

## Щелевые отражательные антенные решётки с расширенной полосой рабочих частот

Ю.Г. Антонов, С.В. Балландович, Г.А. Костиков, Л.М. Любина, М.И. Сугак

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

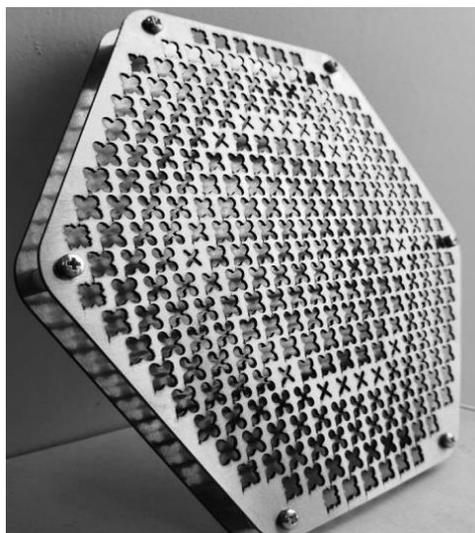
**Аннотация:** В работе представлены результаты электродинамического моделирования ряда щелевых отражательных антенных решёток с расширенной полосой рабочих частот, ориентированных на изготовление с применением технологии лазерной резки. Относительная полоса рабочих частот по критерию падения коэффициента усиления ОАР на 3 дБ от максимального значения составляет 21% и 30% для однослойной и двухслойной антенны соответственно.

**Ключевые слова:** отражательная антенная решётка, ячейка Флоке, лазерная резка.

### 1. Введение

Полностью металлические щелевые отражательные антенные решётки (ОАР) мм-диапазона представляют интерес для разработчиков антенных систем в связи с отсутствием потерь в диэлектрике, менее строгими требованиями к климатической защите и возможностью использования таких экономически эффективных технологий изготовления как лазерная резка. При этом, основные характеристики некоторых известных решений щелевых ОАР не уступают своим печатным аналогам [1-4]. В рамках данной работы спроектированы и экспериментально исследованы щелевые цельнометаллические ОАР мм диапазона с расширенной полосой рабочих частот.

Известен способ расширения полосы рабочих частот антенных решеток (АР) с пространственным питанием [5], заключающийся в том, что размеры печатных элементов подбираются исходя из реализации требуемого фазового распределения с минимально возможной ошибкой на каждой частоте в рабочем интервале. Данная оптимизационная процедура может быть применена и к щелевым ОАР. Вид применяемых в данном случае фазокорректирующих поверхностей в исследуемых ОАР представлен на рис.1.

