

УДК 621.396.663

О.А. Юрцев, С.А. Завадский

Влияние взаимодействия между излучателями на характеристики дуговых вибраторных антенных решеток

Вопросы взаимодействия между излучателями в дуговых и кольцевых антенных решетках при разном амплитудно-фазовом распределении в литературе рассмотрены недостаточно. В статье приводятся результаты численного моделирования дуговых антенных решеток вибраторных излучателей. Исследуются закономерности влияния взаимодействия между излучателями на диаграмму направленности, коэффициент направленного действия и входное сопротивление излучателей при разном амплитудном и фазовом распределении возбуждения излучателей. При анализе используется метод интегральных уравнений.

Ключевые слова: вибраторный излучатель, дуговая решетка, численное моделирование, метод интегральных уравнений.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-17-21

Дуговые и кольцевые антенные решетки рассмотрены во многих публикациях [1–8]. Но вопросы взаимодействия между излучателями при разном амплитудно-фазовом распределении изучены недостаточно [9–11]. Это связано с тем, что в большинстве работ исследовались решетки из излучателей с изотропной диаграммой направленности (ДН). Взаимодействие же излучателей в решетке зависит от конструкции излучателей и может быть рассмотрено при задании конкретного типа излучателя. В настоящей статье рассматриваются дуговые решетки вибраторных излучателей. Вибраторный излучатель в общем случае содержит линейный полуволновый вибратор, линейный рефлектор и линейные директоры. Если эти элементы расположены в плоскости дуги решетки, то решетка далее называется E -плоскостной, если перпендикулярна ей, то H -плоскостной. На рис. 1, 2 схематически показаны два варианта решеток таких излучателей. На рисунках обозначено: 1 – линейный рефлектор, 2 – активный вибратор, 3 – линейный директор.

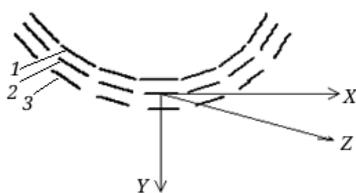


Рис. 1. Дуговая E -плоскостная решетка вибраторных излучателей

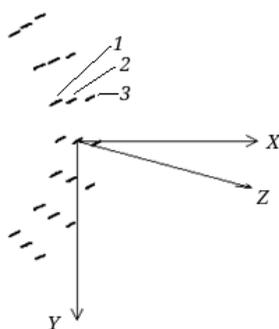


Рис. 2. Дуговая H -плоскостная решетка вибраторных излучателей

Далее рассматривается E -плоскостная решетка. Анализ проведен методом интегральных уравнений (ИУ). В качестве ИУ использовано ИУ Поклингтона [12]. При его решении использованы импульсные функции в качестве базисных и весовых.

Результаты численного моделирования

В статье основные закономерности рассматриваются на примере дуговой антенной решетки (ДАР) с излучателями в виде активного вибратора и линейного рефлектора. Используются следующие обозначения: L_v – длина вибратора, L_r – длина рефлектора, D_e – линейное расстояние между рефлектором и вибратором, A_0 – радиус проводника рефлектора и вибратора, R_e – радиус дуги решетки, N_e – число излучателей в решетке, $Z = R + iX$ – входное сопротивление излучателя в решетке.

Ниже результаты моделирования представлены в виде графиков зависимости входного сопротивления от частоты и графиков диаграмм направленности (ДН) при различных геометрических параметрах решетки. Средняя частота f_0 взята равной 300 МГц. На этой частоте упомянутый излучатель выбором его геометрических размеров был настроен для получения входного сопротивления $Z = R + iX = 50$ Ом без учета взаимодействия в составе решетки: $L_v = 434$ мм, $L_r = 480$ мм, $D_e = 196$ мм, $A_0 = 5$ мм.

Дуговая решетка рассматривается как фрагмент кольцевой решетки. Число излучателей и радиус кривизны дуговой решетки для исследования основных закономерностей выбраны из следующих соображений. Линейное расстояние между соседними излучателями $D_e = (0,5 - 1,0)\lambda_0$ (λ_0 – длина волны, соответствующая средней частоте f_0 диапазона). Расстояние $D_e = 0,5\lambda_0$ обеспечивает выполнение условия единственности главного лепестка при фазовом сканировании в секторе углов $\pm(45 - 50)^\circ$, если число излучателей в решетке в плоскости дуги равно $N_e = 7 - 10$. Радиус кривизны дуговой решетки R_e выбран так, чтобы фрагмент ее занимал дугу,

примерно равную 90° . В этом случае вся кольцевая решетка сможет одновременно формировать 4 луча с круговым конформным сканированием в секторе $0-360^\circ$. Из этих соображений для иллюстрации различных закономерностей в качестве примера выбрано число излучателей, равным $N_e=7$, радиус кольцевой решетки $R_e = 2000-6000$ мм.

