

ИСЛАМОВ ИСЛАМ ДЖАМАЛ ОГЛЫ

МЕТАМАТЕРИАЛЫ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ

ИПА РАН 26.03.2014

Содержание

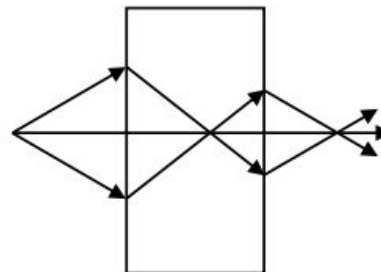
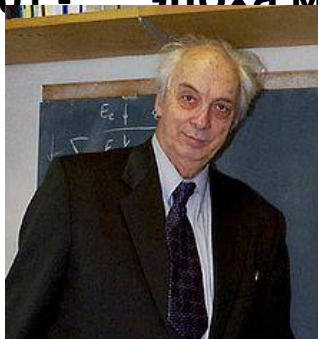
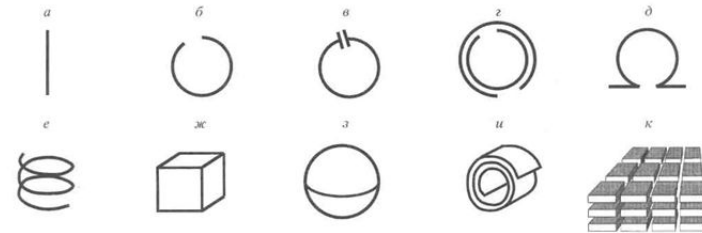
2

- Введение
- Отражательные решетки
- Проходные решетки
- Покрытия из нано-антенн
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

Введение

3

- **1967 г. Виктор Георгиевич Веселаго** описал электромагнитные свойства материалов с отрицательными ϵ и μ
- **90е годы** – исследования КОМПОЗИТОВ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ:
- **John Pendry, Phys. Rev. Lett. 2000** – возможность существования субволновой линзы на основе отрицательного закона преломления
- **David Smith, Science, 2001** – первое экспериментальное подтверждение существования отрицательного закона преломления
- **2001 г.** – эпоха метаматериалов

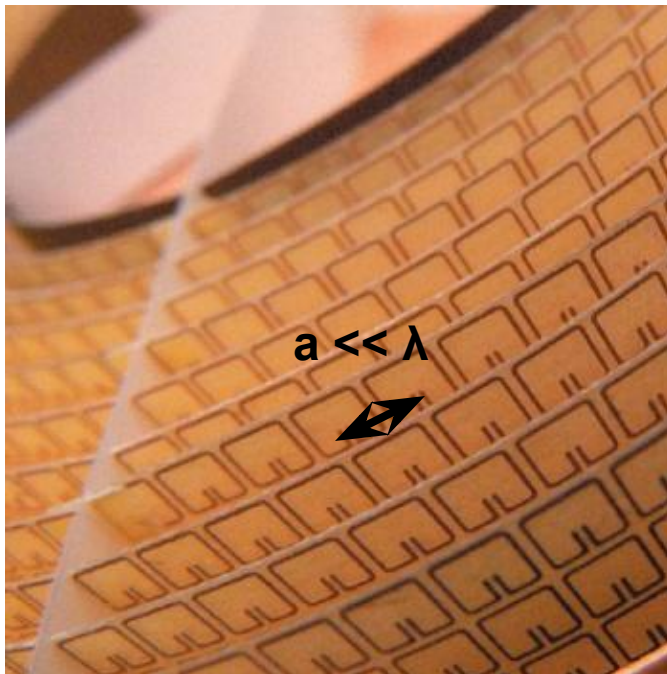


Метаматериалы в антенной технике

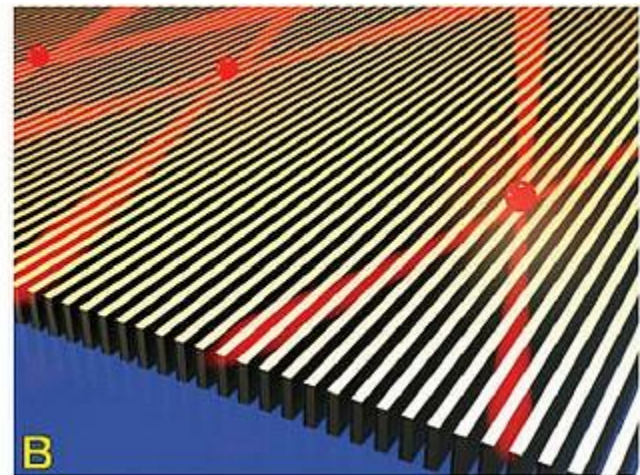
Введение

4

Метаматериал – композитный материал из искусственных частиц
с электромагнитными свойствами,
не присущими естественным материалам
Поле «не различает» дискретности частиц



Метаповерхность – плоский
аналог метаматериала



Метаматериалы в антенной технике

Основные типы антенн

5

Слабой

направленности (< 10 dBi):

Диполи, рамки, микрополосковые, квадрифиллярные и т.д.

Применение:
мобильная связь, передача данных,



Средней

направленности:
($10..20$ dBi)

Рупоры, спиральные, широкополосные антенны типа Вивальди и др.

Применение: базовые станции, измерения,



гели

Остронаправленные:
(>20 dBi)

Зеркальные, линзовые, антенные решетки.

Применение:
космические исследования и связь



- Введение
- **Отражательные решетки**
- Прходные решетки
- Покрытия из нано-антенн
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

Отражательные решетки

7

Параболические антенны:

Простые методы анализа и синтеза
Массивные, требуют специальной
формы отражателей, ограничены
диапазон и скорость сканирования



Антенные решетки:

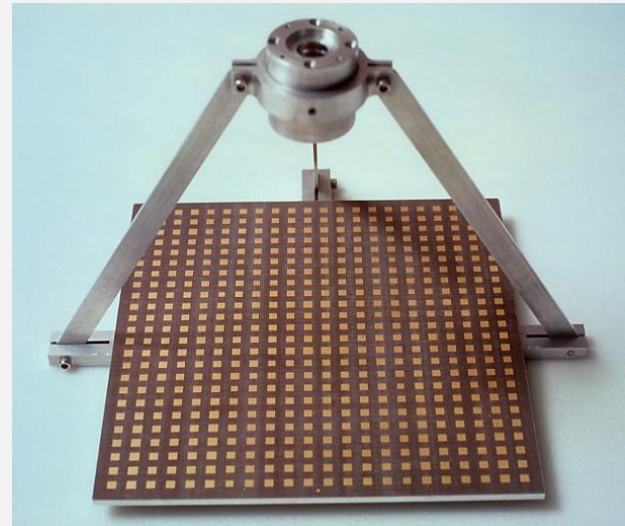
Планарные, быстрое управление
лучом

Сложность разработки,
потери в цепи питания элементов



Отражательные решетки – новый тип антенн

- Планарные
- Малый вес
- Множество функций
- Интеграция с цепью управления



Отражательные решетки

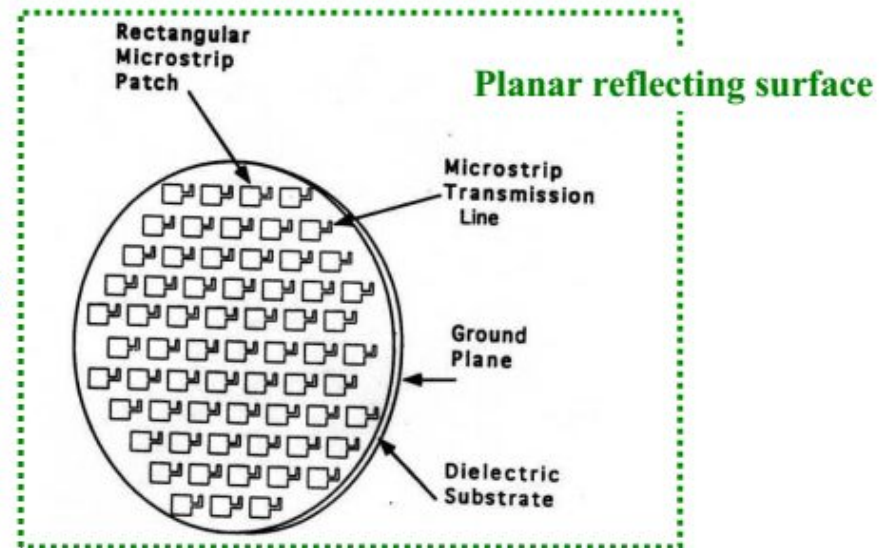
8

Первая – ОР –
волноводная:



Berry, D. et al. The reflectarray antenna,
IEEE TAP, 1963

Действительно планарной ОР
делают элементы в виде
микростриповых антенн –
Печатное исполнение

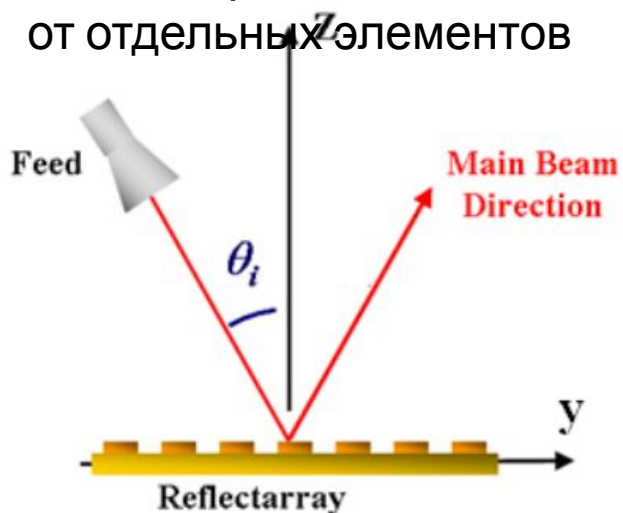


R. E. Munson and H. Haddad,
U.S. patent 4,684,952, August 1987.

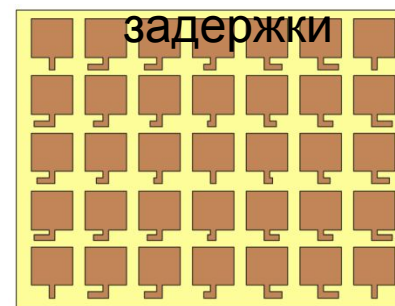
Отражательные решетки

9

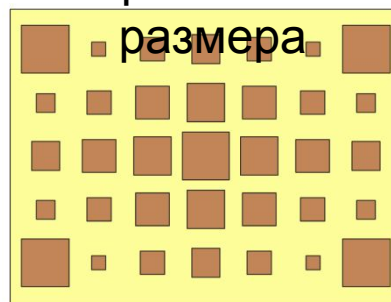
Необходимо сформировать плоский фронт отраженной волны путем регулировки фазы отражения от отдельных элементов



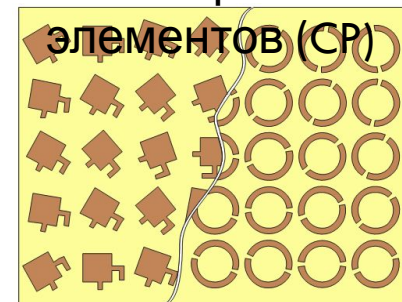
Методы фазировки:
Нагрузка – линия



За счет переменного размера



За счет поворота элементов (CP)



Отражательные решетки

10

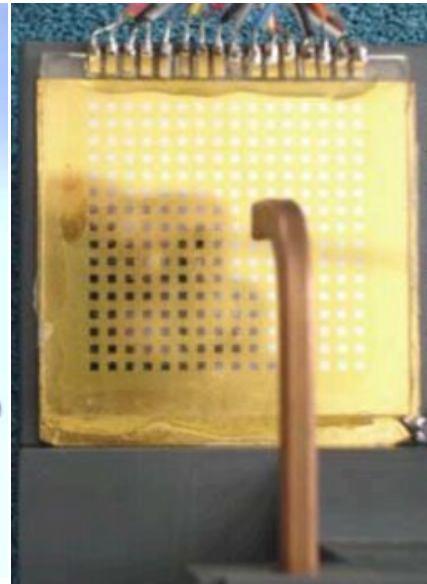
Примеры реализации отражательных решеток:

Двухчастотная ОР, 3м
Jet Propulsion Laboratory
California Institute of
Technology

