

УДК 621.396.96

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ВОЛНОВОДНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ ЧАСТОТНО- ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ МЭМС-СТРУКТУРОЙ В АПЕРТУРЕ

А. И. Семенихин, Д. В. Семенихина, Ю. В. Юханов  
Южный федеральный университет

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2015 г.

**Аннотация.** В работе исследовано влияние реконфигурируемой частотно-избирательной поверхности (ЧИП) с емкостными МЭМС-ключами на характеристики согласования, излучения и рассеяния антенной решеткой (АР) из открытых концов прямоугольных волноводов. Показано, что плоская ЧИП, расположенная в апертуре АР, пропускает поле излучения при защелкивании МЭМС-ключей в полосе частот 8 – 12 ГГц. Лучшее согласование антенной решетки обеспечивается, если ЧИП находится в непосредственной близости от апертуры. Выключение МЭМС приводит к ослаблению поля излучения до 35 дБ на резонансной частоте 9 ГГц. Резонансная частота системы «АР-ЧИП» и уровни обратного рассеяния зависят от расстояния между ЧИП и апертурой АР. Отличие ожидаемых уровней обратного рассеяния для синфазной АР на линейной рабочей поляризации в состояниях МЭМС «включено» и «выключено» может превышать 10-15 дБ.

**Ключевые слова:** частотно-избирательная поверхность, микроэлектромеханические переключатели, реконфигурируемая частотно-избирательная поверхность, волноводная антенная решетка.

**Abstract.** Effect of the reconfigurable frequency selective structure (FSS) with capacitive MEMS-switches on characteristics of matching, radiation and scattering of the antenna array (AA) of the open ends of rectangular waveguides is investigated. It is shown that FSS transmits a radiation field of AA in case of switching on MEMS (in a band of 8 – 12 GHz). The best matching of AA is provided if the FSS is in close proximity to an aperture. Switching off MEMS weakens amplitude of the wave

transmitting through FSS until 35 dB at resonance frequency of 9 GHz; resonance frequency of AA-FSS system depends on distance between the FSS and the AA aperture. Difference of RCS of back scattering of phased AA on working linear polarization in two states of MEMS-switches can make more than 10 – 15 dB.

**Key words:** frequency selective surface; Microelectromechanical RF switches; Reconfigurable FSS; Waveguide antenna array.

## 1. Введение

Одним из известных способов улучшения электромагнитной совместимости (ЭМС) антенных решеток (АР) является установка перед ними управляемой частотно-избирательной поверхности (ЧИП), которая может находиться в двух разных переключаемых во времени состояниях [1-3]. ЧИП проектируется таким образом, чтобы в одном (радиопрозрачном) состоянии обеспечивались малый уровень вносимых потерь и требуемые характеристики излучения ФАР в рабочей полосе частот и в заданном секторе углов сканирования. Вне этой полосы ЧИП должна иметь необходимый уровень ЭМС. Во втором (закрытом) состоянии ЧИП экранирует антенную решетку, обеспечивая необходимый уровень ЭМС. Кроме того, ЧИП должна иметь максимальную скорость переключения этих двух состояний, минимальное напряжение переключения (для снижения энергозатрат) и минимальный вес.

Эти требования можно реализовать с помощью управляемых ЧИП на основе радиочастотных ключей в виде микроэлектромеханических систем (МЭМС), которые изменяют во времени (реконфигурируют) топологию проводников ЧИП [4, 5]. Электростатические МЭМС-ключи консольного или мембранного типа имеют высокую технологичность производства, удовлетворяют требованиям по скорости переключения, напряжению срабатывания и развязке в разомкнутом состоянии [4]. Проектирование, моделирование и изготовление ЧИП с МЭМС-ключами рассмотрено во многих работах [5-7]. Например, в [6] приведена настраиваемая полосно-пропускающая ЧИП в виде решетки щелей с мостовыми МЭМС-ключами.

Менее изучено рассеяние волн на антеннах и антенных решетках с реконфигурируемыми ЧИП, расположенными в их апертуре, особенно с учетом всех электромагнитных взаимодействий в системе «антенна–ЧИП» [3, 8, 9].

