

УДК 621.396.67.012.12

А.Д. Базанова, К.А. Лайко, Ю.О. Филимонова

Структура плоской эквидистантной антенной решетки с радиальной сеткой

Предложена к рассмотрению радиальная структура размещения излучающих элементов в узлах плоской эквидистантной антенной решетки. Рассмотрены известные варианты прямоугольной и гексагональной структур размещения элементов в плоских антенных решетках. Приведены основные расчетные соотношения параметров для радиальной структуры шага и линейных расстояний между излучателями в различных ортогональных направлениях, по радиальной и угловой составляющей. Для предложенной структуры на конкретном примере антенной решетки, состоящей из девяти окружностей с общим количеством излучателей 180 и равномерным амплитудным распределением, рассчитаны диаграммы направленности в трехмерном пространстве, которые представлены на плоскости чертежа различными сечениями по угловой координате φ с шагом 15° . Предложенная радиальная структура, в отличие от известных, обеспечивает идентичность ДН с минимальными расхождениями друг от друга в разных плоскостях φ по уровню -35 дБ.

Ключевые слова: антенная решетка, апертура антенной решетки, диаграмма направленности, излучающие элементы, уровень боковых лепестков, шаг антенной решетки, радиальная структура.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-2-13-17

Существует два основных типа регулярных структур антенных решеток (АР) – это прямоугольная и гексагональная сетки [1]. В прямоугольной сетке ячейка является либо прямоугольником, либо квадратом, в гексагональной – правильным треугольником. Элементы располагаются в узлах сетки, что изображено на рис. 1.

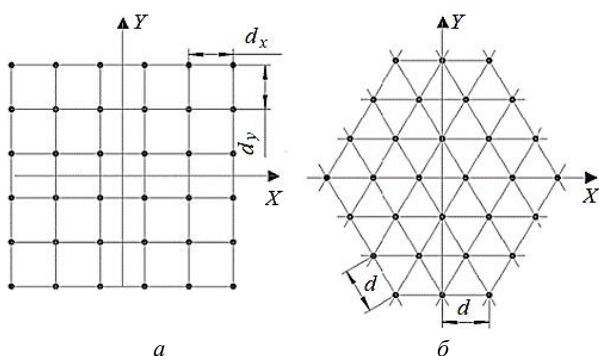


Рис. 1. Размещение излучателей в узлах сетки: прямоугольной – а; гексагональной – б

Здесь d_x , d_y – шаг между излучателями по осям X , Y для прямоугольной сетки; d – шаг между излучателями АР для гексагональной сетки. Для эквидистантной структуры расстояние между элементами является величиной постоянной [2].

В общем случае описанные выше способы расположения излучателей изучены хорошо. Так, например, самая распространенная прямоугольная сетка позволяет получить уровень боковых лепестков (УБЛ) порядка -13 дБ для равномерного амплитудного распределения. При этом недостатком данной структуры является появление дифракционных максимумов с увеличением шага между узлами сетки, также наблюдается различная форма ДН в разных плоскостях обзора. Аналогичные побочные эффекты наблюдаются и при использовании гексагональной сетки координат. Соответственно, возника-

ет необходимость в оптимальной структуре АР, которая позволит, например, получить более низкий УБЛ, отсутствие паразитных дифракционных максимумов и идентичную форму характеристики направленности в различных плоскостях обзора. С точки зрения физической реализуемости радиальная структура не отличается от рассмотренных известных вариантов.

В источниках [3–5] приведено краткое описание кольцевой АР. Представим к рассмотрению подробное описание радиальной структуры расположения излучающих элементов в АР с необходимыми геометрическими параметрами для дальнейшей оптимизации.

Радиальная структура антенной решетки

Радиальная структура – это структура расположения элементов в АР, при котором излучатели равномерно размещены на окружностях определенного радиуса. Приращение радиусов окружностей Δr назовем шагом по радиальной координате d_r . Излучатели равномерно распределены на окружности с шагом по угловой координате d_φ . Величины d_r и d_φ не зависят от номера окружности и являются константой. Данное представление антенной решетки можно характеризовать как радиальную эквидистантную структуру [6–9]. В общем же случае величины d_r и d_φ могут быть варьируемыми. Геометрическое представление радиальной структуры и пояснение к определению координат приведены на рис. 2.