Интеграция солнечной
батареи и ОР для
космоса
NASA

ОР на 77 ГГц –
многослойная
керамическая плата

Антенный пост
РЛО С-300

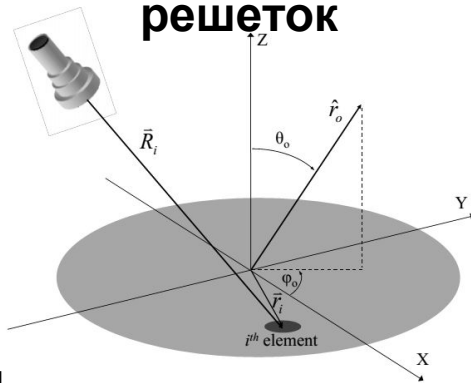


Метаматериалы в антенной технике

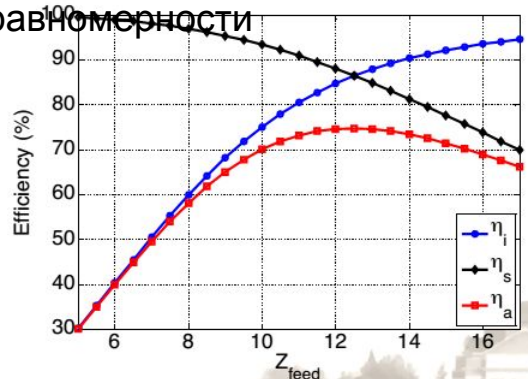
Отражательные решетки

11

Разработка отражательных решеток



η_s - КИП
 η_i - КИП
КПД
неравномерности



Критерии:

- Диаграмма направленности
- Направление луча
- Коэффициент усиления
- КИП
- Полоса частот
- Кросс-поляризация

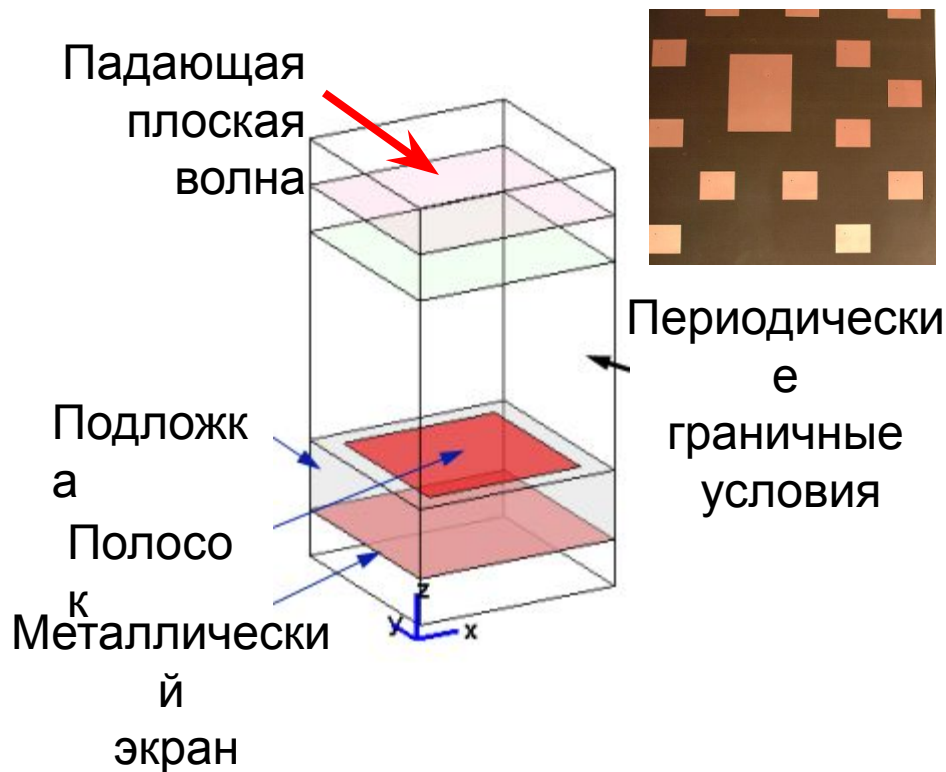
Параметры разработки:

- Апертура (диаметр, форма)
- Положение облучателя (фок.расст.)
- ДН облучателя
 - Тип элемента: МП, кольцо, диполь.
- Подложка (толщина, диэл.прон.)
 - Метод фазировки (размер, поворот, линии задержки)

Отражательные решетки

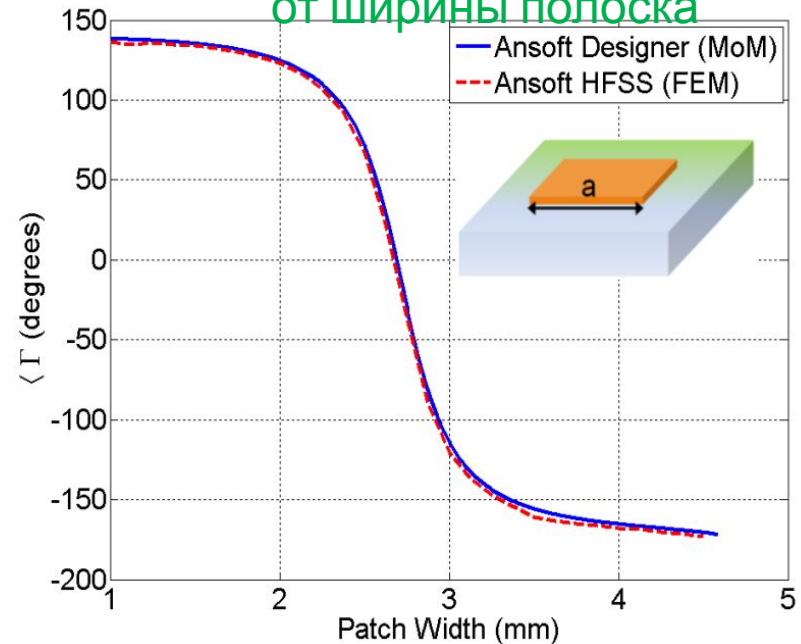
12

Разработка отражательных решеток – подбор параметров одиночного элемента



HFSS
CST
FEKO

Зависимость фазы коэффициента отражения от ширины полоска



Отражательные решетки

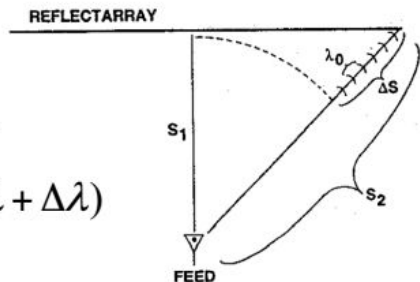
13

Частотные свойства

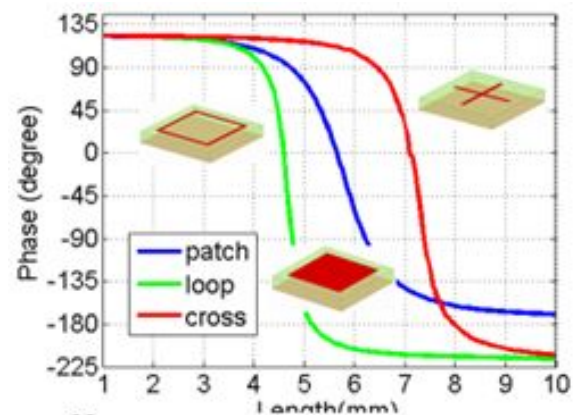
- Диапазон частот – принципиально узкий
- Ограничивается двумя факторами:
 1. Полоса элемента (микроструктурный элемент имеет полосу 3-5% - резонанс)
 2. Пространственная разность фаз – частотно зависима (8-16%)

$$\Delta s = (N + d) \lambda$$

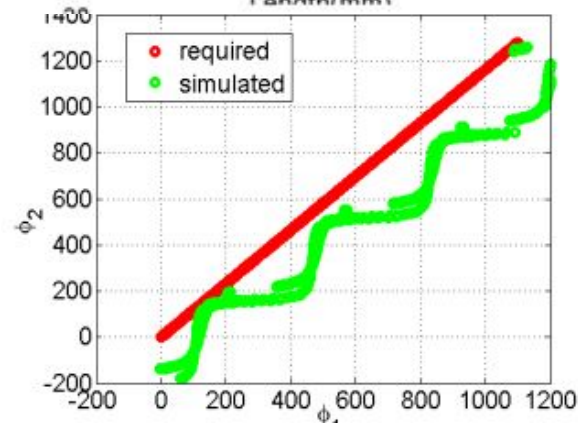
$$\Delta s = (N + d) (\lambda + \Delta \lambda)$$



Полоса
элемент
а:



Широкополосное
обеспечение
фазы:



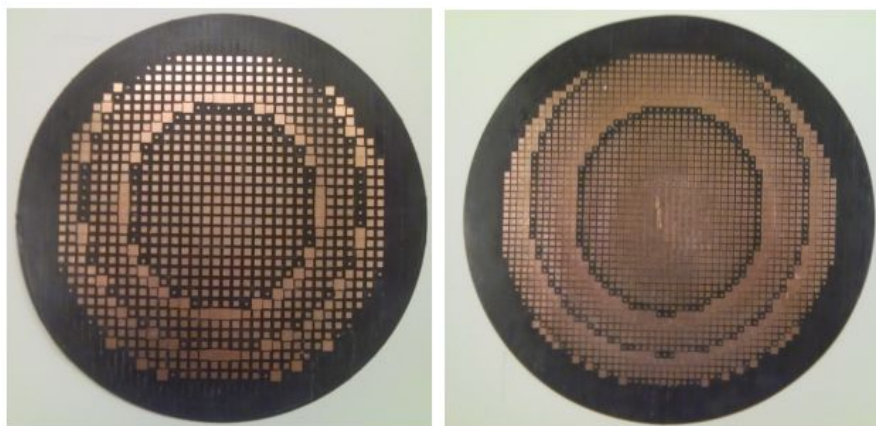
Отражательные решетки

14

Фазовая ошибка, связанная с разностью фаз соседних элементов – падает с увеличением плотности

$\lambda/2$, 848 эл.

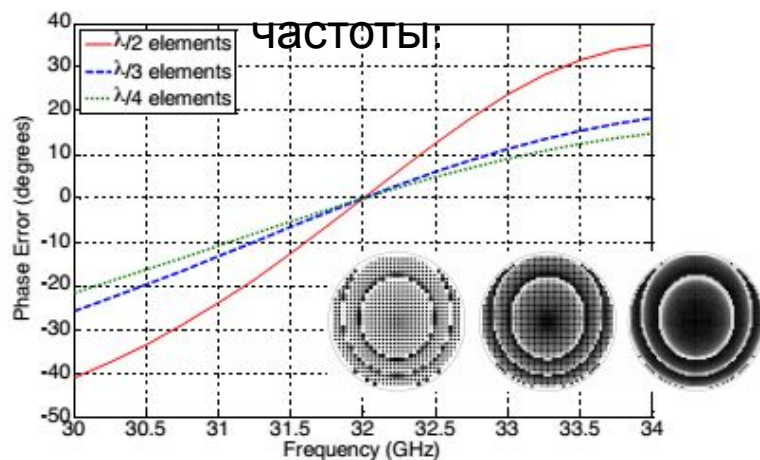
$\lambda/3$, 1941 эл.
решетки



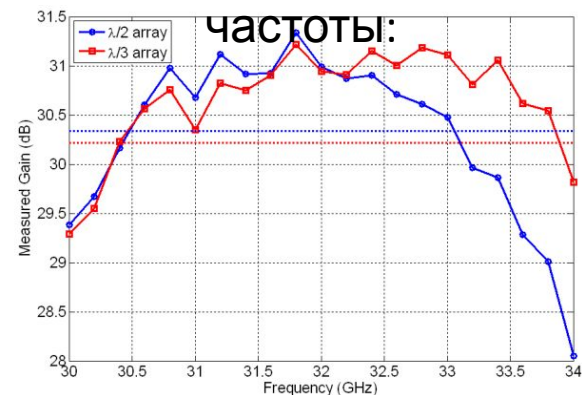
$D = 6.275$ дюйма = 17λ @ 32 ГГц / Rogers 5880

P. Nayeri et al. PIER C, 2011

Фазовая ошибка от



Зависимость КУ от



Отражательные решетки

15

Отражательные решетки могут иметь несколько частотных полос

- Для этого применяются вложенные резонансные элементы сразу нескольких размеров

1. Ка-диапазон (32 ГГц):

