

ПАССИВНОЕ ОКРУЖЕНИЕ В ПЕРЕДАЮЩИХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

В. А. Цветков, А. В. Князев, И. В. Алексанова, С. Г. Кондратьева

Исследуется влияние пассивного окружения (обрамления) на характеристики фазированных антенных решеток в режиме излучения, дается оценка различия между характеристиками передающих фазированных антенных решеток с одним и двумя кольцами пассивного обрамления и изменения стоимости фазированных антенных решеток при добавлении пассивного обрамления. Теоретически вопрос рассмотрен на примере решетки из 9 излучателей (3 по горизонтали и 3 по вертикали). В качестве объектов моделирования взяты квадратные вибраторные решетки с квадратной сеткой расположения излучателей размерами от 49 до 361 антенного элемента. Рассматриваются факторы, влияющие на изменение коэффициентов при добавлении пассивного обрамления. Приводятся графические материалы проверки результатов моделирования в программе CST Microwave Studio, подтверждающие нецелесообразность в большинстве случаев установки пассивного обрамления для передающих фазированных антенных решеток.

Ключевые слова: антенная решетка, фазированная антенная решетка, коэффициент отражения, коэффициент усиления, коэффициент стоячей волны.

Введение

Согласование излучателей в антенной решетке подразумевает настройку активного коэффициента отражения [1, 2] при работе антенны в рабочем секторе обзора и диапазоне частот. Для его настройки существуют разные способы, один из них – добавление пассивных элементов в раскрыв фазированной антенной решетки (ФАР). Это достаточно известный способ развязки излучателей антенных решеток [3, 4] и борьбы с ослеплением [5, 6]. Также известно, что пассивное обрамление несколько уменьшает уровень заднего излучения [7]. В данной работе рассмотрена возможность улучшения согласования излучателей на краях ФАР, где вокруг активных излучателей устанавливается кольцо из нагруженных на согласованную нагрузку пассивных излучателей. Наиболее часто это применяется в приемных ФАР [8, 9]. Краевыми в таких антеннах можно считать излучатели, расположенные на расстоянии менее пяти длин волн от края антенной решетки [10].

Целью работы является оценка влияния пассивного обрамления на характеристики плоской ФАР в режиме излучения, оценка различия между характеристиками передающих ФАР с одним и двумя кольцами пассивного обрамления и оценка изменения стоимости ФАР при добавлении пассивного обрамления.

Для упрощения задачи оценка проходит на примере ФАР, где изменение согласования излучателей по частоте не учитывается.

Постановка задачи. На примере плоской ФАР размера $N \times N$, где N – размер стороны решетки, необходимо оценить влияние одного и двух колец пассивных излучателей на согласование крайних излучателей и коэффициент усиления (КУ) ФАР, а

также сравнить их между собой. Косвенное относительное изменение стоимости ФАР будет вычисляться через увеличение количества излучателей в зависимости от числа колец окружения.

Решение задачи. Для понимания основных причин изменения согласования крайних излучателей необходимо провести сравнение матричных уравнений [11 – 13] ФАР с пассивным обрамлением и без него. Для простоты теоретического анализа по матрице рассеяния будет использована линейная ФАР, состоящая из трех активных излучателей без пассивного обрамления и с двумя кольцами пассивного обрамления, как показано на рис. 1.

Матричные уравнения для ФАР без пассивных излучателей приведены в (1), матричные уравнения для ФАР с двумя кольцами пассивного обрамления приведены в (2):

