

ВЛИЯНИЯ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И ДРУГИХ ФАКТОРОВ НА БОКОВЫЕ ЛЕПЕСТКИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ МНОГОМОДУЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Юбко А.П., Юрцев О.А.

Анализируется влияние закона возбуждения излучателей по фазе многомодульной антенной решетки на уровень боковых лепестков.

THE INFLUENCE OF PHASE DISTRIBUTION AND OTHER FACTORS ON ANTENNA PATTERN SIDE LOBE LEVEL OF MULTI-MODULE ANTENNA ARRAY

Joubko A.P., Yurtsev O.A.

The influence of phase distribution excitation law of multi-module antenna array on side lobe level is analyzed.

Введение

Многомодульные антенные решетки используются в различных радиосистемах. В частности, они используются в орбитальных радиолокаторах для мониторинга Земной поверхности [1, 2]. В таких антенных решетках модули представляют собой плоские антенные решетки, в которых излучателями являются линейные антенные решетки с последовательным или параллельным возбуждением излучателей. Каждая такая решетка имеет один вход, и все модули расположены вдоль прямой линии, образуя линейную решетку модулей. В ортогональной плоскости расположено N_y линейных решеток, и в этой плоскости производится фазовое сканирование за счет возбуждения соседних строк с необходимым сдвигом по фазе. Амплитудное и фазовое распределения возбуждения излучателей в линейных решетках, модулях и во всей многомодульной решетке имеет особенности по сравнению с одномодульной решеткой:

1. В пределах одного модуля, фазовое распределение (ФР) равномерно или четно относительно центра решетки и не меняется в процессе сканирования в решетке модулей.

2. Амплитудное распределение (АР) возбуждения излучателей в пределах одного модуля решетки равномерное или спадающее к краям решетки. Спадающее к краям АР по сравнению с равномерным АР обеспечивает уменьшение уровня боковых лепестков (УБЛ) в диаграмме направленности модуля.

3. Амплитудное распределение возбуждения модулей решетки равномерное или спадающее к краям, фазовое распределение – равномерное или линейное для обеспечения сканирования.

Эти особенности приводят к тому, что амплитудное и фазовое распределение возбуждения излучателей в составе всей решетки в плоскости расположения модулей становится ступенчатым. Причем, одна ступенька – это модуль решетки. В пределах этой ступеньки амплитудное распределение – равномерное или спадающее к краям решетки, фазовое распределение или равномерное или неравномерное.

Влияние ступенчатого АР на диаграмму направленности (ДН) многомодульной решетки рассмотрено в работах [3, 4, 5], влияние ФР – частично в работе [4.]

В настоящей статье излагаются результаты исследования на характеристики решетки ступенчатого фазового распределения возбуждения излучателей многомодульной решетки в плоскости расположения модулей, в том числе при сканировании путем изменения разности фаз между соседними модулями. Рассматривается также влияние на

боковые лепестки и других факторов. Материалы статьи дополняют сведения о многомодульных антенных решетках, опубликованные в литературе.

Постановка задачи и методика ее решения

Многомодульная решетка условно показана на рис.1. Плоскость решетки расположена в плоскости XY, координата Z перпендикулярна плоскости решетки.

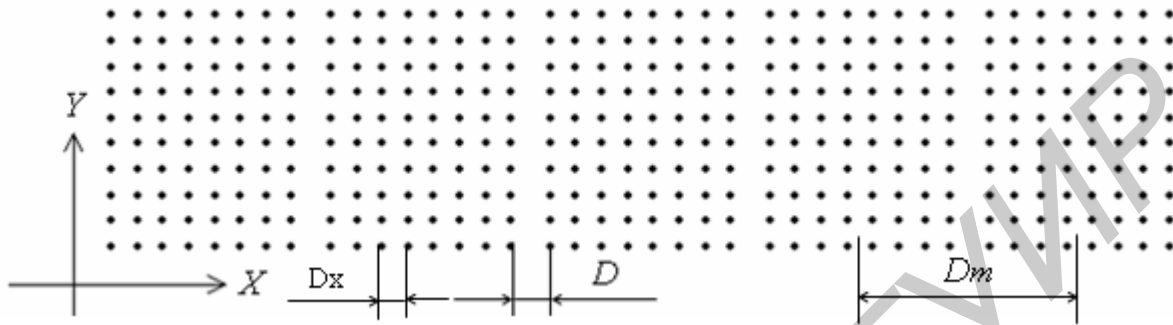


Рис.1. Многомодульная решетка

Далее используются обозначения: N_x – число излучателей в строке модуля; M_x – число модулей по горизонтали; N_y – число строк в модуле. На рис.1 – $N_x=8$; $N_y=10$; $M_x=5$. Расстояние между излучателями в строке модуля – D_x , между строками модуля – D_y ; между крайними столбцами соседних модулей – D , между центрами соседних модулей – D_m , угол сканирования в плоскости XZ – θ_m .