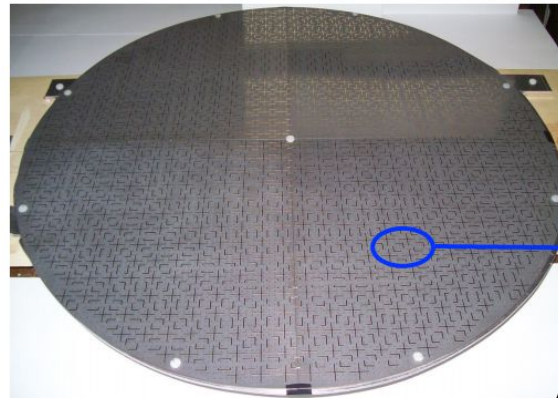
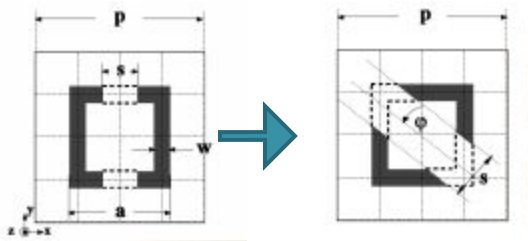
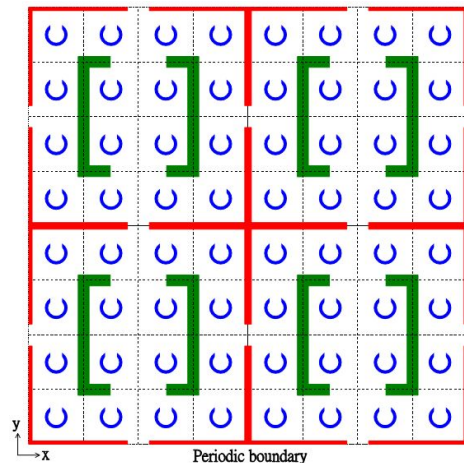
Кольцевой резонатор – поворот элемента

2. С-диапазон (7.1 ГГц):

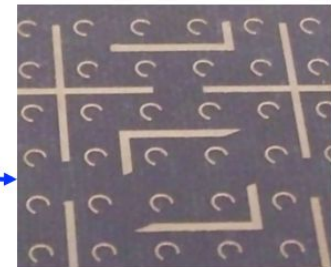
Крест-диполь – настройка размером эл-та

3. X-диапазон (8.4 ГГц):

Разомкнутая квадратная рамка – настройка положением щелей



0.566 м: 692 диполей, 685 квадратов, 10760 колец



A. Yu et al. IEEE APSURSI, 2010

Отражательные решетки

16

Многочувые отражательные решетки

- Способы одновременного синтеза нескольких максимумов ДН:

Суперпозиция АФР:

Поле в апертуре представляется в виде:

$$E_R(x_i, y_i) = A_i^{Feed}(x_i, y_i) \cdot \sum_{n=1}^N e^{j\phi_{n,i}(x_i, y_i)}$$

Недостатки:

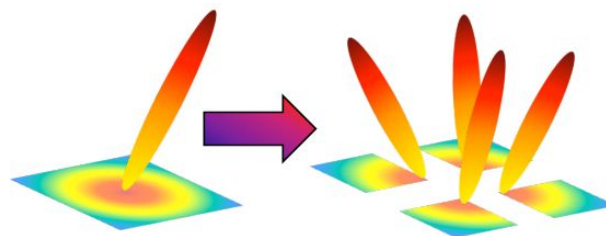
- Амплитудная ошибка:
- Ниже КУ
- Выше УБЛ

Выход: Численная оптимизация

$$\left| \sum_{n=1}^N e^{j\phi_{n(i)}(x_i, y_i)} \right| \neq 1$$

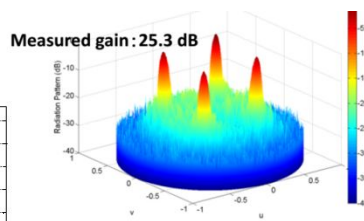
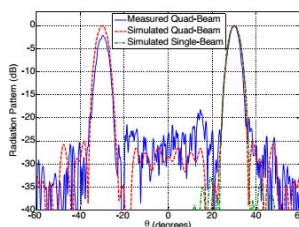
Геометрический способ:

Решетка делится на N подрешеток, каждая из которых создает луч в заданном направлении



Недостатки:

- Подрешетки имеют меньшую апертуру
- Ниже КУ
- Выше УБЛ



метаматериалы в антенной технике

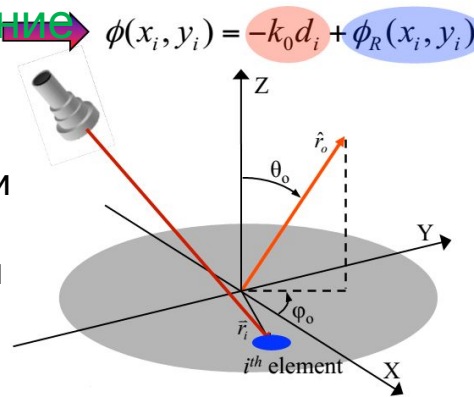
Отражательные решетки

17

Многолучевые отражательные решетки с управлением лучом

Необходимо изменять фазовое распределение

$$\phi(x_i, y_i) = -k_0 d_i + \phi_R(x_i, y_i)$$



1. Механическое сканирование:

По аналогии с зеркальными антеннами перемещение облучателя приводит к повороту диаграммы, однако при этом снижается КУ и растет УБЛ

2. Электронное сканирование:

Фаза отклика каждого элемента контролируется управляющим элементом. Например: ЦФВ

3. Гибридные способы:

Увеличить диапазон перестройки, снизить стоимость решетки

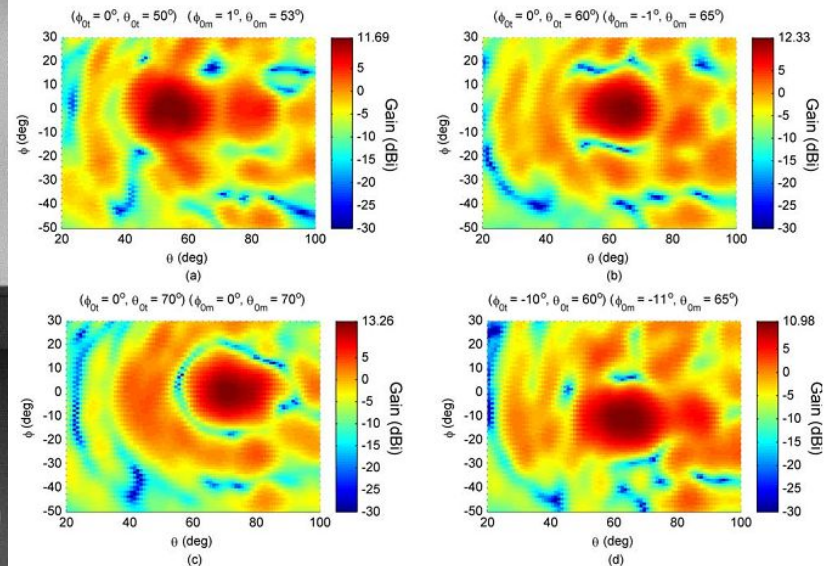
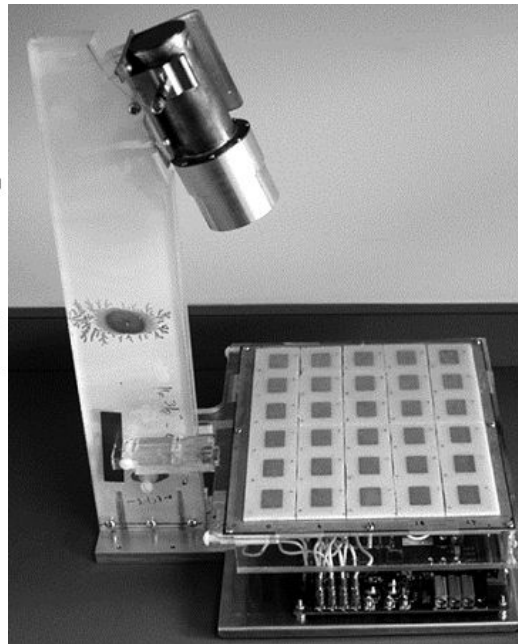
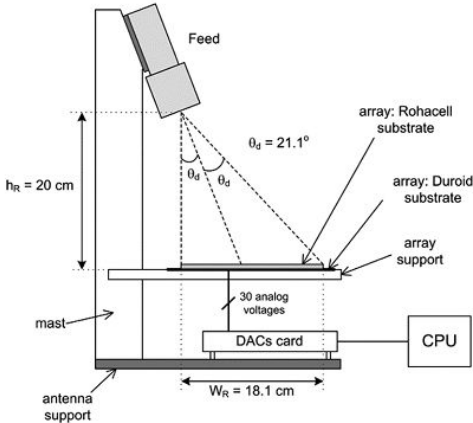
Метаматериалы в антенной технике

Отражательные решетки

18

Многолучевые отражательные решетки с управлением лучом

- Контроль фазы отклика отдельных элементов позволяет управлять лучом ДН:



Mathieu Riel et al.,
IEEE TAP, 2007

Отражательные решетки

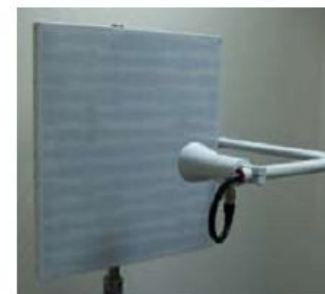
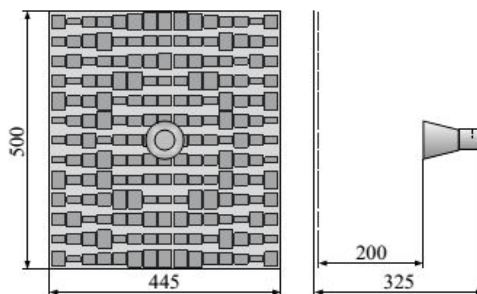
19

Еще примеры отражательных решеток
Разработаны при участии Михаила Ивановича Сугака (ЛЭТИ)

ОР – замена
бытовой
спутниковой
антенны

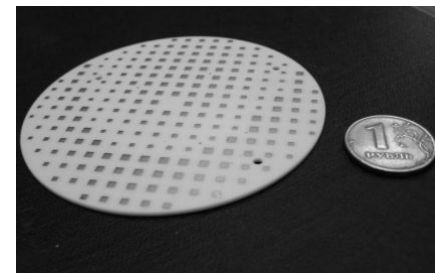


Эскиз и Макет ОР на 5.45
ГГц



С.В. Поленга, М.И. Сугак. Журнал Сиб.Фед.ун-та, 2011

Прототип ОР ММ-
диапазона:



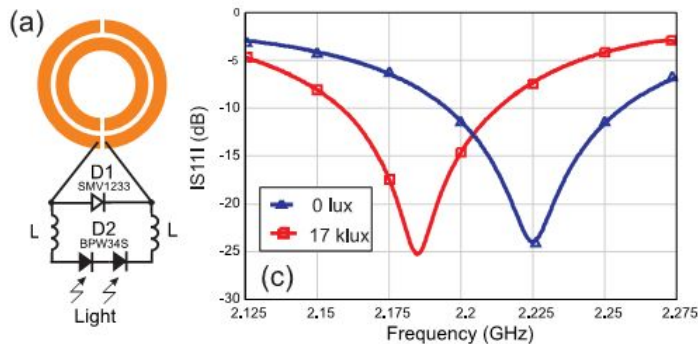
Метаматериалы в антенной технике

Отражательные решетки

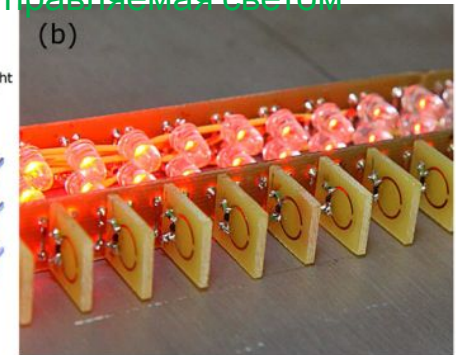
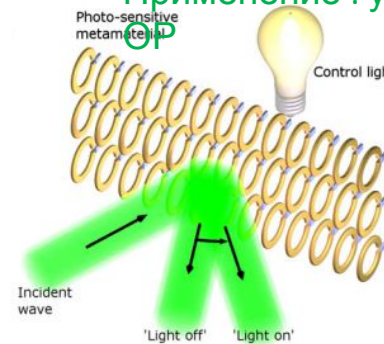
20