На рис. 3 показаны дуговая и линейная (для сравнения) решетки вибраторных излучателей с числом излучателей $N_e = 7$.

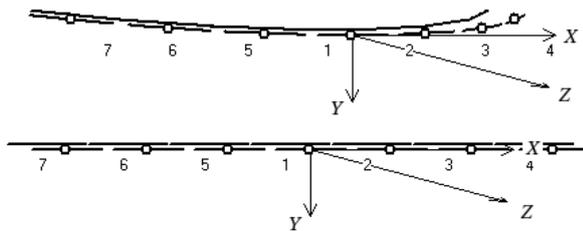


Рис. 3. Нумерация излучателей в 7-элементной решетке

На рис. 4 показаны зависимости R и X излучателя от его номера с учетом взаимодействия в составе 7-элементной решетки: a – для дуговой решетки, b – для линейной решетки. В решетке возбуждены все излучатели с равномерным амплитудным распределением и четным относительно центра фазовым распределением, при котором обеспечивается фокусировка решетки в направлении оси Z . Радиус решетки $R_e = 2\lambda_0 = 2000$ мм, расстояние между соседними излучателями $D_e = 0,7\lambda_0 = 700$ мм.

Из рис. 4 и других результатов моделирования следует, что взаимодействие приводит к некоторому росту активной части входного сопротивления. Реактивная часть растет в сторону отрицательных значений.

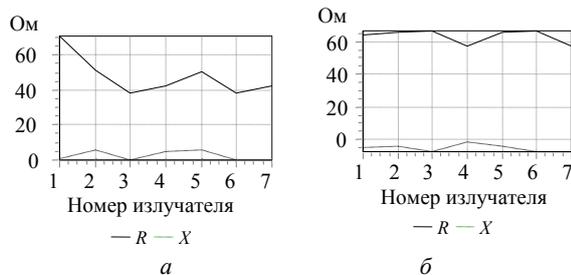


Рис. 4. Зависимости R и X излучателя от его номера с учетом взаимодействия в составе 7-элементной решетки. Расстояние между соседними излучателями $D_e = 0,7\lambda_0 = 700$ мм

Как видно, взаимодействие приводит к большому изменению реактивной части входного сопротивления, чем активной части. Также можно заметить, что влияние взаимодействия на входное сопротивление в дуговой и линейной решетках существенно различно.

Входное сопротивление каждого излучателя в решетке зависит от расстояния между соседними излучателями, амплитудного и фазового распределений возбуждения излучателей и от их взаимодействия в составе решетки. Рисунки 5 и 6 иллюстрируют эти закономерности.

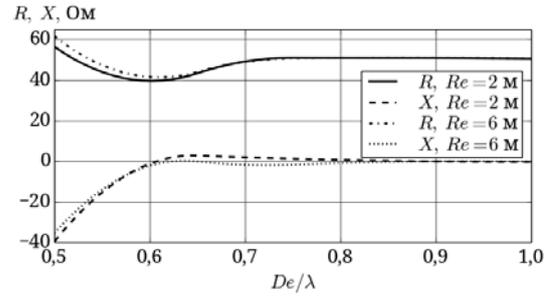


Рис. 5. Зависимость входного сопротивления излучателей от нормированного к средней длине волны расстояния между соседними излучателями D_e/λ при разных радиусах дуговой решетки R_e кривые