В настоящей работе исследуется влияние реконфигурируемой частотно-избирательной структуры (поверхности) с МЭМС-ключами на характеристики согласования, излучения и рассеяния модели волноводной АР с учетом внутрисистемных электромагнитных взаимодействий. Моделирование осуществляется в *HFSS*.

## 2. Модель ЧИП С МЭМС-ключами

### 2.1. Модель МЭМС-ключа

В качестве переключающего элемента ЧИП выбран консольный МЭМС-ключ электростатического типа (рис. 1-3). Он содержит якорь, консоль, изолирующий (емкостной) слой двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  и размещается между двумя соседними полосками (проводниками) ЧИП, на которые подается управляющее напряжение (рис. 1).

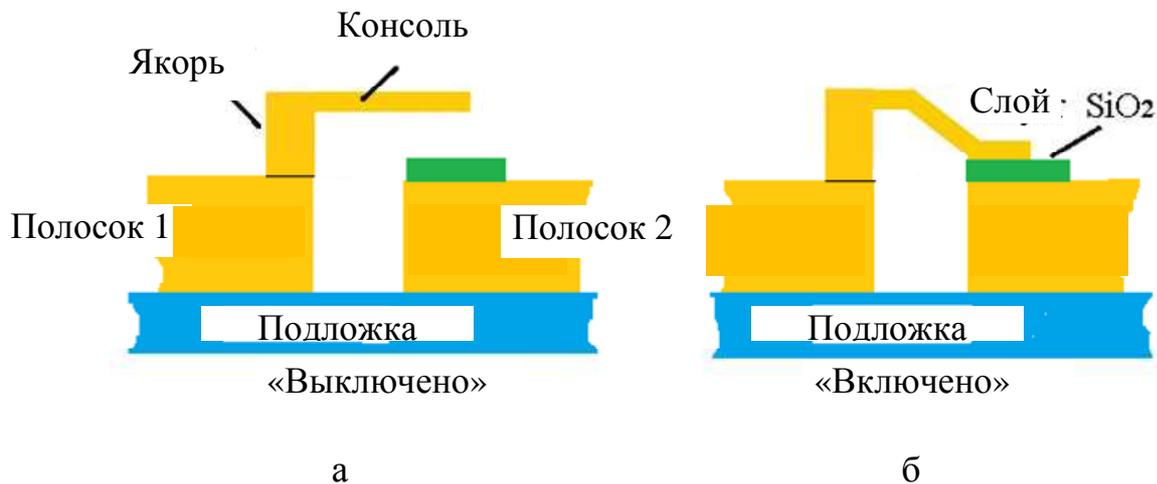


Рис. 1. К пояснению работы МЭМС-ключа консольного типа.

Реконфигурацию ЧИП поясняет рис. 2. В состоянии «выключено» консоль поднята (рис. 1,а); емкостной импеданс ключа велик; соседние полоски 1 и 2 ЧИП разомкнуты (рис. 1,а); идеализированная ЧИП представляет собой резонансную отражательную решетку полосковых вибраторов (для

параллельно ориентированного электрического поля  $E$ , рис. 2,а). В состоянии «включено» («защелкнуто») консоль опускается на емкостной слой под действием управляющего напряжения (рис. 1,б); емкостной импеданс ключа мал; вибраторы ЧИП замыкаются, образуя негустую (радиопрозрачную) решетку параллельных относительно поля  $E$  проводников (рис. 2,б).

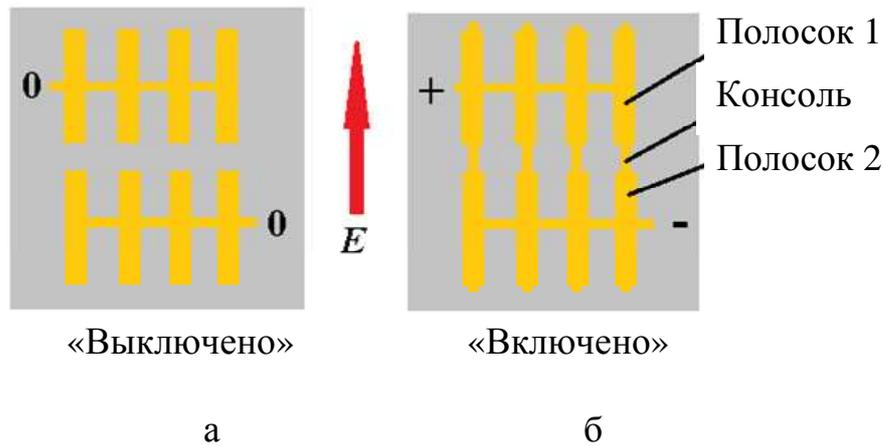


Рис. 2. Идеализированные топологии проводников реконфигурируемой ЧИП.