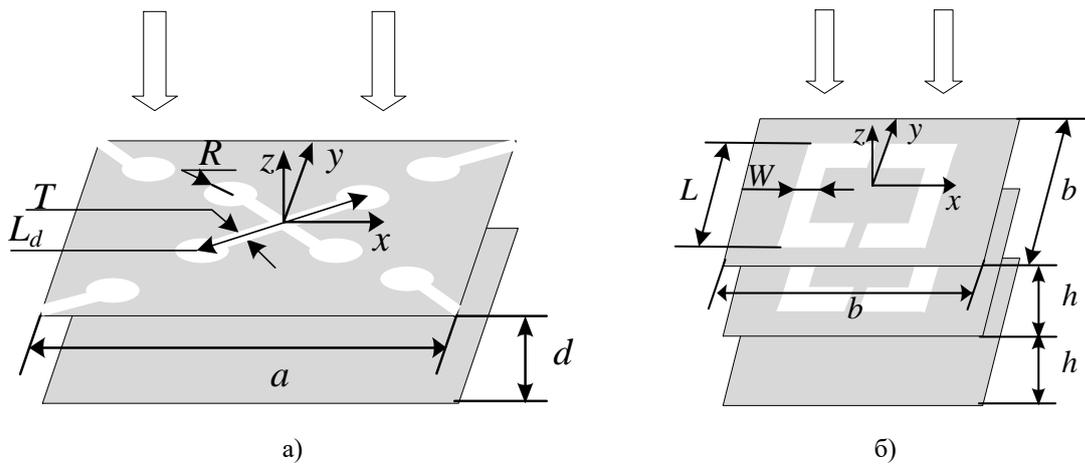


**Рисунок 1.** Раскрыв ОАР на основе гантельных крестообразных щелевых элементов

## 2. Характеристики ОАР

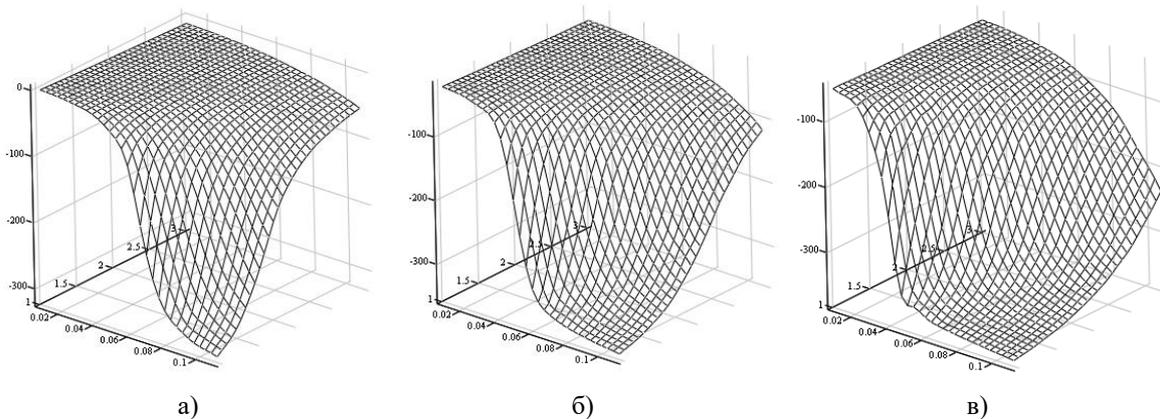
Синтез геометрии ОАР по стандартной методике основан на использовании предварительно рассчитанной зависимости фазы коэффициента отражения ( $\arg(S_{11})$ ) от одного из электрических размеров элемента, установленного в ячейке Флоке по рис.2 (а-б) [6].

На рисунке введены следующие обозначения:  $a$  – шаг гексагональной сетки,  $d$  – расстояние между информационным слоем и проводящей поверхностью,  $T$  – толщина гантельного крестообразного элемента,  $L_d$  – длина гантельного крестообразного элемента,  $R$  – радиус нагрузки гантельного крестообразного элемента,  $b$  – шаг квадратной сетки,  $h$  – расстояние между металлическими слоями,  $L$  – размеры элемента на согнутых прямоугольных щелях,  $W$  – толщина прямоугольных щелей.

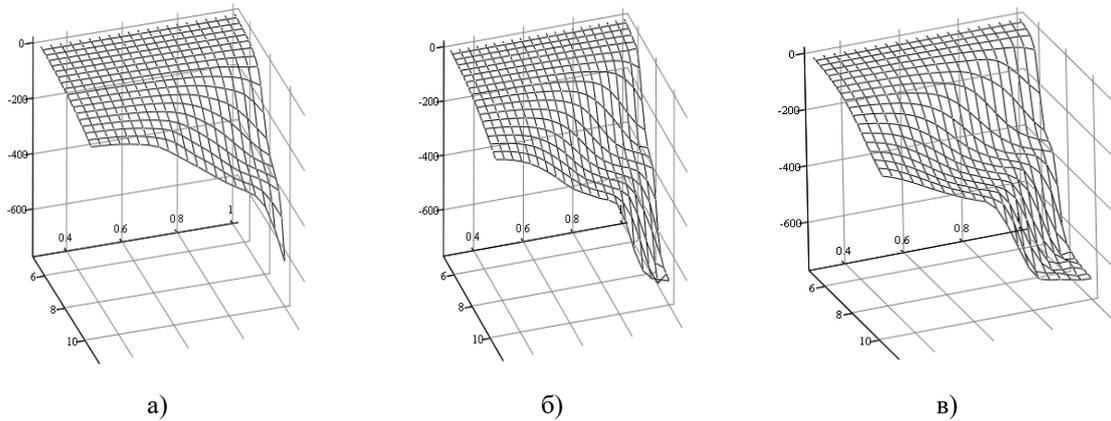


**Рисунок 2.** Вид ячейки Флоке для а) гантельного крестообразного элемента, б) элемента на согнутых прямоугольных щелях.

В целях расширения полосы рабочих частот синтезируемых ОАР использовались двумерные зависимости  $\arg(S_{11}(R,T))$  (на частотах 19 ГГц, 21 ГГц, 23 ГГц) и  $\arg(S_{11}(W,L))$  (на частотах 14 ГГц, 16 ГГц и 18 ГГц) для элементов, представленных на рис.2а и рис.2б соответственно. Результаты расчетов приведены на рис.3(а-в) и рис.4(а-в).



