

УДК 621.391.82

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ МНОГОМОДУЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

О.А. ЮРЦЕВ, Н.М. НАУМОВИЧ, А.П. ЮБКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 19 января 2015

Анализируется влияние закона возбуждения излучателей по амплитуде многомодульной антенной решетки на ее диаграмму направленности. Выявляются условия, при которых в этом влиянии есть существенные особенности по сравнению с одномодульной решеткой, что ведет к росту боковых лепестков.

Ключевые слова: многомодульная антенная решетка, амплитудное распределение возбуждения, диаграмма направленности.

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 линейных решеток, и в этой плоскости производится фазовое сканирование за счет возбуждения соседних строк с необходимым сдвигом по фазе. В этой плоскости расположения модулей сканирование производится за счет изменения разности фаз между соседними модулями. Амплитудное и фазовое распределения возбуждения излучателей в линейных решетках, модулях и во всей многомодульной решетке имеют существенные особенности по сравнению с одномодульной решеткой:

1) в пределах одной линейной решетки, являющейся излучателем 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 одной линейной 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.

Эти особенности приводят к тому, что амплитудное и фазовое распределения возбуждения излучателей в составе всей решетки в горизонтальной плоскости становятся ступенчатыми. Причем, одна ступенька – это модуль решетки. В пределах этой ступеньки амплитудное распределение – равномерное или спадающее к краям решетки, фазовое распределение или равномерное или неравномерное, но четное относительно центра модуля решетки.

В статье излагаются результаты исследования на характеристики решетки ступенчатого амплитудного распределения возбуждения излучателей многомодульной решетки в плоскости расположения модулей. Этот вопрос в литературе освещен частично. В частности, в [3, 4] рассмотрено влияние ступенчатого амплитудного распределения в многомодульной решетке при постоянном амплитудном распределении в пределах одного модуля. В настоящей статье рассматривается более общий вопрос – влияние закона амплитудного распределения в решетке модулей и в пределах одного модуля на диаграмму направленности (ДН) многомодульной решетки, в том числе при сканировании путем изменения разности фаз между соседними модулями.

Постановка задачи и методика ее решения

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

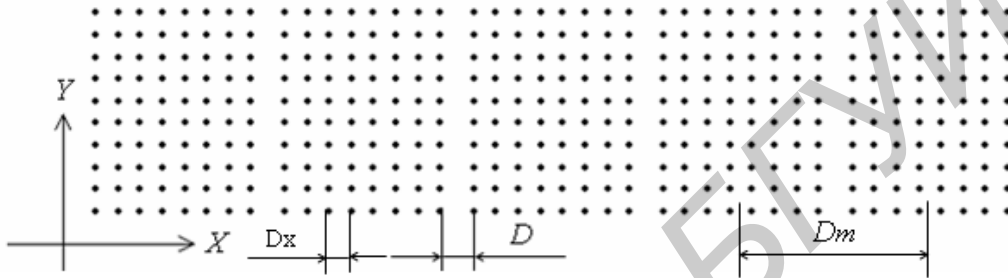


Рис. 1. Многомодульная решетка

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 – Dx , между строками модуля – Dy ; D – расстояние между краями соседних модулей (между крайними столбцами соседних модулей, как на рис.1); D_m – расстояние между центрами соседних модулей. Параметры ДН обозначены символами: θ_{mx} – угол сканирования в плоскости XZ ; $2\theta_{0,5}^x$, $2\theta_{0,5}^y$ – ширина главного лепестка ДН в плоскостях XZ и YZ ; F_{bm}^x , F_{bm}^y – уровень максимального бокового лепестка ДН в плоскостях XZ и YZ .

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

$$\Delta\psi_m = -\frac{2\pi}{\lambda} D_m \cdot \sin \theta_{mx}, \quad (1)$$

где λ – длина волны.

Фазовое распределение (1) обеспечивает отклонение максимума главного лепестка ДН в горизонтальной плоскости (в плоскости XZ) и на угол θ_{mx} [5]. В пределах строки модуля нормированное к максимуму амплитудное распределение – спадающее к краям строки до уровня $\Delta_x \leq 1$ по закону [5]:

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

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

В центре строки модуля амплитуда возбуждения максимальна и равна 1.