В строке каждого модуля фазовое распределение равномерное. Разность фаз возбуждения соседних модулей равна

$$\Delta\Psi_m = -\frac{2\pi}{\lambda} D_m \cdot \sin \theta_m, \quad (1)$$

где λ – длина волны.

Фазовое распределение (1) обеспечивает отклонение максимума главного лепестка ДН в горизонтальной плоскости (в плоскости XZ) на угол θ_m [6].

В пределах строки модуля нормированное к максимуму амплитудное распределение – спадающее к краям строки до уровня $\Delta_x \leq 1$ по закону [6]:

$$A_n = \Delta_x + (1 - \Delta_x) \sin^{P_x} \left[\frac{\pi(n-1)}{N_x - 1} \right], \quad (2)$$

где n – номер излучателя в строке модуля ($1 \leq n \leq N_x$), P_x – любое число.

В центре строки модуля амплитуда возбуждения максимальна и равна 1.

Амплитудное распределение в системе модулей решетки задается аналогично:

$$A_m = \Delta_{xm} + (1 - \Delta_{xm}) \sin^{P_{xm}} \left[\frac{\pi(m-1)}{M_x - 1} \right], \quad (3)$$

где m – номер модуля ($1 \leq m \leq M_x$); Δ_{xm} – уровень возбуждения центров крайних модулей ($\Delta_{xm} \leq 1$), P_{xm} – любое число. В вертикальной плоскости AP и ФР задается аналогично. Суммарное амплитудное распределение вдоль оси X определяется произведением $A_n \cdot A_m$.

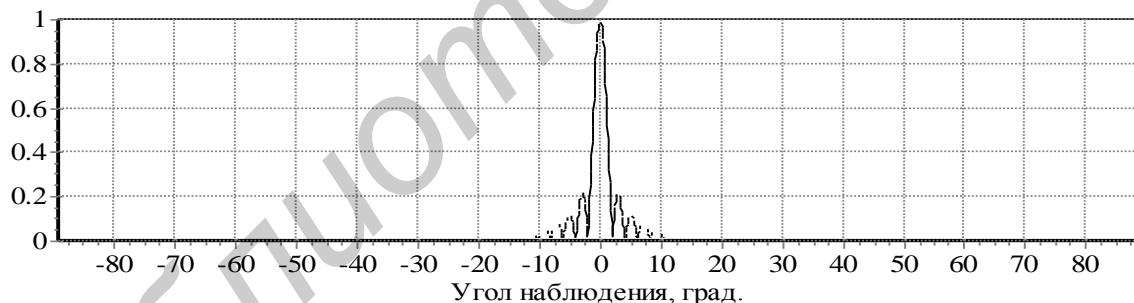
Моделирование описанной решетки с целью выяснения закономерностей выполнено для гипотетического излучателя с шириной главного лепестка ДН $2\theta_{0,5}^1 = 60^\circ$.

Результаты моделирования

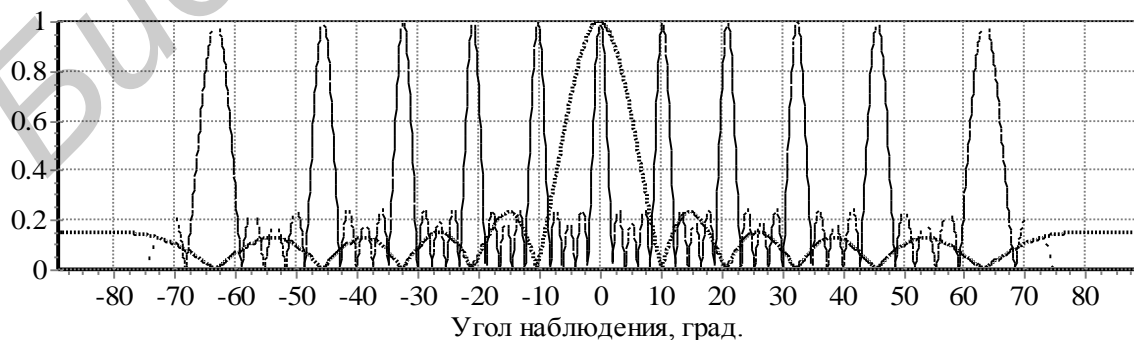
В работах [3, 4, 5] показано, что при ступенчатом амплитудном распределении в ДН многомодульной антенной решетки возрастают дифракционные боковые лепестки, являющиеся не до конца подавленными побочными главными лепестками множителя системы решетки модулей. Это объясняется следующим образом. Диаграмму направленности решетки можно рассчитать двумя способами. Первый способ – суммированием полей всех излучателей. В результате получается ДН вида рис.2а. Второй способ – с применением теоремы перемножения ДН [6]. В соответствии с этой теоремой ненормированную ДН решетки $f(\theta)$ можно представить в виде трех сомножителей:

