которые возникают при протекании электрического тока в силовых кабелях, расположенных поблизости от технических средств (ТС), и токов утечки в системах заземления.

Соответственно, при построении надежной системы БПМС требуется учитывать этот фактор, соответствующе выбрать рабочий диапазон частот, с учетом городской помеховой обстановки.

Решение поставленной задачи. Для оценки помеховой обстановки на входе приемника БПМС в городских условиях, использовалась приемная магнитная антенна в виде тонкоплечного магнитометра [16]. Наибольшую эффективность для такого типа антенн можно достичь в рабочем диапазоне частот 10...200 кГц. Выход антенны был подключен в анализатор спектра Rohde & Schwarz FSV Signal Analyzer с диапазоном работы 10 Гц ... 30 ГГц.

На рис. 1 изображено рабочее место для исследования помеховой обстановки



Рис. 1. Рабочее место для исследования помеховой обстановки

Полученные результаты по помеховой обстановке в полосе 0...200 кГц изображены на рис. 2, 3, 4, 5.

Проанализировав полученные данные, можно отметить сильные источники промышленных помех в диапазонах частот 40...74 кГц, 95...100 кГц.

В качестве одного из самых значимых источников помех для приемной антенны системы БПМС были идентифицированы осветительные лампы, создающие помеховый фон в диапазоне частот от 45 до 60 кГц.

На рис. 2 представлены изображения спектра в диапазоне частот 0...200 кГц при включенном (а) и отключенном (б) электрическом освещении. На рис. 3 представлены изображения спектра в диапазоне частот 35...75 кГц при включенном (а) и отключенном (б) электрическом освещении. По представленным рисункам можно сделать вывод, что при отключении электрического освещения, помеховый фон значительно снижается. На рис. 4 изображен спектр сигнала на выходе антенны, при направлении антенны в сторону лампы освещения. По рис. 4 можно сделать вывод, что при направлении на осветительные приборы, помеховый фон в диапазоне частот от 45 до 60 кГц значительно возрастает.

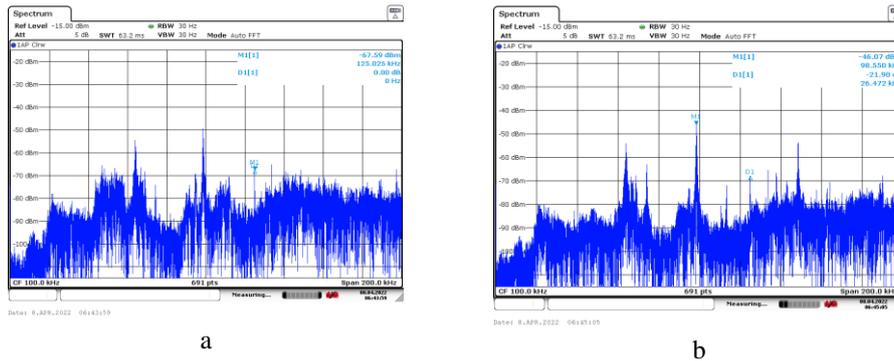


Рис. 2. Спектр на выходе приемной антенны при: а – включенном; б – отключенном освещении в диапазоне частот 0...200 кГц

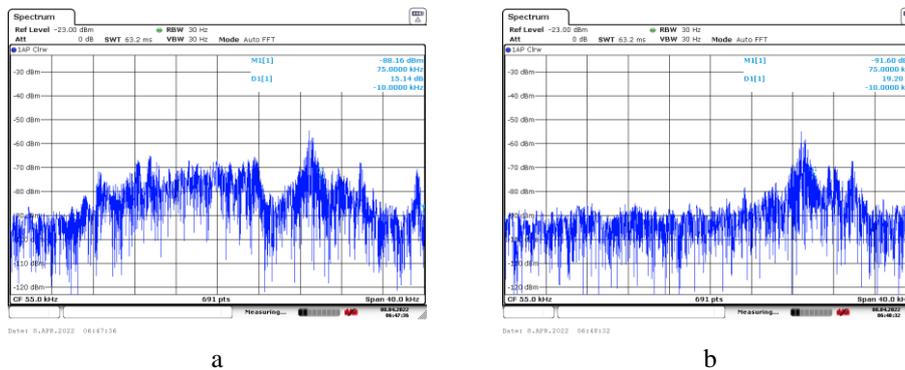


Рис. 3. Спектр на выходе приемной антенны при: а – включенном; б – отключенном освещении в диапазоне частот 35...75 кГц