Амплитудное распределение в системе модулей решетки задается аналогично:

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

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 АР равномерное, ФР – в горизонтальной и вертикальной плоскостях – линейное для обеспечения сканирования. Суммарное амплитудное распределение вдоль оси X определяется произведением $A_n \cdot A_m$.

Моделирование описанной решетки с целью выяснения закономерностей выполнено с учетом взаимодействия излучателей между собой в пределах фрагмента решетки микрополосковых излучателей прямоугольной формы. Использован приближенный метод, описанный в статье [6], основанный на двухщелевой модели полоскового излучателя, принципе перестановочной двойственности уравнений Максвелла [5] и методе интегральных уравнений [7].

Результаты моделирования

Ниже описанные результаты моделирования многомодульной решетки получены при использовании в качестве излучателя микрополоскового излучателя прямоугольной формы с размерами пластины в H -плоскости $A = 13,8$ мм, в E -плоскости $B = 8,5$ мм. Толщина подложки $H = 1,5$ мм, диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon = 2,5$. Моделирование выполнено на частоте 10 ГГц.

Для расчета ДН одного излучателя с учетом взаимодействия использовался фрагмент решетки с числом излучателей 3×3 и метод, описанный в работе [6]. Эта часть моделирования выполнена также и в программе Microwave Office (MWO) для сравнения. На рис. 2, *a* показан фрагмент решетки, созданный в программе, описанной в работе [6], на рис. 2, *б* – фрагмент, созданный в программе MWO.

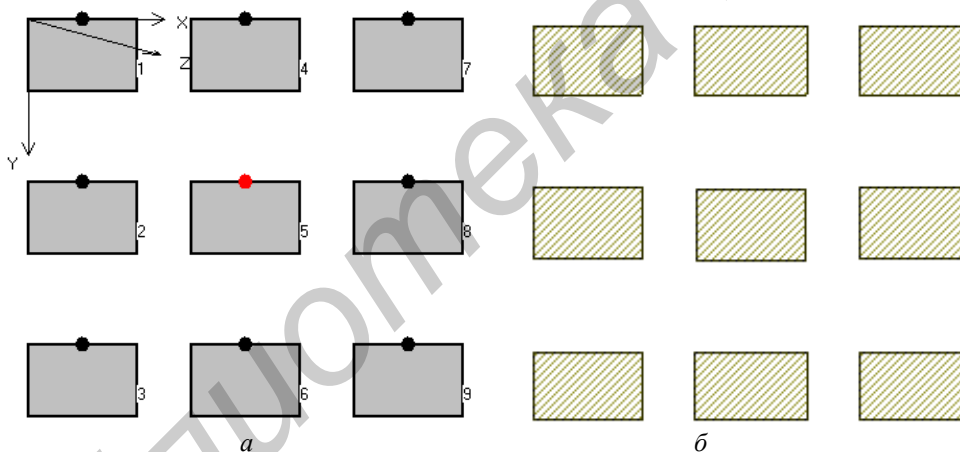


Рис. 2. Фрагмент решетки для учета взаимодействия: *a* – программа работы [4]; *б* – MWO

Во фрагменте возбуждался центральный излучатель, остальные были пассивными. На рис. 3 показаны ДН фрагмента и входное сопротивление (активная – R и реактивная – X части) центрального излучателя, рассчитанные в двух программах: *a* – расчет в программе, описанной в [6], *б* – расчет в программе MWO.

Влияние ступенчатого амплитудного распределения в системе модулей произведено при различных геометрических параметрах решетки и модулей N_x , N_y , M_x , но далее в закономерности иллюстрируются на примере решетки, в которой в модуле число излучателей $N_x = 8$, $N_y = 8$, число модулей по горизонтали $M_x = 5$.