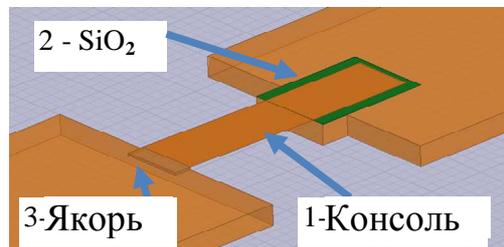


Рис. 3. Модель МЭМС-ключа в *HFSS*.

Модель МЭМС-ключа в *HFSS* показана на рис. 3. Толщина проводников ЧИП задавалась равной 35 мкм. Изолирующий слой 2 двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  (относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 3,9$ ) имеет толщину 0,5 мкм, ширину 140 мкм и длину 200 мкм. Консоль 1 имеет ширину 100 мкм, длину 440 мкм и перекрывает весь зазор 300 мкм между концами соседних вибраторов. В нижнем положении консоли зазор до слоя  $\text{SiO}_2$  полагался равным 0,1 мкм для учета шероховатости поверхности реальной консоли. Якорь 3 имеет ширину консоли (100 мкм), высоту 4 мкм и длину 30 мкм для повышения безотказности ключа. Емкость закрытого ключа оказывается малой

- около 1,38 пФ; емкость открытого ключа примерно равна 0,044 пФ; отношение импедансов ключа в двух состояниях – около 31.

## 2.2. Модель ЧИП с МЭМС-ключами

Единичная ячейка ЧИП с МЭМС-ключами показана на рис. 4. Она содержит общую подложку из ситалла ST38-1 толщиной 0,2 мм ( $\epsilon = 7,25$ ), на которой сформированы плечи вибраторов, четыре МЭМС-ключа и ортогональные к ним проводники питания для подачи управляющего напряжения. Сверху и снизу общей подложки расположены по одному согласующему диэлектрическому слою толщиной 0,25 мм;  $\epsilon = 3,4$ ;  $\text{tg}\delta = 0,001$ .

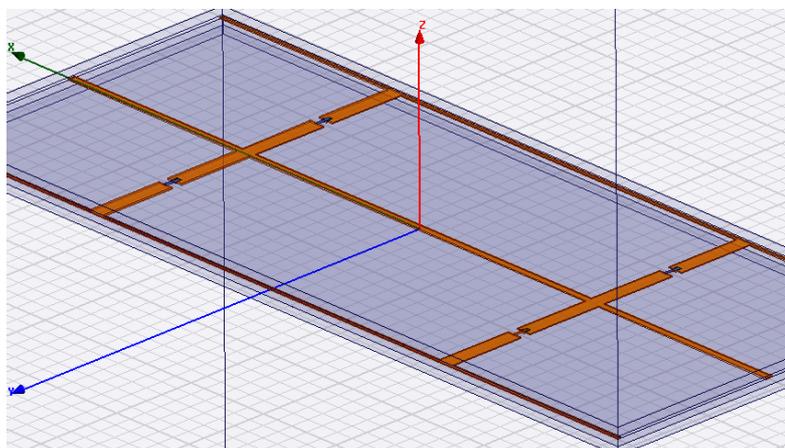


Рис. 4. Единичная ячейка ЧИП с МЭМС-ключами.

Размеры единичной ячейки ЧИП выбирались таким образом, чтобы апертура одного волноводного излучателя в бесконечной периодической АР перекрывалась целым числом единичных ячеек. Поскольку волноводы имеют сечение 23 мм x 10 мм и толщину стенок 0,5 мм, были выбраны периоды АР 24 мм и 11 мм (соответственно, в  $H$ - и  $E$ -плоскостях). При этом в апертуре одного излучателя укладывалось 4 ячейки ЧИП (см. рис. 4).