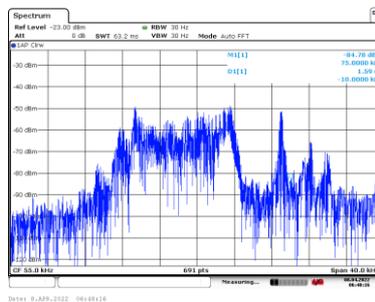


Рис. 4. Спектр сигнала при направлении в сторону лампы освещения

Источники остальных помех достоверно установить не удалось, однако уровень помех усиливается при наведении приемной антенны на сетевые приборы: сетевые источники, блоки питания, разветвители и т.д., что позволяет характеризовать эти помехи как кондуктивные. При обесточивании помещения, большинство помех пропадали.

Для получения объективной картины помеховой обстановки измерена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) приемной антенны рис. 5. Для измерения АЧХ была сконструирована калибровочная катушка в виде цилиндрического соленоида диаметром 41 см, количеством витков, равным пяти. Индуктивность калибровочной катушки равна 17.9 мкГн; катушка обладает равномерной АЧХ в пределах 0...500 кГц. Приемная антенна была помещена во внутрь калибровочной катушки, с помощью осциллографа фиксировалось выходное напряжение антенны на разных частотах.

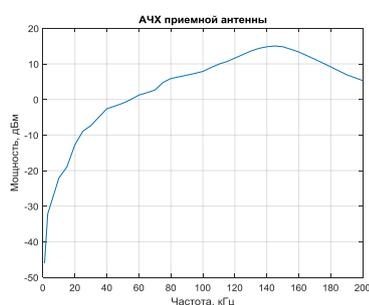


Рис. 5. АЧХ приемной антенны

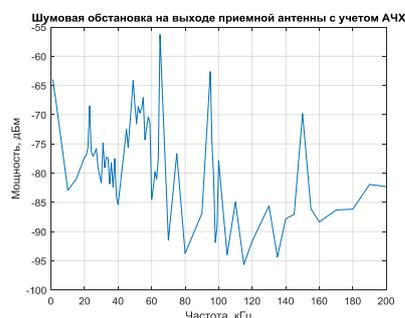


Рис. 6. Шумовая обстановка на выходе приемной антенны с учетом нормировки по АЧХ антенны

Исходя из анализа полученных значений, были определены наилучшие рабочие диапазоны частот: 75...95 кГц, 100...147 кГц, 150...200 кГц.

Однако, диапазон частот 150...200 кГц использовать нецелесообразно, поскольку наибольшая дальность и эффективность индуктивных систем связи достигается на частотах не более 150 кГц [17, 18]. Кроме того, стоит отметить, что поскольку магнитная индукция передающей антенны обратно пропорциональна частоте передаваемого сигнала, для обеспечения максимальной дальности связи в реальных системах предпочтительно использовать как можно более низкие частоты сигналов [19].

Заключение. По полученным данным можно сделать вывод, что применение систем БПМС в городских условиях является достаточно сложной задачей из-за характера помех, распространяющихся в канале такого вида связи. Для эффективного применения БПМС требуется разработка устройств приема, обеспечивающих достаточно сильную фильтрацию сигналов вне выбранной полосы. Очевидно, что в таких системах, применение цифровой фильтрации является первоочередной необходимостью. Перспективно применение перестраиваемых аналоговых полосовых фильтров в приемном тракте, анализ доступных компонентов показал, что, несмотря на достаточно малое предложение перестраиваемых фильтров в данном частотном диапазоне, существуют подходящие модели, например, перестраиваемый полосовой фильтр LTC6602 фирмы Analog Devices. Также, в таких системах, модулированный полезной информацией сигнал должен иметь узкую полосу.

