

УДК 621.391.82

СКАНИРОВАНИЕ В МНОГОМОДУЛЬНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ СО СТУПЕНЧАТЫМ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

А.П. ЮБКО, О.А. ЮРЦЕВ, Н.М. НАУМОВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 1 февраля 2018

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования способа подавления дифракционных боковых лепестков, которые появляются в диаграмме направленности многомодульной антенной решетки при использовании ступенчато-линейного фазового распределения возбуждения излучателей решетки. При таком фазовом распределении в пределах каждого модуля фаза возбуждения постоянна, а от модуля к модулю меняется по линейному закону. Это позволяет каждый модуль решетки возбуждать от одного входа и сократить, например, число приемо-передающих модулей в цифровой активной многомодульной решетке во столько раз, сколько излучателей включает один модуль решетки.

Ключевые слова: многомодульная решетка, фазовое сканирование, амплитудное распределение, боковые лепестки.

Abstract. The investigation results on grating lobes suppression method are described in this paper. Grating lobes appear in pattern of multimodule antenna array, if stair-step phase distribution of element excitation is used. Stair-step here means the case when the phase of elements is constant within one module, and changes linearly from one module to adjacent. Described approach makes possible to excite every module from one common source and shorten, for example, the total transmit / receive module quantity in multimodule digital active antenna array by a factor equal to the radiators quantity in one array's module.

Keywords: multimodule antenna array, phase scanning, amplitude distribution, grating lobes.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 114, No. 4, pp. 23-28

**Scanning in multimodule antenna arrays
with stair-step amplitude-phase distribution element excitation
A.P. Joubko, O.A. Yurtsev, N.M. Naumovich**

Введение

Многомодульная антенная решетка состоит из фрагментов (модулей). В пределах каждого модуля амплитуда и фаза возбуждения излучателей постоянна, но от модуля к модулю может меняться по требуемому закону с помощью приемо-передающих модулей [1]. Показано, что в таких решетках при ступенчатом изменении амплитуды и фазы возбуждения излучателей от модуля к модулю возникают так называемые дифракционные боковые лепестки [2–4]. Это является следствием того, что в множителе решетки системы модулей не выполняется условие единственности главного лепестка нулевого порядка, хотя оно выполняется в пределах каждого модуля. В результате в множителе решетки системы модулей появляются главные лепестки с номерами $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ (дополнительные главные лепестки – ДГЛ). Угловые положения ДГЛ θ_{mn} с номерами $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ определяются известным выражением [2]:

$$\sin(\theta_{mn}) = \frac{\lambda}{Dm} \left(1 - \frac{\Phi_0}{2\pi} \right), \quad (1)$$

где λ – длина волны; Dm – расстояние между центрами соседних модулей (шаг расположения модулей в решетке); Φ_0 – разность фаз между соседними модулями.

Чем больше излучателей в одном модуле, тем больше расстояние между центрами модулей и тем больше в множителе системы модулей ДГЛ. При равномерном амплитудно-фазовом распределении (АФР) возбуждения модулей решетки ДГЛ подавляются диаграммой направленности (ДН) одного модуля, так как нули в ней совпадают по углу наблюдения с максимумами ДГЛ системы модулей. Но при отличии АФР от равномерного в каждом модуле или в системе модулей происходит смещение по углу наблюдения нулей в ДН одного модуля или максимумов ДГЛ в системе модулей. В результате подавления ДГЛ не происходит. На угловых местах ДГЛ в ДН многомодульной решетки появляются дифракционные боковые лепестки (ДБЛ). Зависимость их уровня от геометрии решетки рассмотрена в работах [3, 4], а их зависимость от амплитудного распределения – в работе [5]. В настоящей статье рассматривается зависимость уровня ДБЛ от ступенчато-линейного фазового распределения, которое образуется, если в пределах каждого модуля фазовое распределение равномерное, а от модуля к модулю меняется по линейному закону. Такое распределение используется для сканирования в многомодульной решетке. Этот вопрос в литературе не рассмотрен.