На рис. 5 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) коэффициента прохождения такой модели бесконечной ЧИП при нормальном падении электромагнитной волны. Видно, что ЧИП обеспечивает ослабление прошедшей волны в полосе 8,3 – 9,6 ГГц (по уровню -10 дБ) в состоянии «выключено» и практически полное прохождение волны в полосе 8,3 – 12 ГГц

(с потерями не более 0,5 дБ) в состоянии «включено».

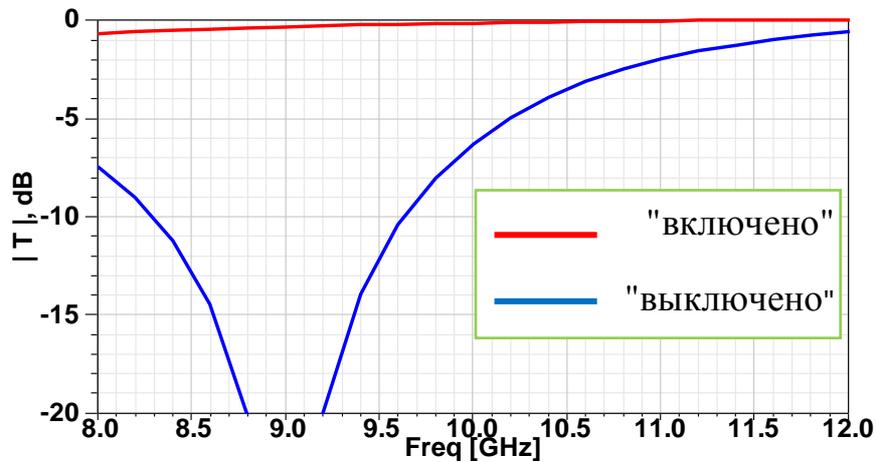


Рис. 5. АЧХ коэффициентов прохождения в двух состояниях ЧИП.

### 3. Модель волноводной АР, укрытой ЧИП с МЭМС-ключами

Модель конечной АР из 10 x 10 открытых концов прямоугольных волноводов с плоской реконфигурируемой ЧИП в апертуре показана на рис. 6. Длина волноводных излучателей задавалась равной 50 мм. Расстояние между экраном и апертурами излучателей описывалась параметром  $zf$  и варьировалось от 10 мм до 60 мм. Для сокращения вычислительных затрат в *HFSS* задавалась модель бесконечной АР с периодическими граничными условиями Master, Slave, а характеристики конечной АР рассчитывались без учета краевых эффектов.

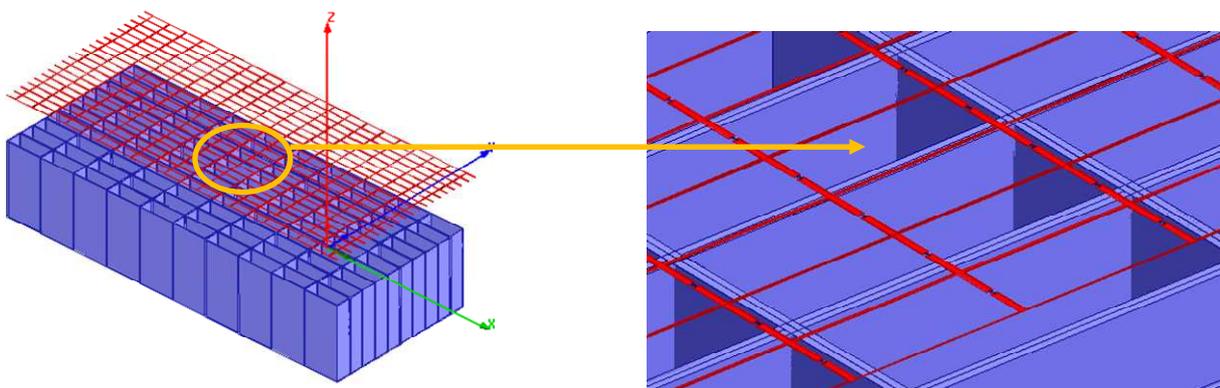


Рис. 6. Модель волноводной АР, укрытой ЧИП с МЭМС-ключами.

