DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-13-19

УДК 621.396.67

А. А. Головков, П. В. Терентьева, А. Г. Журавлев

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия*

М. С. Шмырин, Н. С. Стенюков

*АО «НИИ "Вектор"»
ул. Академика Павлова, д. 14-а, Санкт-Петербург, 197376, Россия*

ШИРОКОПОЛОСНАЯ СВЧ-АНТЕННА ВИВАЛЬДИ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИЕЙ¹

Аннотация. В настоящее время антенны Вивальди используются как направленные излучатели, которые требуют согласования и симметрирования возбуждающего СВЧ-радиосигнала на входе. Чаще всего установка в раскрыт антенны согласующе-симметрирующего устройства приводит к дополнительным потерям и искажениям диаграммы направленности излучателя, особенно в случае работы в широком диапазоне частот. Кроме того, в случаях жестких требований по условиям эксплуатации (большой диапазон рабочих температур, высокая влажность, соляной туман, вибрация и пр.) сложен подбор подходящей микросхемы. Целью исследования является разработка щелевой антенны с 50-омным портом на входе, которая была бы проста в производстве и эксплуатации, при сохранении высокого коэффициента усиления в широком диапазоне частот. Как известно, структура поля в копланарной линии близка к структуре поля в близкой к ней щелевой. С использованием математического аппарата для таких полей, средств электродинамического моделирования и численного расчета разработана система, представляющая собой две антенны Вивальди, запитываемые одной копланарной линией. Таким образом, излучатель обладает близкой к круговой диаграммой направленности и низкими потерями в структуре питания, согласования и симметрирования, функции которой выполняет копланарная линия. Представлены результаты для диапазона частот 1...6 ГГц. Устройство в целом представляет собой диэлектрическую подложку, на которой двусторонней металлизацией выполнена излучающая структура. Для работы в более высоких диапазонах допустимо использовать излучатели на основе Finline. Кроме очевидных конструктивных плюсов антенна обладает низкой стоимостью в производстве и легко повторяема. В настоящее время авторами продолжается работа по исследованию использования таких элементов в составе антенных решеток.

Ключевые слова: антенна Вивальди, щелевая антенна, антенна, СВЧ-антенна, широкополосная антенна, согласующе-симметрирующее устройство, круговая диаграмма направленности

Для цитирования: Широкополосная СВЧ-антенна Вивальди с возбуждением копланарной линией /

А. А. Головков, П. В. Терентьева, А. Г. Журавлев, М. С. Шмырин, Н. С. Стенюков // Изв. вузов России.

Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 13–19. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-13-19

Alexander A. Golovkov, Polina V. Terenteva, Alexander G. Zhuravlev

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

Michail S. Shmyrin, N. Nikolay S. Stenyukov

JSC «Scientific-research institute "Vektor"»

14-a, Academician Pavlova Str., 197376, St. Petersburg, Russia

¹При подготовке публикации использовались результаты работ по проекту "Разработка многопозиционного комплекса полуактивной радиолокации и радиомониторинга излучающих и радиомолчащих объектов" (Соглашение от 21 ноября 2018 г. № 075-11-2018-035) с использованием мер государственной поддержки, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218

BROADBAND MICROWAVE VIVALDI ANTENNA USING COPLANAR FEED LINE

Abstract. Nowadays Vivaldi antennas are used as directional emitters with matching and balancing device at the input. As a rule, these devices cause additional losses in case of broadband operation. Besides, the use of the device leads to radiator pattern distortions, especially when operating in a wide frequency range. Stringent operating requirements (wide operating temperature, high humidity, salt fog, vibration, etc.), make the choice of proper chip very complicated. The aim of the study is to develop a slot antenna with a 50-ohm port at the input, which would be easy to manufacture and operate, while maintaining high gain in a wide frequency range. As is known, the field structure in the coplanar line is close to the field structure in the slit field close to it. As is known, the field structure in the coplanar line is similar to the field structure in the slot line. Using mathematics for such fields, means of electrodynamic modeling and numerical calculation, a system is developed that consists of two Vivaldi antennas fed by one coplanar line. Thus, the emitter has a close to a circular pattern and low losses in the structure of feeding, matching and balancing, the functions of which are performed by the coplanar line. The results are given for the frequency range of 1-6 GHz. The device as a whole is a dielectric substrate with radiating structure made as double-sided metallization. Fineline-based emitters are acceptable to use for operation in higher frequencies. Antenna has low manufacturing cost and it is easy to repeat. Currently the authors are continuing work on the study of the use of such elements as part of antenna arrays.