Деление решетки на фрагменты (модули) не только решает задачу унификации элементов такой сложной и дорогой системы, какой является многоэлементная активная цифровая антенная решетка (ЦАР). Это является также способом упрощения конструкции ЦАР, так как один ППМ возбуждает весь модуль, и их число в решетке уменьшается. Очень важно сохранить возможности многомодульной решетки по сканированию с использованием ступенчато-линейного фазового распределения. Поэтому в настоящей статье исследуется не описанный в литературе способ уменьшения ДБЛ при сканировании. Поскольку положение

ДГЛ зависит от отношения $\frac{Dm}{\lambda}$, систему ДГЛ множителя системы решетки модулей можно

разрушить, сделав в разных строках модулей разным шаг Dm . Этот способ исследуется в настоящей статье. Кроме того, исследуется влияние амплитудного распределения в системе модулей на уровень ДБЛ при сканировании за счет использования ступенчато-линейного фазового распределения. Этот вопрос в литературе также не рассмотрен.

Зависимость уровня дифракционных боковых лепестков от числа излучателей в одном модуле

При сканировании с использованием ступенчато-линейного фазового распределения уровень ДБЛ растет с увеличением угла сканирования. Эта физическая закономерность известна, но численных оценок в известной литературе нет. Поэтому ниже приводятся результаты численного моделирования многомодульной антенной решетки при различном числе излучателей в одном модуле при постоянном общем числе излучателей в решетке. Плоскость решетки – это плоскости XU . Ось Z – это нормаль к плоскости решетки. От нормали отсчитывается угол наблюдения θ . Используются следующие обозначения: N_x, N_y – число излучателей в одном модуле по осям X и Y ; M_x, M_y – число модулей по осям X и Y ; D_x, D_y – расстояние между соседними излучателями в модуле (и во всей решетке) по осям X и Y (шаг расположения излучателей); D_{mx}, D_{my} – расстояние между центрами соседних модулей по осям X и Y . При равномерном (эквидистантном) расположении излучателей во всей решетке $D_{mx} = D_x \cdot N_x$.

Влияние числа излучателей в одном модуле на уровень ДБЛ ниже иллюстрируется на примере решетки с общим числом излучателей вдоль оси X , $N_x = 24$. В одном модуле число излучателей по оси Y равно $N_y = 2$. Вдоль оси X число излучателей $N_x = 2, 3, 4$. Число строк модулей $M_y = 1$.

На рис. 1 показаны рассчитанные зависимости уровня дифракционных боковых лепестков (УДБЛ) от угла сканирования при разных значениях N_x для двух известных амплитудных распределений, описываемых косинусом в степени Pa на «подставке» Da .

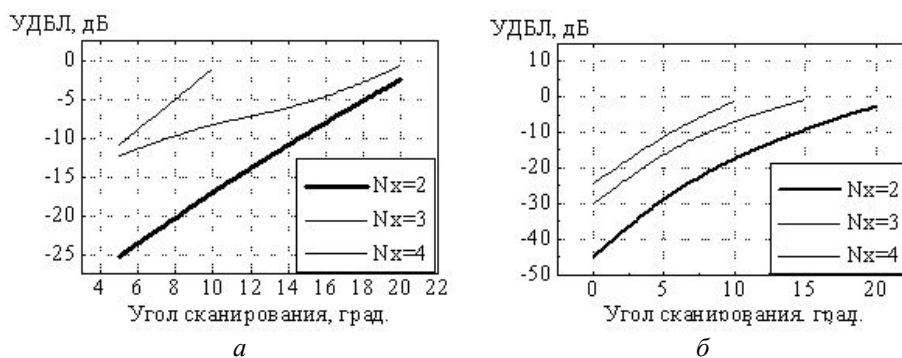


Рис. 1. Зависимости УДБЛ от угла сканирования: *a* – $Da = 1, Pa = 0$; *б* – $Da = 0,2; Pa = 1,5$

Из рис. 1 следует, что УДБЛ быстро растет с увеличением числа излучателей в одном модуле. Так, если задаться допустимым УДБЛ, равным -10 дБ, при равномерном амплитудном распределении ($Da = 1$) максимально допустимый угол сканирования будет равен 15° . Этот угол почти не зависит от амплитудного распределения в решетке модулей.