Здесь d_n – расстояние по хорде n -ой окружности, d_φ – расстояние по дуге окружности, d_r – шаг по радиальной координате, r_n – радиус n -й окружности, φ_{nm} – угловая координата элемента, n – номер окружности, m – номер отдельно рассматриваемого излучателя на заданной окружности.

На рис. 2 показана симметричная структура, где начальное смещение по φ равно $d_\varphi/2$. Возможны различные варианты величины смещения по угловой координате для эквидистантной структуры.

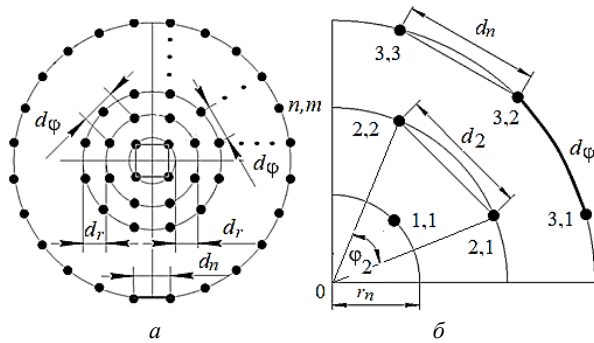


Рис. 2. Геометрическое представление радиальной структуры – а; определение координат для радиальной структуры – б

Геометрические параметры антенны с радиальной структурой

Приведем основные геометрические соотношения для определения линейных (по хорде окружности d_n) и нелинейных расстояний (по дуге окружности d_ϕ) между элементами для данной структуры, которые позволят точно задать параметры АР [10–12].

Определим расстояния между излучателями для заданной структуры, которые будут влиять на физическую реализуемость, на сектор сканирования и другие параметры ФАР [13–14]. Приращение радиусов Δr , а значит, и шаг по радиальной координате d_r , примем равным радиусу первой окружности

$$d_r = \Delta r = r_1 = \text{const}, \quad (1)$$

где r_1 – радиус первой окружности.

Радиус n -й окружности вычисляется как

$$r_n = nr_1. \quad (2)$$

Так как длина n -й окружности увеличивается в n раз, то для сохранения равных расстояний по дуге d_ϕ число излучателей на окружностях должно прирастать по аналогичному закону. Следовательно, число излучателей на n -й окружности (N_n) определяется по формуле

$$N_n = 4n. \quad (3)$$

Для рассмотренной ранее структуры АР найдем шаг по угловой координате ϕ . В общем случае расстояние по координате ϕ между элементами находится из следующего выражения:

$$d_\phi = \frac{2\pi r_n}{N_n}. \quad (4)$$

Тогда расстояние между элементами по дуге любой окружности составляет

$$d_\phi = \frac{2\pi nr_1}{4n} = \frac{\pi r_1}{2}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что шаг по угловой координате d_ϕ не зависит от номера окружности и является величиной постоянной.

$$d_\phi = d_{\phi 1} = d_{\phi 2} = \dots = \text{const}.$$

Поскольку шаг по радиальной d_r и по угловой d_ϕ координатам не зависит от номера окружностей n , то данная структура является эквидистантной.

Расстояние по хорде d_n на n -й окружности между соседними излучателями находится по следующей формуле:

$$d_n = r_n \sin(\phi_n / 2), \quad (6)$$

где $\phi_n = \frac{360^\circ}{4n} = \frac{90^\circ}{n}$ – это угол между отрезками, которые соединяют соседние излучатели на n -й окружности с центром координат (см. рис. 2).

Тогда выражение (6) может быть представлено в следующем виде:

$$d_n = 2r_n \sin(360^\circ / 2N_n). \quad (7)$$

Преобразовав (7), получаем

$$d_n = 2nr_1 \sin(45^\circ / n). \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что минимально возможное расстояние по хорде между соседними излучателями наблюдается при наименьшем количестве элементов, т.е. на первой окружности, и составляет

$$d_1 = 2r_1 n \sin(45^\circ) = \sqrt{2}r_1. \quad (9)$$

При постепенном увеличении радиусов окружностей расстояние между элементами по хорде d_n становится соизмеримо с расстоянием между элементами по дуге окружности d_ϕ

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d_n = \lim_{n \rightarrow \infty} 2nr_1 \sin\left(\frac{\pi}{4n}\right) = \frac{\pi r_1}{2}. \quad (10)$$

Определим расстояния между излучающими элементами в радиальном направлении (расстояния между ближайшими излучателями на соседних окружностях). Обозначим данное расстояние как $d_{n,n+1}$. Геометрическое изображение такого рода структуры, а также пояснения к определению расстояния $d_{n,n+1}$ приведены на рис. 3.