Отражательные решетки можно контролировать внешним ИСТОЧНИКОМ СВЕТА:

Каждый резонансный элемент нагружен на варикап и фотоэлемент, в результате чего его фазу можно перестраивать, регулируя световой ПОТОК



Пример:
фокусировка/дефокусировка/
изменение направления луча
Применение : управляемая светом



<http://phoi.ifmo.ru/metamaterials/>

I. Shadrivov, P. Kapitanova,
S. Maslovski, and Y. Kivshar PRL, 2012

Метаматериалы в антенной технике

Отражательные решетки

21

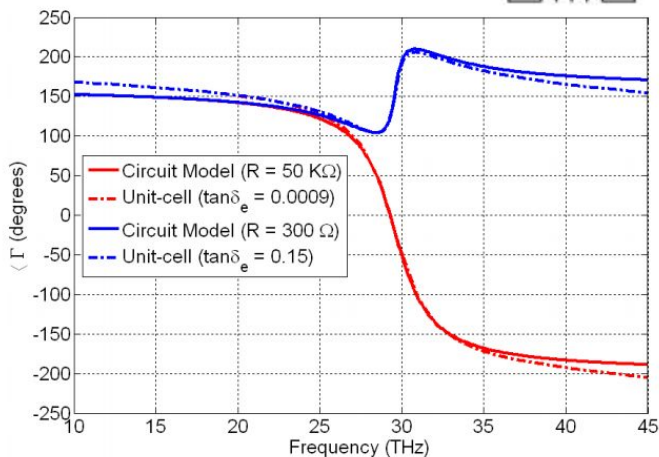
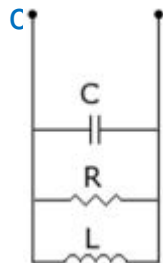
Решетки ММ и ТГц

С повышением частоты растут потери в резонансных элементах, что не позволяет настраивать их фазу

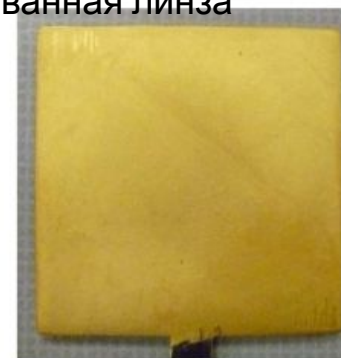
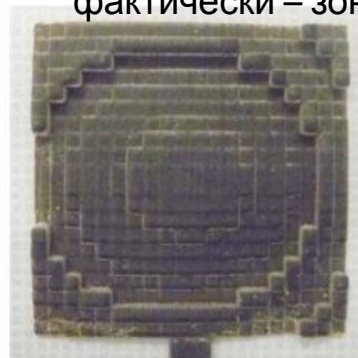
Резонансный МП-элемент



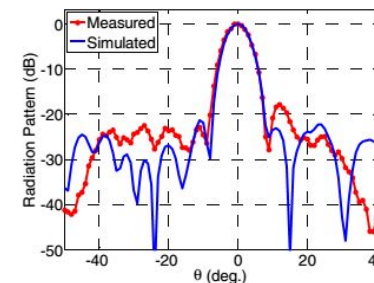
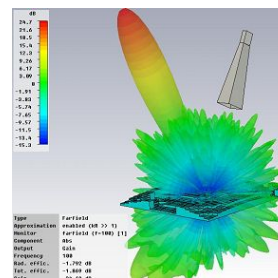
Экв.
C



Диэлектрическая нерезонансная ОР на 100 ГГц – фактически – зонированная линза



Payam Nayeri et al.,
IEEE AP-S, 2013



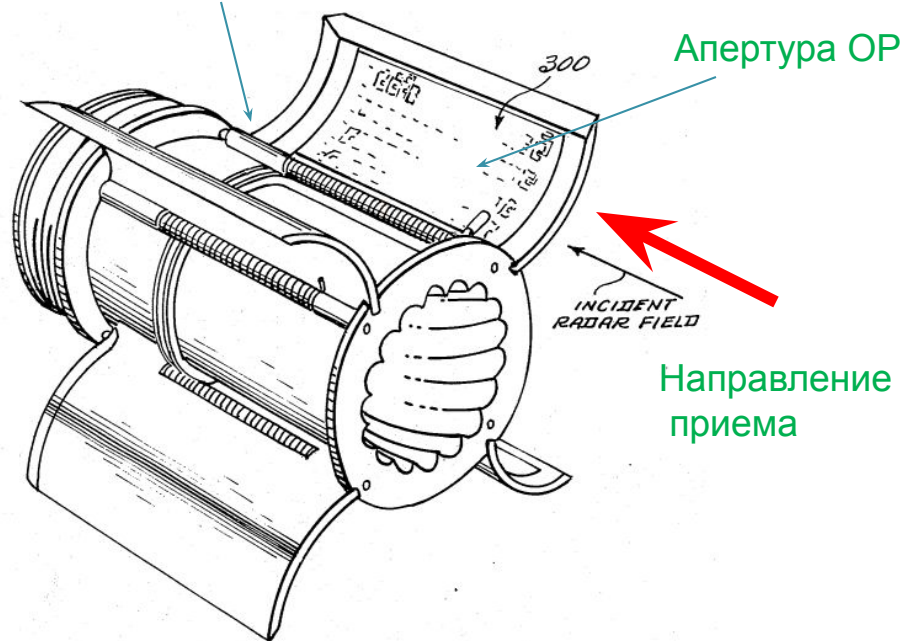
Метаматериалы в антенной технике

Отражательные решетки

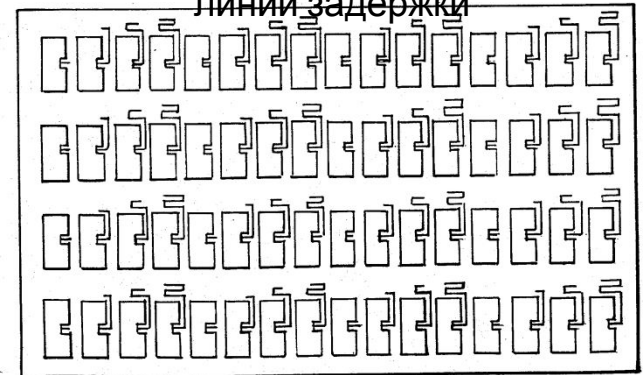
22

ОР бокового излучения

Периодическая система излучателей (АР) может создавать луч диаграммы параллельно плоскости апертуры (End-fire-array) – разлитие Удо Яги



Фазировка ОР при помощи линий задержки

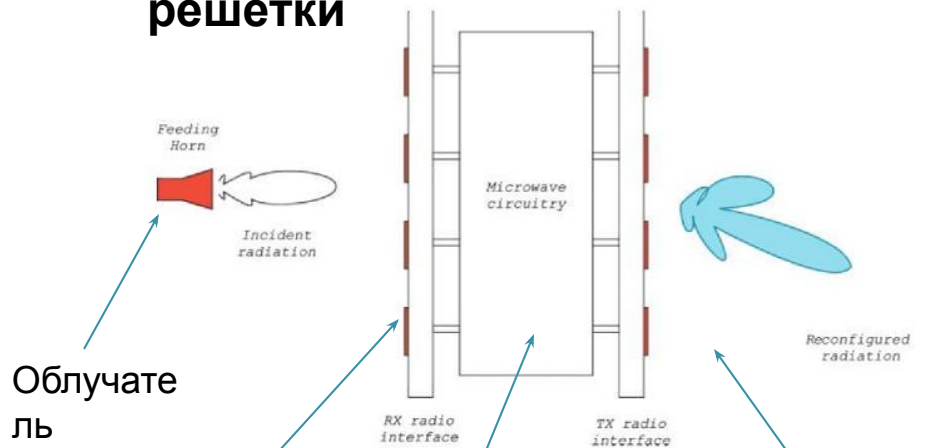


US Patent, Aug 4, 1987, 4,684,952

- Введение
- Отражательные решетки
- **Проходные решетки**
- Покрытия из нано-антенн
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

Прходные решетки

Принцип работы проходной решетки



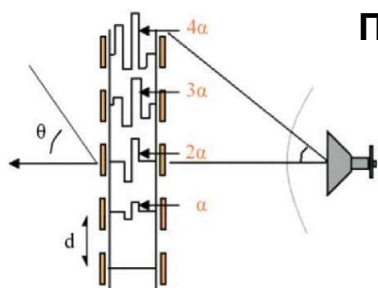
Облучатель

Приемная решетка

Управляемая СВЧ

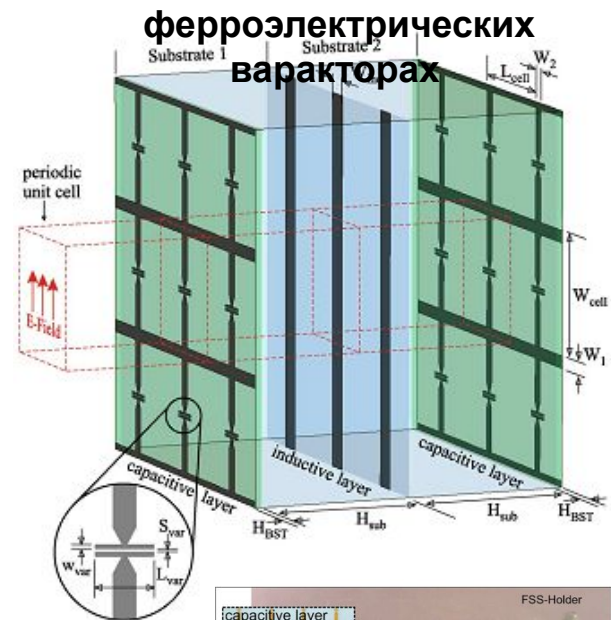
Передающая решетка

Пассивная ПР на линиях задержки

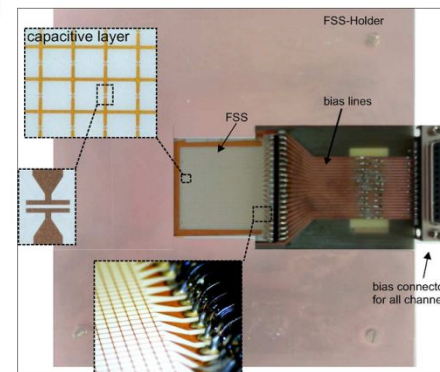


Метаматериалы в антенной технике

Активная ПР на 12 ГГц из ЧСС на ферроэлектрических варакторах



Mohsen Sazegar et al.,
IEEE TAP, 2012



- Введение
- Отражательные решетки
- Проходные решетки
- **Покрытия из нано-антенн**
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

Покрытие из нано-антенн

26

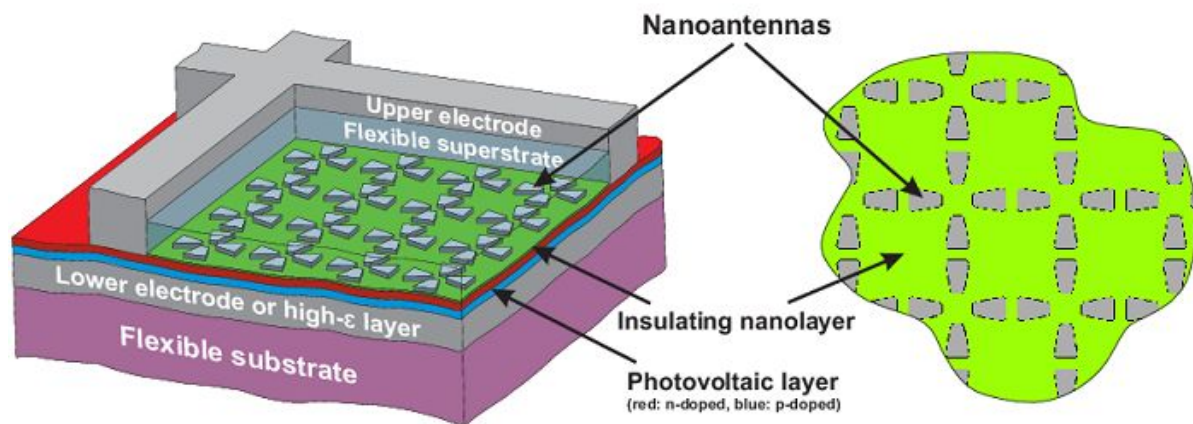
Широкополосный захват света в сверхтонком полупроводниковом слое