Сканирование в решетке с многими строками модулей и разным шагом в разных строках

Рассматриваются три модели многомодульной решетки: в модели 1 во всех строках модулей шаг расположения модулей Dm_x сделан разным по случайному закону – рис. 2, *a*; во второй модели шаг Dm_x нарастает от нижней строки модулей к верхней по линейному закону – рис. 2, *б*. В моделях 1 и 2 число модулей по оси X равно 12, в каждом модуле число излучателей $N_x \times N_y = 2 \times 2$. Третья модель отличается от второй тем, что число модулей в строках уменьшается с ростом номера строки так, чтобы размер всех строк был примерно одинаков – рис. 2, *в*. Сканирование в плоскости строк модулей производилось при разном числе строк модулей. При исследовании рассчитывалось поле в дальней зоне всей решетки модулей для изотропных (ненаправленных) излучателей, по полю рассчитывался множитель системы всей решетки в плоскости XZ .

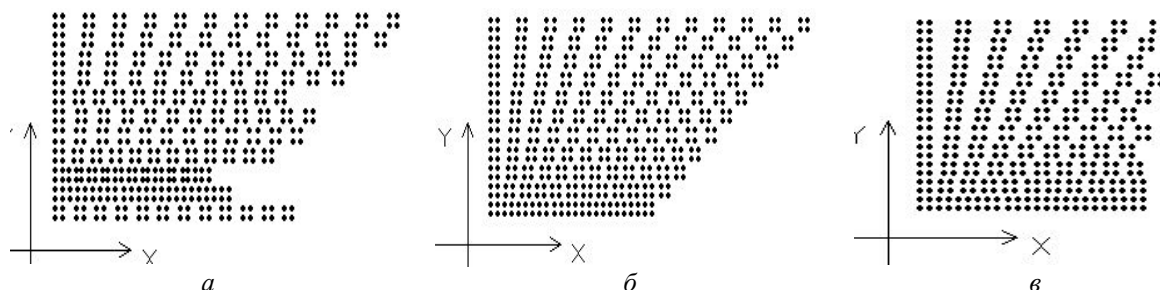


Рис. 2. Схематические изображения рассматриваемых моделей многомодульных решеток: *a* – модель 1; *б* – модель 2; *в* – модель 3

На рис. 3 приведены результаты расчета зависимости УДБЛ множителя системы от числа строк модулей M_y для моделей 1 и 2 и зависимость ширины главного лепестка (ГЛ) множителя системы всей решетки от числа строк модулей для тех же моделей при угле сканирования 20° . Если учесть направленность реального излучателя с типичной ДН, уровень всех боковых лепестков понизится. Это известная закономерность.

Из рисунков следует, что:

- по зависимости УДБЛ от числа строк модулей M_y модели 1 и 2 близки друг к другу;
- по зависимости ширины ГЛ от M_y при $M_y > 4$ эти модели также близки друг к другу, хотя условие $M_y > 4$ зависит от вида случайной реализации распределения модулей в строках;
- в модели 2 с ростом числа строк уменьшается ширина ГЛ ДН.