Как следует из рис. 3, б, минимально возможное расстояние между излучателями на соседних окружностях равно $d_r = r_1$.

Максимальное расстояние между соседними элементами, расположенными на окружностях под номерами n и $n+1$ (см. рис. 3, в), определяется исходя из теоремы косинусов. Выражение принимает следующий вид:

$$d_{n,n+1} = \sqrt{(2r_1^2 n^2 - 2r_1^2 n)(1 - \cos(90^\circ / 2n)) + r_1^2}. \quad (11)$$

Упростим данное выражение, используя разложение функции косинуса в ряд Тейлора:

$$\cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m x^{2m}}{(2m)!}. \quad (12)$$

При малых значениях аргумента функции ограничимся первыми двумя членами ряда. Тогда приближенная формула определения расстояния между элементами, расположенными на соседних окружностях, примет вид

$$d_{n,n+1} = r_1 \sqrt{\frac{\pi^2}{16} \left(1 - \frac{1}{n}\right) + 1} = r_1 \sqrt{1,62 - \frac{0,62}{n}}. \quad (13)$$

При большом числе окружностей ($n > 10$), приведенное выше выражение принимает упрощенный вид

$$d_{n,n+1} = 1,27r_1 \quad (14)$$

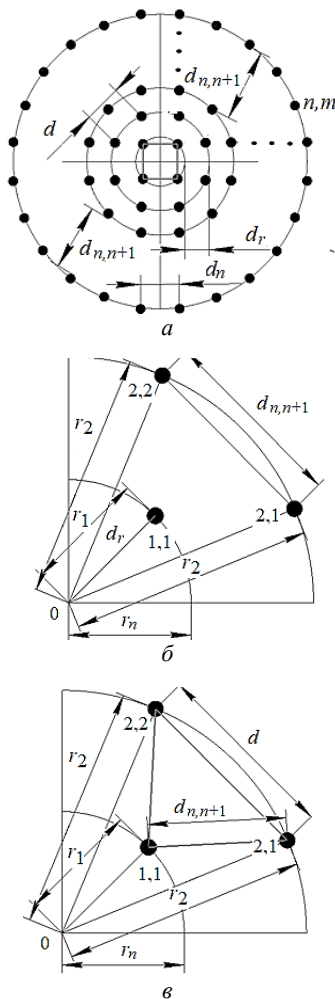


Рис. 3. Геометрическое представление радиальной структуры (расстояние между элементами на соседних окружностях) – а; определение координат для радиальной структуры при расстоянии: минимальном – б; максимальном – в

Расчет характеристик направленности антенной решетки

Проведем оценку точности полученных выражений. В качестве примера примем шаг по радиальной координате $d_r = 1\lambda$. Расчет приведем в длинах волн (табл. 1).

Таблица 1

Значения расстояния между излучателями на соседних окружностях

$d_{n,n+1}/\lambda$	Полная формула (11)	Приближенная формула (13) (ошибка в %)	Упрощенная формула (14) (ошибка в %)
$d_{1,2}/\lambda$	0,15	0,15 (0,0%)	0,191 (4,1%)
$d_{2,3}/\lambda$	0,171	0,172 (0,1%)	0,191 (2,0%)
$d_{3,4}/\lambda$	0,178	0,178 (0,0%)	0,191 (1,3%)
$d_{4,5}/\lambda$	0,181	0,182 (0,1%)	0,191 (1,0%)
$d_{5,6}/\lambda$	0,183	0,183 (0,0%)	0,191 (0,8%)

Тогда с точностью до 0,1% возможно использование приближенной формулы (13) для расчета расстояния между ближайшими излучателями на соседних окружностях. При увеличении же порядка окружности (свыше 3-й) упрощенная формула (14) дает ошибку менее 1%.

Также следует уточнить, по какому принципу необходимо выбирать геометрические параметры плоской АР с радиальной сеткой, если заданы электрические параметры антенны. Геометрические размеры (максимальный радиус раскрыва АР) определяются исходя из заданного коэффициента усиления (КУ) и коэффициента использования поверхности раскрыва (КИПР) антенны, который зависит от УБЛ. Исходя из сектора сканирования и условия отсутствия паразитных дифракционных максимумов, определяется шаг между излучателями по радиальной координате.