$$f(\theta) = F_1(\theta) \cdot F_{c1}(\theta) \cdot F_{cm}(\theta), \quad (4)$$

где $F_1(\theta)$ - ДН одного излучателя; $F_{c1}(\theta)$ - множитель системы одного модуля; $F_{cm}(\theta)$ - множитель системы решетки модулей. Система модулей представляет собой разреженную решетку, в которой не выполняется условие единственности главного лепестка ДН. Поэтому в множителе системы решетки модулей появляются побочные главные лепестки. На рис.2б показаны множители $F_{c1}(\theta)$ - толстой линией и $F_{cm}(\theta)$ - тонкой линией для равномерного амплитудного распределения ($\Delta_x=1, \Delta_{xm}=1$). Как видно, максимумы побочных главных лепестков множителя системы решетки модулей $F_{cm}(\theta)$ совпадают с нулями множителя системы модуля $F_{c1}(\theta)$. В результате множитель системы всей решетки $F_c(\theta) = F_{cm}(\theta) \times F_{c1}(\theta)$ получается таким, как показано на рис.2а.



(а)



(а)

Рис.2. Множители системы решетки модулей (тонкая линия) и одного модуля (толстая линия) - (а), произведение множителей системы - (б)

Описанная ситуация нарушается при изменении углового положения множителя системы решетки модулей или множителя системы одного модуля. Это происходит, если меняется амплитудное или фазовое распределение возбуждения излучателей в модуле или в решетке модулей.

На рис.3 показан множитель системы решетки $F_c(\theta)$ для случая, когда вдоль системы модулей устанавливается линейное фазовое распределение, соответствующее углу сканирования $\theta_m = 5^\circ$. В пределах каждого модуля и в системе модулей амплитудное распределение равномерное. В рассматриваемом частном случае угловой разнос между побочными максимумами множителя системы решетки модулей равен 10° , поэтому при сканировании на угол кратный 10° побочные главные лепестки компенсируются. Во всех других случаях этого не происходит. При этом в ДН решетки на месте побочных главных лепестков возрастают боковые лепестки – дифракционные боковые лепестки. (ДБЛ).

Возрастают боковые лепестки и при изменении амплитудного распределения в пределах каждого модуля, что рассмотрено в работе [5].

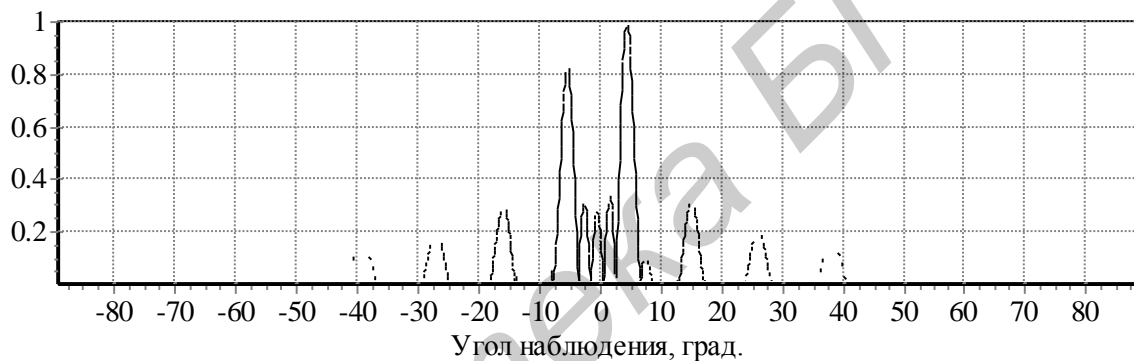


Рис.3. Множитель системы решетки при сканировании

Нарушение взаимного соответствия структуры лепестков в множителях системы $F_{cm}(\theta)$ и $F_{c1}(\theta)$, обеспечивающего подавление побочных главных лепестков, наступает в многомодульной решетке также в случае, когда расстояния между крайними излучателями смежных модулей отличается от расстояния между соседними излучателями, т.е. когда $D \neq Dx$ (см.рис.1). Это ведет к росту боковых лепестков.

В настоящей статье рассматривается вопрос влияния на уровень ДРФ фазового распределения и расстояния D (см. рис.1).