Key words: Vivaldi antenna, slot antenna, antenna, microwave antenna, broadband antenna, matching balancing device, circular directivity pattern

For citation: Golovkov A. A., Terenteva P. V., Zhuravlev A. G., Shmyrin M. S., Stenyukov N. S. Broadband Microwave Vivaldi Antenna Using Coplanar Feed Line. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 6, pp. 13–19. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-13-19 (In Russian)

Введение. В настоящее время в системах радиомониторинга широко применяются излучатели с осесимметричной диаграммой направленности (ДН) по крайней мере в одной из плоскостей [1]–[3]. Такие излучатели используются как в составе кольцевых антенных решеток, так и в качестве одиночных излучателей с возможностью приема по всем направлениям в азимутальной или угломестной плоскости в системах радиолокации и связи.

Классическими излучателями с подобной ДН являются дипольные антенны. При вертикальном расположении диполя он формирует сигнал вертикальной поляризации и имеет круговую диаграмму в горизонтальной плоскости. Однако такие излучатели узкополосны, а современные системы обычно работают либо с широкополосными сигналами, либо в широкой полосе частот.

Существуют возможности расширения полосы дипольных антенн [4]–[6] за счет геометрического расширения и установки дополнительных емкостных элементов. Однако в таком случае на низких частотах размер антенн недопустимо возрастает. Альтернативным решением являются биконические антенны [7], однако они сложны в конструктивной и технической реализации. Кроме того, все перечисленные излучатели требуют согласующе-симметрирующего устройства на входе, установка которого в открытом пространстве также вызывает ряд сложностей.

В настоящее время широкое применение находят щелевые антенны Вивальди [8], [9] ввиду про-

стоты их конструкции и возможности изготовления методами печатной технологии. Такие излучатели обеспечивают высокий коэффициент усиления и широкие рабочие полосы частот при небольших массогабаритных параметрах [10], [11]. Однако большинство этих антенн являются однонаправленными. Кроме того, питание такой антенны от 50-омного порта приводит к потерям [12], [13].

Постановка задачи. Средствами электродинамического моделирования с последующим экспериментальным подтверждением разработать широкополосную антенну, позволяющую работать в широкой полосе частот с высоким коэффициентом усиления, с 50-омным портом на входе, которая была бы проста в производстве и эксплуатации.

Структура антенной системы. Предлагается двунаправленная антенна Вивальди, содержащая 2 сфазированных излучателя и встроенное в конструкцию антенны согласующе-симметрирующее устройство.

Предлагаемая антенна выполнена по печатной технологии на диэлектрической подложке. Схематически излучатель представлен на рис. 1, а, б, где 1 – металлизация на верхней стороне диэлектрической подложки 2; 3 – расширяющиеся по экспоненциальному закону участки щелевой линии первого и второго излучателей; 4 – возбуждающая копланарная линия, зазоры которой совмещены и равны зазорам однородных участков щелевых линий излучателей. На обратной стороне подложки выполнен аналогичный излучатель 7, соеди-

Рис. 1

ненный с верхней стороной металлизированными переходными отверстиями 5. Возбуждение антенны осуществляется 50-омным портом 6.