Для иллюстрации влияния ступенчатого АР на ДН многомодульной решетки на рис. 4, *a* показано АР, меняющееся вдоль оси X в пределах всей решетки по закону, определяемому формулами (2) и (3) с параметрами $\Delta_{xm} = 0,3$ и $P_{xm} = 1$. Решетка не разделена на модули и имеет параметры $M_x = 40$, $N_x = 1$ (40 излучателей по оси X в решетке). На рис. 4, *б* показана ДН этой решетки. На рис. 5, *a* показано АР для той же решетки, но разделенной на модули с параметрами $M_x = 5$, $N_x = 8$. В пределах каждого модуля АР равномерное и меняется от

модуля к модулю по закону (3) с параметрами $\Delta_{xm} = 0,3$; $P_{xm} = 1$. На рис. 5, б показана соответствующая ДН в E -плоскости.

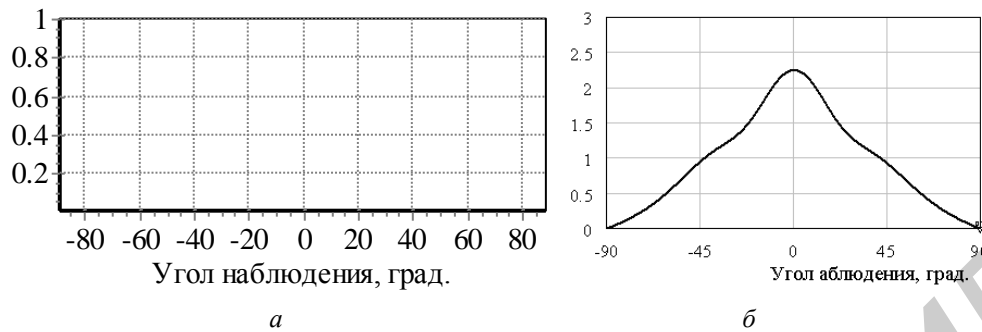


Рис. 3. ДН с учетом взаимодействия в составе фрагмента:
a – $R = 52,5 \text{ Ом}$; $X = 5,9 \text{ Ом}$; *б* – $R = 59 \text{ Ом}$; $X = 18 \text{ Ом}$