Численное моделирование показывает, что ДПФ зависят

– от числа излучателей в модуле при одном и том же числе излучателей в решетке;

– от угла сканирования θ_m ;

– от расстояния между соседними излучателями в решетке Dx ;

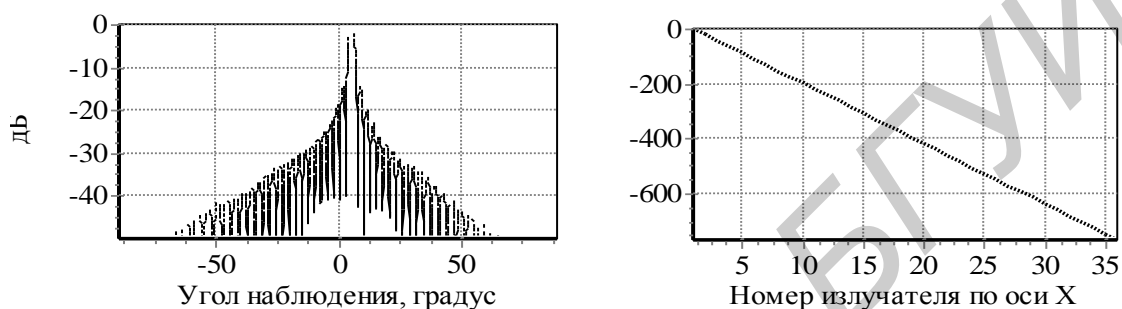
– от расстояния между соседними излучателями на стыке соседних модулей D ;

– от ширины главного лепестка ДН одного излучателя $2\theta_{0,5}^1$.

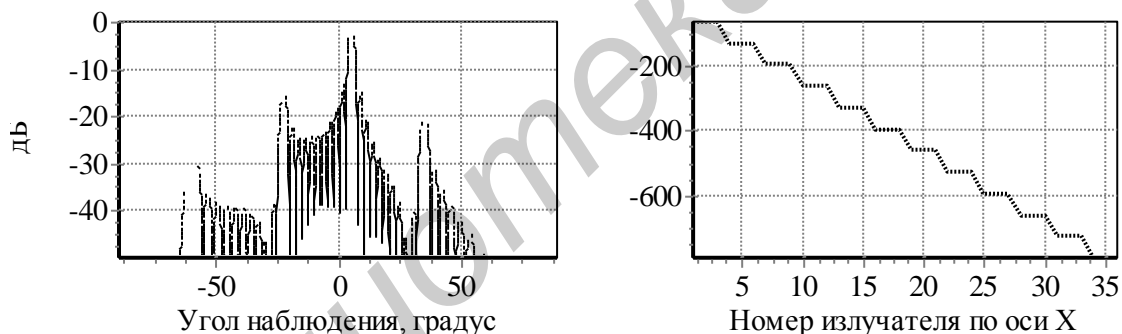
Зависимости ДПФ от амплитудного распределения в системе модулей и в пределах одного модуля нет.

Указанные выше закономерности далее рассматриваются на примере решетки с параметрами $Nx \times Mx = 36$, $Ny = 8$, $Dx = 0,7\lambda$ (λ - длина волны), $D = 0,.$

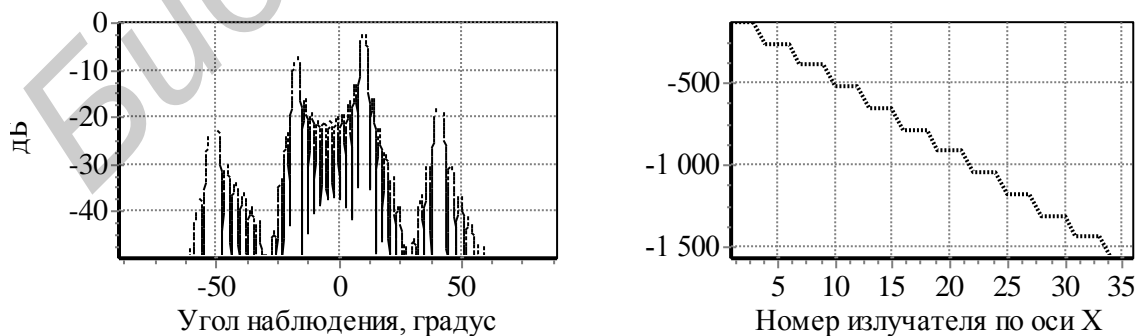
На рис.4 показана ДН решетки в плоскости XZ и фазовое распределение при значениях числа излучателей в одном модуле $N_x=3$, $M_x=12$, $2\theta_{0,5}^1=60^\circ$. Амплитудное распределение в решетке модулей и в пределах каждого модуля – равномерное; фазовое распределение в решетке модулей линейное для угла сканирования θ_m (угол θ_m показан на рисунках). В пределах каждого модуля фазовое распределение равномерное. В итоге в решетке фазовое распределение получается ступенчатым. Оно превращается в линейное при числе излучателей в одном модуле $N_x=1$. Слева на рисунках показаны ДН, справа – фазовое распределение. Слова на рис.4 «Фазовое распределение линейное» означают, что в модулях, как и во всей решетке фазовое распределение линейное, или в модуле решетки всего один излучатель, а таких модулей в рассматриваемом частном случае $M_x=36$.