Устройство возбуждения, включающее отрезки заземленной копланарной линии 4 и двух щелевых линий 3, выполняет функции согласования и симметрирования возбуждающего СВЧ-радиосигнала. Выход копланарной линии 4 подключен к параллельному соединению двух отрезков щелевых линий 3 и для обеспечения согласования предполагает равенство волнового сопротивления линии 4 половинному сопротивлению каждого из волновых сопротивлений отрезков щелевых линий 3. Волновое сопротивление щелевых линий определяется подложкой и шириной зазора, а волновое сопротивление отрезка копланарной линии – подложкой, зазорами между центральным и заземленными проводниками и шириной центрального проводника. Рабочая полоса частот излучателя будет в основном ограничиваться дисперсионными характеристиками щелевых и копланарной линий и электрической неоднородностью в местах их соединения. Распределение электрического поля в поперечных сечениях как копланарной (рис. 2, а), так и щелевой (рис. 2, б) линий направлено вдоль поверхности подложки [14], поэтому можно ожидать, что дисперсионные свойства их будут близкими. На рис. 2 электрическое поле показано сплошной линией, а магнитное – штриховой.

Рис. 2

Если пренебречь частотной дисперсией, волновое сопротивление копланарной линии описывается частотно-независимым выражением

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{K(k)}{K(k^1)},$$

где ϵ_r – эффективная диэлектрическая проницаемость подложки; K – полный эллиптический интеграл; $k = \frac{w}{w+2s}$; $k^1 = \sqrt{1-k^2}$ (w – ширина центрального проводника; s – ширина зазора копланарной линии).

Волновое же сопротивление щелевой линии имеет явную частотную зависимость, включая слагаемое, пропорциональное h/λ (h – толщина диэлектрической подложки, λ – длина волны). Тем не менее, в диапазоне частот 20...40 ГГц частотные зависимости волновых сопротивлений обеих типов линий при одинаковых ширинах зазоров практически совпадают [14].

Именно совпадение значений волновых сопротивлений и определяет широкополосность антенны и потери в ней. По сравнению с ближайшим аналогом [15] антенна на рис. 1 имеет более высокий коэффициент усиления и близкую к круговой диаграмму направленности в азимутальной плоскости. Отличительным свойством антенны является ее работа как комбинированного электрического и магнитного излучателя. Несомненным достоинством антенны является отсутствие симметрирующего трансформатора и возможность подачи возбуждающего сигнала через стандартный 50-омный разъем, например SMA (от англ. sub-miniature version A).

Характеристики. Моделирование антенны проводилось в пакете Ansoft HFSS, модель антенны и связанная с ней система координат показаны на рис. 3.

Рис. 3

Рис. 4

Рис. 5

Габаритные размеры такой антенны $53 \times 85 \times 0.5$ мм. В экспериментальном образце использовался материал FR4 (толщина 0.5 мм, диэлектрическая проницаемость 4.3). Входное сопротивление в полосе частот показано на рис. 4, а, где сплошной линией приведена действительная, а штриховой – мнимая часть сопротивления. На рис. 4, б показан модуль коэффициента отражения в полосе частот.

Диаграммы направленности антенны в азимутальной и угломестной плоскостях приведены на рис. 5, а и б соответственно. Здесь сплошной линией показана диаграмма направленности на 1 ГГц, штриховой – на 3 ГГц, а пунктирной – на 6.3 ГГц.

Экспериментальные исследования макета антенной системы. Результаты измерений входного коэффициента отражения приведены на рис. 6. Фотография измерительной установки показана на рис. 7.

Измерения коэффициента отражения демонстрируют хорошее совпадение с результатами расчета, антенна согласована в полосе частот 1...6 ГГц.

Заключение. В результате работы была спроектирована и получена антенна, представляющая собой две антенны Вивальди, запитываемые копланарной линией. Копланарная линия и щелевые от-

Рис. 6

Рис. 7

резки на входе антенн выполняют функции согласования и симметрирования возбуждающего СВЧ-радиосигнала. Такая конструкция позволяет отказаться от дополнительной установки согласующе-симметрирующего устройства в раскрыв антенны.

Антенна работает в широкой полосе частот и обладает ДН, близкой к осесимметричной. Результаты измерений показали хорошее совпадение с расчетом.