150-250 нм при помощи покрытия из нано-антенн

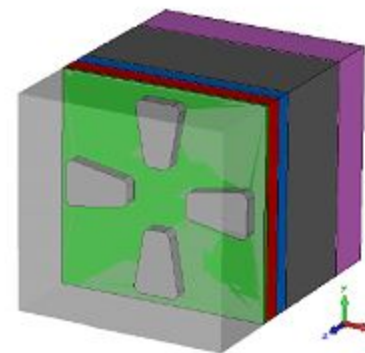
Солнечные батареи на тонких пленках — гибкие, более практичные и дешевые в изготовлении,

но менее эффективные, чем объемные

НИУ ИТМО совместно с Aalto university



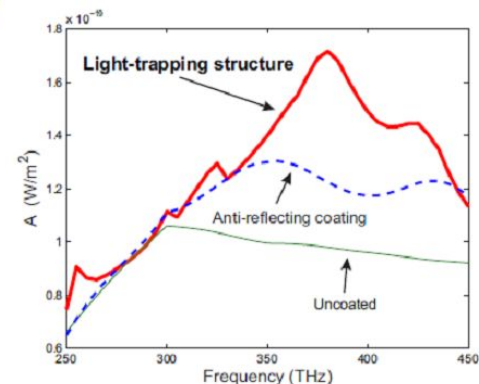
Комп. модель ячейки



Размер антенн —
160 нм

Выигрыш в поглощении энергии
до 30% в ИК-диапазоне и
до 15% - в видимом

Метаматериалы в антенной технике

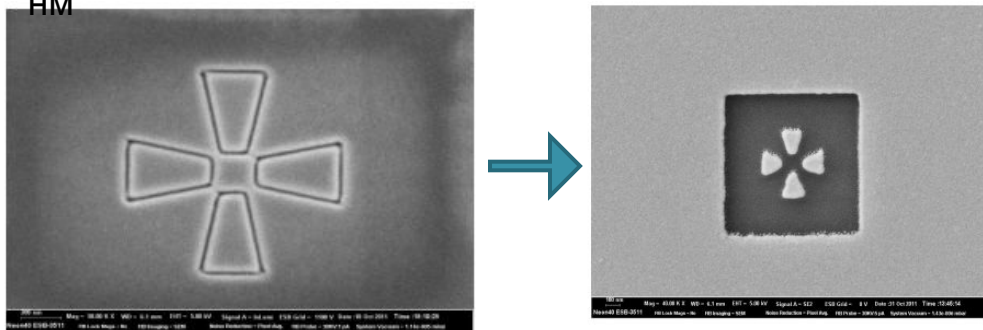


Покрывтие из нано-антенн

27

Разрабатываемые технологии для покрытий из нано-антенн

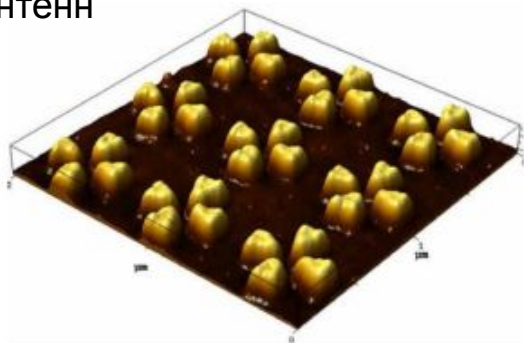
Фокусированное ионное травление в золотой пленке 50 нм



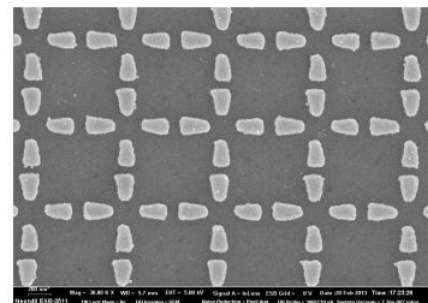
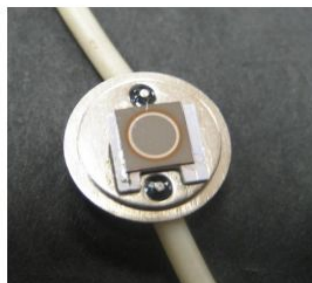
<http://phoi.ifmo.ru/metamaterials/>

Аналогичная задача существует для повышения чувствительности ТГц детекторов

Матрица золотых нано-антенн



Серебряные нано-антенны на фотодетекторе



метаматериалы в антенной технике

- Введение
- Отражательные решетки
- Проходные решетки
- Покрытия из нано-антенн
- **Линзы из метаматериалов**
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

Линзы из Метаматериалов

Сферическая линза Лüneберга фокусирует излучение точечного источника на ее периферии.

Для этого она должна быть неоднородна (показатель преломления зависит от расстояния)

$$n(r) = \sqrt{2 - r^2}$$

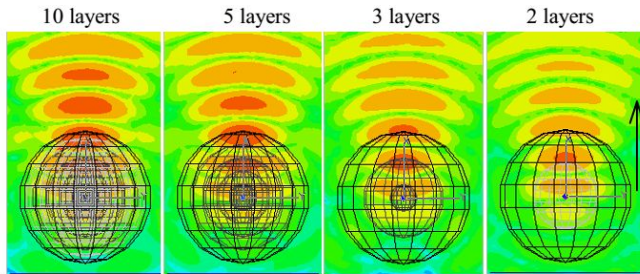
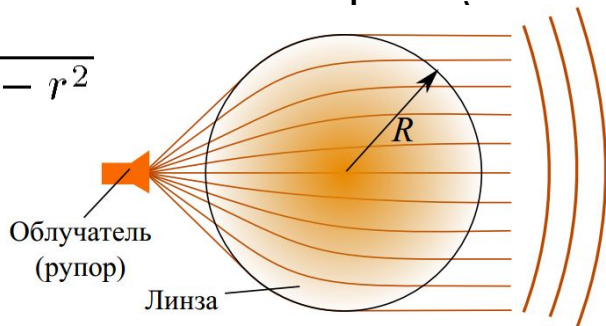
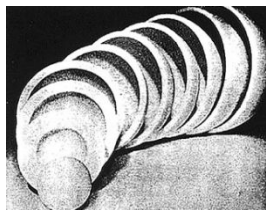
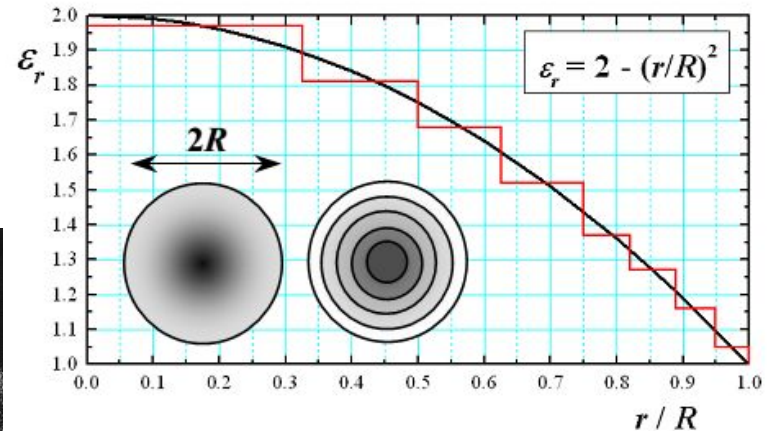


Fig. 3. Focusing abilities of 200-mm Lüneburg lens with different number N of layers ($f = 3.5$ GHz): the focussing effect becomes worse, when $N \leq 2-4$ (log scale)



Стандартная реализация –
Множество вложенных шаровых слоев с разным показателем преломления



Требуется большое число слоев – высокая стоимость
Объем полностью заполнен – значительный вес

Линзы из Метаматериалов

30

Сферическая линза Люнеберга на основе диэлектрического метаматериала

Разработана совместно СПбГПУ и ИТМО

Радиальные диэлектрические штырьки переменного профиля образуют неоднородный материал

Экспериментальный образец:

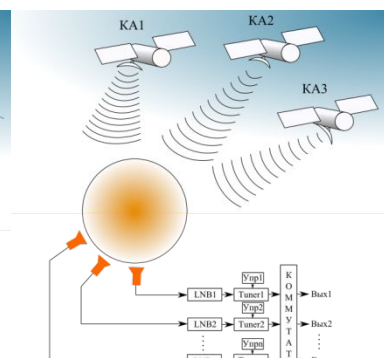
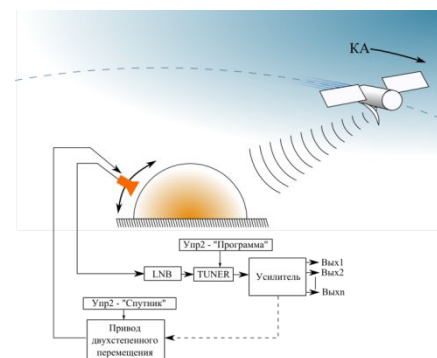


- Широкая полоса частот (5-15 ГГц)
- Малый вес (в 3-4 раза ниже многослойной линзы)
- Состоит из одинаковых элементов
- Используется один материал
- Может быть изготовлена на 3D-принтере

Сопровождение движущихся спутников



Одновременная работа по нескольким спутникам



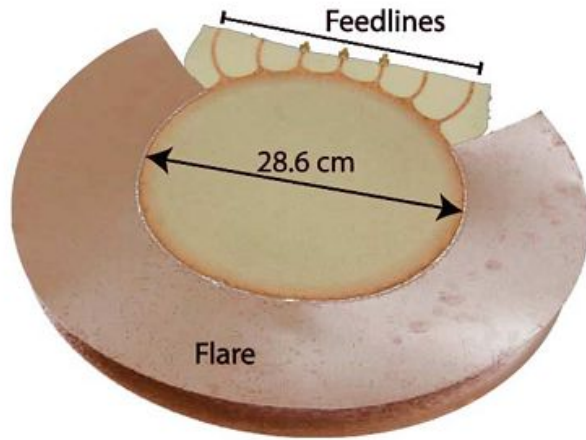
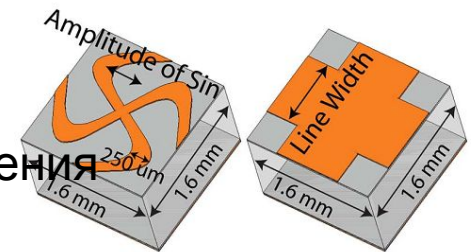
И.К. Мешковский, Д.В. Шанников, ПЖТФ, 2002

Линзы из Метаматериалов

31

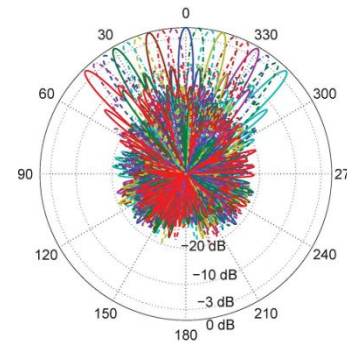
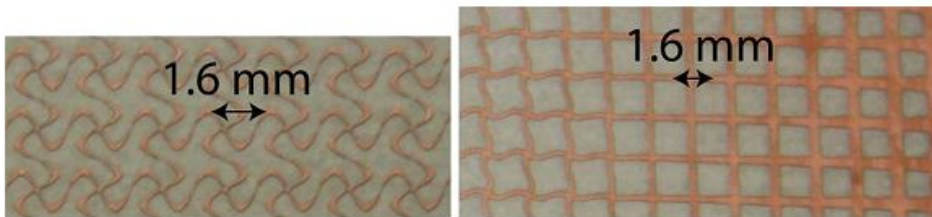
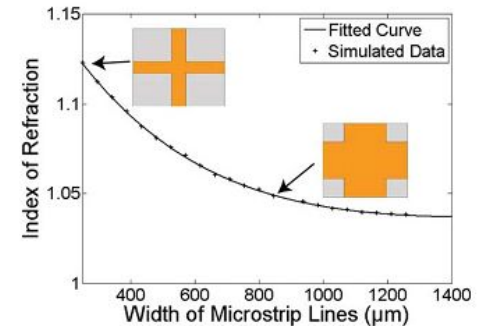
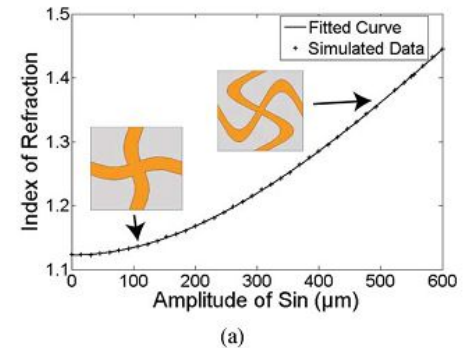
Планарная линза Лüneберга на основе сетки

