

## **РАЗРЕЖЕННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА СО СЛУЧАЙНЫМ СМЕЩЕНИЕМ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ПЛОСКОСТИ АПЕРТУРЫ**

О.А. Юрцев, И.Ф. Шаляпин, С.А. Завадский, А.П. Юбко

Приводятся результаты численного моделирования плоской антенной решетки, в которой не выполняется условие единственности главного лепестка диаграммы направленности, при случайном смещении излучателей в плоскости апертуры. Описываются закономерности влияния ряда факторов на электрические параметры решетки.

## **SPARSE ANTENNA ARRAY, WITH A RANDOM OFFSET OF EMITTERS IN THE PLANE OF THE APERTURE**

O.A, Yurtsev, I.F.Shaljapin, S.A.Zavadsky, A.P.Yubko

The results of the numerical modeling of planar antenna array, in which there is no condition of uniqueness of the antenna pattern main lobe, in the presence of random offset of emitters in the plane of the aperture are presented. The regularities of the influence of some factors on antenna array electrical parameters are described.

### **Введение**

Неэквидистантные антенные решетки со случайным расположением излучателей рассмотрены в ряде статей [1-10]. Среди методов построения таких решеток, рассмотрены два основных типа. Тип 1 – решетка, получаемая из эквидистантной решетки с выполненным условием единственности главного лепестка диаграммы направленности (ДН) путем удаления части излучателей, расположенных в апертуре решетки, по случайному закону. В работе [11] приведены подробные результаты анализа такой решетки. В отличие от других работ исследованы не средние характеристики и параметры, а характеристики и параметры отдельных реализаций. Смысл их рассмотрения заключается в том, что при изготовлении такая решетка будет представлять собой отдельную реализацию.

В статье [10] описана неэквидистантная решетка типа 2. Такая решетка получается из эквидистантной путем смещения излучателей в плоскости апертуры решетки по случайному закону. В указанной статье выполнен статистический анализ решетки методами теории вероятности.

В настоящей статье для решетки типа 2 исследуются закономерности, не описанные в литературе. Это зависимость диаграммы направленности (ДН) и коэффициента направленного действия (КНД):

- от степени разброса координат излучателей в апертуре решетки;
- от степени разрежения решетки при случайном смещении излучателей;
- от амплитудного и фазового распределения возбуждения излучателей в решетке;
- от формы раскрыва решетки.

Используется также численный метод анализа отдельных реализаций. Материалы настоящей статьи являются дополнением к содержащимся в работе [10].

### Постановка задачи

Численное моделирование решеток выполнено с помощью программы, в которой используется теорема перемножения диаграмм направленности [12]. Для расчета диаграммы направленности одного излучателя используется модель излучателя с задаваемой шириной главного лепестка ДН ( $2\theta_{0,5}^1$ ) и задаваемым уровнем первого бокового лепестка, т.е. гипотетический излучатель.

Излучатели в решетке расположены в плоскости  $XY$ , угол между направлением на точку наблюдения в дальней зоне и нормалью к плоскости решетки (угол наблюдения) обозначается символом  $\theta$ . Строки решетки ориентированы вдоль оси  $X$ , столбцы – вдоль оси  $Y$ . Число строк –  $N_y$ , число столбцов –  $N_x$  независимо от того, удалены или нет излучатели. Расстояния между соседними излучателями по осям  $X$ ,  $Y$  обозначены символами  $D_x$ ,  $D_y$  в решетке с неудаленными излучателями.

Моделирование выполнено при различном амплитудно-фазовом распределении возбуждения излучателей, при  $2\theta_{0,5}^1 = 90^\circ$ . Используется комбинированное амплитудное распределение. Фазовое распределение задается линейным для обеспечения сканирования в плоскостях  $XZ$  и  $YZ$ . Рассматривается сканирование в плоскости  $XZ$ . Это не снижает общность полученных результатов, так как плоскости  $XZ$  и  $YZ$  эквивалентны. На рис.1 показаны схемы размещения излучателей в решетке с прямоугольным (1), овальным (2) и восьмиугольным (3) раскрытием с детерминированным размещением излучателей (слева) и решетки, в которых излучатели смещены от исходного положения по случайному закону (справа). Исследуются все три типа решеток по форме раскрытия.