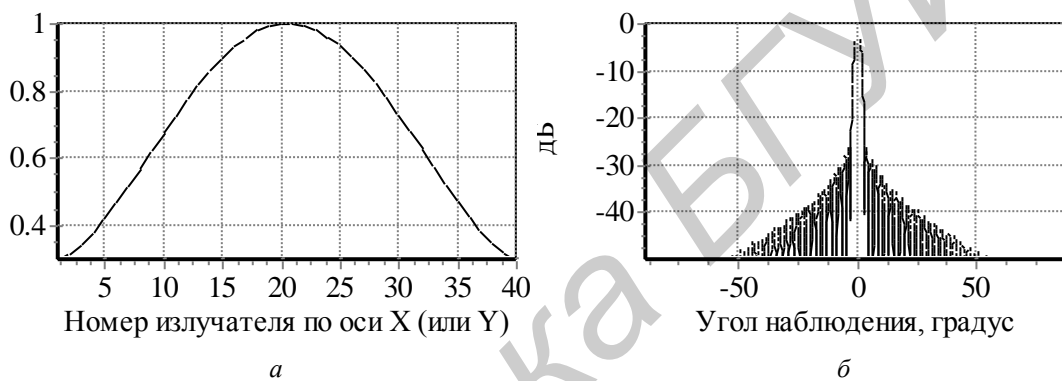


Рис. 4. Амплитудное распределение и ДН решетки, не разделенной на модули

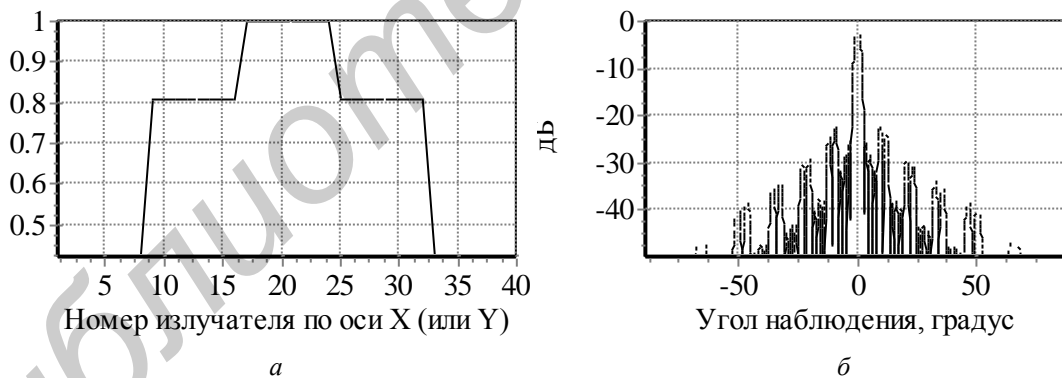


Рис. 5. Амплитудное распределение и ДН 5-модульной решетки при ступенчатом АР

Как видно, в многомодульной решетке появились возросшие боковые лепестки, расположенные парами. Это объясняется следующим образом. Если представить линейную решетку в виде системы модулей, то ее ДН можно рассчитать двумя способами. Первый способ – суммированием полей всех излучателей. В результате получается ДН вида рис. 4, б. Второй способ – с применением теоремы перемножения ДН [5]. 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.6, а

показаны множители $F_{c1}(\theta)$ – толстой линией и $F_{cm}(\theta)$ – тонкой линией для равномерного амплитудного распределения: $\Delta_{xm}=1$, $\Delta_x=1$. Как видно, максимумы побочных главных лепестков множителя системы решеток 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. 6, б.

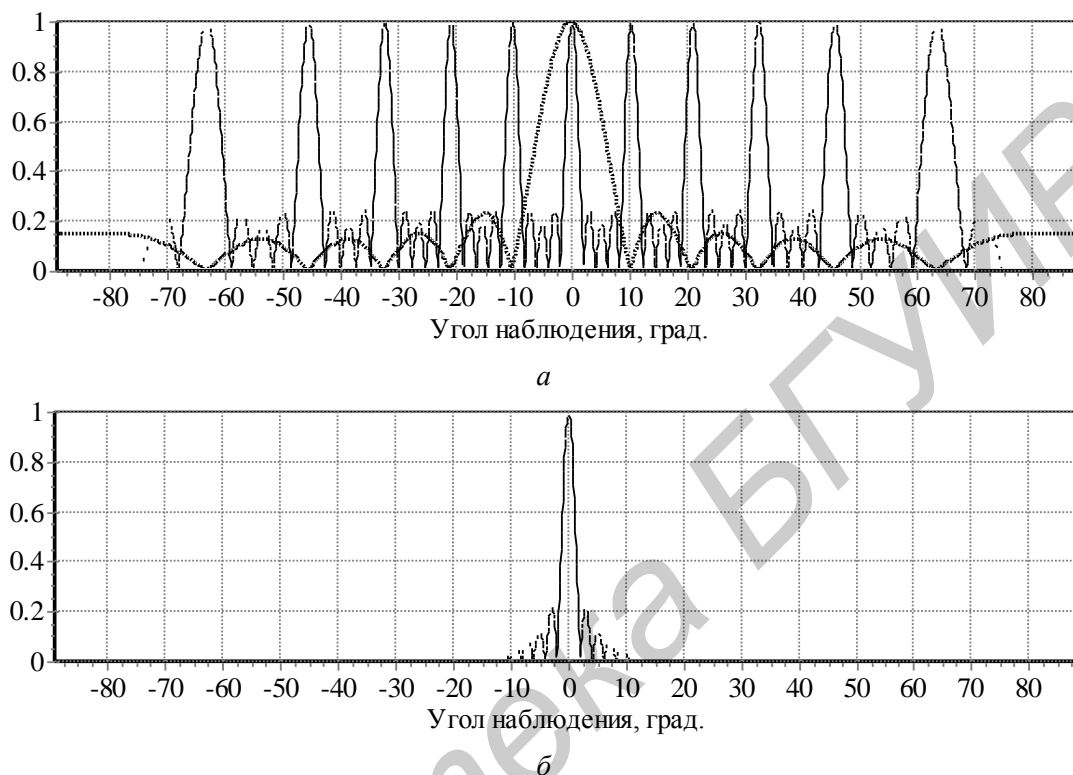


Рис. 6. Множители системы решеток модулей (тонкая линия) и одного модуля (толстая линия) – а, произведение множителей системы – б

Описанная ситуация нарушается при изменении углового положения элементов множителя системы решеток модулей или множителя системы модуля. Это происходит, если меняется амплитудное или фазовое распределение возбуждения излучателей в модуле или решетке модулей. Предыдущий случай (рис. 5, а, б) соответствует измененному амплитудному распределению в решетке модулей.