## 4. Численные результаты

### 4.1. Характеристики излучения АР с ЧИП-экраном

На рис. 7 приведены частотные зависимости коэффициента отражения  $|S_{11}|$  по входу единичного излучателя в составе бесконечной синфазной АР с ЧИП-экраном. Видно, что в состоянии «выключено» (синие линии) экран отражает поле излучателей АР,  $|S_{11}| > -0,5$  dB в полосе частот около 1,6 ГГц (от 8 ГГц до 9,6 ГГц). В состоянии «включено» (красные линии) экран пропускает поле излучения,  $|S_{11}| < -13$  dB в полосе частот 8 – 12 ГГц ( $zf = 10$  мм). При этом величина  $|S_{11}|$  существенно зависит от расстояния  $zf$  между ЧИП и АР. Лучшее согласование АР обеспечивается, если ЧИП находится в непосредственной близости от апертуры, когда  $zf = 10$  мм (рис. 7,а; красная сплошная линия).

Распределения электрического поля в Н-плоскости системы «АР-ЧИП» в двух состояниях МЭМС-ключей показаны на рис. 8,а и рис. 8,б. Рисунки наглядно иллюстрируют тот факт, что в состоянии «выключено» поле АР практически не проникает сквозь ЧИП, а защелкивание ключей пропускает излучение АР без изменений.

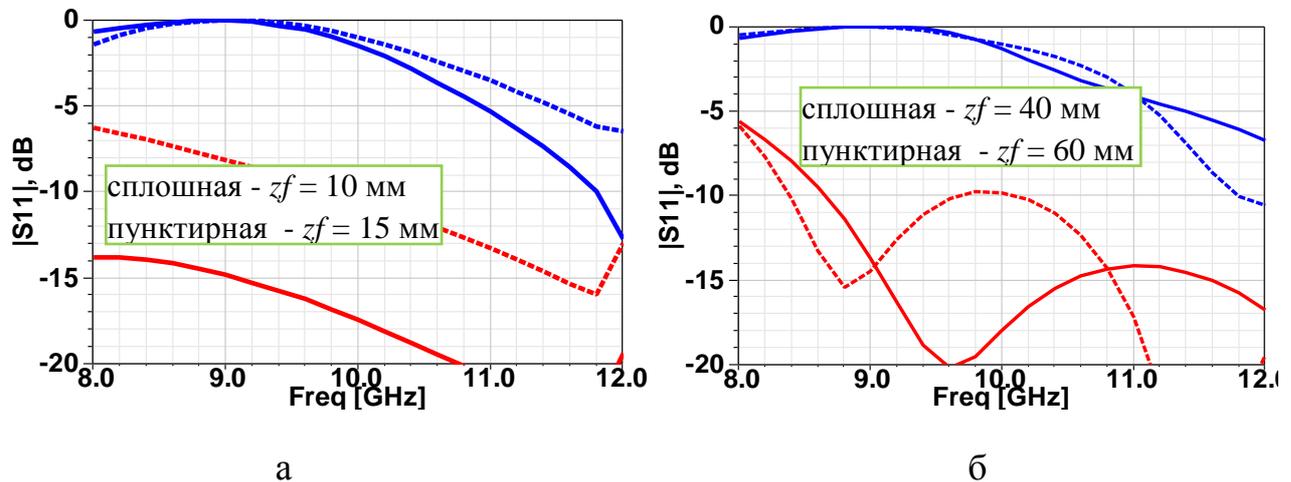


Рис. 7. Коэффициент отражения по входу единичного излучателя в составе бесконечной АР при различных расстояниях  $zf$  от ЧИП до апертуры решетки.