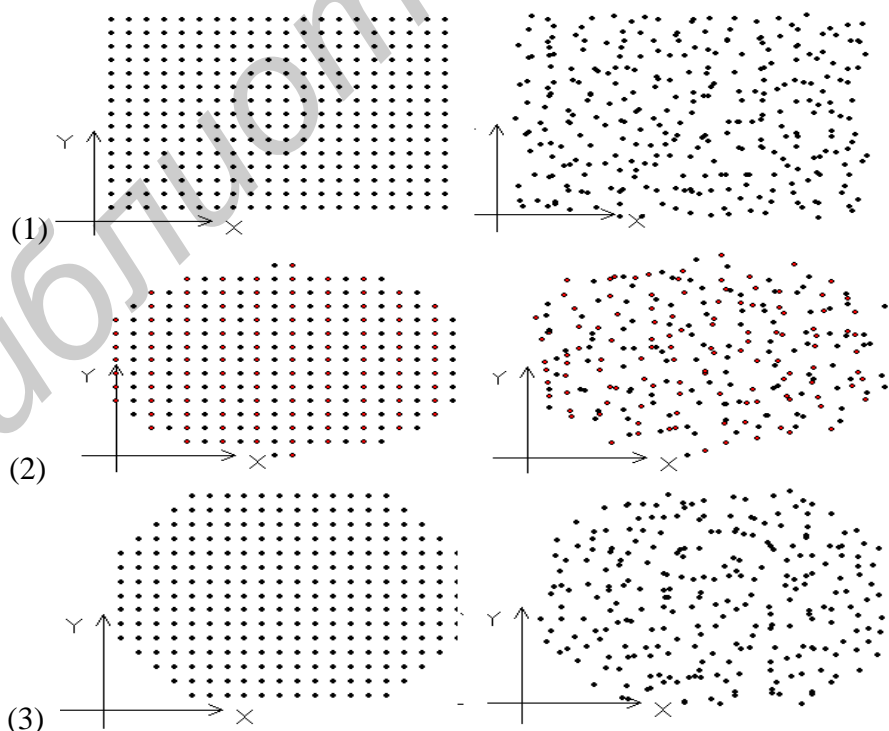


Рис. 1. Решетки с прямоугольным, эллиптическим и восьмиугольным раскрытием

Степень неэквидистантности решетки по осям  $X, Y$  задается величинами  $DLx, DLy$  – среднеквадратичным отклонением положения излучателя по оси  $X$  и по оси  $Y$  от исходного положения вдоль этих осей. В каждом излучателе координаты его центра по оси  $X$  меняются в пределах  $0 \dots 3 \cdot DLx$ , по оси  $Y$  – в пределах  $0 \dots 3 \cdot DLy$  по случайному закону от излучателя к излучателю с равномерным законом распределения (коэффициент 3 введен потому, что  $DLx$  и  $DLy$  – среднеквадратичные значения отклонений). На рис.2 для иллюстрации показана исходная эквидистантная решетка с квадратным раскрывом, с параметрами  $Nx=15, Ny=15, Dx=Dy=2\lambda$  и две решетки, в которых по осям  $X, Y$  введена неэквидистантность с разными значениями  $DLx$  и  $DLy$ . Все размеры выражены через длину волны  $\lambda$ .

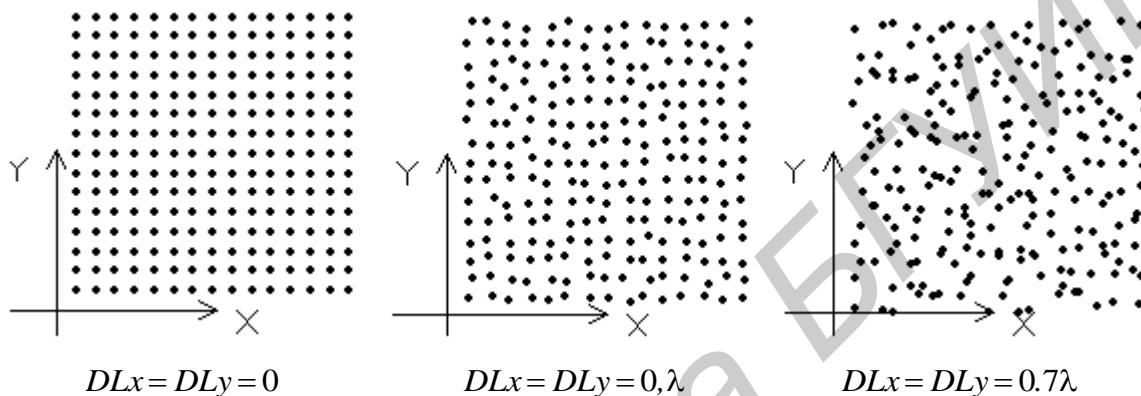


Рис.2. Схема размещения излучателей в разреженной решетке с параметрами:

$Nx = Ny = 15, Dx = Dy = 2\lambda$  при различных значениях  $DLx = DLy$

### Результаты численного моделирования

В работе [11] показано, что в разреженной решетке типа 1 при невыполнении условия единственности главного лепестка ДН ( $DLx > \lambda, DLy > \lambda$ ) введение неэквидистантности путем удаления части излучателей по случайному закону не приводит к «размыванию» побочных главных лепестков множителя системы решетки. В разреженной решетке типа 2 картина иная. Если в исходной эквидистантной решетке условие единственности главного лепестка ДН не выполняется, то введение неэквидистантности путем случайного смещения излучателей в плоскости апертуры решетки приводит к «размыванию» побочных главных лепестков множителя системы. На рис.3 показаны ДН решеток, схемы которых приведены на рис.2, при разных  $DLx = DLy$ . Амплитудное роаспределение в плоскости  $YZ$  комбинированное, описываемое косинусом в степени  $P_y=1$  на подставке  $\Delta_y=0,3$ . В плоскости  $XZ$  амплитудное распределение равномерное ( $P_x=1, \Delta_x=1$ ).

*Замечание: на рис.3 и последующих рисунках показаны ДН случайных реализаций размещения излучателей после введения неэквидистантности.*

Как видно, введение неэквидистантности уменьшает дифракционные боковые лепестки, являющиеся остатками побочных главных максимумов, до уровня апертурных боковых лепестков. Причем средний уровень боковых лепестков примерно одинаков в плоскостях  $XZ$  и  $YZ$ , т.е. слабо зависит от амплитудного распределения возбуждения излучателей в решетке.