В случае необходимости работы на более высоких частотах результаты могут быть перенесены на излучатели на основе Finline.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghosh C. K., Mandal B., Parui, S. K. Omni-Directional Printed Antenna Array for MIMO Application // Proc. of 2012 5th Intern. Conf. on Computers and Devices for Communication (CODEC), 17–19 Dec. 2012, Kolkata, India. Piscataway: IEEE, 2013. doi: 10.1109/codec.2012.6509197
2. Design of Patch Antenna with Omni Directional Radiation Pattern for Wireless LAN Applications / D. Punnamoorthy, G. K. Reddy, V. S. Kamadal, G. V. Gopal, K. Poornachary // Proc. of 2017 Intern. Conf. on Recent Innovations in Signal Processing and Embedded Systems (RISE), 27–29 Oct. 2017, Bhopal, India. Piscataway: IEEE, 2017. P. 70–74. doi: 10.1109/rise.2017.8378127
3. Di Wu, Yingzeng Yin, Minjun Guo, Renqiang Shen. Wideband Dipole Antenna for 3G Base Stations // Proc. of 2005 IEEE Intern. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 8–12 Aug. 2005, Beijing, China. Piscataway: IEEE, 2005. P. 454–457. doi: 10.1109/mape.2005.1617947
4. Ultrawideband VHF/UHF Dipole Array Antenna / A. J. Fenn, P. T. Hurst, J. D. Krieger, J. S. Sandora, L. I. Parad // Proc. of 2010 IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, 12–15 Oct. 2010, Waltham, MA, USA. Piscataway: IEEE, 2010. P. 79–82. doi: 10.1109/array.2010.5613390
5. Yang K.-W., Zhang F.-S., Li C. Design of a Novel Wideband Printed Dipole Array Antenna // Proc. of 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf. (CSQRWC), 21–24 July 2018, Xuzhou, China. Piscataway: IEEE, 2018. doi: 10.1109/csqrwc.2018.8455804
6. Terentyeva P. V., Golovkov G. A., Borovikov S. G. Antenna Array for the Passive Radar Monitoring System // Proc. of 2018 22nd Intern. Microwave and Radar Conf. (MIKON), 14–17 May 2018, Poznan, Poland. Piscataway: IEEE, 2018. P. 208–211. doi: 10.23919/MIKON.2018.8405179
7. Калошин В. А., Мартынов Е. С., Скородумова Е. А. Моделирование биконической антенны в широкой полосе частот // Сб. докл. III Всерос. конф. "Радиолокация и радиосвязь", М., 26–30 окт. 2009 г. М.: Изд-во ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2009. С. 63–67.
8. UHF Ultrabroadband Vivaldi-Type Direction Finding Antenna / R. Mueller, S. Lutz, R. Lorch, T. A. Walter // Proc. of 2010 IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp., 11–17 July 2010, Toronto, ON, Canada. Piscataway: IEEE, 2010. doi: 10.1109/aps.2010.5561691
9. A Design of High-Gain Vivaldi Antenna Loaded with Antipodal Structure and Slotting Correction / Y. Tang, X. Cao, Y. Song, L. Jidi, J. Lan, H. Yu // Proc. of 2018 IEEE MTT-S Intern. Wireless Symp. (IWS), 6–10 May 2018, Chengdu, China. Piscataway: IEEE, 2018. doi: 10.1109/ieee-iws.2018.8400909
10. Рязанов И. Г., Бякин А. А., Белоусов О. А. Анализ и синтез широкополосной планарной щелевой антенны с экспоненциальным изменением ширины щели для систем широкополосного доступа // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского. 2013. № 2 (46). С. 297–306.
11. A Miniaturized Vivaldi Antenna with High Gain for Ultra-Wideband Applications / H. Wang, S. He, Z. Ding, J. Cao, Y. Yang // Proc. of 2017 Sixth Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation (APCAP), 16–19 Oct. 2017, Xi'an, China. Piscataway: IEEE, 2017. doi: 10.1109/apcap.2017.8420722
12. Shan J., Xu A., Lin J. A Parametric Study of Microstrip-Fed Vivaldi Antenna // Proc. of 2017 3rd IEEE Intern. Conf. on Computer and Communications (ICCC), 13–16 Dec. 2017, Chengdu, China. Piscataway: IEEE, 2017. P. 1099–1103. doi: 10.1109/compcomm.2017.8322713
13. Novel Conformal Vivaldi Antenna Fed by CPW / Lin Tao, Song Lizhong, Liu Shangji, Wang Yongjian, Li Zexiu // Proc. of 2016 IEEE Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 5–8 June 2016, Beijing, China. Piscataway: IEEE, 2016. doi: 10.1109/icmmt.2016.7762422
14. Kai Chahg. Encyclopedia of RF and Microwave Engineering. New Jersey: Wiley, 2005. 5945 p.
15. Пат. РФ № 2269187. Щелевая антенна / А. Г. Коновалов, В. М. Нефедьев. Оpubл. 27.01.2006.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2018 г.