$$U_{3 \times 3 \text{ стп}} = \begin{pmatrix} S_{33} + S_{34} + S_{35} \\ S_{43} + S_{44} + S_{45} \\ S_{53} + S_{54} + S_{55} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{33} S_{34} S_{35} \\ S_{43} S_{44} S_{45} \\ S_{53} S_{54} S_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$U_{7 \times 7 \text{ стп}} = \begin{pmatrix} S_{13} + S_{14} + S_{15} \\ S_{23} + S_{24} + S_{25} \\ S_{33} + S_{34} + S_{35} \\ S_{43} + S_{44} + S_{45} \\ S_{53} + S_{54} + S_{55} \\ S_{63} + S_{64} + S_{65} \\ S_{73} + S_{74} + S_{75} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} S_{12} S_{13} S_{14} S_{15} S_{16} S_{17} \\ S_{21} S_{22} S_{23} S_{24} S_{25} S_{26} S_{27} \\ S_{31} S_{32} S_{33} S_{34} S_{35} S_{36} S_{37} \\ S_{41} S_{42} S_{43} S_{44} S_{45} S_{46} S_{47} \\ S_{51} S_{52} S_{53} S_{54} S_{55} S_{56} S_{57} \\ S_{61} S_{62} S_{63} S_{64} S_{65} S_{66} S_{67} \\ S_{71} S_{72} S_{73} S_{74} S_{75} S_{76} S_{77} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Как видно из приведенных уравнений, добавление пассивного обрамления не вводит новых компонент в уравнение, а, следовательно, изменение согласования происходит за счет изменения коэффициентов связи между активными излучателями.

Так как это изменение происходит только за счёт переотражений второго порядка от пассивных излучателей, оно будет значительно меньше значений «прямых» связей между соседними активными излучателями.

Изменение КУ при добавлении пассивного окружения будет зависеть от двух факторов – изменения коэффициента направленного действия (КНД) результирующей решетки и изменения согласования угловых излучателей.

Результаты моделирования

Проверка производилась с помощью электродинамического моделирования в программе CST Microwave Studio [14 – 16]. В качестве моделей использовались наиболее распространенные в литературе квадратные ФАР, состоящие из полуволновых вибраторов [17 – 19], подвешенных над бесконечным экраном. Размеры вибраторов оптимизированы для согласования центрального излучателя (обведен синим) до коэффициента стоячей волны (КСВ), равного 1 при равно амплитудном синфазном возбуждении антенной решетки. ФАР без пассивного обрамления приведена на рис. 2, а, а с пассивным обрамлением – на рис. 2, б.

Красным и зеленым отмечены угловой и боковой вибраторы соответственно, согласование которых сравнивалось для решеток с обрамлением и без него.

На рис. 3 приведено согласование боковых и угловых излучателей ФАР размером $N \times N$.

Три кривые из рис. 3, а, характеризуют согласование боковых излучателей. Их КСВ практически не изменяется при добавлении одного или двух колец пассивного обрамления. Три кривые из рис. 3, б, показывают согласование угловых излучателей. Как видно из графика – количество колец пассивного обрамления не сильно влияет на согласование угловых излучателей, что согласуется с [20].

На рис. 4 приведено изменение КУ при добавлении пассивного обрамления, относительно ФАР без пассивного.

Изменение КУ в дБ высчитывалось по (3), а в процентах по (4):

$$\Delta G = G_{\text{с.обр}} - G_{\text{без.обр}}; \quad (3)$$

$$\Delta G, \% = (1 - 10^{(-0,1\Delta G)}) 100\%. \quad (4)$$

Видно, что добавление первого кольца пассивного обрамления уменьшает КНД, при добавлении второго кольца КНД незначительно увеличивается, но все равно меньше, чем КНД ФАР без пассивного обрамления.

На рис. 5 приведено изменение числа излучателей в ФАР.

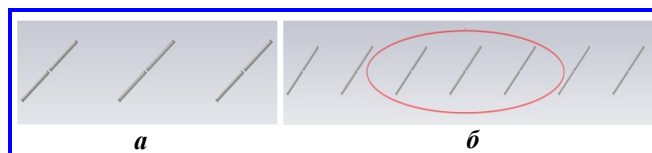


Рис. 1. Линейная фазированная антенная решетка из трех излучателей: а – без пассивного обрамления; б – с двумя кольцами пассивного обрамления