(а) – Фазовое распределение в решетке линейное, угол сканирования $\theta_m = 5^\circ$



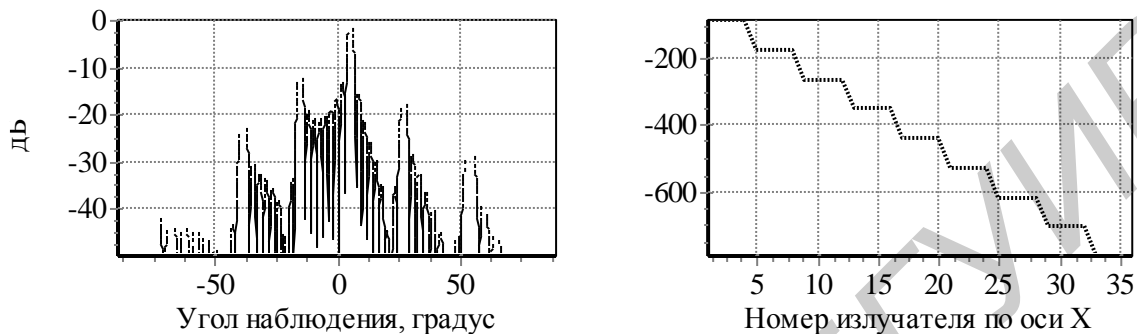
(б) – Фазовое распределение в решетке модулей ступенчатое, угол сканирования $\theta_m = 5^\circ$



(в) – Фазовое распределение в решетке модулей ступенчатое, угол сканирования $\theta_m = 10^\circ$

Рис.4. Диаграмма направленности и фазовое распределение при $N_x=3$, $M_x=12$

Как видно, дифракционные боковые лепестки при угле сканирования $\theta_m = 5^\circ$ уже достигли уровня апертурных боковых лепестков, соответствующих равномерному амплитудному распределению (-13 дБ). При угле сканирования $\theta_m = 10^\circ$ дифракционные боковые лепестки становятся неприемлемо большими. Если в модуле число излучателей больше 3, эти лепестки становятся еще больше, что показано на рис.5 для случая $N_x=4$, $M_x=9$ при $\theta_m = 5^\circ$.



Фазовое распределение в решетке модулей ступенчатое, угол сканирования $\theta_m = 5^\circ$

Рис.5. Диаграмма направленности и фазовое распределение при $N_x=4$, $M_x=9$

Уровень и положение по углу наблюдения дифракционных боковых лепестков не зависит от амплитудного распределения в решетке модулей и в одном модуле. Это иллюстрируется рис.6 для решетки с параметрами $N_x=4$, $M_x=9$ при $\theta_m = 5^\circ$. На рис.6 амплитудное распределение в решетке модулей комбинированное с параметрами $\Delta_{xm}=0,1$, $P_{xm}=1$ (см. формулу (3)). В пределах модуля – АР равномерное. Этот рисунок надо сравнить с рисунком 5.

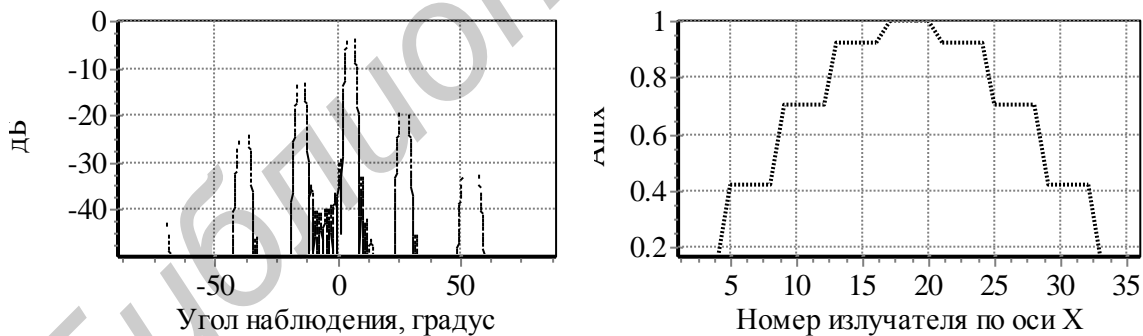


Рис.6. Диаграмма направленности и амплитудное распределение в решетке модулей при $N_x=4$, $M_x=9$, $\Delta_{xm}=0,1$, $P_{xm}=1$, угол сканирования $\theta_m = 5^\circ$

Из рис.6 следует, что комбинированное АР в решетке модулей приводит только к уменьшению апертурных боковых лепестков, расположенных между дифракционными боковыми лепестками.