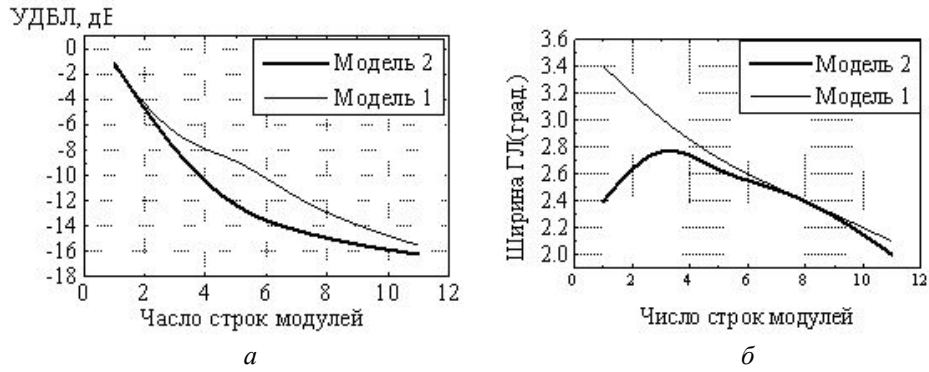


Рис. 3. Зависимости УДБЛ (а) и ширины ГЛ множителя системы всей решетки (б) от числа строк модулей при угле сканирования 20° для моделей 1 и 2

Из сравнения рис.1, а и рис. 2, а следует, что в моделях 1 и 2 УДБЛ значительно ниже, чем в многомодульной решетке с одинаковыми строками модулей. Так, при угле сканирования 20° в решетке с одинаковыми строками модулей УДБЛ равен минус 13 дБ, в решетке модели 2 – минус 16 дБ.

Результаты анализа модели 3 приведены ниже: зависимость УДБЛ – на рис. 4, а, зависимость ширины ГЛ множителя системы решетки – на рис. 4, б.

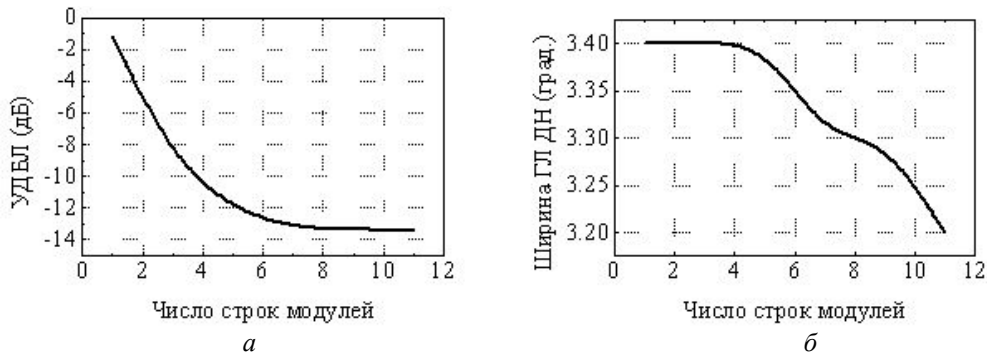


Рис. 4. Зависимости УДБЛ (а) и ширины ГЛ (б) от числа строк модулей для модели 3

Из сравнения рис. 3 и рис. 4 следует, что по УДБЛ модель 3 несколько хуже модели 2, но в модели 3 ширина главного лепестка ДН почти не зависит от числа строк модулей. Кроме того, в модели 3 число модулей меньше, чем в модели 2 и, особенно, по сравнению с исходной моделью с одинаковыми строками модулей. На рис. 5 показаны зависимости от угла сканирования УДБЛ и ширины ГЛ модели 3 при числе строк модулей $M_y = 11$ (см. рис. 2, б). На рис. 5 амплитудное распределение в системе модулей каждой строки равномерное.