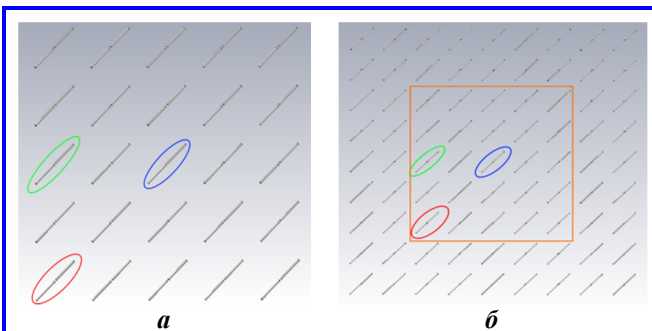


Рис. 2. Квадратная фазированная антенная решетка из трех излучателей: а – без пассивного обрамления; б – с двумя кольцами пассивного обрамления

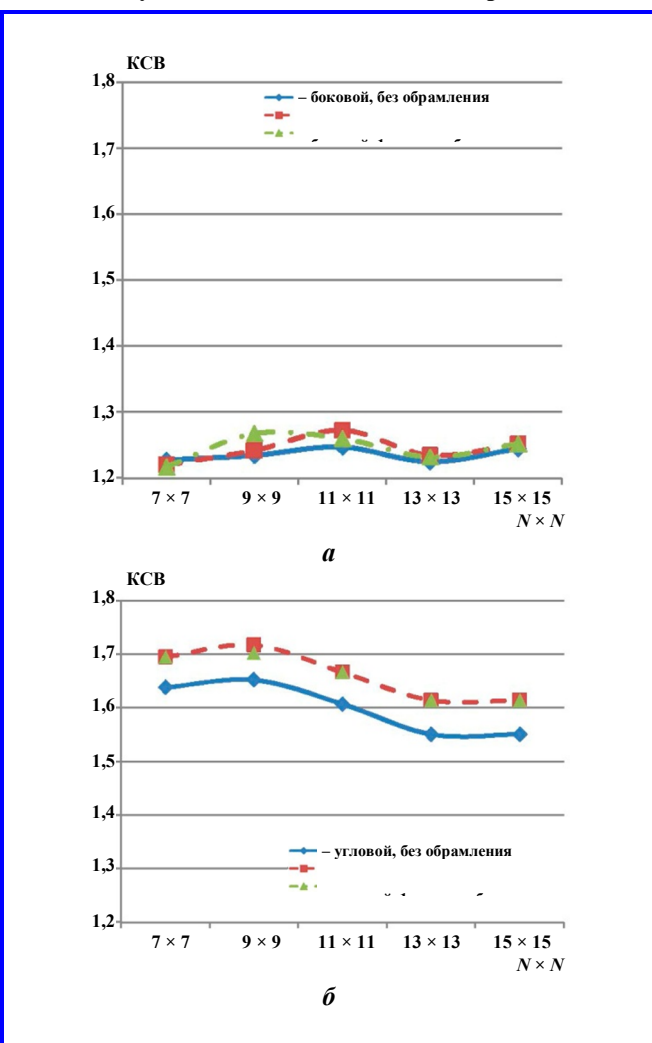


Рис. 3. Коэффициент стоячей волны крайних излучателей: а – боковых; б – угловых

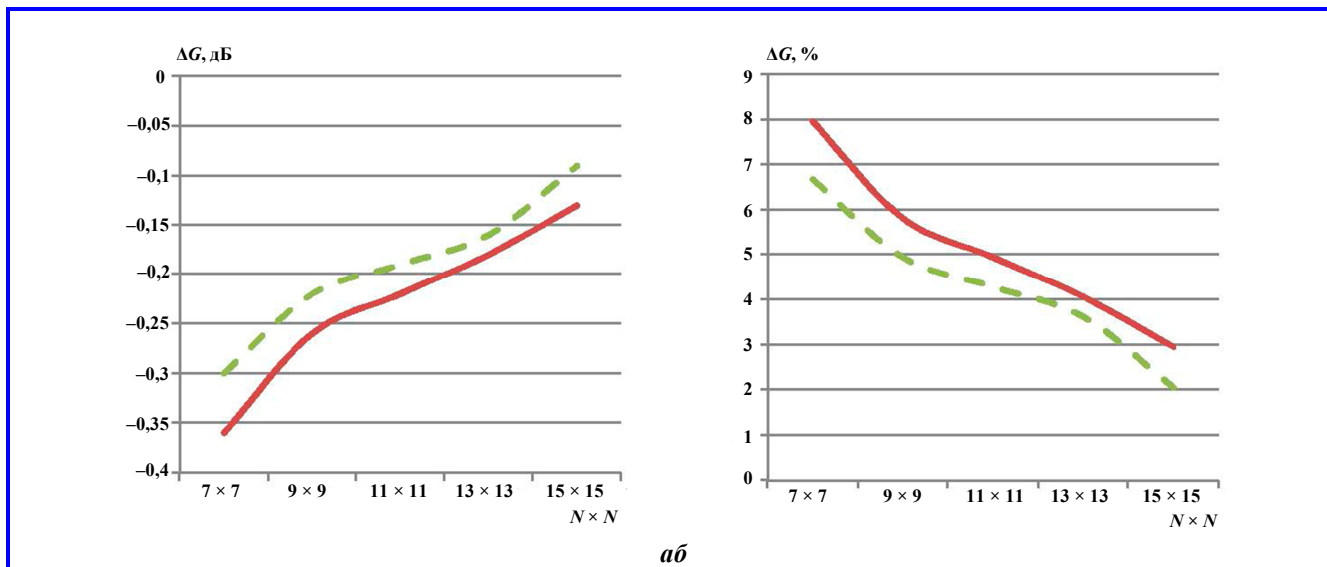


Рис. 4. Падение коэффициента усиления при добавлении пассивного обрамления в зависимости от размера антенной решетки: *a* – в дБ; *b* – в процентах; — — — одно кольцо обрамления; — — — два кольца обрамления

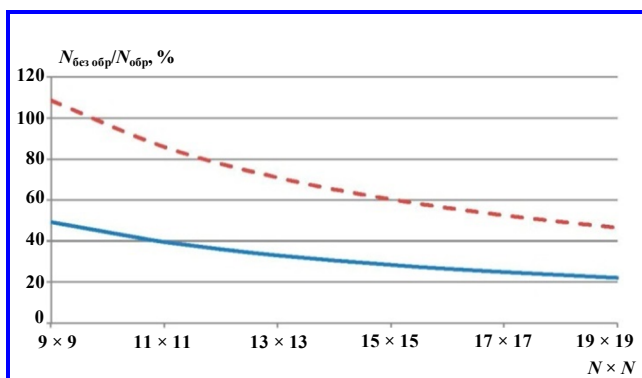


Рис. 5. Увеличение общего числа излучателей квадратной решётки размером $N \times N$ при добавлении пассивного обрамления: — — — с одним кольцом; - - - двумя кольцами

Вычисленное изменение числа излучателей в ФАР для квадратной решетки при добавлении одного и двух колец пассивного обрамления приведено в (5):

$$\frac{N_{\text{без обр}}}{N_{\text{с обр}}} = \left(\frac{NM}{(N + K)(M + K)} - 1 \right) 100\%, \quad (5)$$

где K – количество колец обрамления; N – количество элементов по основным осям решетки.

Как видно из рис. 5, даже для решётки размером 19×19 (361 элемент) для одного кольца обрамления количество излучателей увеличивается более чем на 20%, а для двух – более чем на 40%. Это пропорционально увеличению стоимости ФАР, а также стоимости несущих конструкций.

Заключение

По итогам проведенного исследования можно сделать вывод, что установка пассивного обрамления для передающих ФАР в большинстве случаев нецелесообразна по следующим причинам:

- добавление пассивного обрамления не улучшает согласование угловых и ухудшает согласование крайних излучателей;
- добавление пассивного окружения уменьшает КУ ФАР;
- добавление второго кольца к пассивному обрамлению слабо влияет на характеристики ФАР;
- пассивное окружение существенно увеличивает относительную стоимость ФАР.