При уменьшении D_x , как известно [3, 4, 6] побочные главные лепестки множителя системы решетки модулей отодвигаются от рабочего главного лепестка нулевого порядка в область низкого уровня главного лепестка ДН одного излучателя. В результате уменьшаются ДБЛ. Исключение составляют те ДБЛ, которые расположены поблизости от главного лепестка нулевого порядка в стороне, противоположной

направлению сканирования. Чем меньше ширина главного лепестка ДН одного излучателя, тем сильнее подавляются ДБЛ. Зависимость уровня и положения ДБЛ от расстояния Dx иллюстрирует рис.7, на котором показана ДН решетки с ранее указанными параметрами для $Dx = 0,5\lambda$, $\theta_m = 12^\circ$ при $2\theta_{0,5}^1 = 30^\circ$ и $2\theta_{0,5}^1 = 20^\circ$.

Уровень ДБЛ можно в некоторых пределах изменять введением неэквилидистантности в расположение модулей решетки в плоскости сканирования. Эту неэквилидистантность можно, например, ввести изменением расстояния между крайними столбцами соседних модулей. Причем увеличение этого расстояния и уменьшение его по сравнению с Dx приводит к разным результатам. Для иллюстрации этого эффекта на рис.8 слева показаны ДН решетки для варианта, показанного на рис.7б, при $D = 0,2\lambda$ (а) и $D = 0,8\lambda$ (б). Фрагменты многомодульной решетки в этих двух случаях показаны на том же рис.8 справа.

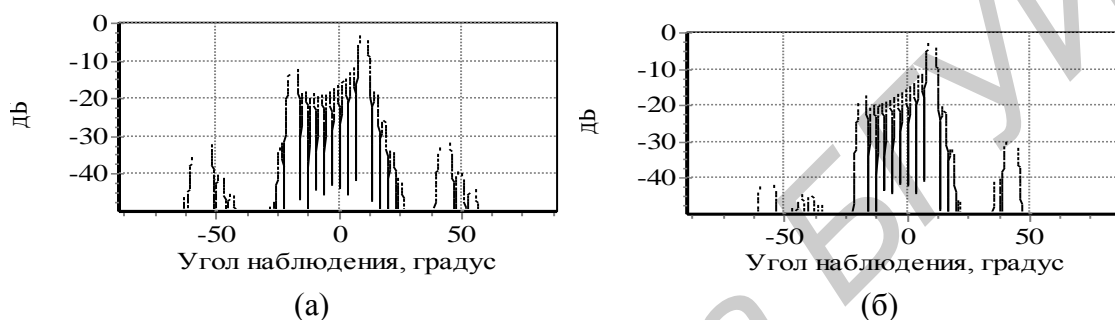


Рис.7. ДН решетки с параметрами $N_x=4$, $M_x=9$, равномерного амплитудного распределения для $Dx = 0,5\lambda$, $\theta_m = 10^\circ$ при $2\theta_{0,5}^1 = 30^\circ$ (а) и $2\theta_{0,5}^1 = 20^\circ$ (б)