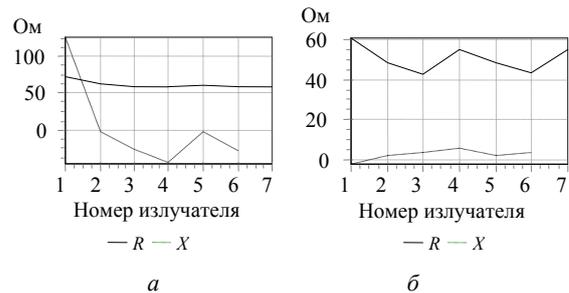
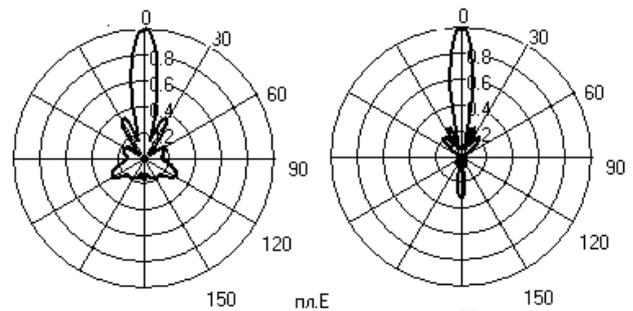


Рис. 6. Зависимость входного сопротивления от номера излучателя. Расстояние между излучателями: $a - D_e = 0,5\lambda_0$; $b - D_e = 0,8\lambda_0$

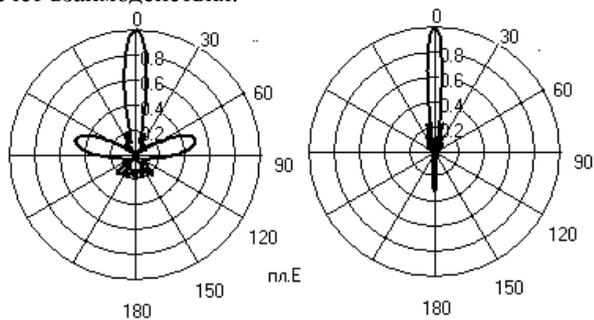
На рис. 7 и 8 показаны в линейном масштабе ДН решетки при указанных выше расстояниях D_e . Число излучателей в решетке $N_e=7$. Нелинейное фазовое распределение на эквивалентной линейной решетке скомпенсировано, что обеспечивает фокусировку дуговой решетки в направлении оси Z . Для сравнения на том же рисунке показана ДН прямолинейной решетки с теми же параметрами. Как видно, в дуговой решетке по сравнению с прямолинейной решеткой КНД меньше. Это очевидный результат, так как размер апертуры меньше. На рис. 7, 8 обозначено: F/B – отношение КНД в направлении максимума ДН и в обратном направлении.

Уровень боковых лепестков дуговой решетки больше за счет того, что максимумы ДН излучателей ориентированы по радиусам решетки, в том числе в направлении боковых лепестков ДН решетки.



Дуговая решетка КНД = 10,1 дБ; $F/B = 11,1$ дБ
 Линейная решетка КНД = 11,8 дБ; $F/B = 10$ дБ
 Рис. 7. ДН 7-элементной дуговой и линейной решеток при $D_e = 0,5\lambda_0$ на средней частоте 300 МГц

Возрастание боковых лепестков связано также с изменением формы ДН отдельного излучателя за счет взаимодействия.



Дуговая решетка
КНД = 9,7 дБ; F/B = 10,3 дБ
Линейная решетка
КНД = 14,2 дБ; F/B = 9,3 дБ
Рис. 8. ДН 7-элементной дуговой и линейной решеток при $D_e = 0,8\lambda_0$ на средней частоте 300 МГц

В подрисуночных надписях рис. 7 и 8 приведены также значения коэффициента направленного действия (КНД).

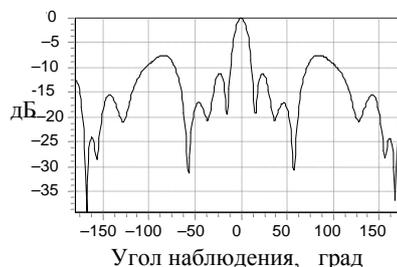
Для исследования влияния амплитудного распределения использовано амплитудное распределение, описываемое косинусом в степени P_a (произвольное число) на пьедестале D_a . В качестве примера рассматривается та же дуговая решетка вибраторных излучателей с числом излучателей $N_e = 7$, расстояние между центрами соседних излучателей $D_e = 0,7\lambda$ ($D_e = 700$ мм, частота 300 МГц). На рис. 9, 10 представлены результаты расчета ДН при различных значениях D_a и $P_a = 1$. Фазовое распределение на эквивалентной линейной решетке (ЭЛР) равномерное.

Из рис. 9, 10 следует, что при одинаковом амплитудном распределении и расстоянии между соседними излучателями уровень боковых лепестков (УБЛ) в дуговой решетке больше, чем в прямолинейной.