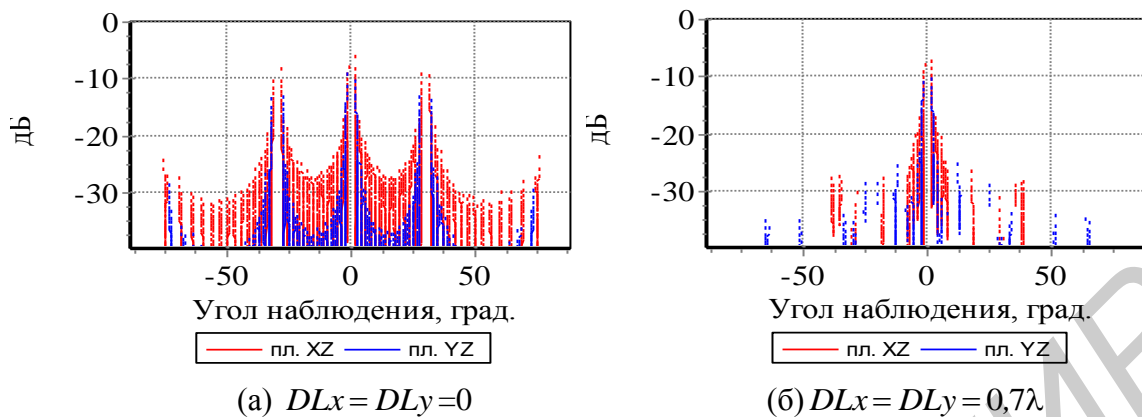


Рис.3. ДН решеток, схемы которых приведены на рис.2 , при разных  $DLx = DLy$ .

Проведенный численный анализ показывает, что величины  $DLx, DLy$ , при которых побочные главные лепестки снижаются до уровня апертурных боковых лепестков, зависит от расстояния между соседними излучателями  $Dx, Dy$ , от числа излучателей  $Nx, Ny$ , от формы раскрыва. Ниже описываются эти закономерности на примере решетки с параметрами  $Nx = Ny = 16$ . В обеих плоскостях амплитудное и фазовое распределения равномерные, неэквидистантность введена только в положение излучателей по оси X. В этом случае ДН в зависимости от  $DLx$  меняется только в плоскости XZ. Все другие параметры (число излучателей, АФР) меняются только в плоскости XZ. Изменение параметров ДН в зависимости от  $DLx$  оценивается только в этой плоскости.

На последующих рисунках представлены зависимости:

- рисунок 4– зависимость уровня боковых лепестков (УБЛ) и коэффициента направленного действия (КНД) от  $DLx$  при разном числе излучателей в плоскости XZ ( $Nx$ );
- рисунок 5– зависимость УБЛ и КНД от  $DLx$  при разном исходном расстоянии между излучателями в плоскости XZ ( $Dx$ );
- рисунок 6 – зависимость УБЛ и КНД от  $DLx$  при разной форме раскрыва – для квадратной, круглой и 8-угольной с равными сторонами;
- рисунок 7– зависимость УБЛ и КНД от  $DLx$  при разном амплитудном распределении.

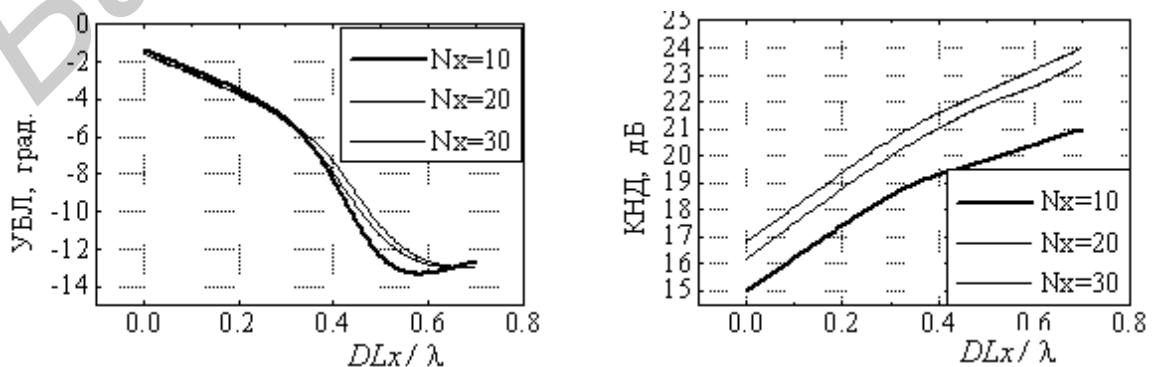


Рис.4. Зависимость УБЛ и КНД от  $DLx$  при разном числе излучателей  $Nx$

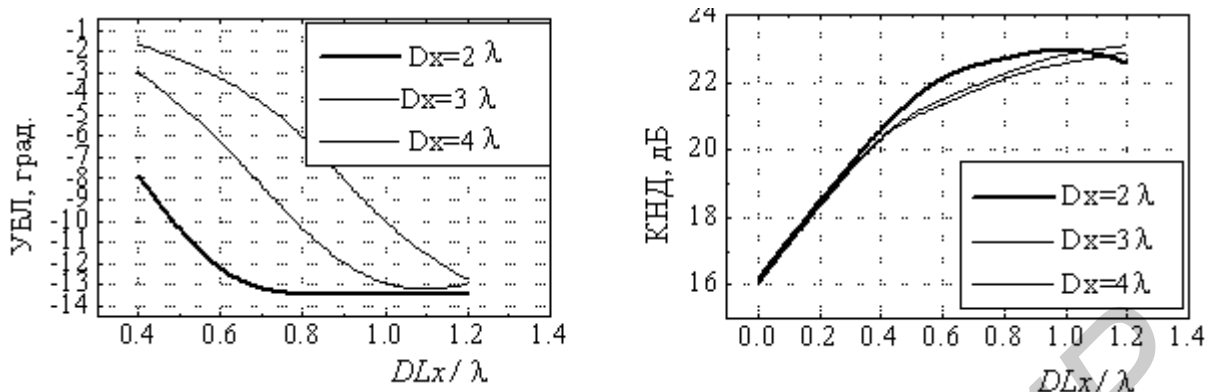


Рис.5. Зависимость УБЛ и КНД от  $DLx$  при разном исходном расстоянии между излучателями в плоскости  $XY$  ( $Dx$ )