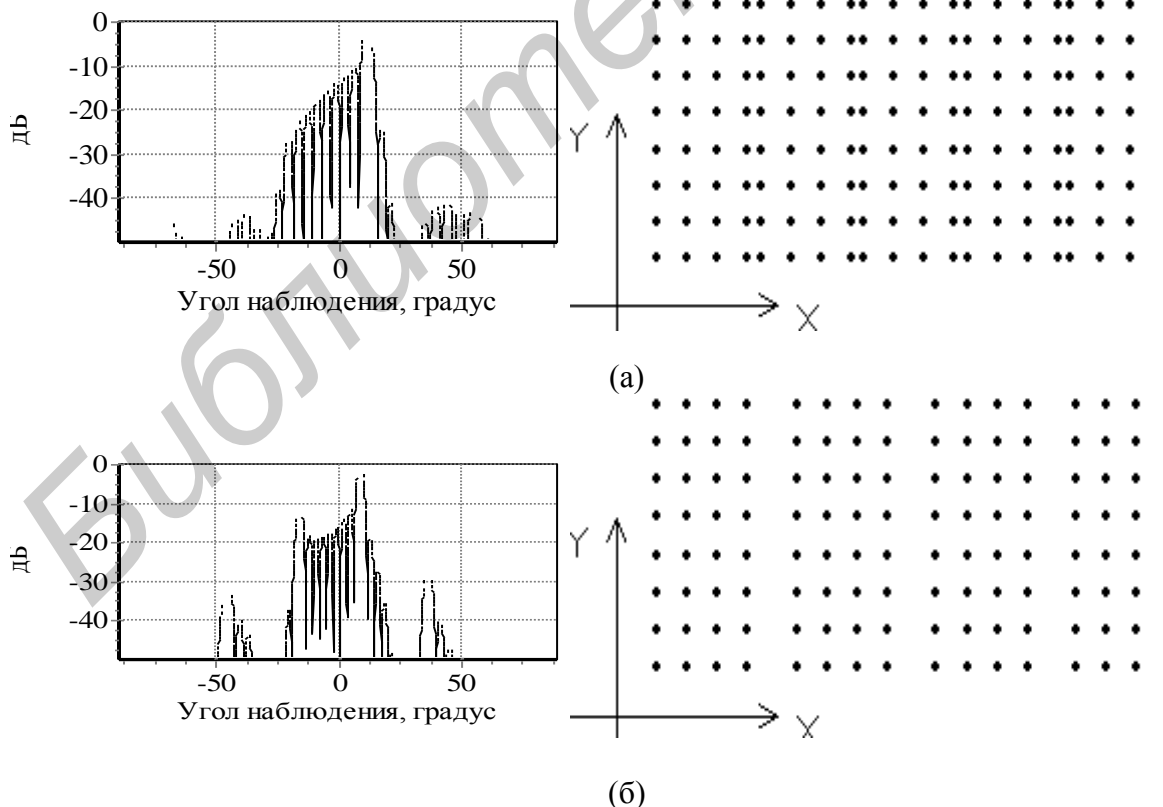


Рис.8. ДН многомодульной решетки при уменьшенном (а) и увеличенном (б) расстоянии между столбцами соседних модулей

На рис.8а ДБЛ, ближайший слева к главному лепестку ДН, стал меньше апертурного бокового лепестка. Это видно так же и на рис.9а, где показана ДН решетки с параметрами $N_x=4$, $M_x=9$, $D_x=0,5\lambda$, при $2\theta_{0,5}^1=20^\circ$, как на рис.7б, но при комбинированном ступенчатом амплитудном распределении в системе моделей для параметров $\Delta_{xm}=0,1$ и $P_{xm}=1$.

Из сравнения рис.7б и рис.9 видно, за счет уменьшения расстояния между крайними столбцами уровень ДБЛ уменьшился с -15 дБ (рис.7б) до -22 дБ (рис.9а), но при увеличении угла сканирования с 10° до 12° резко возрос до -12 дБ.

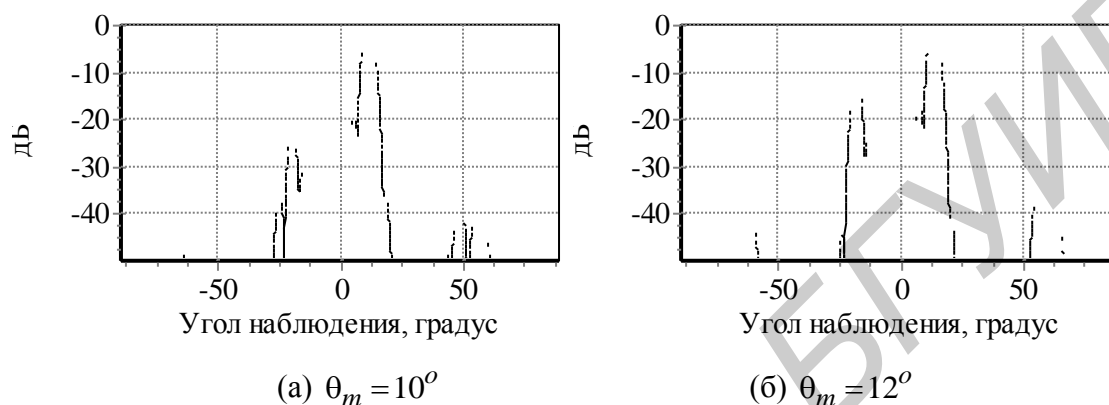


Рис.9. ДН при уменьшенном расстоянии между крайними столбцами соседних модулей для решетки с параметрами: $N_x=4$, $M_x=9$, с комбинированным амплитудным распределением для $D_x=0,5\lambda$ и $2\theta_{0,5}^1=20^\circ$

Изменение числа излучателей в модуле при сохранении общего числа излучателей в решетке ДН существенно меняется: ухудшается при увеличении N_x . Эту закономерность иллюстрирует рис.10. Рисунок 10 надо сравнит с рисунком 9б.