Рассмотрим пример реализации АР с радиальной структурой. Минимально возможное число излучателей представлено в табл. 2.

Таблица 2

Распределение излучателей на окружностях

Номер окружности n	Радиус n -й окружности	Длина n -й окружности	Количество излучателей на n -й окружности N_n в первом квадранте ($N_n/4$)	Общее количество излучателей на n -й окружности N_n ($N_n/4$)
1	$1r_1$	$2\pi r_1$	4 (1)	4 (1)
2	$2r_1$	$4\pi r_1$	8 (2)	12 (3)
3	$3r_1$	$6\pi r_1$	12 (3)	24 (6)
4	$4r_1$	$8\pi r_1$	16 (4)	40 (10)
5	$5r_1$	$10\pi r_1$	20 (5)	60 (15)
...
n	nr_1	$2\pi nr_1$	$4n$	$2n(1+n)$

Так как структура симметрична, то в скобках в крайней колонке указано количество излучателей в одном квадранте – $N_n/4$.

Структура данной АР приведена на рис. 4.

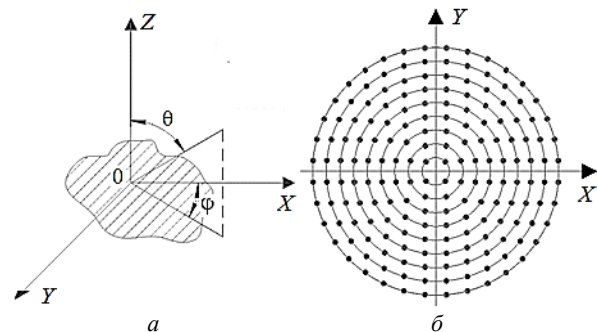


Рис. 4. Определение параметров в сферической системе координат – а; апертура плоской АР с радиальной структурой для круглого раскрыва – б

Данная АР содержит 180 излучающих элементов, расположенных на девяти равномерно удаленных друг от друга окружностях. Диаграмма направленности (ДН) АР в разных плоскостях обзора ϕ представлена на рис. 5.

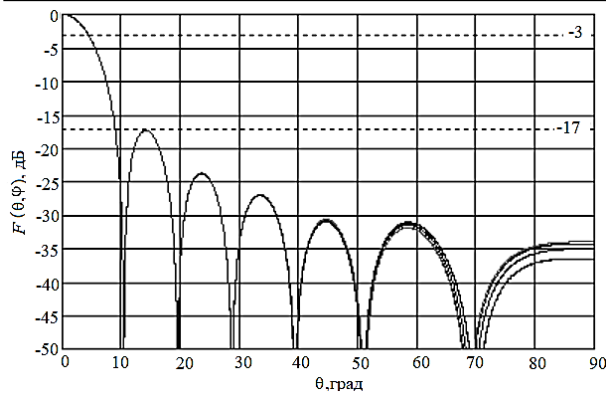


Рис. 5. ДН АР в плоскостях $\varphi = 0, 15, 30, 45, 90^\circ$, где $F(\theta, \varphi)$ – ДН АР; θ, φ – текущие угловые координаты

Из рис. 5 следует, что ДН в различных плоскостях обзора с высокой точностью совпадают, разница наблюдается лишь на уровне порядка -35 дБ. Данный факт указывает на наличие одинакового влияния геометрии и структуры АР на характеристику излучения. Следовательно, по известному методу эквивалентного линейного излучателя для двумерных структур [15] линейное амплитудное распределение идентично во всех плоскостях, что позволяет снизить неравномерность ДН для различных углов обзора φ по сравнению с другими структурами АР [16]. Тем самым можно утверждать, что описанные закономерности ДН АР, отмеченные по результатам расчета конкретного примера, будут сохраняться и при любых количествах окружностей в то время как снижение неравномерности ДН для различных углов обзора φ невозможно при использовании известных структур АР, таких как прямоугольная и гексагональная.

Заключение

В работе рассмотрена эквидистантная радиальная структура плоской АР, получены основные соотношения для расчета шага по радиальной и угловой координатам, рассчитаны минимальные и максимальные линейные расстояния для соседних излучателей, что необходимо при физической реализации антенны. Отмечены преимущества данной структуры (идентичность формы ДН АР во всех плоскостях обзора φ) в сравнении с известными: прямоугольной и гексагональной сетками. Также данная структура, в отличие от известных, предполагает дальнейший синтез геометрических параметров путем синхронного перемещения излучателей по произвольной n -й окружности и по их комбинациям.