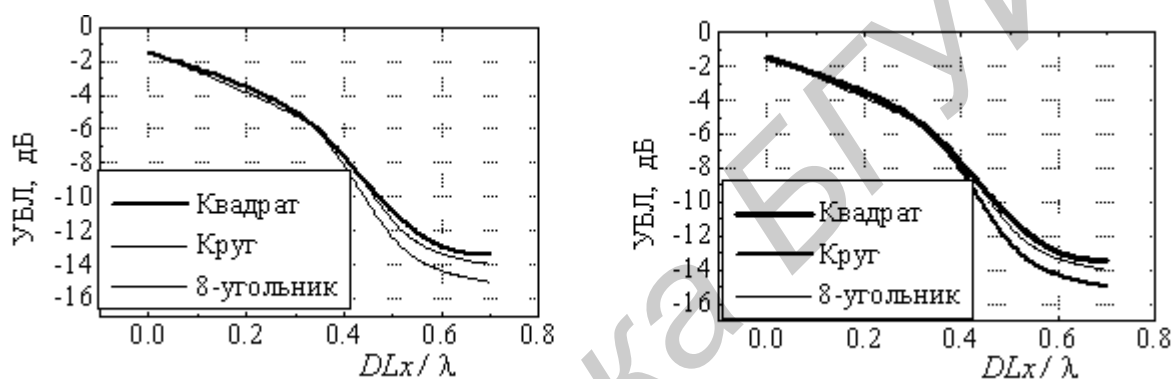


Рис.6 Зависимость УБЛ и КНД от  $DLx$  при разной форме раскрыва при  $Nx = Ny = 16$ ,  $Dx = Dy = 2\lambda$

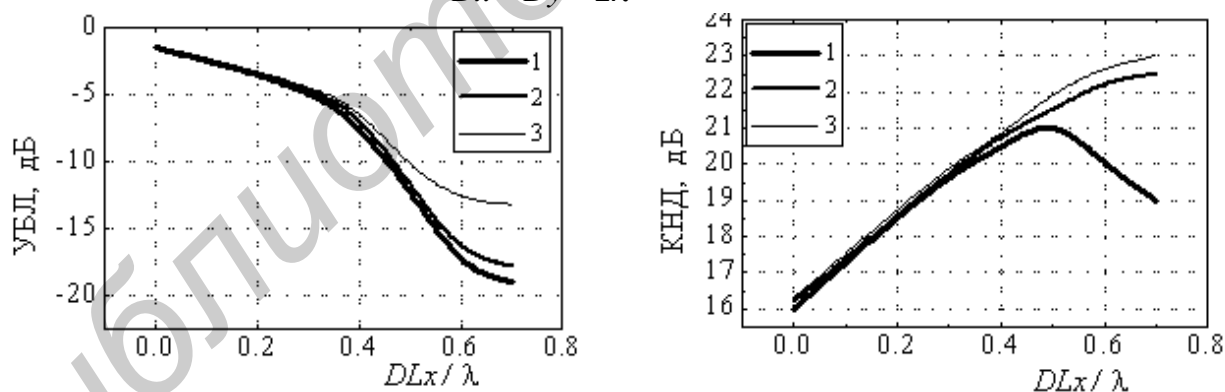


Рис.7. Зависимость УБЛ и КНД от  $DLx$  при разном амплитудном распределении.  $Nx = Ny = 16$ ,  $Dx = Dy = 2\lambda$

Обозначения: 1 -  $\Delta_x = 0.1$ ; 2 -  $\Delta_x = 0.5$ ; 3 -  $\Delta_x = 1$

Из приведенных результатов следуют выводы:

1. Минимум боковых лепестков наступает примерно при одном и том же значении  $DLx/\lambda$  при разном числе излучателей  $Nx$ , для разных форм раскрыва и для разного амплитудного распределения. Это значение равно примерно  $(0,6-0,7)\lambda$  для  $Dx = 2\lambda$
2. Чем больше  $Dx$ , тем при большем значении  $DLx/\lambda$  наступает минимум боковых лепестков. При этом побочные главные лепестки ДН подавляются до уровня апертурных боковых лепестков.

3. От амплитудного распределения зависит минимальный уровень боковых лепестков: чем меньше уровень «подставки»  $\Delta_x$ , тем меньше минимальный УБЛ. По этому свойству разреженная решетка типа 2 отличается от решетки типа 1. Необходимо отметить, что за счет введения неэквидистантности УБЛ не удастся снизить до максимального УБЛ в эквидистантной решетке, соответствующего заданному амплитудному распределению.

Условие единственности главного лепестка ДН зависит от сектора сканирования. Но в разреженной решетке типа 2 это условие не выполняется, так как разреженность достигается увеличением межэлементного расстояния. Поэтому возникает вопрос о том, что происходит с ДН разреженной решетки типа 2 при сканировании. Ниже закономерности сканирования рассматриваются на примере решетки с квадратной апертурой и размерами в плоскостях Е и Н  $L_x = L_y = 29\lambda$  при разном числе излучателей вдоль осей  $X, Y$  для трех случаев:

*Случай 1.*  $N_x = N_y = 59, D_x = D_y = 0,5\lambda$ . При этих параметрах выполняется условие единственности главного лепестка ДН, и решетка является неразрезанной.

*Случай 2.*  $N_x = N_y = 30, D_x = D_y = \lambda$ . При этих параметрах условие единственности главного лепестка ДН, не выполняется, и решетка является разреженной.

*Случай 3.*  $N_x = N_y = 20, D_x = D_y = 1,5\lambda$ . При этих параметрах условие единственности главного лепестка ДН также не выполняется, решетка является более разреженной по сравнению со случаем 2.