Особенно возрастают боковые лепестки на границе переднего и заднего полупространств за счет того, что максимумы ДН крайних излучателей в дуговой решетке ориентированы в направлении, близком к 90° . Степень уменьшения УБЛ за счет использования спадающего к краям решетки амплитудного распределения в дуговой решетке меньше, чем в прямолинейной. За счет более высокого УБЛ и меньшей длины эквивалентной линейной решетки КНД в дуговой решетке меньше, чем в прямолинейной при одинаковом числе излучателей и расстоянии между соседними излучателями.

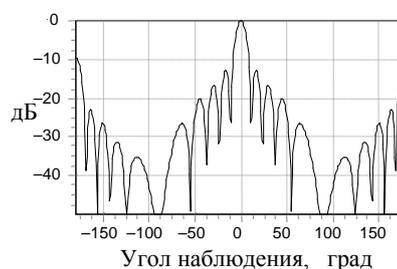
В кольцевых и цилиндрических решетках при сканировании группа возбужденных излучателей, формирующих ДН, перемещается вдоль решетки (конформное сканирование). Следовательно, угловой дискрет перемещения ДН равен угловому расстоянию между соседними излучателями решетки. Если такой дискрет слишком велик для данной технической задачи, дополнительно используется фазовое сканирование. Далее рассматривается только

фазовое сканирование. При этом возбужденная часть кольцевой решетки является дуговой решеткой и рассматривается ниже. Некоторые различия в параметрах возбужденного фрагмента кольцевой решетки и дуговой решетки при одинаковых геометрических параметрах обусловлены тем, что в дуговой решетке есть два конца, т.е. присутствует концевой эффект.



Угол наблюдения, град

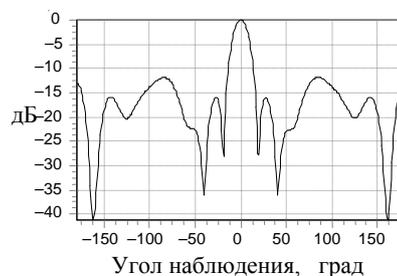
Дуговая решетка



Угол наблюдения, град

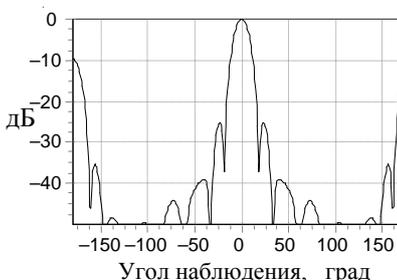
Линейная решетка

Рис. 9. ДН дуговой и прямолинейной решеток при равномерном амплитудном распределении возбуждения



Угол наблюдения, град

Дуговая решетка



Угол наблюдения, град

Линейная решетка

Рис. 10. ДН дуговой и прямолинейной решеток при амплитудном распределении возбуждения излучателей с параметрами $P_a = 1$, $D_a = 0,2$

В дуговой решетке все излучатели расположены в различном окружении. За счет этого токи в излучателях даже при равномерном амплитудно-фазовом распределении возбуждения различны по амплитуде и фазе.

В кольцевой решетке концевой эффект заключается в том, что за пределами активной зоны, в которой излучатели возбуждены с требуемым амплитудно-фазовым распределением, расположены пассивные излучатели. В них наводятся токи полем излучателей активной зоны. Поле этих токов складывается с полем излучателей активной зоны, за счет чего искажается ДН активной зоны.

Ниже оценивается влияние взаимодействия между излучателями ДН при фазовом сканировании. В качестве фазового распределения рассматривается линейное фазовое распределение на эквивалентной линейной решетке, обеспечивающее фазовое сканирование. При этом на дуговой решетке фазовое распределение отличается от линейного за счет дополнительного фазового распределения, обеспечивающего фокусировку решетки в заданном направлении. Это дополнительное фазовое распределение в излучателях решетки учтено во всех результатах, приводимых ниже.