**Рисунок 3.** Зависимости  $S_{11}$  от параметров  $R$  и  $T$ , при  $a = 0.62\lambda$ ,  $d = 0.7\lambda$ ,  $L_d = 0.4\lambda$  для гантельного крестообразного элемента ( $\lambda=14.28$  мм): а) на частоте 19 ГГц, б) на частоте 21 ГГц, в) на частоте 23 ГГц



**Рисунок 4** Зависимости  $S_{11}$  от параметра  $L$  и отношения  $(L-2W)/(L-2W_0)$ , при  $b = 0.64\lambda$ ,  $d = 0.16\lambda$  для элемента на согнутых прямоугольных щелях ( $\lambda=18.75$  мм,  $W_0=1$  мм): а) на частоте 14 ГГц, б) на частоте 16 ГГц, в) на частоте 18 ГГц

Если рассматривать случай с использованием только одной частоты, то для формирования диаграммы направленности (ДН) карандашного типа может быть получено сколь угодно много распределений фаз вдоль раскрыва, которые будут отличаться только начальными значениями фазы. Однако при работе в определенной полосе частот каждый отражательный элемент должен быть подобен (насколько это возможно) временной линии задержки. Это обстоятельство связывает между собой начальные значения распределений фаз на выбранных частотах. Алгоритм синтеза геометрии ОАР с расширенной полосой рабочих частот заключается в следующем:

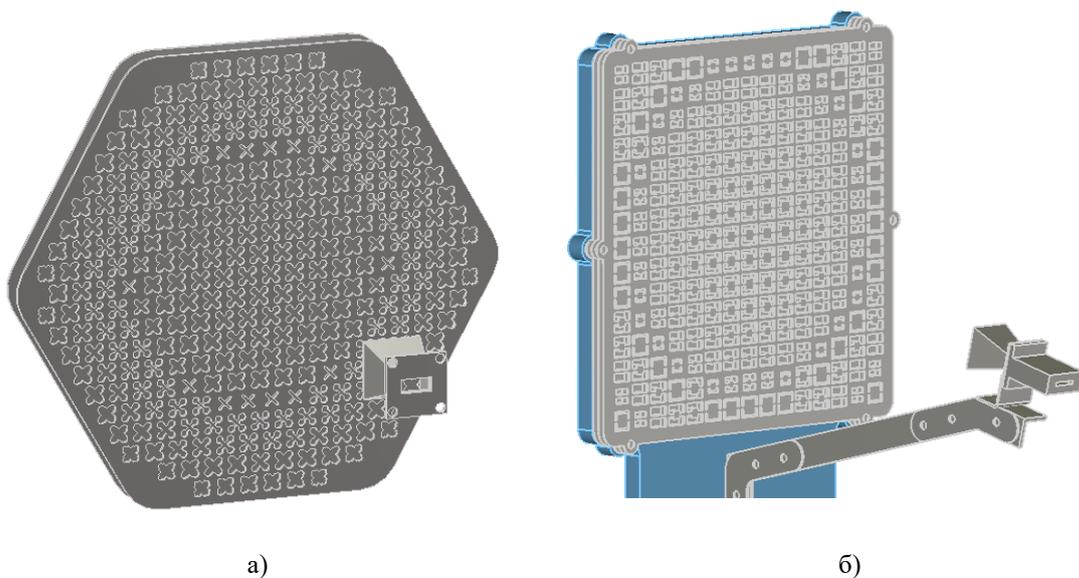
- на нескольких частотах из рабочего диапазона рассчитывалось фазовое распределение поля облучателя в раскрыве;
- для каждого элемента ОАР подбирались оптимальные геометрические параметры так, чтобы фаза рассеянного им (элементом) поля соответствовала минимальной суммарной фазовой ошибке. Фазовая ошибка на конкретной частоте рассчитывалась как сумма фазы поля облучателя в месте положения рассматриваемого элемента и значения  $\arg(S_{11})$ , соответствующего выбранным геометрическим параметрам элемента. Суммарная фазовая ошибка вычислялась как сумма модулей фазовых ошибок на каждой из выбранных частот.