На рис. 7 показан множитель системы решеток $F_c(\theta)$ для случая, когда вдоль системы множителей для сканирования устанавливается линейное фазовое распределение, соответствующее углу сканирования $\theta_m = 5^\circ$. В пределах каждого модуля и в системе модулей амплитудное распределение равномерное.

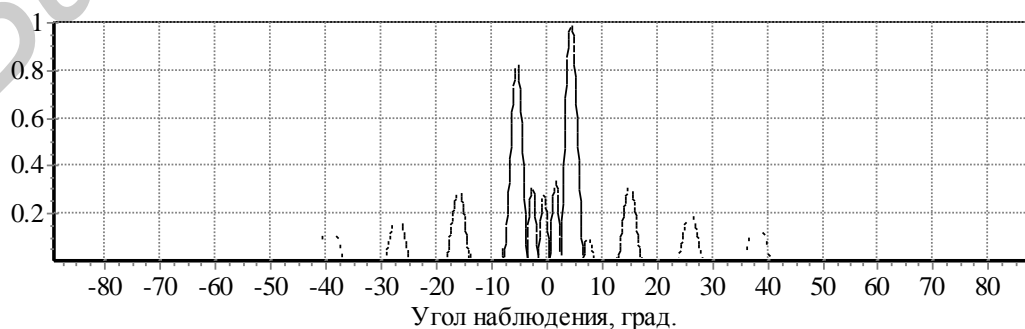


Рис. 7. Множитель системы решеток при сканировании

В рассматриваемом частном случае угловой разнос между побочными максимумами множителя системы решетке модулей равен 10° , поэтому при сканировании на угол кратный 10° побочные главные лепестки компенсируются. Во все других случаях этого не происходит. При этом в ДН решетки на месте побочных главных лепестков возрастают боковые лепестки. Возрастают они и при изменении амплитудного распределения в пределах каждого модуля. Обычное стремление уменьшить уровень боковых лепестков каждого модуля использованием в пределах модуля спадающего амплитудного распределения не приводит к уменьшению побочных главных лепестков множителя системы решетки $F_c(\theta)$, соответствующих побочным главным лепесткам множителя системы решетки модулей $F_{cm}(\theta)$. На рис. 8 справа показана диаграмма направленности решетки при спадающем в пределах модуля амплитудном распределении при двух значениях $\Delta_x=0,5$ и $\Delta_x=0,1$. Слева показаны множители системы модуля при этих двух значениях Δ_x . Как видно, с уменьшением Δ_x растут боковые лепестки, соответствующие побочным главным лепесткам множителя системы решетки модулей, хотя боковые лепестки множителя системы модуля уменьшаются.