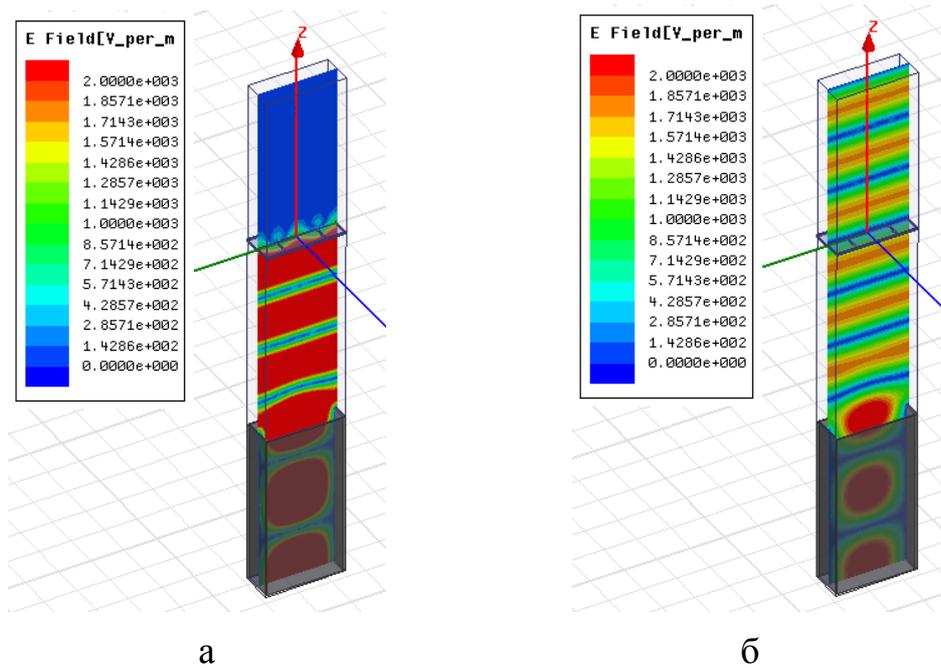


Рис. 8. Распределения электрического поля в Н-плоскости АР с ЧИП в состояниях «выключено» (а) и «включено» (б) в режиме излучения на частоте 9 ГГц при  $z_f = 60$  мм.

На рис. 9 приведены рассчитанные ЧХ реализованного коэффициента усиления (КУ) в дБ и диаграммы направленности (ДН) конечной синфазной АР в двух состояниях МЭМС-экрана.

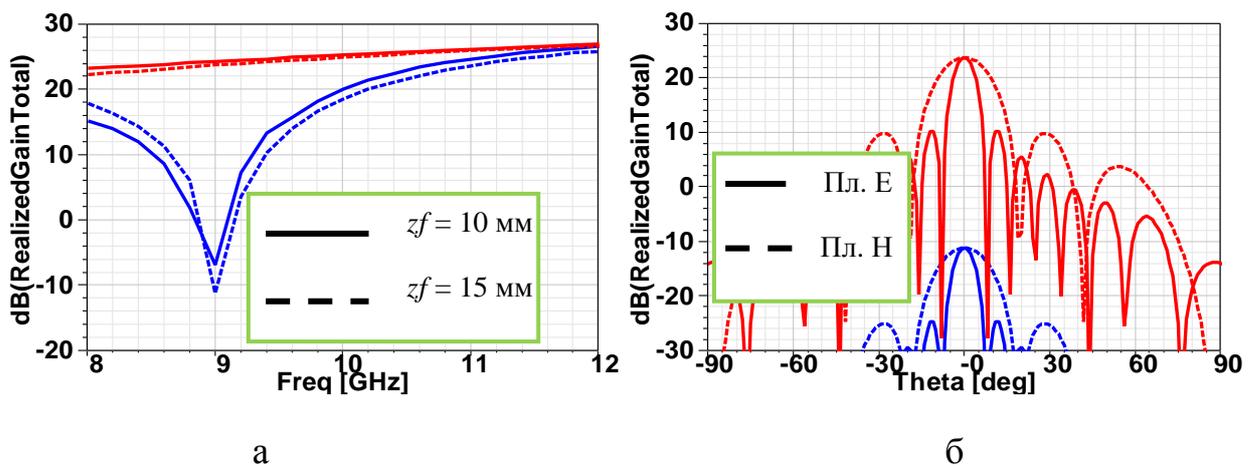


Рис. 9. Частотные зависимости КУ для разных расстояний  $z_f$  от ЧИП до АР (а) и ДН в Е- и Н-плоскостях при  $z_f = 15$  мм (б) синфазной АР в состояниях ЧИП «включено» (красные линии) и «выключено» (синие линии).

Из рис. 9 следует, что выключение МЭМС ослабляет поле излучения АР до 35 дБ на резонансной частоте 9 ГГц без изменения формы ДН. Резонансная частота системы «АР-ЧИП» зависит от расстояния между ЧИП и апертурой антенной решетки.