Максимальной эффективности при использовании систем БПМС возможно добиться в таких условиях, где наличие электрических кондуктивных помех сведено к минимуму: вдали от электрофицированных поселений, в водной среде, под землей.

В то же время, разработка такой системы является особенно важной задачей на сегодняшний день. Данная система обладает уникальными характеристиками, таким как скрытность, защищенность канала связи, возможность прохождения сигнала через абсолютное большинство препятствий без значимого затухания. БПМС может быть применена в интересах министерств и силовых структур Российской Федерации в таких сценариях использования, где применение традиционной ЭМ связи является невозможным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Pal K. Kant.* Magnetic-Induction-Based Near-Field Communication: Connectivity for Short-Range IoT Applications // IEEE Explore, IEEE Computer society. – DOI: 10.1109/MC.2019.2892862.
2. *Sharma A.K., Yadav S., Dandu S.N., Kumar V., Sengupta J., Dhok S.B., and Kumar S.* Magnetic Induction-Based Non-Conventional Media Communications: A Review // IEEE Sensors Journal. – April 2017. – Vol. 17. – P. 926-940. – DOI: 10.1109/JSEN.2016.2640190.
3. *Hott M., Hoehner P.A.* Underwater Communication Employing High-Sensitive Magnetic Field Detectors // IEEE Access. – September 2020. – Vol. 8. – P. 177385-177394. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026623.
4. *Власов А.А., Родионов А.Ю.* Перспективы использования систем подводной коммуникации на основе магнитной индукции (обзор).
5. *Zhi Sun, Pu Wang, Mehmet C. Vuran, Mznah A. Al-Rodhaan, Abdullah M. Al-Dhelaan, Ian F. Akyildiz.* Mise-PIPE: Magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring // Ad Hoc Networks. – 2011. – No. 9 (3). – P. 218-227. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2010.10.006.
6. *Kisseleff, S., Akyildiz I.F., and Gerstacker W.H.* Digital signal transmission in magnetic induction based wireless underground sensor networks // IEEE Transactions on Communications. – 2015. – Vol. 63, No. 6. – P. 2300-2311.
7. *Yuzhou Li, Shengnan Wang, Cheng Jin, Yu Zhang, Tao Jiang.* A survey of underwater magnetic induction. communications: fundamental issues, recent advances, and challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21 (3). – P. 2466-2487. – DOI: 10.1109/COMST.2019.2897610.
8. *Gulbahar B. and Akan O.B.* A communication theoretical modeling and analysis of underwater magneto-inductive wireless channels // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2012. – Vol. 11, No. 9. – P. 3326-3334.
9. *Guo H., Sun, Z. and Wang P.* On reliability of underwater magnetic induction communications with tri-axis coils // ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). – IEEE, 2019. – P. 1-6.
10. *Telford W., Geldart L., Sheriff R.* Applied Geophysics. – Cambridge University Press, 1990. [Online]. Available: <https://books.google.co.in/books?id=Q8ogAwAAQBAJ>.
11. *Sojdehei J.J., Wrathall P.N., Dinn D.F.* Magneto-inductive (MI) communications // Proc. MTS/IEEE Oceans. – 2001. – No. (11). – P. 513-519. – DOI: 10.1109/OCEANS.2001.968775.
12. *Xin Tan, Zhi Sun, Ian F. Akyildiz.* Wireless underground sensor networks: MI-based communication systems for underground applications // IEEE MAP. – 2015. – Vol. 57 (4). – P. 74-87. – DOI: 10.1109/MAP.2015.-2453917.
13. *Guo H.* Performance Analysis of Near-Field Magnetic Induction Communication in Extreme Environments // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2020. – Vol. 90. – P. 77-83.
14. *Sogade J., Vichabian Y., Vandiver A., Reppert P.M., Coles D., Morgan F.D.* Electromagnetic cave-to-surface mapping system // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2004. – Vol. 42 (4). – P. 754-763.
15. ГОСТ Р 51317.4.16-2000 – Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 кГц. Требования и методы испытаний. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.
16. *Babitskii A.N., Belyaev B.A., Boev N.M. and Izotov A.V.* Low noise wideband thin-film magnetometer // IEEE Sensors 2017, conference proceedings. – 2017. – P. 316-318. – DOI: 10.1109/ICSENS.2017.8233972.