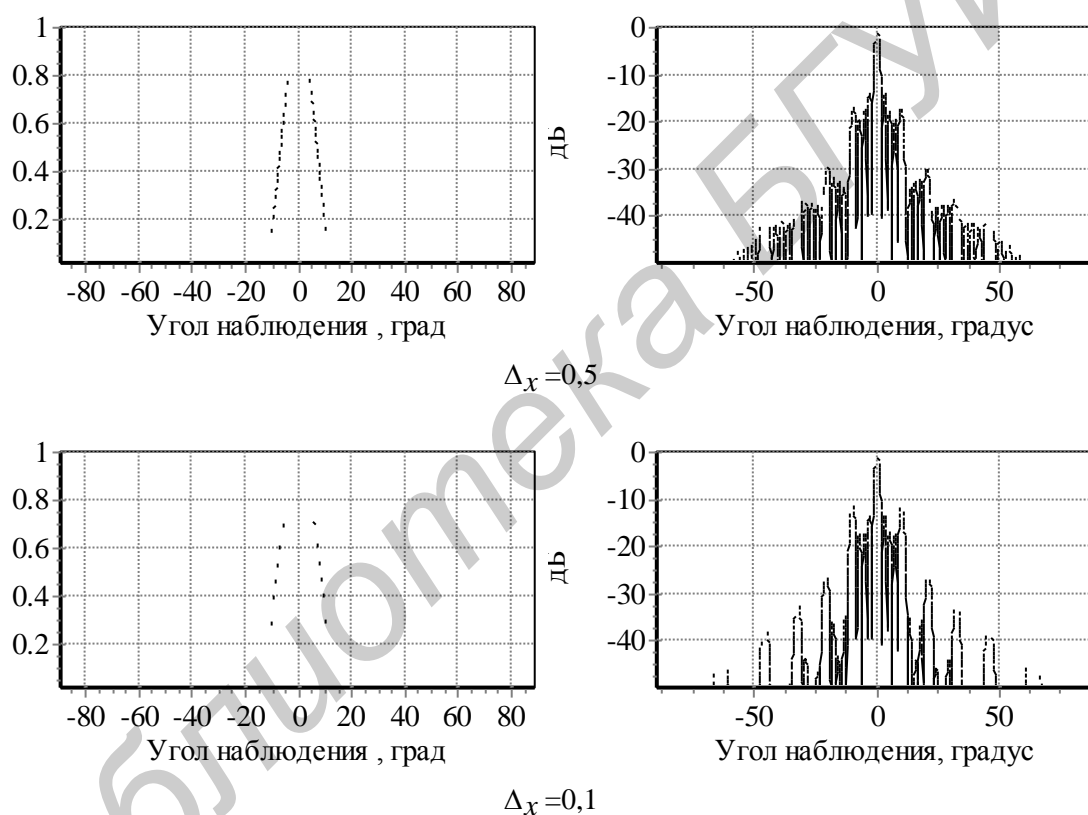


Рис. 8. Множитель системы при разном амплитудном распределении в пределах модуля

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 крайним излучателями смежных модулей отличается от расстояния между соседними излучателями, т.е. когда $D \neq Dx$ (рис. 1). Это ведет к росту боковых лепестков.

Заключение

Исследовано влияние амплитудного и частично фазового распределений возбуждения излучателей в многомодульной антенной решетке из M_x модулей, в которой модулем является фрагмент решетки с N_x излучателями. Показано, что любое изменение амплитудного и фазового распределений в модуле и в решетке модулей, по сравнению с соответствующей одномодульной решеткой с числом излучателей $M_x \times N_x$, приводит к существенному росту

отдельных 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. Эти побочные главные лепестки только частично «давятся» множителем системы модуля. В дополнение к материалам, опубликованным в работах [3, 4], в статье рассмотрены эффекты, связанные с изменением амплитудного распределения в каждом модуле и в зависимости от фазового распределения в решетке модулей, используемого для сканирования.

THE FEATURES OF RADIATING ELEMENT EXCITATION AMPLITUDE DISTRIBUTION INFLUENCE UPON PATTERN OF MULTI-MODULE ANTENNA ARRAY

O.A. YURTSEV, N.M. NAUMOVICH, A.P. YUBKO

Abstract

The regularity of radiating element excitation amplitude distribution influence upon radiation pattern of multi-module antenna array is analyzed. The conditions are investigated, when the essential particularities in such an influence in contrast with the single-module antenna array are present. These conditions lead to sidelobe level growth.

Список литературы

1. eoPortal [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x>. – Дата доступа: 11.08.2014.
2. eoPortal [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed>. – Дата доступа: 11.08.2014.
3. *Haapt R.L.* Antenna arrays: a computational approach. United Kingdom, 2010.
4. *Mailloux Robert J.* Phased array antenna handbook. United Kingdom, 2005.
5. *Фельд Я.Н., Бененсон Л.С.* Основы теории антенн. М., 2007.
6. *Юрцев О.А., Кизименко В.В.* // Докл. БГУИР. № 8 (54). 2010. С. 54–60.
7. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры. М., 1977.