На рис. 11 и 12 показаны ДН линейной и дуговой решеток при угле сканирования $\theta_m = 20^\circ$. Параметры решетки: число излучателей $N_e = 7$, линейное расстояние между центрами соседних излучателей $D_e = 0,5\lambda$, радиус дуговой решетки $R_e = 2000$ мм. Амплитудное распределение равномерное

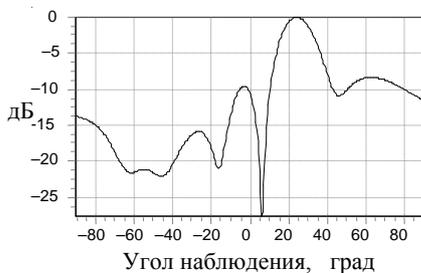


Рис. 11. ДН дуговой решетки при угле сканирования $\theta_m = 20^\circ$ и радиусе дуговой решетки $R_e = 2\lambda_0 = 2000$ мм

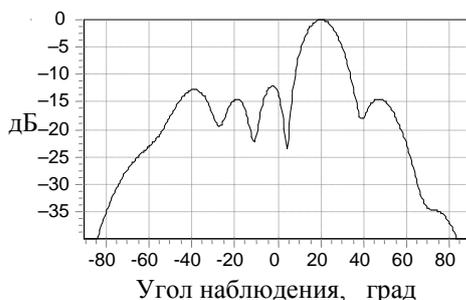


Рис. 12. ДН линейной решетки при угле сканирования $\theta_m = 20^\circ$

Из результатов численного моделирования следует, что:

1. Взаимодействие излучателей в дуговой решетке при одних и тех же значениях межэлементного расстояния D_e и числе излучателей N_e приводит к более существенному росту боковых лепестков по сравнению с линейной решеткой, особенно при больших углах сканирования.

2. Взаимодействие приводит к существенному изменению входного сопротивления излучателей в дуговой антенной решетке. Изменение входного сопротивления увеличивается с ростом угла сканирования.

3. Степень взаимодействия и связанные с ним изменения в ДН и входного сопротивления увеличивается с уменьшением радиуса дуговой решетки.

Литература

1. Воскресенский Д.И. Выпуклые сканирующие антенны / Д.И. Воскресенский, Л.И. Пономарев. – М.: Сов. радио, 1977. – 207 с.
2. Neff H.P. An electronically scanned circular antenna array / H.P. Neff, J.D. Tillman // IRE Intern. Conv. Rec. – 1960. – Vol. 8, pt. 1. – P. 41–47.
3. Воскресенский Д.И. КНД выпуклых остронаправленных антенных решёток / Д.И. Воскресенский, В.С. Филиппов // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1968. – Т. 11, № 5. – С. 426–440.
4. Accurate Analysis of Conformal Antenna Arrays with Finite and Curved Frequency Selective Surfaces / N. Yuan, X.-C. Nie, Y.-B. Gan, T.-S. Yeo, L.-W. Li // Journal of Electromagnetic Waves and Applications – 2007. – Vol. 21, No. 13. – P. 1745–1760.
5. Taylor T. A synthesis method for circular and cylindrical antennas composed of discrete elements // Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation. – 1952. – Vol. 3. – P. 251–261.
6. Protsenko M.B. Curved antenna array for application to mobile communication systems / M.B. Protsenko, M.V. Rozhnovskiy, P. Bannykh, O. Kobylinskiy, A.A. Iarenko // International Conference on Antenna Theory and Techniques. – Odessa, Ukraine, 2013. – P. 261–263.
7. Karimkashi S. An optimal design of a cylindrical polarimetric phased array radar for weather sensing / S. Karimkashi, G. Zhang // Radio Sci. – 2012. – Vol. 47. – P. 2017–2027.
8. He Q.-Q. An Efficient Pattern Synthesis Method for Cylindrical Phased Array Antennas / Q.-Q. He, H.-D. He, H. Lan // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2009. – Vol. 23. – P. 473–482.
9. Goossens R. Optimal beam forming in the presence of mutual coupling / R. Goossens, H. Rogier // Symposium on Communications and Vehicular Technology – Liege, Belgium, 2006. – P. 13–18.
10. Craeye C. A review on array mutual coupling analysis / C. Craeye, D. Gonzalez-Ovejero // Radio Sci. – 2011. – Vol. 46. – P. 2012–2027.
11. Hui H.T. Decoupling Methods for the Mutual Coupling Effect in Antenna Arrays: A Review // Recent Patents on Engineering. Bentham Science Publishers. – 2007. – Vol. 1, No. 2. – P. 187–193.
12. Вычислительные методы в электродинамике: пер. с англ. / под ред. П. Митры. – М.: Мир, 1977. – 243 с.