Литература

1. The active element pattern / D. M. Pozar // IEEE Trans. Antennas and Propagat. –1994. – Vol. 42. – P. 1176 – 1178.
2. A relation between the active input impedance and the active element pattern of a phased array / D. M. Pozar // IEEE Trans. Antennas and Propagat. –2003. – Vol. 51. – P. 2486 – 2489.
3. Decoupling of Two Strongly Coupled Dual-Band Antennas With Reactively Loaded Dummy Element Array / Xiumei Shen, Feng Liu, Luyu Zhao [et al.] // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 154672 – 154682. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8879584> (дата обращения: 08.04.2021). – Текст :электронный.
4. Decoupling of a Three-Port MIMO Antenna With Different Impedances Using Reactively Loaded Dummy Elements / Jing-YaDeng, Jin-Yong Li, Li-Xin Guo // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2018. – Vol. 17. – Iss. 3 – P. 430 – 432.
5. Сурков В. И. Расчёт вибраторных фазированных антенных решёток с расширенным углом сканирования: специальность 05.12.07 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. И. Сурков. – Москва, 1984. – 319 с.

6. Оптимизация широкополосной фазированной антенной решётки с вибраторными излучателями / В. А. Цветков, С. Г. Кондратьева // Труды МАИ. – 2019. – № 108. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109430>. (дата обращения: 08.04.2021). – Текст : электронный. – DOI: 10.34759/trd-2019-108-6.
7. Количественная оценка уровня бокового и заднего излучения фазированных антенных решёток методом дифракции Кирхгофа-Зоммерфельда / А. А. Прилуцкий // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований. – Материалы 2-й научно-технической конференции «Инновационные автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований. Актуальные вопросы создания служебных и научных систем», Анапа, Краснодарский край, 4 – 9 сентября 2017 года. – URL: file:///C:/Users/vtsvetkov/Downloads/_29_03_17.pdf. – (дата обращения: 08.04.2021). – Текст : электронный.
8. Effect of dummy elements on a monopole array-assisted Doppler spread compensator for digital terrestrial television broadcasting receiver / Y. Yu, M. Okada, H. Yamamoto // IEEE Radio and Wireless Symp. – 2006. – P. 203 – 206.
9. Design and construction of an array of vertically oriented bow-tie antennas for a new generation of radio telescopes / M. J. Arts, A. B. Smolders // 29th European Microwave Conf. – 1999. – P. 259 – 262.
10. On the size requirement for finite phased-array models / H. Holter, H. Steyskal // IEEE Trans. Antennas and Propagat. – 2002. – Vol. 50. – P. 836 – 840.
11. Марков Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов // Москва : Энергия, 1975. – С. 191 – 194.
12. Хансен Р. К. Сканирующие антенные системы СВЧ / Р. К. Хансен. – Москва: Советское радио, 1969. – Т. 2. – 496 с.
13. Bhattacharyya A.K. Phased array antennas / A. K. Bhattacharyya. – New York : John Wiley & Sons Inc., 2006. – 516 p. – DOI: 10.1002/9780470529188.ch7.
14. 3DDesign&EngineeringSoftware [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/>. – Дата доступа: 08.09.2021.
15. Курушин А. Проектирование СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE / Александр Курушин – Москва : Солон-пресс, 2018. – 428 с.
16. Юрцев А. О. Моделирование антенн в режимах излучения и рассеяния в пакетах CST Studio, HFSS, FEKO и узкоспециализированных программах / А. О. Юрцев, Ю. Ю. Бобков, В. В. Кизименко [и др.] – Минск: БГУИР, 2012. – 62 с. – URL: https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_85515.pdf (дата обращения: 08.04.2021). – Текст : электронный.
17. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Д. И. Воскресенский (ред.). – Москва : Радиотехника, 2003. – 631 с.
18. Гончаренко И. В. Антенны КВ и УКВ. В 6 частях. Часть 5. Направленные КВ антенны / И. В. Гончаренко. – Москва : Радиософт, 2010. – 317 с.
19. Драбкин А. Л. Антенно-фидерные устройства / А. Л. Драбкин, В. Л. Зузенко, А. Г. Кислов. – Москва : Советское радио, 1974. – 536 с.
20. On the use of dummy elements to match edge elements in transmit arrays / Eric Holzman // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. – 2013. – P. 549 – 552. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6731887/> (дата обращения: 08.04.2021). – Текст : электронный.