Головков Александр Алексеевич – доктор технических наук (1992), профессор (1995) кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 180 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика и антенно-фидерные устройства.
E-mail: algol110843@yandex.ru

Терентьева Полина Викторовна – магистр техники и технологии по направлению "Радиотехника" (2017), аспирантка кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электро-

технического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика и антенно-фидерные устройства.

E-mail: teterevinsky.pol@gmail.com

Журавлев Александр Геннадьевич – студент 4-го курса бакалавриата Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – электродинамика и антенно-фидерные устройства.

E-mail: keni-97s@mail.ru

Стенюков Николай Сергеевич – кандидат технических наук (1974), ведущий научный сотрудник АО «НИИ "Вектор"». Автор 35 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов в радиомониторинге.

E-mail: nsten@mail.ru

Шмырин Михаил Сергеевич – радиоинженер (2005, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), начальник отдела АО «НИИ "Вектор"». Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – аппаратно-программные средства в радиомониторинге.

E-mail: kotovski@list.ru

REFERENCES

1. Ghosh C. K., Mandal B., Parui, S. K. Omni-Directional Printed Antenna Array for MIMO Application. Proc. of 2012 5th Intern. Conf. on Computers and Devices for Communication (CODEC), 17–19 Dec. 2012, Kolkata, India. Piscataway, IEEE, 2013. doi: 10.1109/codec.2012.6509197
2. Punniamoorthy D., Reddy G. K., Kamadal V. S., Gopal G. V., Poornachary K. Design of Patch Antenna with Omni Directional Radiation Pattern for Wireless LAN Applications. Proc. of 2017 Intern. Conf. on Recent Innovations in Signal Processing and Embedded Systems (RISE), 27–29 Oct. 2017, Bhopal, India. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 70–74. doi: 10.1109/rise.2017.8378127
3. Di Wu, Yingzeng Yin, Minjun Guo, Renqiang Shen. Wideband Dipole Antenna for 3G Base Stations. Proc. of 2005 IEEE Intern. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 8–12 Aug. 2005, Beijing, China. Piscataway, IEEE, 2005, pp.454–457. doi: 10.1109/mape.2005.1617947
4. Fenn A. J., Hurst P. T., Krieger J. D., Sandora J. S., Parad L. I. Ultrawideband VHF/UHF Dipole Array Antenna. Proc. of 2010 IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, 12–15 Oct. 2010, Waltham, MA, USA. Piscataway, IEEE, 2010, pp. 79–82. doi: 10.1109/array.2010.5613390
5. Yang K.-W., Zhang F.-S., Li C. Design of a Novel Wideband Printed Dipole Array Antenna. Proc. of 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), 21–24 July 2018, Xuzhou, China. Piscataway, IEEE, 2018. doi: 10.1109/csqrwc.2018.8455804
6. Terentyeva P. V., Golovkov G. A., Borovikov S. G. Antenna Array for the Passive Radar Monitoring System. Proc. of 2018 22nd Intern. Microwave and Radar Conference (MIKON), 14–17 May 2018, Poznan, Poland. Piscataway, IEEE, 2018, pp 208–211. doi: 10.23919/MIKON.2018.8405179
7. Kaloshin V. A., Martynov E. S., Skorodumova E. A. Biconical Antenna Simulation in Wide Frequency Band. Proc. III All-Russia Conf. "Radiolocation and Radio Communication", 26–30 October 2009, Moscow: publishing house IRE named after V. A. Kotelnikov RAS, 2009, pp. 63–67. (In Russian)