*Случай 4.*  $N_x = N_y = 10, D_x = D_y = 3,2\lambda$ . При этих параметрах условие единственности главного лепестка ДН также не выполняется, решетка является более разреженной по сравнению со случаем 3. По сравнению со случаем 1 в этой решетке число излучателей уменьшено в 348 раз.

В случаях 2, 3, 4 неэквидистантность вводится путем случайного смещения излучателей от исходного положения на величину  $DL_x = DL_y$  – разную в этих трех случаях. Размеры апертуры во всех случаях одинаковы.

Схема размещения излучателей в решетке в случаях 2 и 4 показана на рис.8.

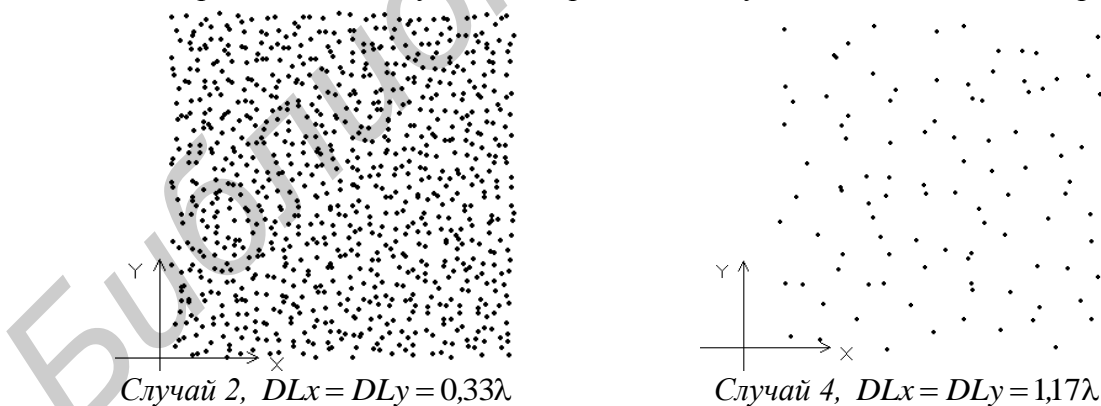


Рис.8 Схемы размещения излучателей в решетке после введения неэквидистантности для случаев 1,2,3,4

На рис. 9 и 10 слева показана ДН решетки без введения неэквидистантности ( $DL_x = DL_y = 0$ ), справа – после введения неэквидистантности ( $DL_x = DL_y > 0$ ), Угол сканирования равен нулю.