Между двумя периодическими структурами возможно замедление TEM волны – меняется показатель преломления



Линза Лüneберга фокусирует излучения источника на ее периферии

$$n(r) = \sqrt{2 - r^2}$$



Carl Pfeiffer and Anthony Grbic, IEEE TAP, 2010

Линзы из Метаматериалов

32

Массив из композитных линз Микаэляна

Концепция искусственного неоднородного диэлектрика находит применение и для цилиндрических линз

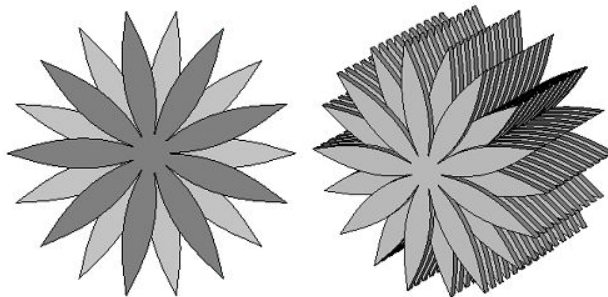
Неоднородная линза Микаэляна фокусирует излучение

точечного источника, расположенного

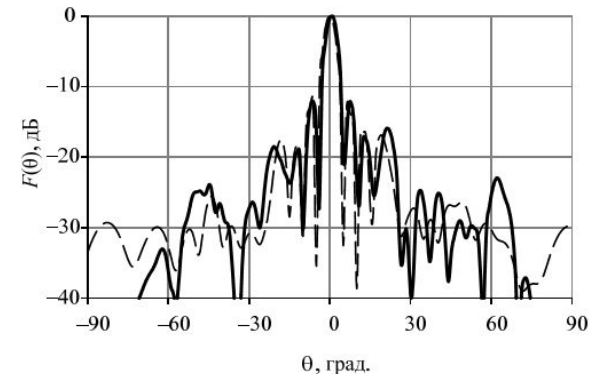
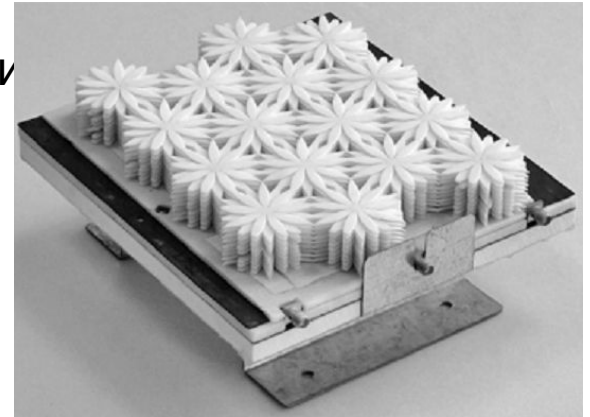
в торце цилиндра если:

$$n(r) = \frac{n_0}{\text{ch}[(r/r_0)\text{Arch } n_0]}$$

Распределение показателя преломления достигается использованием многослойной структуры с элементарной ячейкой определенной формы:



Метаматериалы в антенной технике



А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов.
Доклады ТУСУРа, 2012

- Введение
- Отражательные решетки
- Проходные решетки
- Покрытия из нано-антенн
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

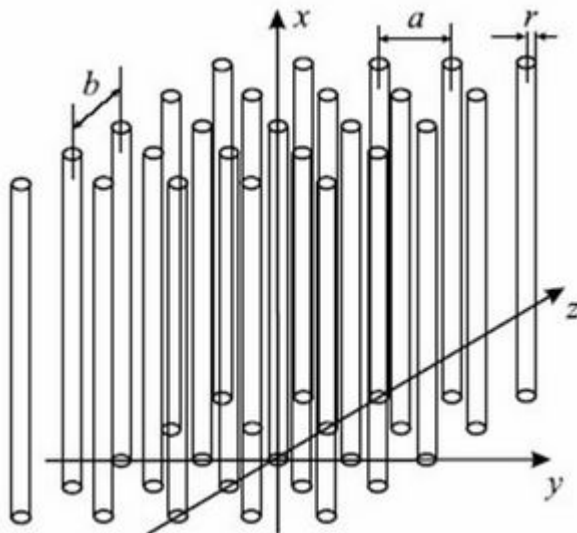
Проволочные среды

34

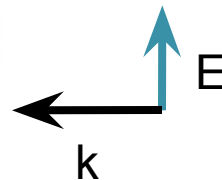
Среда из параллельных проводов круглого сечения, образующих решетку

Структуру можно рассматривать как анизотропную (одноосную) среду с эквивалентными параметрами:

f_p - плазменная частота, зависит от геометрических параметров решетки



$$\epsilon_{\text{reff}} = 1 - \frac{f_p^2}{f^2 - \left(\frac{q \cdot c}{2\pi}\right)^2}$$



Режимы работы:

- $f < f_p$ – запредельный режим, экспоненц.затухание,
 $\epsilon_{\text{reff}} < 0$
- $f = f_p$ – ENZ метаматериал, бесконечная фазовая скорость
 $\epsilon_{\text{ref}} = 0$
- $f > f_p$ – распространяющаяся волна,
 $\epsilon_{\text{ref}} > 0$

Проволочные среды

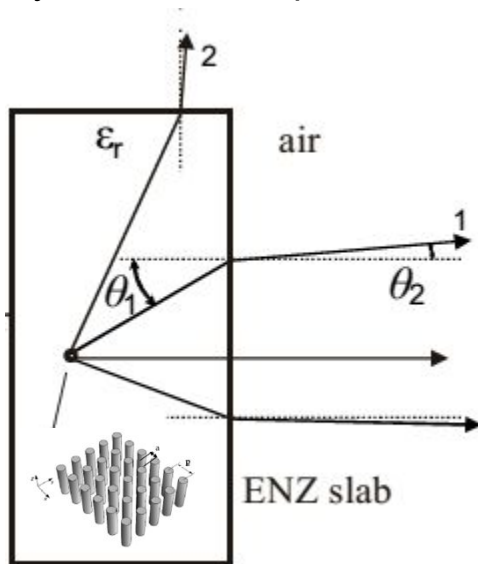
35

Синфазная апертура при помощи проволочной среды

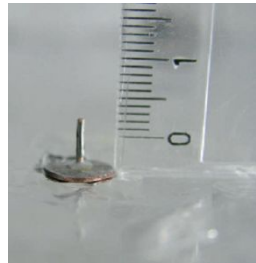
В режиме $\epsilon_{\text{ref}}=0$:

- фазовая скорость в среде бесконечна:
- все лучи выходят из среды под углом, близким к нормали
- > можно расположить точечный диполь внутри слоя и получить синфазную апертуру

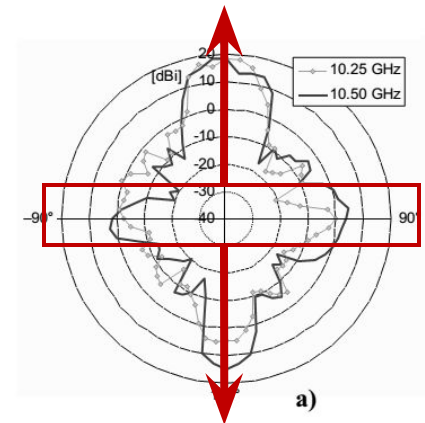
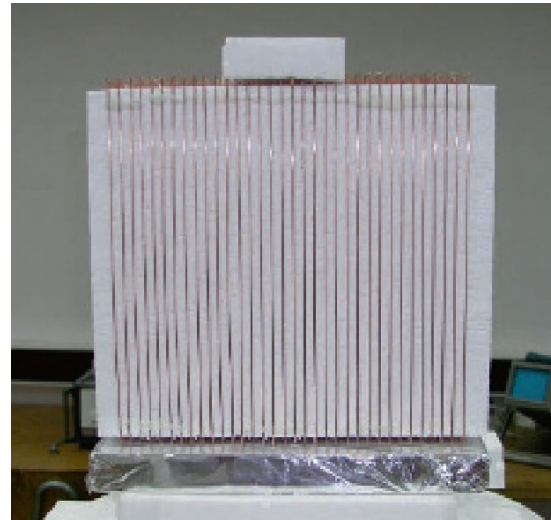
Лучи в слое из проводов:



Точечный
монополь:



Экспериментальная реализация
слоя из проводов:



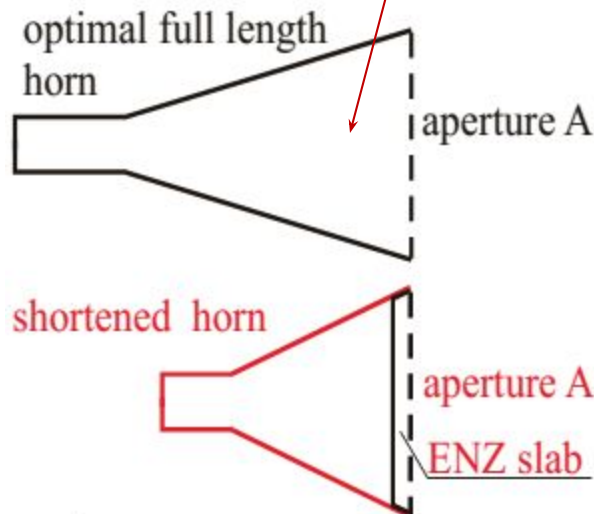
Проволочные среды

36

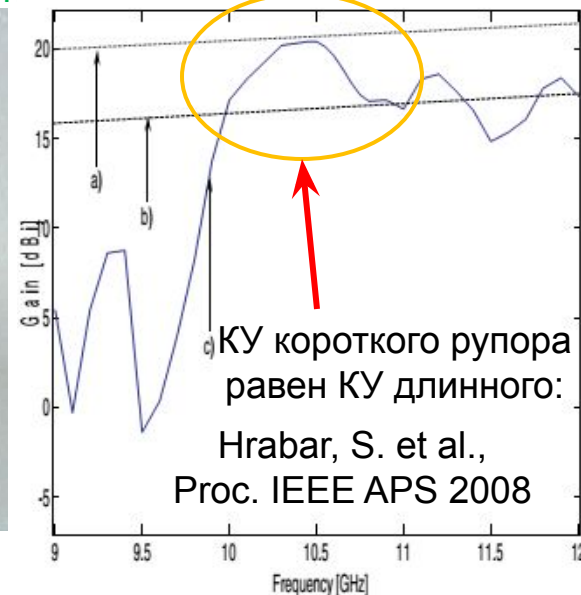
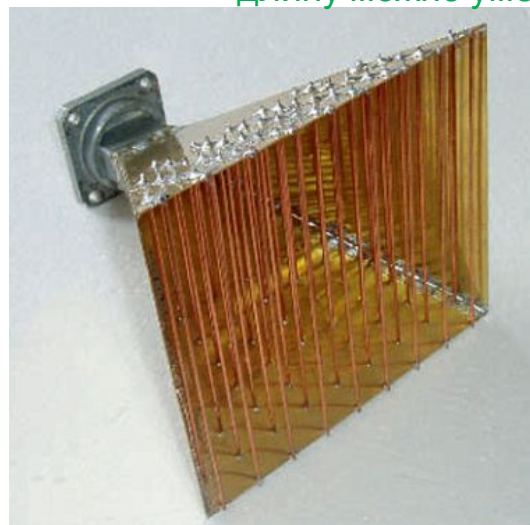
Укороченная рупорная антенна за счет вставки из проволочного материала

За счет бесконечной фазовой скорости можно реализовать фокусирующую вставку в рупор

Оптимальный рупор для заданной длины имеет фиксированные размеры апертуры



За счет вставки из проволочного метаматериала длину можно уменьшить с тем же КПД



Не содержит диэлектрика! Удобно для космических систем.