8. Mueller R., Lutz S., Lorch R., Walter T. A. UHF Ultrabroadband Vivaldi-Type Direction Finding Antenna. Proc. of 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 11–17 July 2010, Toronto, ON, Canada. Piscataway, IEEE, 2010. doi: 10.1109/aps.2010.5561691
9. Tang Y., Cao X., Song Y., Jidi L., Lan J., Yu H. A Design of High-Gain Vivaldi Antenna Loaded with Antipodal Structure and Slotting Correction. Proc. of 2018 IEEE MTT-S International Wireless Symp. (IWS), 6–10 May 2018, Chengdu, China. Piscataway, IEEE, 2018. doi: 10.1109/ieee-iws.2018.8400909
10. Ryazanov I. G., Byakin A. A., Belousov O. A. Analysis and Synthesis of Broadband Planar Slit Antenna with Slit Width Exponential Change For Broadband Access Systems. Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University. 2013, no. 2 (46), pp. 297–306. (In Russian)
11. Wang H., He S., Ding Z., Cao J., Yang Y. A Miniaturized Vivaldi Antenna with High Gain for Ultra-Wideband Applications. Proc. of 2017 Sixth Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation (APCAP), 16–19 Oct. 2017, Xi'an, China. Piscataway, IEEE, 2017. doi: 10.1109/apcap.2017.8420722
12. Shan J., Xu A., Lin J. A Parametric Study of Microstrip-Fed Vivaldi Antenna. Proc. of 2017 3rd IEEE Intern. Conf. on Computer and Communications (ICCC), 13–16 Dec. 2017, Chengdu, China. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1099–1103. doi: 10.1109/compcomm.2017.8322713
13. Lin Tao, Song Lizhong, Liu Shangji, Wang Yongjian, Li Zexiu. Novel Conformal Vivaldi Antenna Fed by CPW. Proc. of 2016 IEEE Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 5–8 June 2016, Beijing, China. Piscataway, IEEE, 2016. doi: 10.1109/icmmt.2016.7762422
14. Kai Chahg. Encyclopedia of RF and Microwave Engineering. New Jersey, Wiley, 2005, 5945p.
15. Konovalov A. G., Nefediev V. M. Patent RF no. 2269187. Slotted antenna. 2006. (In Russian)

Received December, 10, 2018

Alexander A. Golovkov – D.Sc. (1992), Professor (1995) of the Department of Radio-Electronic Resources of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 180 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics, antennas, microwave technology.

E-mail: algol110843@yandex.ru

Polina V. Terenteva – Master's Degree in Radio Engineering (2017), postgraduate student of the Department of Radio-Electronic resources, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics, antennas, microwave technology.

E-mail: teterevinsky.pol@gmail.com

Alexander G. Zhuravlev – Student of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Area of expertise: electrodynamics, antennas, microwave technology.

E-mail: keni-97s@mail.ru

Nikolay S. Stenukov – PhD in Engineering (1974), Leading Researcher Joint-Stock Company «NII "Vektor"». The author of 30 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing in radiomonitoring.

E-mail: nsten@mail.ru

Michail S. Shmirin – Engineer (2005, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI"), Head of Department Joint-Stock Company «NII "Vektor"». The author of 3 scientific publications. Area of expertise: radiomonitoring hardware and software.

E-mail: kotovski@list.ru