#### 4.2 Характеристики рассеяния АР с ЧИП-экраном

Характеристики рассеяния системы «АР-ЧИП» рассчитывались для случая падения плоской электромагнитной волны с линейной поляризацией (параллельной МЭМС-ключам) по нормали к апертуре синфазной АР.

На рис. 10 изображены частотные зависимости максимальной эффективной площади рассеяния (ЭПР) АР в состояниях МЭМС «включено» и «выключено» для различных расстояний  $zf$  между апертурой АР и ЧИП.

Видно, что в состоянии «включено» ЭПР укрытой АР минимальна при близком расположении экрана к апертуре (на расстоянии  $zf = 10$  мм) и почти совпадает с обратной ЭПР антенной решетки без экрана (зеленая линия). Разница между ЭПР укрытой АР в режимах «включено» и «выключено» в рабочем диапазоне частот может составлять 10...15 дБ.

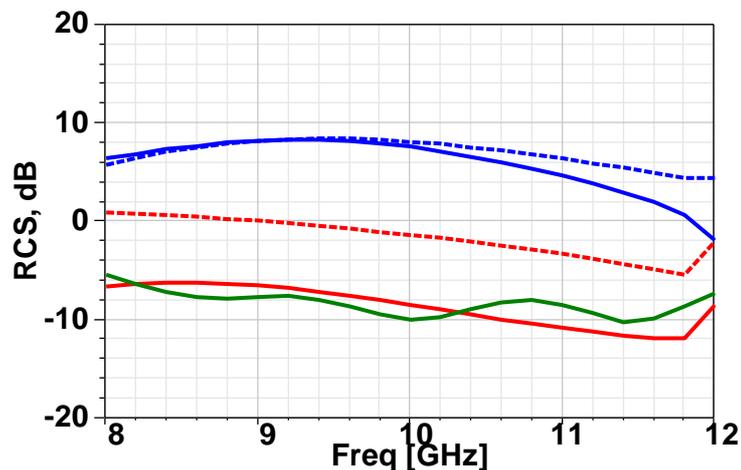


Рис. 10. Частотные зависимости ЭПР (в дБ) при обратном рассеянии от синфазной АР с ЧИП в состояниях «включено» (красные линии) и «выключено» (синие линии) для  $zf = 10$  мм (сплошные линии) и  $zf = 15$  мм (пунктирные линии); зеленая линия соответствует ЭПР синфазной АР без ЧИП.

Распределения полей в Н-плоскости системы «АР-ЧИП» в двух состояниях МЭМС-ключей в режиме рассеяния на частоте 9 ГГц иллюстрирует рис. 11. Видно, что открытые ключи (без управляющего напряжения) экранируют антенную решетку, обеспечивая ей необходимую ЭМС (рис. 11,а), защелкнутые ключи делают экран радиопрозрачным (рис. 11,б).

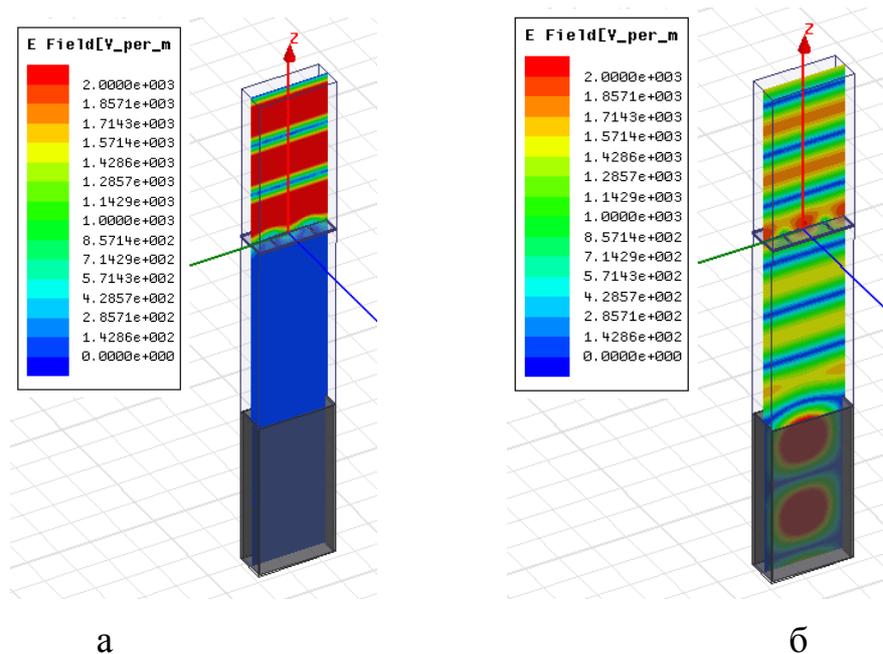


Рис. 11. Распределения полного электрического поля в Н-плоскости АР с ЧИП в состояниях «выключено» (а) и «включено» (б) в режиме рассеяния на частоте 9 ГГц при  $zf = 60$  мм.