Литература

1. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Д.И. Воскресенский, В.И. Степаненко. – М.: Радиотехника, 2003. – 632 с.
2. Марков Г.Т. Антенны: учеб. для студентов радиотехнических специальностей вузов / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.

3. Abdelmadjid R. Concentric Ring Arrays Optimization Using the Spiral Inspired Technique // Algerian Journal of Signals and Systems. – 2018. – Vol. 3. – P. 10–21.

4. Kleiman A. Constant-Beamwidth Beamforming with Concentric Ring Arrays / A. Kleiman, I. Cohen, B. Berdugo // MDPI. – 2021. – Vol. 4. – P. 1–19.

5. Chatterjee A. Differential Evolution and Genetic Algorithm for Sidelobe Reduction of a Concentric Ring Arrays Antenna by Radial Variation of Amplitudes with Fixed and Variable First Null Beamwidth / A. Chatterjee, G.K. Mahanti // International Journal on Electrical Engineering and Informatics. – 2012. – Vol. 4, No. 1. – P. 1–14.

6. Бененсон Л.С. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования. Обзор зарубежных работ / Л.С. Бененсон, В.А. Журавлев, С.В. Попов, Г.А. Постнов. – М.: Сов. радио, 1966. – 368 с.

7. Хансен Р.К. Сканирующие антенные системы СВЧ. – Т. 1. – М.: Сов. радио, 1966. – 536 с.

8. Хансен Р.К. Сканирующие антенные системы СВЧ. – Т. 2. – М.: Сов. радио, 1969. – 496 с.

9. Хансен Р.К. Сканирующие антенные системы СВЧ. – Т. 3. – М.: Сов. радио, 1971. – 464 с.

10. Balanis C. Antenna theory: Analysis and Design. – John Wiley & Sons, INC., 1997. – 959 p.

11. Андрусевич Л.К. Антенны и распространение радиоволн / Л.К. Андрусевич, А.А. Ищук, К.А. Лайко. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 396 с.

12. Верещагин Е.М. Антенны и распространение радиоволн. – М.: Воениздат, 1964. – 240 с.

13. Зелкин Е.Г. Методы синтеза антенн / Е.Г. Зелкин, В.Г. Соколов. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.

14. Зелкин Е.Г. Задачи синтеза антенн и новые методы их решения. – Кн. 1 / Е.Г. Зелкин, В.Ф. Кравченко. – М.: ИПРЖР, 2002. – 72 с.

15. Филимонова Ю.О. Синтез амплитудных распределений антенных решеток с повышенным коэффициентом использования поверхности раскрыва: дис. ... канд. техн. наук. Спец. 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии. – Томск, 2015. – 162 с.

16. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: учеб. для радиотехнических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.

Базанова Анастасия Дмитриевна

Магистрант каф. конструирования и технологии радиоэлектронных средств (КТРС) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) Карла Маркса пр., 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7 (913-9) 21-51-40
Эл. почта: adbazanova@yandex.ru

Лайко Константин Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КТРС НГТУ Карла Маркса пр., 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7 (383-3) 46-06-33
Эл. почта: play-byte@mail.ru

Филимонова Юлия Олеговна

Канд. техн. наук, доцент каф. КТРС НГТУ Карла Маркса пр., 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7 (383-3) 46-06-33
Эл. почта: jul7788@mail.ru

Bazanova A.D., Laiko K.A., Filimonova Yu.O..

Structure of a flat equidistant antenna array with a radial grid

The article proposes to consider the radial structure of the placement of radiating elements in the nodes of a flat equidistant antenna array. The known variants of rectangular and hexagonal structures of elements placement in flat antenna arrays are considered. The main calculated ratios of parameters for the radial structure of the pitch are given as well as the linear distances between the emitters in various orthogonal directions, along the radial and angular components. For the proposed structure, using a specific example of an antenna array consisting of nine circles, with a total number of 180 emitters and a uniform amplitude distribution, the radiation patterns in three-dimensional space are calculated, that are represented on the drawing plane by various sections along the angular coordinate φ with a step of 15° . The proposed radial structure, unlike the known ones, ensures the identity of the DN with minimal discrepancies from each other in different planes φ at the level of -35 dB.