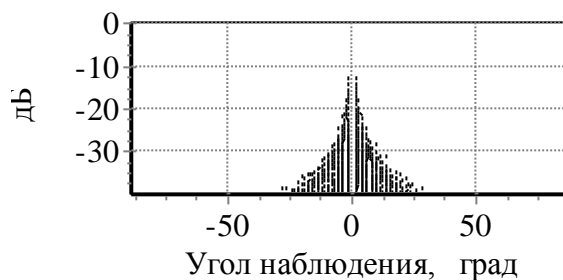


Рис.9 ДН решетки для случая 1:  $DLx = DLy = 0$

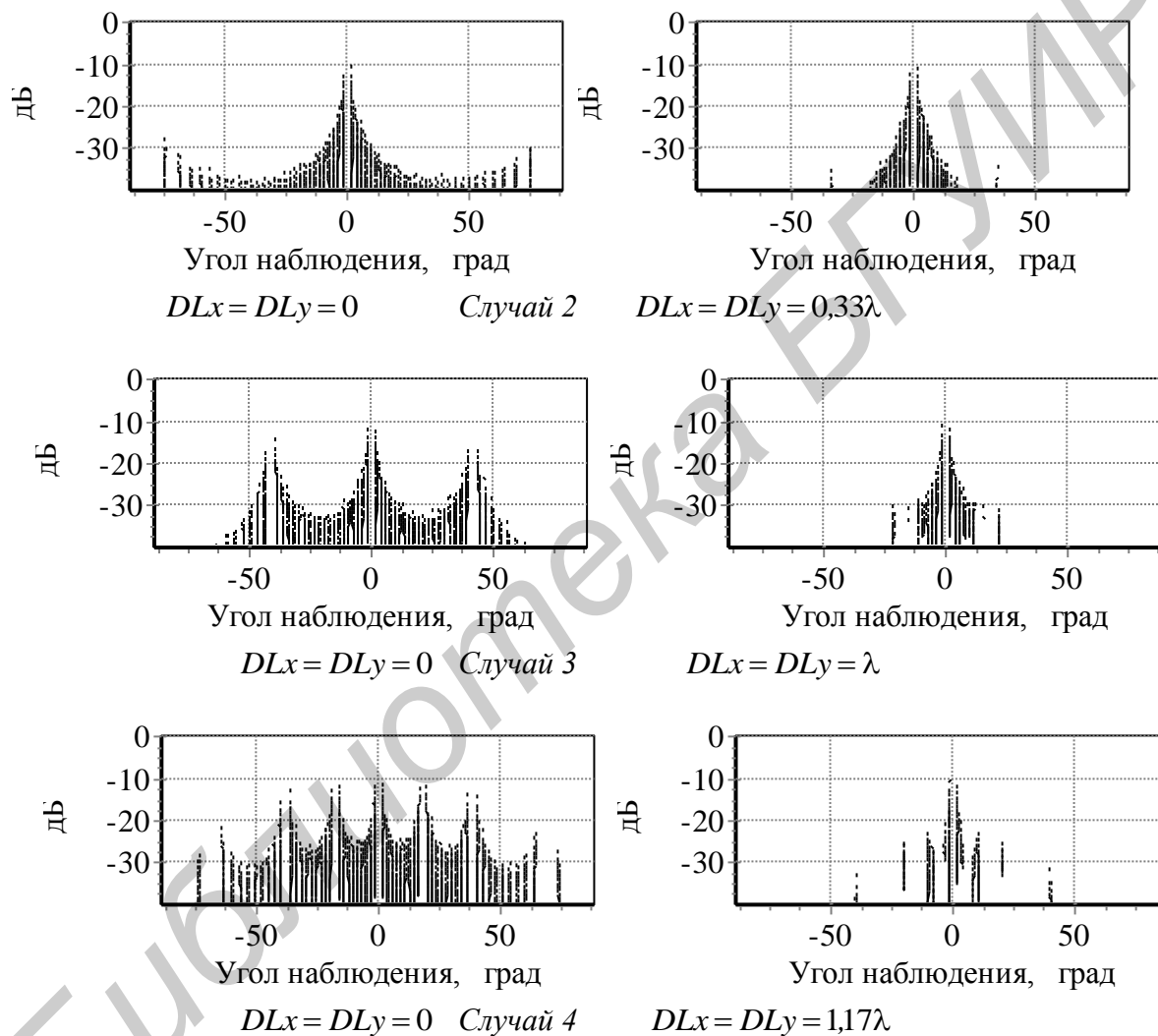


Рис. 10. ДН решетки для различных случаев:  
слева – до введения неэквидистантности,  
справа – после введения неэквидистантности

Из рисунка 10 следует, что с увеличением разреженности решетки (с уменьшением числа излучателей при сохранении размеров апертуры) после введения неэквидистантности средний уровень дальних боковых лепестков возрастает.

При сканировании параметры ДН и КНД меняются. Зависимости ширины главного лепестка (а), УБЛ(б) и КНД (в) от угла сканирования для случаев 1, 2, 3, 4 при равномерном амплитудном распределении показаны на рис.11

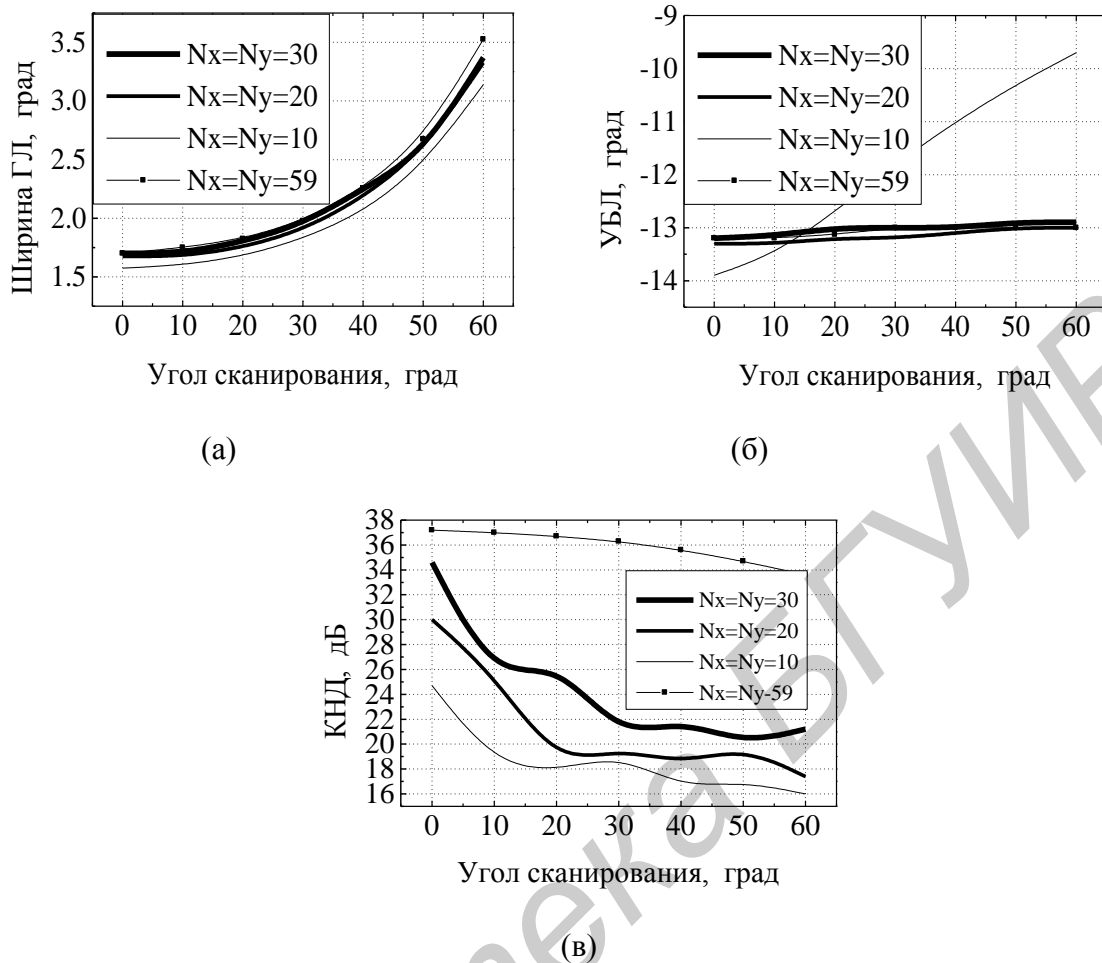


Рис.11. Зависимости ширины главного лепестка (а), УБЛ (б) и КНД (в) от угла сканирования для случаев 1, 2, 3, 4 после введения неэквидистантности