Поступила в редакцию 19.04.2021

Василий Алексеевич Цветков, ведущий инженер, т. 8 (915) 045 15 91,
(АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» (АО «РТИ»)).
e-mail: vtsvetkov@rti-mints.ru.

Александр Васильевич Князев, инженер, т. 8 (916) 382 37 78, e-mail: s_knyzev@mail.ru.
(АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» (АО «РТИ»)).

Ирина Владимировна Алексанова, заместитель начальника отдела,
т. 8 (917) 575 73 62, e-mail: irina-razina@yandex.ru.
(ПАО «НПО «Алмаз»)).

Светлана Геннадьевна Кондратьева, кандидат технических наук, доцент,
т. 8 (915) 042-94-22, e-mail: kondratieff89@ya.ru.
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)).
(Российский университет дружбы народов).

PASSIVE ENVIRONMENT IN TRANSMITTING PHASED ARRAY ANTENNAS

V. A. Tsvetkov, A. V. Kniazev, I. V. Aleksanova, S. G. Kondratieva

The article investigates the effect of passive framing on the performance of phased antenna arrays in radiation mode and gives an estimate of the difference between the performance of transmitting phased antenna arrays with one and two passive framing rings and the change of phased antenna arrays cost in case of adding of passive framing. Theoretically this aspect is considered with the help of a case study with antenna array consisting of 9 radiators (3 x 3 radiator antenna array). The objects of modelling are represented by square dipole arrays with a square mesh for accommodation of reflectors with a size of 49 to 361 antenna elements. The factors leading to the change of

coefficients after adding passive framing are considered in the article. The article contains graphical information demonstrating the results of verification of modelling performed using the CST Microwave Studio program, confirming that the installation of passive framing for transmitting phased antenna arrays is unreasonable in most cases.

Key words: antenna array, phased antenna array, reflection coefficient, antenna gain, standing wave ratio.