Юрцев Олег Анатольевич

Д-р техн. наук, профессор каф. информационных радиотехнологий (ИРТ) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР)
П. Бровка ул., д. 6, г. Минск, Беларусь, 220013
Тел.: +375 (29) 773-54-27
Эл. почта: yurtsev_o@mail.ru

Завадский Сергей Анатольевич

Аспирант каф. информационных радиотехнологий (ИРТ) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР)
П. Бровка ул., д. 6, г. Минск, Беларусь, 220013
ORCID 0000-0001-5800-9639
Тел.: +375 (29) 1698315
Эл. почта: z_serhio@tut.by

Yurtsev O.A., Zavadski S.A.

Mutual coupling influence on wire arc antenna array parameters

The mutual coupling in arc and ring antenna arrays at different amplitude and phase distribution is not sufficiently described. This article presents numerical investigation of the arc antenna array of vibrator radiators. The simulation results are shown in charts. The mutual coupling between radiators influence dependences of radiation pattern, directivity and impedance at different amplitude and phase excitation distribution are investigated. The integral equations method is incorporated.

Keywords: wire radiator, arc array, numerical simulation, integral equations method

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-17-21

References

1. Voskresenskii D.I., Ponomarev L.I. *Vypuklye skaniruyushchie anteny* [Convex scanning antennas]. M., Sov. Radio publ., 1977, 207 p. (In Russ.)
2. Neff H.P., Tillman J.D. An electronically scanned circular antenna array. *IRE Intern. Conv. Rec.*, 1960, vol. 8, pt. 1, pp. 41–47.
3. Voskresenskii D.I., Filippov V.S. KND vypuklykh ostronapravlennykh antennykh reshetok. [Directivity of convex sharp directional antenna arrays]. *Izvestiya Vuzov SSSR. Radioelektronika*, 1968, vol. 11, no 5, pp. 426–440. (In Russ.)
4. Yuan N., Nie X.-C., Gan Y.-B., Yeo T.-S., Li L.-W. Accurate Analysis of Conformal Antenna Arrays with Finite and Curved Frequency Selective Surfaces. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2007, vol. 21, no. 13, pp. 1745–1760. doi: 10.1163/15693930778189106.

5. Taylor T. A synthesis method for circular and cylindrical antennas composed of discrete elements. *Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation*, 1952, vol. 3, pp. 251–261. doi: 10.1109/T-AP.1952.28047.

6. Protsenko M.B., Rozhnovskiy M.V., Bannykh P., Kobylinskyi O., Iaremenko A.A. Curved antenna array for application to mobile communication systems. *International Conference on Antenna Theory and Techniques*, 2013, Odessa, Ukraine, pp. 261–263. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650745.

7. Karimkashi S., Zhang G. An optimal design of a cylindrical polarimetric phased array radar for weather sensing. *Radio Sci.*, 2012, vol. 47, pp. 2017–2027. doi: 10.1029/2011RS004753.

8. He Q.-Q., He H.-D., Lan H. An Efficient Pattern Synthesis Method for Cylindrical Phased Array Antennas. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2009, vol. 23, pp. 473–482. doi: 10.1163/156939309787612329.

9. Goossens R., Rogier H. Optimal beam forming in the presence of mutual coupling. *Symposium on Communications and Vehicular Technology*, 2006, Liege, Belgium, pp. 13–18. doi: 10.1109/SCVT.2006.334364.

10. Craeye C., Gonzalez-Ovejero D. A review on array mutual coupling analysis. *Radio Sci.*, 2011, Vol. 46, pp. 2012–2027. doi: 10.1029/2010RS004518.

11. Hui H.T. Decoupling Methods for the Mutual Coupling Effect in Antenna Arrays: A Review. *Recent Patents on Engineering, Bentham Science Publishers*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 187–193.

12. Mitra R. *Vychislitel'nye metody v elektrodinamike* [Computational methods in electrodynamics]. Moscow, Mir publ., 1977. 243 p. (In Russ.)

Oleg A. Yurtsev

Doctor of Engineering Sciences, professor,
Department of Information Radiotechnologies,
Belarusian State University of Informatics and
Radioelectronics
6, P. Brovka st., Minsk, Belarus, 220013
Phone: +375 (29) 7735427
Email: yurtsev_o@mail.ru

Siarhei A. Zavadski

PhD student, Department of Information Radiotechnologies,
Belarusian State University of Informatics and
Radioelectronics
6, P. Brovka st., Minsk, Belarus, 220013
ORCID 0000-0001-5800-9639
Phone: +375 (29) 1698315
Email: z_serhio@tut.by