В общем виде целевая функция для такого алгоритма может быть записана следующим образом:

$$\varphi_{\Sigma} = \sum_m \sum_n \left( \sum_i \left| \arg(S_{11}(x_m, y_n, f_i)) + \{ \varphi_{\text{обл}}(x_m, y_n, f_i) - \varphi_0 \} \right| \right) \rightarrow \min ,$$

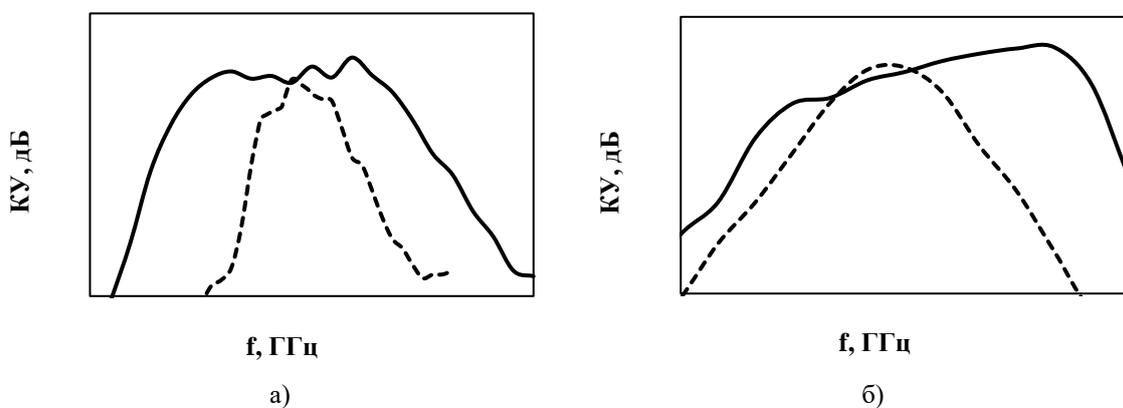
где  $(x_m, y_n)$  координаты места положения элемента;  $\varphi_{\text{обл}}(x_m, y_n, f_i)$  – значение фазы поля облучателя в точке  $(x_m, y_n)$ ,  $\varphi_0$  – постоянная, значение которой подлежит оптимизации наряду с геометрическими параметрами отражательных элементов.

Геометрии синтезированных ОАР приведена на рис.5(а-б), отношение  $F/D = 1$  для обеих структур, где  $F$  – расстояние между центром ОАР и облучателем,  $D$  – размер стороны ОАР.



**Рисунок 5.** ОАР на основе а) гантельного крестообразного элемента, б) элемента на согнутых прямоугольных щелях.

Частотные зависимости коэффициента усиления (КУ) ОАР, полученные в результате оптимизации (сплошная кривая) приведены на рис.6 (а-б) в сравнении с зависимостями, полученными при вариации только одного параметра ( $R$  – для элемента по рис.2(а)),  $L$  – для элемента по рис.2(б), пунктирная кривая). Полосы рабочих частот ОАР составили 19-25 ГГц и 13.9-18.88 ГГц соответственно.



**Рисунок 6.** Частотные зависимости КУ для ОАР на основе а) гантельного крестообразного элемента, б) прямоугольного элемента.

### 3. Заключение

В работе приведены результаты электродинамического моделирования металлических щелевых ОАР мм-диапазона с расширенной полосой рабочих частот на основе гантельного крестообразного и элемента на согнутых прямоугольных щелях. Показано, что применение методики синтеза [5], основанной на использовании зависимостей  $S_{11}$  от двух параметров элемента в пределах ячейки Флоке позволяет добиться расширения полосы рабочих частот по сравнению с традиционным методом [6] в 2.3 раза для гантельного крестообразного элемента и в 2.5 раза для элемента на согнутых прямоугольных щелях соответственно.

#### Список литературы

1. W. An, S. Xuand, F. Yang, "A Metal-Only Reflectarray Antenna Using Slot-Type Elements," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, pp. 1553-1556, 2014.

2. S. Chen, F. Wu and J. Wang, "Design of A broadband metal-only reflectarray antenna with modified slot-type elements," 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Nanjing, 2015, pp. 1-3.
3. K. Q. Henderson and N. Ghalichechian, "Metal Only Spiral Slot Reflectarray Element Operating at 66 GHz," 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, 2018, pp. 1633-1634.
4. S. V. Ballandovich, L. M. Liubina and M. I. Sugak, "Investigation of slot reflectarray antennas," 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, 2018, pp. 1-4.
5. M. R. Chaharmir, J. Shaker, and H. Legay, "Broadband design of a single layer large reflectarray using multi cross loop elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 10, pp. 3363–3366, Oct. 2009.
6. Балландович С.В., Сугак М.И., Костиков Г.А. Печатные отражательные антенные решетки с диаграммой направленности специальной формы // Антенны. 2008. № 6, С.53-59.