References

1. The active element pattern / D. M. Pozar // IEEE Trans. Antennas and Propagat. –1994. – Vol. 42. – P. 1176 – 1178.
2. A relation between the active input impedance and the active element pattern of a phased array / D. M. Pozar // IEEE Trans. Antennas and Propagat. –2003. – Vol. 51. – P. 2486 – 2489.
3. Decoupling of Two Strongly Coupled Dual-Band Antennas With Reactively Loaded Dummy Element Array / Xiumei Shen, Feng Liu, Luyu Zhao [et al.] // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 154672 – 154682. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8879584> (access date: 08.04.2021). – Text: electronic.
4. Decoupling of a Three-Port MIMO Antenna With Different Impedances Using Reactively Loaded Dummy Elements / Jing-YaDeng, Jin-Yong Li, Li-Xin Guo // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2018. – Vol. 17. – Iss. 3 – P. 430 – 432.
5. Surkov V.I. Calculation of dipole phased antenna arrays with extended scanning angle: speciality 05.12.07 ‘Antennas, microwave devices and their technologies’: Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences / V.I. Surkov. – Moscow, 1984. – p. 319.
6. Optimization of a broadband phased array with vibrator emitters / V.A. Tsvetkov, S.G. Kondratieva // MAI Proceedings. – 2019. – No. 108. – URL:<http://trudymai.ru/published.php?ID=109430>. (date of access: 08.04.2021). – Text : electronic. – DOI: 10.34759/trd-2019-108-6.
7. Qualitative assessment of lateral and rear radiation of phased antenna arrays by means of Kirchhoff- Sommerfeld diffraction method / A.A. Prilutskiy // Topical issues in designing automatic spacecraft for fundamental and applied research. – Proceedings of the 2nd scientific and technical conference ‘Innovative automatic spacecraft for fundamental and applied research. Topical issues in designing the service and scientific systems’, Anapa, Krasnodar Territory, September 4 – 9, 2017. – URL:file:///C:/Users/vtsvetkov/Downloads/_29_03_17.pdf. – (date of access: 08.04.2021). – Text: electronic.
8. Effect of dummy elements on a monopole array-assisted Doppler spread compensator for digital terrestrial television broadcasting receiver / Y. Yu, M. Okada, H. Yamamoto // IEEE Radio and Wireless Symp. – 2006. – P. 203 – 206.
9. Design and construction of an array of vertically oriented bow-tie antennas for a new generation of radio telescopes / M. J. Arts, A. B. Smolders // 29th European Microwave Conf. –1999. – P. 259 – 262.
10. On the size requirement for finite phased-array models / H. Holter, H. Steyskal // IEEE Trans. Antennas and Propagat. – 2002. – Vol. 50. –P. 836 – 840.
11. Markov G.T. Antennas / G.T. Markov, D. M. Sazonov // Moscow: Energia, 1975. – Pp. 191 – 194.
12. Hansen R.C. Microwave scanning antenna systems / R.C. Hansen. – Moscow: Soviet radio, 1969. – Vol. 2. – p. 496.
13. Bhattacharyya A.K. Phased array antennas / A. K. Bhattacharyya. – New York : John Wiley & Sons Inc., 2006. –516 p. – DOI: 10.1002/9780470529188.ch7.
14. 3DDesign&EngineeringSoftware [Electronic resource]. – Access available at: <https://www.3ds.com/>. – Date of access: 08.09.2021.
15. Kurushin A. Design of Microwave Devices using the CST Studio Suite / Aleksandr Kurushin – Moscow : Solon-press, 2018. – p. 428.
16. Yurtsev A.O. Simulation of antennas in radiation and dissipation modes using the CST Studio, HFSS, FEKO packets and specialty programs / A. O. Yurtsev, Yu. Yu. Bobkov, V.V. Kizimenko [et al.] – Minsk: BSUIR, 2012. – p. 62. – URL:https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_85515.pdf (date of access:08.04.2021). – Text: electronic.
17. Microwave devices and antennas. Designing of phased antenna arrays / Voskresenskiy D. I. (edit.) – Moscow : Radio-tekhnika, 2003. - p. 631.
18. Goncharenko I.V. HF and UHF antennas. In 6 parts. Part 5. Directional HF antennas / I. V. Goncharenko. – Moscow : Radiosoft, 2010. – p. 317.
19. Drabkin A. L. Antenna-feeder devices / A. L. Drabkin, V. L. Zuzenko, A. G. Kislov. – Moscow : Soviet radio, 1974. – p. 536.
20. On the use of dummy elements to match edge elements in transmit arrays / Eric Holzman // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. – 2013. – P. 549 – 552. – URL:<https://ieeexplore.ieee.org/document/6731887/> (date of access: 08.04.2021). – Text : electronic.

Vasily Alekseevich Tsvetkov, Leading Engineer, tel.: +7 (915) 045 15 91, e-mail: vtsvetkov@rti-mints.ru.

Alexander Vasilyevich Kniazev, Engineer, tel.: +7 (916) 382 37 78, e-mail: s_knyzev@mail.ru.

(JSC «Radio Engineering Institute named after Academician A.L. Mints» (JSC «RTI»)).

Irina Vladimirovna Aleksanova, Deputy Head of the Department,

tel.: +7 (917) 575 73 62, e-mail: irina-razina@yandex.ru.

(JSC «NPO «Almaz»).

Svetlana Gennadievna Kondratieva, Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Associate Professor,

tel.: +7 (915) 042-94-22, e-mail: kondratieff89@ya.ru.

(Moscow Aviation Institute (National Research University)).

(RUDN University).