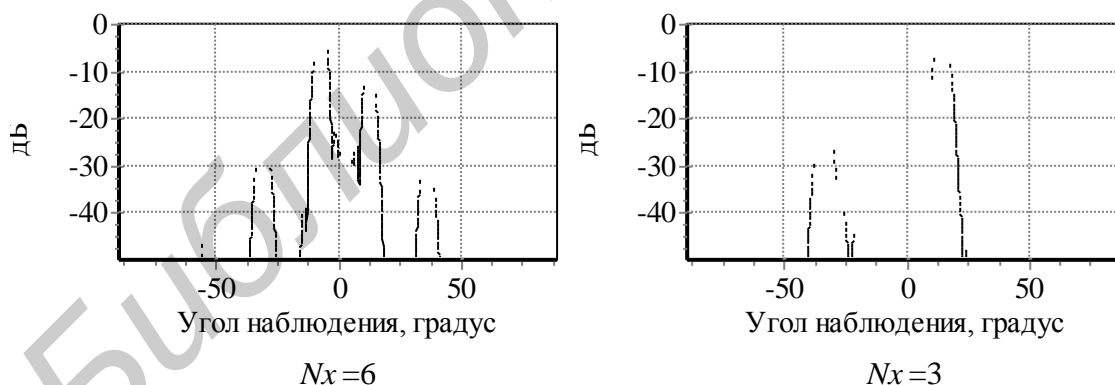


Рис.10. ДН решетки с параметрами $N_x \times N_y = 36$, с комбинированным амплитудным распределением для $D_x=0,5\lambda$, $\theta_m=12^\circ$ и $2\theta_{0,5}^1=20^\circ$ при разном числе излучателей N_x

С ростом числа модулей при неизменном N_x уровень ДБЛ немного уменьшается. Для иллюстрации на рис.11 показана ДН решетки с параметрами $N_x=4$ и скомбинированным амплитудным распределением для $D_x=0,5\lambda$, $2\theta_{0,5}^1=20^\circ$, $\theta_m=12^\circ$ при разном числе модулей.

Заключение

Исследовано влияние фазового распределения возбуждения излучателей в многомодульной антенной решетке из M_x модулей, в которой модулем является фрагмент решетки с N_x излучателями. Показано, что любое изменение фазового распределений в решетке модулей при равномерном фазовом распределении в пределах модуля приводит к существенному росту дифракционных боковых лепестков в диаграмме направленности многомодульной решетки. Эти лепестки являются побочными главными лепестками решетки модулей, которая является разреженной решеткой и в которой не выполняется условие единственности главного лепестка. Побочные главные лепестки только частично «давятся» множителем системы модуля.

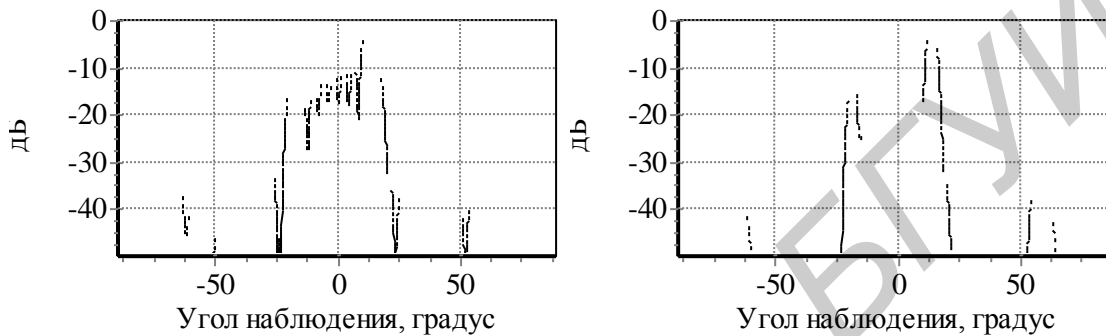


Рис.11. ДН решетки с $N_x=4$ при $M_x=8$ (слева) и $M_x=12$ (справа)

В дополнение к материалам, опубликованным в работах [3, 4] в статье рассмотрены факторы, влияющие на параметры сканирования в решетке модулей путем изменения разности фаз между соседними модулями: влияние амплитудного распределения возбуждения модулей, расстояния между крайними излучателями в соседних модулях, ширины главного лепестка диаграммы направленности одного излучателя, числа излучателей в одном модуле. Показано, что при числе излучателей в одном модуле $N_x=4$, возбужденных синфазно, сектор сканирования не превосходит $10-12^\circ$ при уровне дифракционных боковых лепестков не более -10 дБ. С увеличением N_x сектор сканирования уменьшается.

Литература

1. eoPortal [Электронный ресурс] / Earth Observation resources. – Режим доступа : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x>. – Дата доступа : 11.08.2014.
2. eoPortal [Электронный ресурс] / Earth Observation resources. – Режим доступа : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmosky-med>. – Дата доступа : 11.08.2014.
3. Haupt R.L. Antenna arrays: a computational approach/ John Wiley & Sons, Artech House.
4. Mailloux Robert J. Phased Array Antenna Handbook /Mailloux, Robert J. Artech House.- с.362. ISBN 1-58053-689-1
5. Юрцев О.А., Наумович О.А., Юбка А.П. Особенности Влияния амплитудного распределения возбуждения излучателей на диаграмму направленности многомодульной антенной решетки // Доклады БГУИР. №5(91). 2015. С.100-106.
6. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Основы теории антенн./М. Дрофа. 2007.

Краткие сведения об авторах



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: yurich87@yandex.ru



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

Библиотека БГУИР