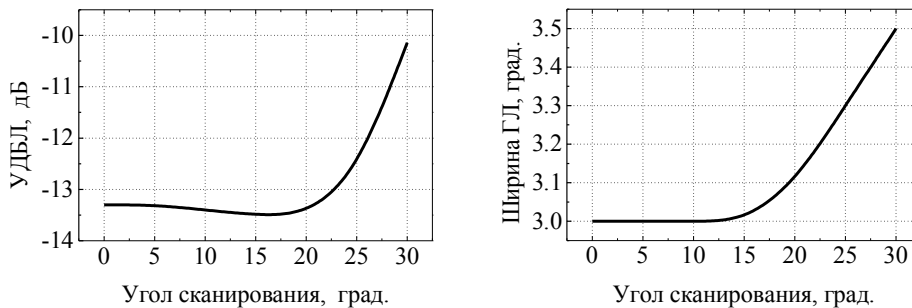


Рис. 5. Зависимости от угла сканирования УДБЛ (а) и ширины ГЛ (б) модели 3 при числе строк модулей, равном 11

Влияние амплитудного распределения иллюстрирует рис. 6. На рисунке приведены графики ДН этой модели при угле сканирования $\theta_m = 30^\circ$ для равномерного амплитудного распределения (а) и для спадающего к краям строк с параметрами $Da = 0,2$; $Pa = 1,5$ (б).

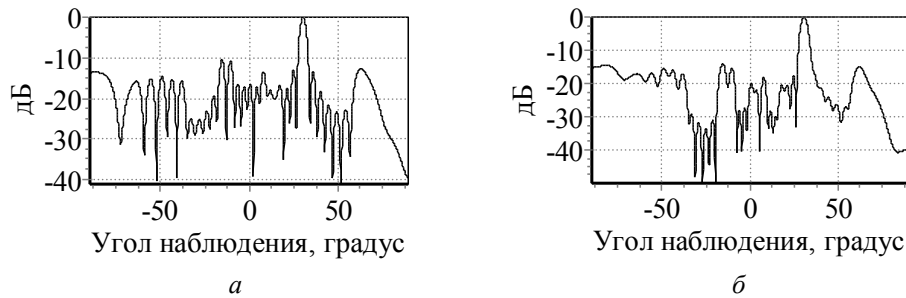


Рис. 6. Графики ДН модели 3 при угле сканирования, равном 30° :
a – $Da = 1$; $Pa = 0$; $\theta_m = 30^\circ$; *б* – $Da = 0,2$; $Pa = 1,5$; $\theta_m = 30^\circ$

Ступенчатые фазовое и амплитудное распределения, соответствующие параметрам, при которых рассчитаны ДН на рис. 6, показаны на рис. 7.

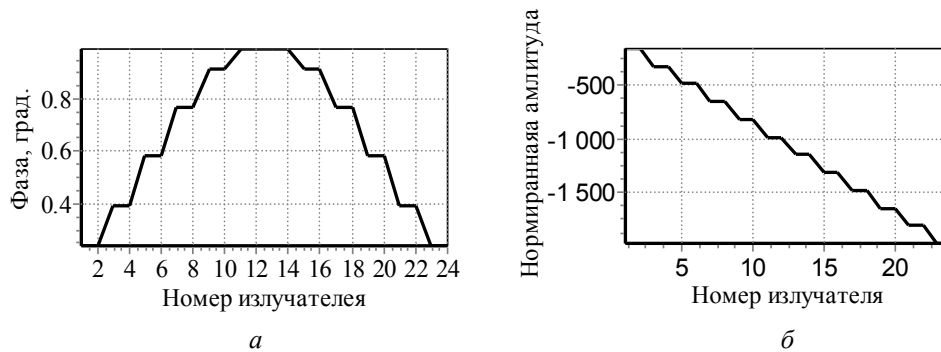


Рис. 7. Ступенчатые фазовое (*a*) и амплитудное (*б*) распределения

Из приведенных рисунков следует, что при сканировании в секторе углов $\pm 20^\circ$ дифракционные боковые лепестки и ширина главного лепестка слабо зависят от угла сканирования. При уменьшении уровня «подставки» в амплитудном распределении возбуждения решетки модулей (Da) уменьшаются не только апертурные боковые лепестки, но и дифракционные боковые лепестки. Этот результат не противоречит известному результату из публикаций по многомодульным решеткам: УДБЛ не зависит от амплитудного распределения в системе модулей. Этот известный результат получен для линейной многомодульной решетки. В двумерной решетке при разной степени неэквидистантности в разных строках модулей множители системы этих строк модулей имеют разное распределение дифракционных боковых лепестков по углу наблюдения при разном амплитудном распределении возбуждения модулей. Но направление главного лепестка в множителе решетки модулей разных строк не зависит от амплитудного распределения возбуждения модулей. Поэтому при суммировании полей этих строк в суммарном поле УДБЛ по сравнению с главным лепестком уменьшается. Этот эффект ранее в литературе не описан.