Метаматериалы в антенной технике

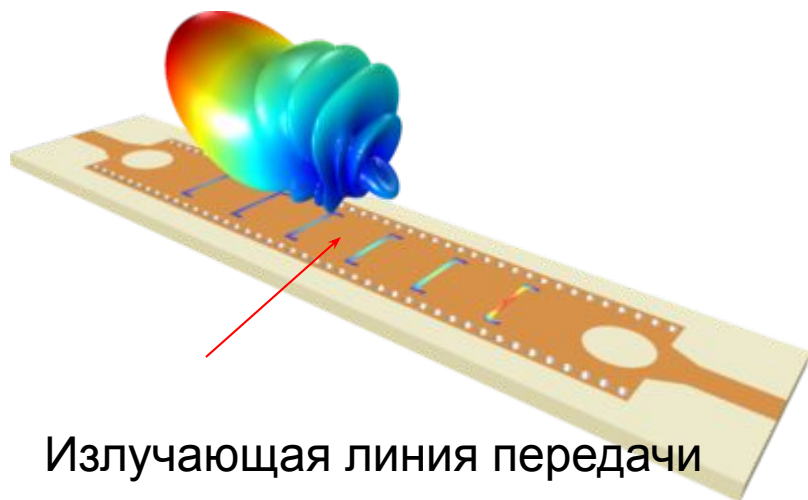
Проволочные среды

37

Антенна бегущей волны на волноводе с проволочным заполнением

Бесконечная фазовая скорость дает антенну бегущей волны с синфазным раскрывом!

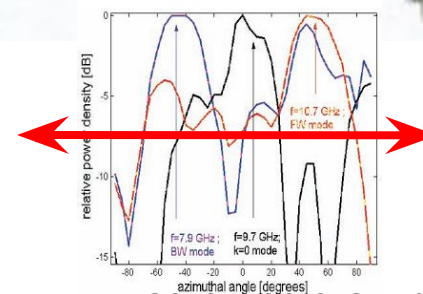
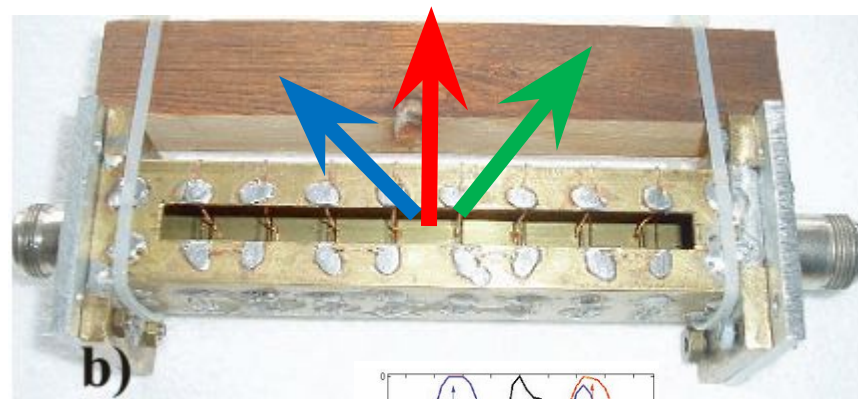
Типичная антенна бегущей волны:
максимум излучения – под углом



Излучающая линия передачи

Волновод с проволочной средой реализует:

- Режим обратной волны
- Режим с бесконечной фазовой скоростью
- Режим с прямой волной



Hrabar, S et al., Proc. Meta 2008

Метаматериалы в антенной технике

частотное сканирование

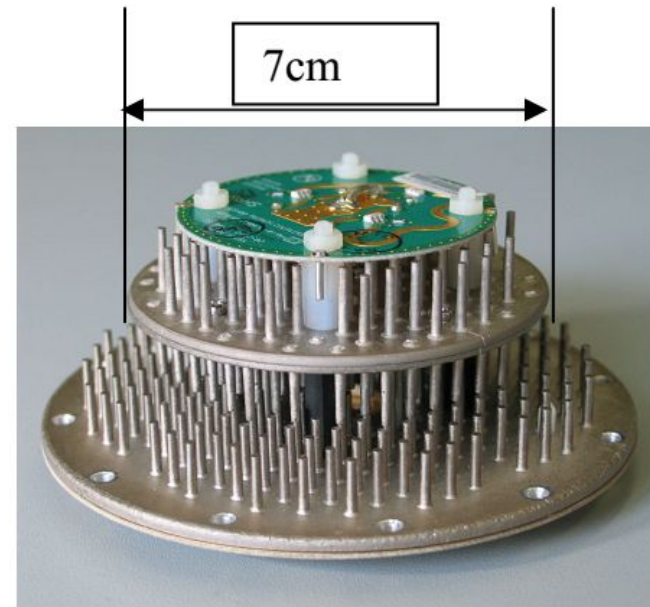
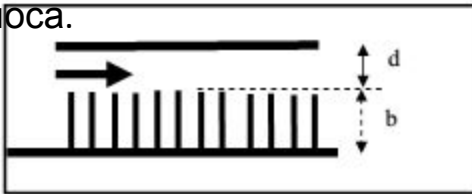
Проволочные среды

38

Система из близких разомкнутых проводов между двумя близкими пластинами играет роль замедляющей структуры – искусственный диэлектрик

Для всенаправленности МП антенну нужно делать меньше – растёт с подложки – уменьшается полосу.

Искусственный диэлектрик на замедляющей структуре даёт широкополосность и всенаправленность одновременно



Dmitry Tatarnikov, Topcon

- Введение
- Отражательные решетки
- Проходные решетки
- Покрытия из нано-антенн
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- **Высокоимпедансные поверхности**

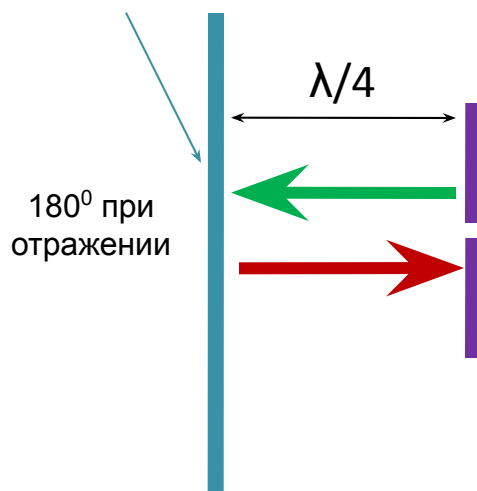
Высокоимпедансные пов-ти

40

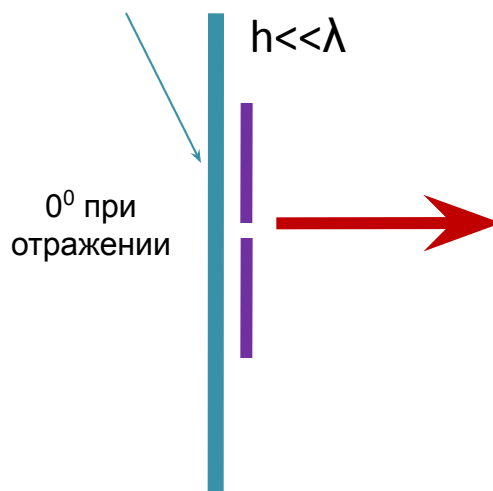
Планарные структуры, в т.ч. периодические – импедансные поверхности

От импеданса зависит коэффициент отражения. **Не существует природных стенок с магнитными свойствами**

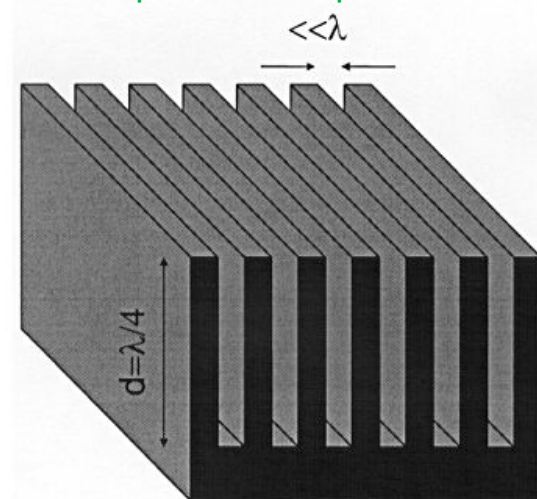
Металлический экран
($E=0, Z=0$)



Магнитный экран
($H=0, Z=\infty$)



Corrugated Surface
Отражение с фазой 0°



НО! Это – не совсем планарная структура! Нужна миниатюризация!

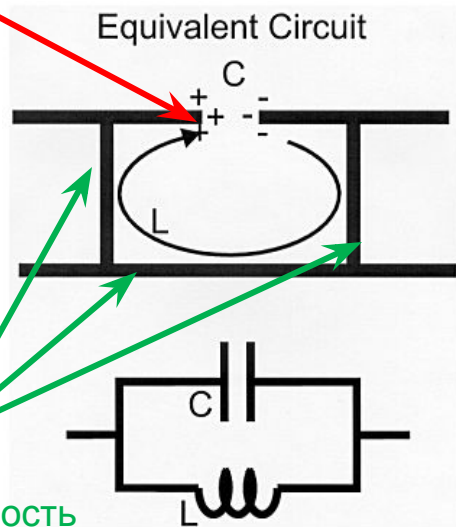
Высокоимпедансные пов-ти

41

Для миниатюризации необходимо уменьшить объем элементарной ячейки –увеличить емкость и индуктивность

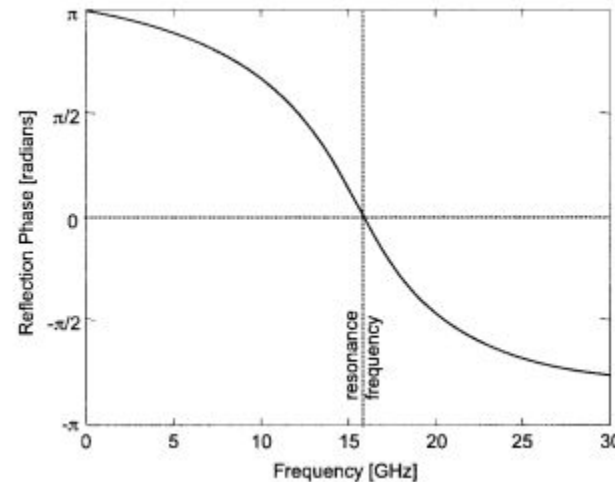
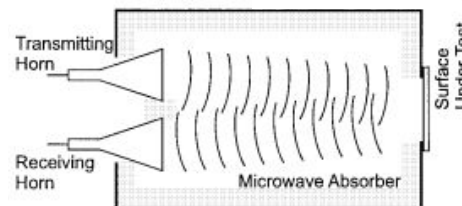
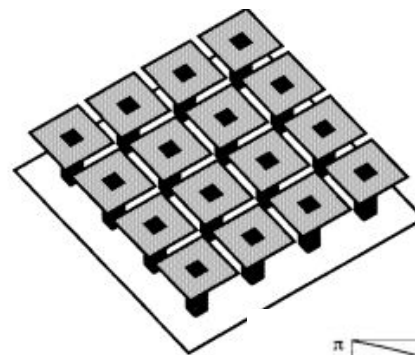
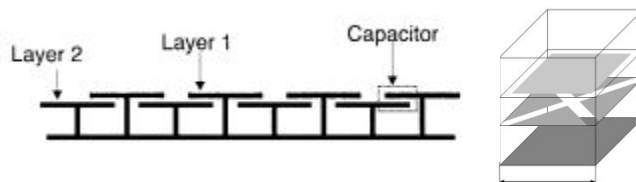
Высокоимпедансная поверхность (грибная)

Краевая емкость



Индуктивность контура

Можно еще увеличить емкость:



Метаматериалы в антенной технике

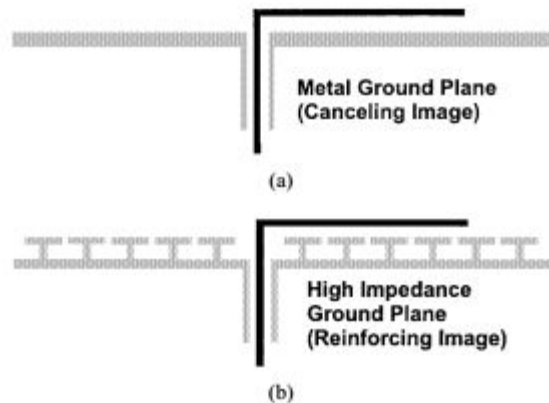
Высокоимпедансные пов-ти

42

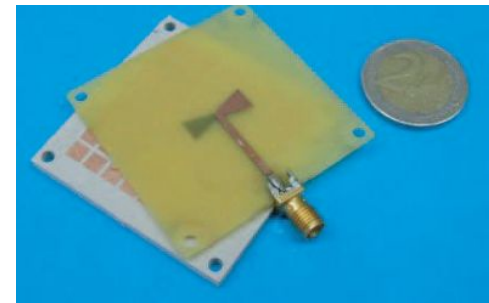
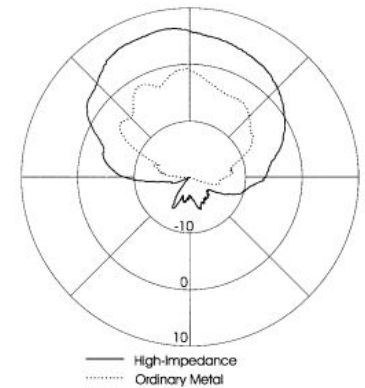
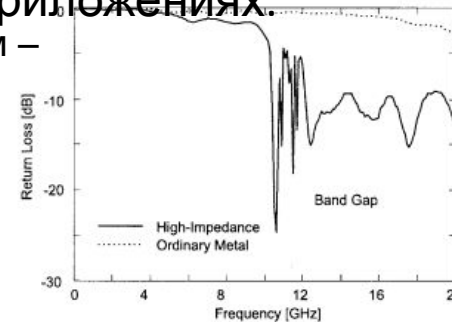
Грибные поверхности могут легко изготавливаться в виде печатных плат,

что делает их наиболее популярными в приложениях.