17. Binbin Chai, Xin Zhang, Jinhong Wang. A Test of Magnetic Induction Communication from Air to Sea. 2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO) // Conference Paper Publisher, IEEE, 2018. – DOI: 10.1109/OCEANSKOB.2018.8559464.
18. Шварц Б.А. Оперативная беспроводная индуктивная связь внутри предприятия (Основы теории расчета). – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1978. – 208 с.
19. Gulati R.K., Pal A., Kant K. Experimental Evaluation of a Near-Field Magnetic Induction Based Communication System // IEEE Explore 2019, conference processing. – DOI: 10.1109/WCNC.2019.8885541.
20. Tumanski S. Induction coil sensors – a review // Measurement Science and Technology. – January 2007. – Vol. 18, No. 3.

REFERENCES

1. Pal K. Kant. Magnetic-Induction-Based Near-Field Communication: Connectivity for Short-Range IoT Applications, *IEEE Explore, IEEE Computer society*. DOI: 10.1109/MC.2019.2892862.
2. Sharma A.K., Yadav S., Dandu S.N., Kumar V., Sengupta J., Dhok S.B., and Kumar S. Magnetic Induction-Based Non-Conventional Media Communications: A Review, *IEEE Sensors Journal*, April 2017, Vol. 17, pp. 926-940. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2640190.
3. Hott M., Hoehner P.A. Underwater Communication Employing High-Sensitive Magnetic Field Detectors, *IEEE Access*, September 2020, Vol. 8, pp. 177385-177394. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026623.
4. Vlasov A.A., Rodionov A.Yu. Perspektivy ispol'zovaniya sistem podvodnoy kommunikatsii na osnove magnitnoy induksii (obzor) [Prospects for the use of underwater communication systems based on magnetic induction (review)].
5. Zhi Sun, Pu Wang, Mehmet C. Vuran, Mznah A. Al-Rodhaan, Abdullah M. Al-Dhelaan, Ian F. Akyildiz. Mise-PIPE: Magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring, *Ad Hoc Networks*, 2011, No. 9 (3), pp. 218-227. DOI: 10.1016/j.adhoc.2010.10.006.
6. Kisseleff, S., Akyildiz I.F., and Gerstacker W.H. Digital signal transmission in magnetic induction based wireless underground sensor networks, *IEEE Transactions on Communications*, 2015, Vol. 63, No. 6, pp. 2300-2311.
7. Yuzhou Li, Shengnan Wang, Cheng Jin, Yu Zhang, Tao Jiang. A survey of underwater magnetic induction. communications: fundamental issues, recent advances, and challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, Vol. 21 (3), pp. 2466-2487. DOI: 10.1109/COMST.2019.2897610.
8. Gulbahar B. and Akan O.B. A communication theoretical modeling and analysis of underwater magneto-inductive wireless channels, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, Vol. 11, No. 9, pp. 3326–3334.
9. Guo H., Sun, Z. and Wang P. On reliability of underwater magnetic induction communications with tri-axis coils, *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2019, pp. 1-6.
10. Telford W., Geldart L., Sheriff R. Applied Geophysics. – Cambridge University Press, 1990. [Online]. Available: <https://books.google.co.in/books?id=Q8ogAwAAQBAJ>.
11. Sojdehei J.J., Wrathall P.N., Dinn D.F. Magneto-inductive (MI) communications, *Proc. MTS/IEEE Oceans*, 2001, No. (11), pp. 513-519. DOI: 10.1109/OCEANS.2001.968775.
12. Xin Tan, Zhi Sun, Ian F. Akyildiz. Wireless underground sensor networks: MI-based communication systems for underground applications, *IEEE MAP*, 2015, Vol. 57 (4), pp. 74-87. DOI: 10.1109/MAP.2015.-2453917.
13. Guo H. Performance Analysis of Near-Field Magnetic Induction Communication in Extreme Environments, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2020, Vol. 90, pp. 77-83.
14. Sogade J., Vichabian Y., Vandiver A., Reppert P.M., Coles D., Morgan F.D. Electromagnetic cave-to-surface mapping system, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2004, Vol. 42 (4), pp. 754-763.
15. GOST R 51317.4.16-2000 – Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ustoychivost' k konduktivnykh pomekham v polose chastot ot 0 do 150 kGts. Trebovaniya i metody ispytaniy [GOST R 51317.4.16-2000 – Electromagnetic compatibility of technical means. Resistance to conductive interference in the frequency band from 0 to 150 kHz. Requirements and test methods]. Moscow: IPK Izd-vo standartov, 2001.