Из рис. 11 следуют выводы:

1. Существенной особенностью закономерностей сканирования в разреженной неэквидистантной решетке типа 2 по сравнению с эквидистантной неразрезанной решетке является то, что при увеличении угла сканирования резко уменьшается КНД. Причем, чем больше разреженность (меньше число излучателей), тем быстрее уменьшается КНД при увеличении угла сканирования.
2. Второй существенной особенностью является то, что при большой разреженности (при малом числе излучателей) УБЛ быстро растет при увеличении угла сканирования.
3. В зависимости КНД от угла сканирования наблюдаются колебания. Это связано с тем, что КНД рассчитывается путем интегрирования ДН по углам  $\theta, \varphi$  в переднем полупространстве ( $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ). В этом полупространстве структура боковых лепестков меняется с изменением угла сканирования. На графиках зависимость УБЛ от угла сканирования колебаний нет, так как график построен для максимального бокового лепестка, расположенного рядом с главным лепестком, а его уровень плавно уменьшается при увеличении угла сканирования. Этот вывод поясняется рисунком 12, на котором показана ДН решетки для случая 3 при двух углах сканирования. Из рисунка видно, что структура боковых лепестков в секторе углов наблюдения  $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  существенно раз-



ная, хотя структура расположения излучателей в решетке одна и та же (рассматриваются параметры одной той же случайной реализации расположения излучателей).

4. Ранее отмечалось, что случаи 1 и 4 отличаются числом излучателей в 348 раз. Из рисунка 11 следует, что КНД решетки в этих двух случаях отличается на 12,5 дБ. Это меньше, чем в 348 раз.

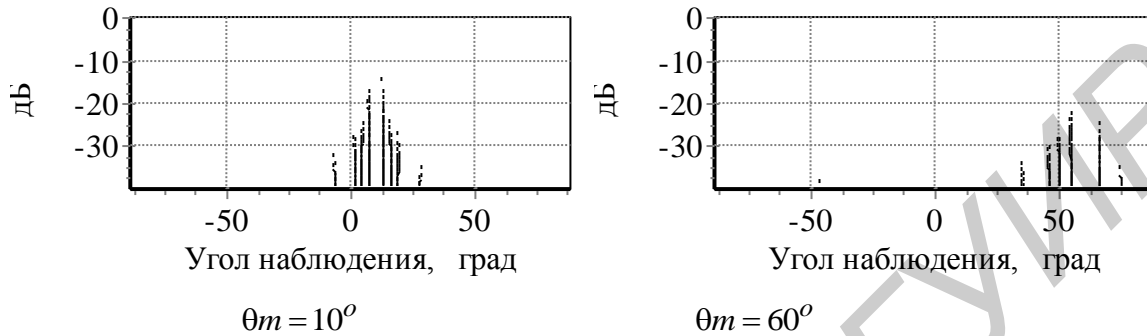
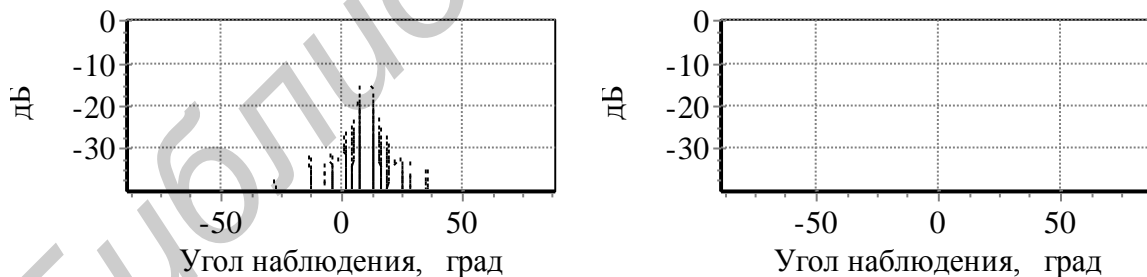


Рис. 12. ДН решетки в плоскости  $XU$  для случая 3 при двух углах сканирования  $\theta_m$  в этой плоскости

Что происходит с параметрами ДН и КНД при изменении амплитудного возбуждения излучателей?

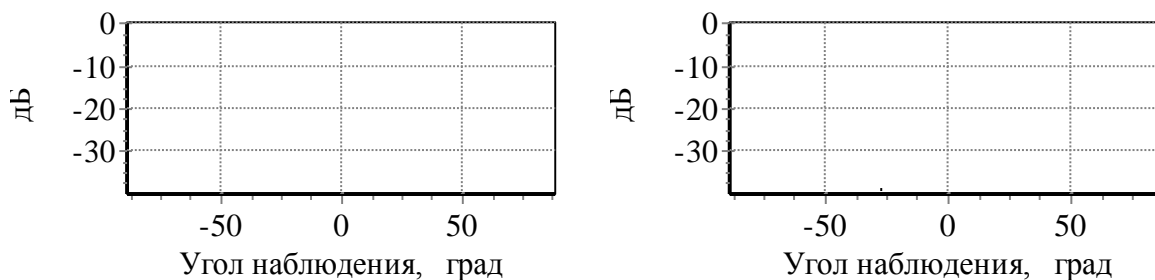
Проведенный численный анализ показал, что закономерности в зависимости ширины главного лепестка ДН, уровень первого бокового лепестка (апертурного) и КНД такие же, как и в эквидистантной неразрезанной решетке. Дальние боковые лепестки, являющиеся подавленными («размытыми») побочными главными лепестками, практически не зависят от амплитудного распределения. Этот вывод иллюстрируется рис. 13 и 14, на которых показаны ДН решетки в плоскости  $XU$  для случая 3 при равномерном и спадающим к краям решетки с параметрами  $\Delta_x=0,1$  и  $P_x=2$  для двух углов сканирования  $\theta_m$ .