Горизонтальный диполь над металлическим экраном – изображение в противофазе – **трудно согласовать**



Горизонтальный диполь над поверхностью с высоким импедансом – изображение в фазе – **легко согласовать!**



Dan Sievenpiper et al., IEEE MTT Trans., 1999

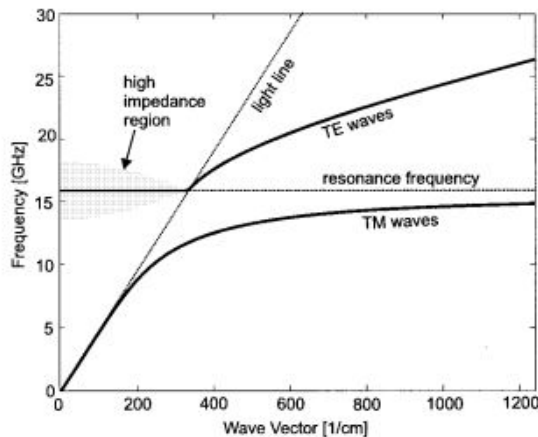
Метаматериалы в антенной технике

Высокоимпедансные пов-ти

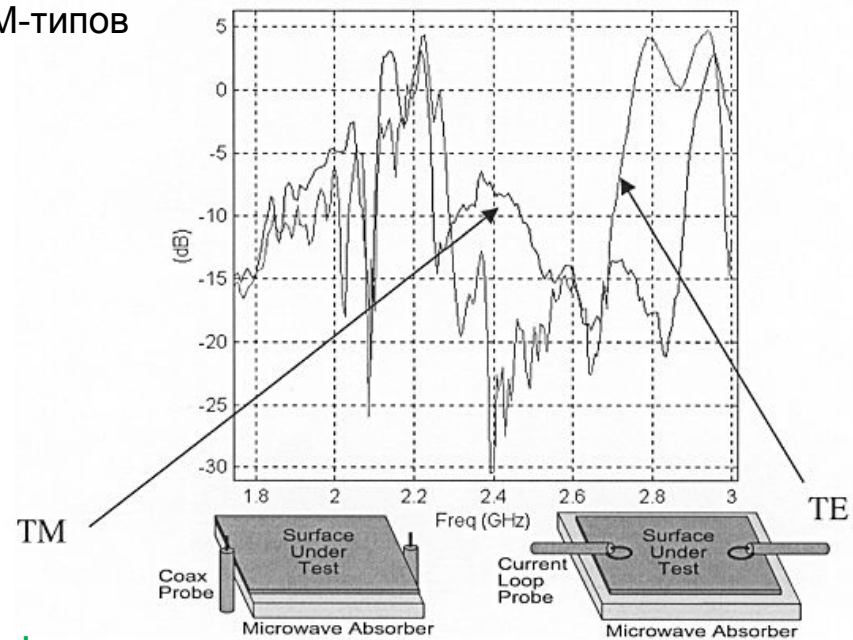
43

Вблизи резонанса поверхности с высоким импедансом блокируют поверхностные волны
(при возбуждении как электрическим, так и магнитным диполями)

ВИП подавляют поверхностные волны TE- и TM-типов
– эффект запрещенной зоны



Структура из метаматериала позволяет добиться развязки элементов антенной решетки!



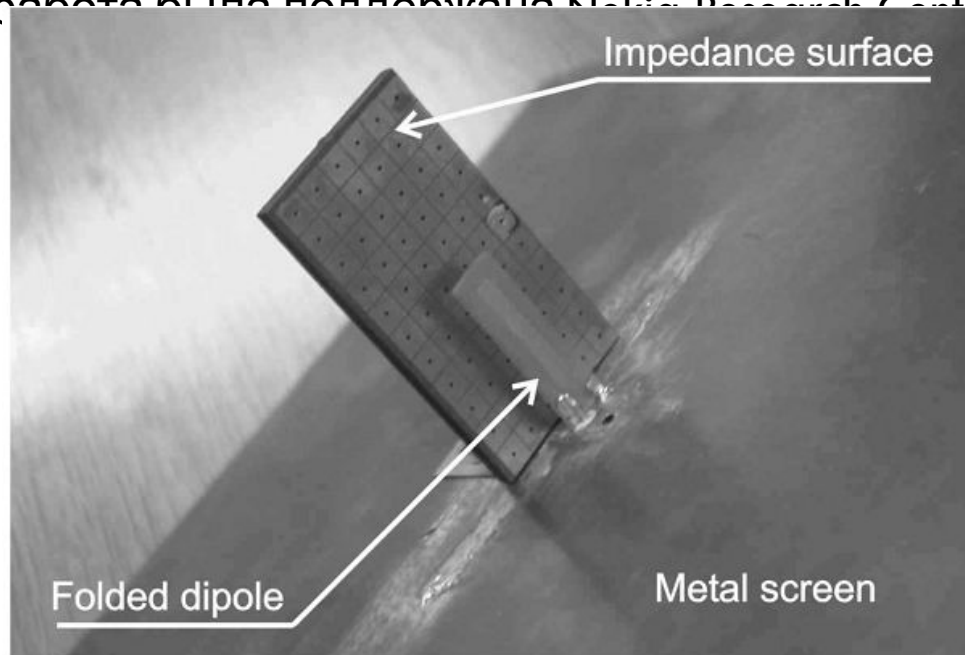
G. Poilasne, PIER, 2003

Высокоимпедансные пов-ти

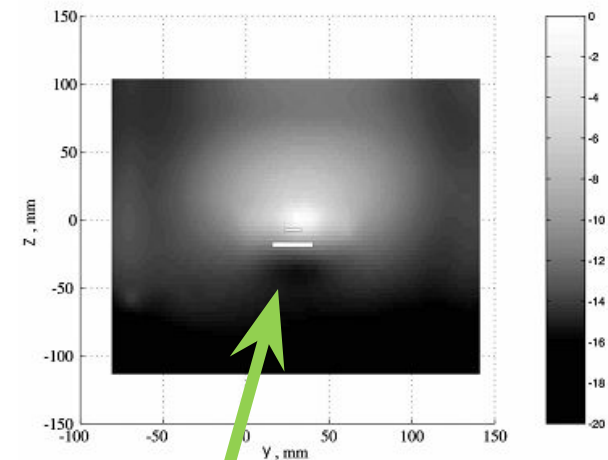
44

Конечные высокоимпедансные поверхности могут управлять ближним полем

Это важно для уменьшения вредного действия устройств радиосвязи – работа была поддержана Nokia Research Center



Результат измерения ближнего поля



Область пониженного поля в ближней зоне

S.A. Tretyakov et al, Improving antenna near-field pattern by use of artificial impedance screens, 2005

Метаматериалы в антенной технике

Высокоимпедансные пов-ти

45

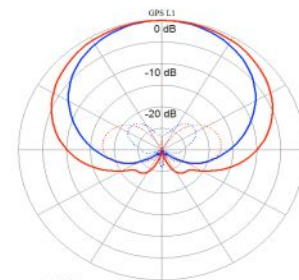
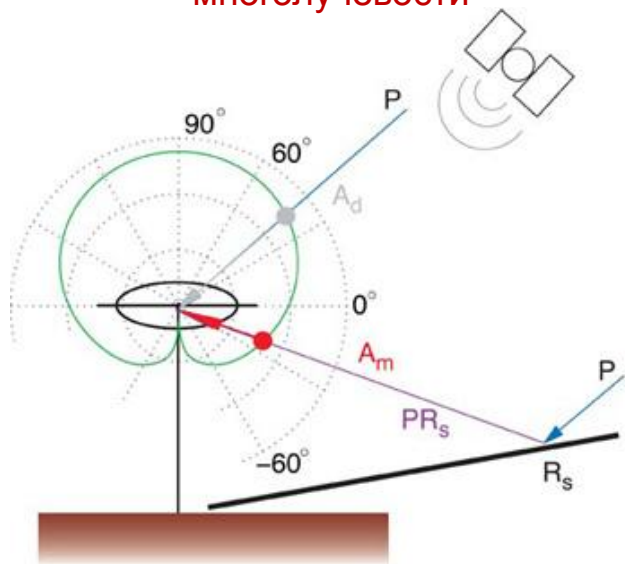
Другое применение – снижение краевых эффектов отражателя антенн

Поверхностные волны затухают и не доходят до края – не портится форма

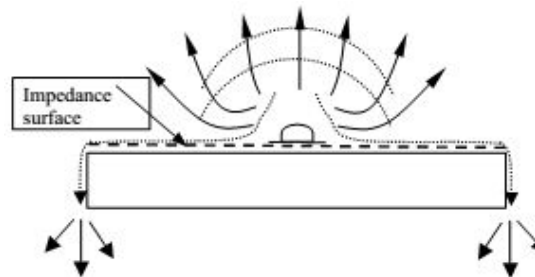
ДН обычной GNSS антенны – высокое боковое и заднее излучение –
Ошибка измерения координат из-за многолучевости

Промышленные GNSS антенны делают с подавлением многолучевости за счет высокоимпедансных поверхностей

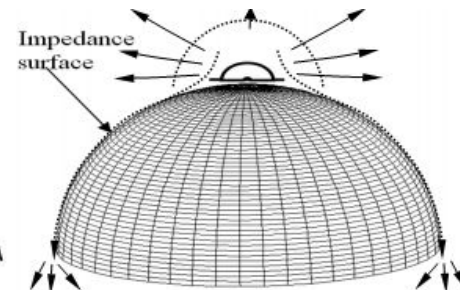
Происходит подавление краевых эффектов – ровная форма ДН – нет фазовых ошибок



Плоская поверхность:



Выпуклая поверхность:

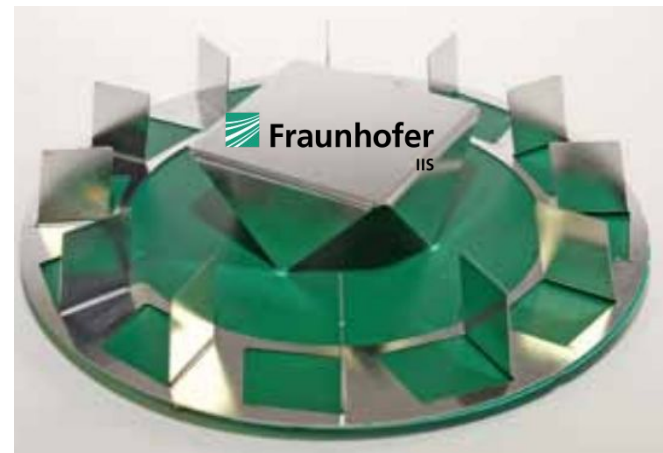


Метаматериалы в антенной технике

Высокоимпедансные пов-ти

46

Модели высокоточных GNSS антенн на высокоимпедансных поверхностях, имеющиеся на рынке



В рамках работ по модернизации комплекса "Квазар-КВО" в июле 2010 г. на обсерватории Зеленчукская установлен совмещённый GPS/ГЛОНАСС-приёмник фирмы Javad GNSS Delta-G3T с антенной RingAnt-DM Choke Ring.

Метаматериалы в антенной технике

Спасибо за внимание!