Keywords: antenna array, antenna array aperture, radiation pattern, radiating elements, side lobe level, antenna array pitch, radial structure.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-2-13-17

References

1. Voskresenskij D.I., V.I. Stepanenko. *Ustrojstva SVCH i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok* [Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays]. Moscow, Radiotekhnika, 2003, 632 p.
2. Markov G.T., Sazonov D.M. *Anteny. Uchebnik dlya studentov radiotekhnicheskikh special'nostej vuzov* [Textbook for students of radio engineering specialties of universities]. Moscow, Energiya, 1975, 528 p.
3. Abdelmadjid R. Concentric Ring Arrays Optimization Using the Spiral Inspired Technique. *Algerian Journal of Signals and Systems*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 10–21.
4. Kleiman A., Cohen I., Berdugo B. Constant-Beamwidth Beamforming with Concentric Ring Arrays. *MDPI*, 2021. vol. 4, no. 1, pp. 1–19.
5. Chatterjee A., Mahanti G.K. Differential Evolution and Genetic Algorithm for Sidelobe Reduction of a Concentric Ring Arrays Antenna by Radial Variation of Amplitudes with Fixed and Variable First Null Beamwidth. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 1–14.
6. Benenson L.S., Zhuravlev V.A., Popov S.V., Postnov G.A. *Antennye reshetki. Metody rascheta i proektirovaniya. Obzor zarubezhnykh rabot* [Antenna arrays. Methods of calculation and design. Overview of foreign works]. Moscow, Soviet Radio, 1966. 368 p.
7. Hansen R.K. *Skanirovuyushchie antennye sistemy SVCH. T. 1* [Scanning microwave antenna systems. Vol. 1]. Moscow, Soviet Radio, 1966. 536 p.
8. Hansen R.K. *Skanirovuyushchie antennye sistemy SVCH. T. 2* [Scanning microwave antenna systems. Vol. 2]. Moscow, Soviet Radio, 1969. 496 p.
9. Hansen R.K. *Skanirovuyushchie antennye sistemy SVCH. T. 3* [Scanning microwave antenna systems. Vol. 3]. Moscow, Soviet Radio, 1971. 464 p.
10. Balanis C. *Antenna theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, INC, 1997, 959 p.
11. Andrusevich L.K., Ishchuk A.A., Lajko K.A. *Antenny i rasprostraneniye radiovoln* [Antennas and radio wave propagation]. Novosibirsk, NSTU, 2006, 396 p.
12. Vereshchagin E.M. *Antenny i rasprostraneniye radiovoln* [Antennas and radio wave propagation]. Moscow, Voenizdat, 1964, 240 p.
13. Zelkin E.G., Sokolov V.G. *Metody sinteza antenn* [Methods of antenna synthesis]. Moscow, Soviet Radio, 1980, 296 p.
14. Zelkin E.G., Kravchenko V.F. *Zadachi sinteza antenn i novye metody ih resheniya. Kn. 1* [Problems of antenna synthesis and new methods of their solution. Book 1]. Moscow, IPRZHR, 2002, 72 p.
15. Filimonova YU.O. *Sintez amplitudnykh raspredeleniy antennykh reshetok s povyshennym koefitsientom ispol'zovaniya poverhnosti raskryva. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Spec. 05.12.07-Antenny, SVCH-ustrojstva i ih tekhnologii*. [Synthesis of amplitude distributions of antenna arrays with increased utilization of the opening surface. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Spec. 05.12.07-Antennas, microwave devices and their technologies.]. Tomsk, 2015, 162 p. (in Russ.).
16. Sazonov D.M. *Antenny i ustrojstva SVCH: Uchebnik dlya radiotekhnicheskikh special'nostej vuzov* [Antennas and microwave devices: Textbook for radio engineering majors of universities]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1988, 432 p.

Anastasia D. Bazanova

Master student

Department of Design and Technology of Radio-electronic Means Novosibirsk State Technical University (NSTU)

20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073

Phone: +7 913-921-51-40

Email: adbazanova@yandex.ru

Konstantin A. Laiko

Doctor of Science in Engineering, Assistant Professor

Department of Design and Technology of Radio-electronic Means NSTU

20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073

Phone: +7 (383-3) 46-06-33

Email: play-byte@mail.ru

Yulia O. Filimonova

Doctor of Science in Engineering, Assistant Professor

Department of Design and Technology of Radio-electronic Means NSTU

20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073

Phone: +7 (383-3) 46-06-33

Email: jul7788@mail.ru