16. Babitskii A.N., Belyaev B.A., Boev N.M. and Izotov A.V. Low noise wideband thin-film magnetometer, *IEEE Sensors 2017, conference proceedings*, 2017, pp. 316-318. DOI: 10.1109/ICSENS.2017.8233972.
17. Binbin Chai, Xin Zhang, Jinhong Wang. A Test of Magnetic Induction Communication from Air to Sea. 2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), *Conference Paper Publisher, IEEE, 2018*. DOI: 10.1109/OCEANSKOBE.2018.8559464.
18. Shvarts B.A. Operativnaya besprovodnaya induktivnaya svyaz' vnutri predpriyatiya (Osnovy teorii rascheta) [Operational wireless inductive communication within the enterprise (Fundamentals of calculation theory)]. 2nd ed., revised and suppl. Moscow: Svyaz', 1978, 208 p.
19. Gulati R.K., Pal A., Kant K. Experimental Evaluation of a Near-Field Magnetic Induction Based Communication System, *IEEE Explore 2019, conference processing*. DOI: 10.1109/WCNC.2019.8885541.
20. Tumanski S. Induction coil sensors – a review, *Measurement Science and Technology*. January 2007, Vol. 18, No. 3.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.М. Бородянский.

Конеv Александр Николаевич – АО «НПП «Радиосвязь»; e-mail: FBRLC@ya.ru; г. Красноярск, Россия; тел.: +79082181452; инженер-конструктор.

Комаров Алексей Александрович – e-mail: komarovalal@gmail.com; тел.: +79831576492; инженер-конструктор.

Луферчик Павел Валерьевич – e-mail: Luferschikp@gmail.com; тел.: +79232942552; начальник отдела.

Штро Павел Викторович – e-mail: faust_256@mail.ru; тел.: +79069712716; главный специалист.

Konev Alexandr Nikolaevich – JSC SPE Radiosvyaz; e-mail: FBRLC@ya.ru; Krasnoyarsk, Russia; phone: +79082181452; design engineer.

Komarov Alexey Alexandrovich – e-mail: komarovalal@gmail.com; phone: +79831576492; design engineer.

Luferschik Pavel Valerievich – e-mail: Luferschikp@gmail.com; phone: +79232942552; head of the department.

Shtro Pavel Viktorovich – e-mail: faust_256@mail.ru; phone: +79069712716; chief specialist.

УДК 621.376

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220

Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд, К.Е. Румянцев

ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОПОЛОСНОЙ КВАДРАТУРНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ НА ПОДНЕСУЩИХ ЧАСТОТАХ В КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КОММУНИКАЦИИ

Технология когерентной оптической связи позволяет создать систему передачи на большие расстояния с высокой пропускной способностью. Такие форматы модуляции, как квадратурная фазовая манипуляция (QPSK), обеспечивают высокую скорость передачи данных простым, надежным и экономичным способом. Эти методы модуляции, использующие несколько битов, передаются как символ, реализующий простые синфазные и квадратурные (IQ) форматы модуляции. Для увеличения пропускной способности в когерентных оптических системах используется мультиплексирование оптических поднесущих, когда несколько радиосигналов трансформируются одной оптической несущей. Это мультиплексирование имеет ограничения из-за двойной боковой полосы, что приводит к снижению мощности принимаемой поднесущей и ухудшает отношение сигнала несущей частоты к шуму. Чтобы аккумулировать эти эффекты, предлагается много различных