Заключение

Проведен анализ параметров сканирования многомодульной решетки при использовании ступенчатого амплитудного распределения и ступенчато-линейного фазового распределения. Показано, что в многомодульной решетке с одинаковыми строками модулей даже при минимальном числе излучателей в одном модуле максимальный угол сканирования не превосходит 10° , если ограничить допустимый УДБЛ значением минус 10 дБ. Сектор сканирования можно существенно расширить, сделав в решетке все строки модулей с разным шагом. Проанализированы три модели такой многомодульной решетки. Показано, что в секторе сканирования $\pm 30^\circ$ дифракционные боковые лепестки не превосходят значения минус 15...20 дБ в зависимости от амплитудного распределения возбуждения модулей.

Список литературы

1. eoPortal [Электронный ресурс]. – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x> (дата обращения: 11.08.2014).
2. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Основы теории антенн. М.: Дрофа, 2007. 490 с.
3. Haupt R.L. Antenna Arrays. John Wiley & Sons, Inc., 2010. 534 p.
4. Кеда В.В., Сухачевский П.В. Особенности диаграммы направленности многомодульной антенной решетки при ступенчатом амплитудном распределении возбуждения излучателей // Сб. статей III Всерос. науч.-техн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, 2014. С. 485–489.
5. Юрцев О.А., Наумович Н.М., Юбко А.П. Особенности влияния амплитудного распределения возбуждения излучателей на диаграмму направленности многомодульной антенной решетки // Докл. БГУИР. 2015. № 5 (91). С. 100–106.

References

1. eoPortal [Electronic resource]. – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x> (access date: 11.08.2014).
2. Fel'd Ja.N., Benenson L.S. Osnovy teorii antenn. M.: Drofa, 2007. 490 s. (in Russ.)
3. Haupt R.L. Antenna Arrays. John Wiley & Sons, Inc., 2010. 534 p.
4. Keda V.V., Suhachevskij P.V. Osobennosti diagrammy napravlenosti mnogomodul'noj antennoj reshjotki pri stupenchatom amplitudnom raspredelenii vzbuzhdenija izluchatelej // Sb. statej III Vseros. nauch.-tehn. konf. «Jelektronika i mikrojelektronika SVCh». Sankt–Peterburg, 2014. S. 485–489. (in Russ.)
5. Jurcev O.A., Naumovich N.M., Jubko A.P. Osobennosti vlijanija amplitudnogo raspredelenija vzbuzhdenija izluchatelej na diagrammu napravlenosti mnogomodul'noj antennoj reshetki // Dokl. BGUIR. 2015. № 5 (91). S. 100–106. (in Russ.)

Сведения об авторах

Юбко А.П., заместитель директора Центра 1.6 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Юрцев О.А., д.т.н., профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Наумович Н.М., к.т.н., директор Центра 1.6 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Joubko A.P., deputy director of Center 1.6 of R&D department of Belarussian state university of informatics and radioelectronics.

Yurtsev O.A., D.Sci, professor of department of information radiotechnologies of Belarussian state university of informatics and radioelectronics.

Naumovich N.M., PhD, director of Center 1.6 of R&D department of Belarussian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,
Минск, пр. Независимости, 22–27
тел. +375-29-773-54-27;
e-mail: yurtsev_o@mail.ru
Юрцев Олег Анатольевич

Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 22–27
tel. +375-29-773-54-27;
e-mail: yurtsev_o@mail.ru
Yurtsev Oleg Anatolievich