## 5. Выводы

В работе рассмотрена модель плоской реконфигурируемой ЧИП с емкостными МЭМС-ключами в апертуре антенной решетки из открытых концов прямоугольных волноводов. Проведен численный анализ влияния ЧИП с МЭМС-ключами в состояниях «включено» и «выключено» на характеристики согласования, излучения и рассеяния антенной решетки. Показано, что ЧИП с защелкнутыми МЭМС-ключами пропускает поле излучения антенной решетки (с ожидаемыми обратными потерями менее -13 дБ в полосе частот 8 – 12 ГГц). Лучшее согласование антенной решетки обеспечивается, если ЧИП находится в

непосредственной близости от апертуры. Выключение МЭМС ослабляет поле излучения АР до 35 дБ на резонансной частоте 9 ГГц без изменения формы диаграммы направленности. Резонансная частота системы «АР-ЧИП» зависит от расстояния между экраном и апертурой антенной решетки. Отличие ожидаемой ЭПР при обратном рассеянии от синфазной решетки на линейной рабочей поляризации для состояний МЭМС «включено» и «выключено» может превышать 10-15 дБ.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования «*Прикладная электродинамика и антенные измерения*» Южного федерального университета по проектной части гранта № 8.2461.2014/К Минобразования России.

### Литература

1. Munk B.A., "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design". John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000. [Электронный ресурс]. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/0471723770>.
2. Wu T.K., "Frequency Selective Surface and Grid Array". John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
3. Лагарьков А.Н., Погосян М.А., "Фундаментальные и прикладные проблемы Стелс-технологий" // Вестник российской Академии наук. Т. 73. № 9. 2003. с. 848. // [Электронный ресурс]. URL: [http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/VRAN/03\\_10/STELLS.HTM](http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/VRAN/03_10/STELLS.HTM).
4. Varadan V.K., Vinoy K.J., and Jose K.A., "RF MEMS and Their Applications", 1st ed. USA: JohnWiley & Sons, Inc. December 2002.
5. Gianvittorio J.P., Zendejas J., and Rahmat-Samii Y., "MEMS enabled reconfigurable frequency selective surfaces: Design, simulation, fabrication, and measurement"// IEEE AP-S Int. Symp. Vol. 2, pp. 404–407. June 2002. // [Электронный ресурс]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1016109&isnumber=21869>.

6. Schoenlinner B., Abbaspour-Tamijani A., Kempel L.C. and Rebeiz G.M., “Switchable low-loss RF MEMS Ka-band frequency-selective surface”// IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 52, no. 11, pp. 2474-2481. Nov. 2004. [Электронный ресурс].  
URL: [http://www.researchgate.net/publication/3130559\\_Switchable\\_low-loss\\_RF\\_MEMS\\_Ka-band\\_frequency-selective\\_surface](http://www.researchgate.net/publication/3130559_Switchable_low-loss_RF_MEMS_Ka-band_frequency-selective_surface).
7. Coutts G.M., Mansour R.R., and Chaudhuri S.K., “A MEMS-Tunable Frequency-Selective Surface Monolithically Integrated on a Flexible Substrate”// 2007 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. June 2007. // [Электронный ресурс].  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4263859&isnumber=4263707>.
8. Knott E.F. et al. “Radar Cross Section”. 2nd Edition, SciTech, Raleigh, NC. 2004.
9. Semenikhina D.V., Semenikhin A.I., and Yukhanov Y.V., “Radiation and scattering characteristics of antenna array covered frequency selective shield”// 2014 16th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), Victoria, BC. DOI:10.1109/ANTEM.2014.6887750. // [Электронный ресурс].  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6887750&isnumber=6887652>.