$\theta_m = 10^\circ$ ;  $2\theta_{0,5} = 2,57^\circ$ ; КНД=20, 8 дБ  $\theta_m = 60^\circ$   $2\theta_{0,5} = 5,05^\circ$ ; КНД=18, 89дБ

Рис. 13. ДН решетки в плоскости  $XU$  для случая 3 при равномерном амплитудном распределении для двух углов сканирования  $\theta_m = 10^\circ$  и  $\theta_m = 60^\circ$

Из рисунка 14 следует, что при применении спадающего к концам решетки амплитудного распределения ширина ГЛ ДН увеличивается, КНД и первый (апертурный) боковой лепесток уменьшается (известные закономерности). Однако при этом средний уровень остальных боковых лепестком зависит от амплитудного распределения слабо.



$$\theta_m = 10^\circ; 2\theta_{0,5} = 3,8^\circ; \text{КНД} = 18,8 \text{ дБ} \quad \theta_m = 60^\circ; 2\theta_{0,5} = 7,47^\circ; \text{КНД} = 18,3 \text{ дБ}$$

Рис. 14. ДН решетки в плоскости  $XU$  для случая 3 при спадающим к краям решетки с параметрами  $\Delta_x = 0,1$  и  $P_x = 2$  амплитудном распределении для двух углов сканирования  $\theta_m = 10^\circ$  и  $\theta_m = 60^\circ$

### Заключение

Проведен численный анализ неэквидистантных разреженных антенных решеток, получаемых из эквидистантных решеток путем случайного смещения излучателей в плоскости апертуры решетки. Для трех форм апертуры (прямоугольной, овальной и восьмиугольной) исследованы зависимости уровня боковых лепестков и коэффициента направленного действия от степени неэквидистантности при разном числе излучателей в решетке, от исходного расстояния между излучателями, от формы апертуры, от амплитудного и фазового распределения возбуждения излучателей в решетке. Показано, что уровень боковых лепестков в разреженной неэквидистантной антенной решетке при любом амплитудном распределении не уменьшается ниже  $-18..-120$  дБ

### Литература

1. Lo Y.T. Sidelobe level in nonuniformly spaced antenna arrays/ IEEE Trans. –1963. –v. AP-11, –№ 4 pp. 511 – 512.
2. Lo Y.T. A mathematical theory of antenna arrays with randomly spaced elements /IEEE Trans.–1964. – v. AP-12, –№ 3, pp.257-269.
3. Scolnik M.J, Sherman J.W., Ogg F.C. Statistically designed density-tapered arrays/ IEEE Trans. – 1964. –vol. AP-12, –№ 4, pp. 408 – 417.
4. Lo Y.T and Simcoe R.J. An experiment on antenna arrays with randomly spaced elements/ IEEE Trans. –1967. v. AP-15, –№ 2, pp. 231 - 235 .
5. Закон М.Б., Меркулов В.В. Неэквидистантные антенные решетки со случайно расположенными элементами. / Радиотехника и электроника.– 1965. –№ 1, сс. 7-13.
6. Меркулов В.В. КНД решеток со случайно расположенными элементами./ Радиотехника и электроника.– 1966. – № 5, сс. 128-1306.
7. Содин Л.Г. Статистический анализ неэквидистантных линейных антенн-решеток. / Радиотехника и электроника. – 1966. –№ 11, сс. 1953-1959.
8. Щифрин Я.С., Назаренко В.А. Поле случайных антенных решеток в зоне Френеля /Радиотехника и электроника. –1991. –№1, сс. 52-62.
9. Щифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн./ – М.: Сов. Радио. –1979. – 381.
10. Галлеев Э.Г. /Антенны. Под ред. Бубнова Г.Г. Радио и связь.1988. Вып.35. сс.3-14.
- 11 Юрцев О.А., Шаляпин И.Ф.
12. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Основы теории антенн /– М.: Дрофа, –2007. – 491 с.

## Сведения об авторах



**Юрцев Олег Анатольевич** - 1933 г. р. Окончил МВИРТУ (Минск) в 1956 г. Направление научных исследований: антенны, устройства СВЧ, рассеяние электромагнитных волн, численное моделирование. Кандидатская диссертация по специальности 05.12.07 – Антенны, устройства СВЧ и их технологии – 1962 г., докторская диссертация по специальности 05.12.07 – Антенны, устройства СВЧ и их технологии – 1976 г. Профессор БГУИР.

E-mail: yurtsev\_o@mail.ru



**Шаляпин Иван Федорович** - 1987 г. р. Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР, Минск) в 2010 г., магистратуру при БГУИР в 2011 г. Направление научных исследований: антенные решетки, техника СВЧ. Аспирант БГУИР; ведущий конструктор ОАО «АЛЕВКУРП» (Минск).

E-mail: Sir-shal@yandex.ru



**Завадский Сергей Анатольевич** - 1987 г. р. Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР, Минск) в 2011 г., магистратуру при БГУИР в 2012 г. Направление научных исследований: антенные решетки, техника СВЧ. Аспирант БГУИР; инженер-конструктор 1-й категории ОАО «АЛЕВКУРП» (Минск).

E-mail: [z\\_serhio@tut.by](mailto:z_serhio@tut.by)



**Юбко Александр Петрович**  
1987 г. р. Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР, Минск) в 2010 г., магистратуру при БГУИР в 2011 г., аспирантуру – в 2014 г. Направление научных исследований: антенные решетки, техника СВЧ. Младший научный сотрудник Центра 1.6 НИЧ БГУИР.

E-mail: yupich87@yandex.ru