

*На правах рукописи*



**Генералов Алексей Анатольевич**

**ПОЛУПРОЗРАЧНЫЕ ВОГНУТЫЕ ЭКРАНЫ АНТЕНН  
ВЫСОКОТОЧНОГО СПУТНИКОВОГО  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

05.12.07 – Антенны, СВЧ – устройства и их технологии

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2019

Работа выполнена на кафедре «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Научный руководитель:** **Татарников Дмитрий Витальевич**  
доктор технических наук, профессор  
Московского авиационного института

**Официальные оппоненты:** **Петров Александр Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник АО "НПО  
им. С.А. Лавочкина"

**Глыбовский Станислав Борисович**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, научный сотрудник физико-  
технического факультета Санкт-  
Петербургского НИУ информационных  
технологий, механики и оптики

**Ведущая организация:** АО «Всероссийский научно-  
исследовательский институт  
радиотехники»

Защита диссертации состоится «24» декабря 2019г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться на сайте [mai.ru](http://mai.ru) и в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «\_\_\_» октября 2019г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.125.03, к.т.н.



А.А. Горбунова

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Современные системы характеризуются стремлением к уменьшению коэффициента усиления (КУ) антенны в нерабочей области углов. Это обусловлено не столько энергетическими потерями, сколько, в основном, ростом требований к помехозащищенности и электромагнитной совместимости. Родственные задачи возникают в области высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1]. Здесь КУ антенны приемника в нерабочей области углов определяет потенциальную точность навигационной системы.

Простейшие навигационные приемники, зачастую являющиеся частью бытовых мобильных устройств, относятся к кодовым дальномерам и обеспечивают определение координат потребителя с ошибкой порядка десятков метров в среднеквадратичном смысле. В настоящей работе эти устройства не рассматриваются. Напротив, рассматриваются устройства высокоточного позиционирования, которые относятся к фазовым дальномерам и работают в дифференциальном режиме [1]. К высокоточным условно относят устройства, обеспечивающие сантиметровую точность в режиме реального времени. Этими устройствами применяется алгоритм RTK (от англ. Real Time Kinematic). Известные и применяемые на практике алгоритмы и методы обработки сигналов описаны в [1-2].

Применительно к задачам высокоточного спутникового позиционирования типична ситуация, при которой приёмная антенна размещается на некоторой высоте над подстилающей поверхностью земли [1]. При этом антенна наряду с прямым сигналом со спутников, принимает сигнал, отраженный от подстилающей поверхности. Это явление называется многолучевостью, а ошибка многолучевости не поддается устранению принятыми на практике алгоритмами обработки сигналов [1-2] и определяется свойствами диаграммы направленности (ДН) приемной антенны. Одним из основных элементов, определяющих способности антенны ГНСС к подавлению многолучевости, является экран.

В силу сказанного, задачи построения экранов, дополняющих конструкцию антенны и служащих для подавления КУ антенны в нерабочей области углов, представляются актуальными. Такой подход позволяет отделить задачи разработки экрана и антенны: ДН в рабочей области углов, поляризационные и частотные характеристики

обеспечиваются антенной, а экран служит для обеспечения уменьшения КУ в нерабочей области углов.

**Целью диссертационной работы** является построение процедур синтеза и исследование вогнутых полупрозрачных экранов, охватывающих антенну и служащих для формирования ДН с отсечкой при переходе в нерабочую область углов.

Для достижения поставленной цели ставятся и решаются следующие **основные задачи**:

1. Построение аналитической и численной оптимизационной процедуры синтеза импеданса плоских полупрозрачных экранов, параллельных направлению главного максимума ДН для обеспечения резкой отсечки поля при переходе в нерабочую область углов.

2. Построение аналитической и численной оптимизационной процедуры синтеза импеданса вогнутых полупрозрачных экранов, охватывающих источник излучения для обеспечения резкой отсечки поля при переходе в нерабочую область углов.

3. Разработка компактной антенной системы с вертикальным полупрозрачным экраном, реализующим подавление поля антенны в нерабочей области для снижения ошибки многолучевости при использовании в малогабаритных устройствах высокоточного позиционирования по сигналам ГНСС.

**Научная новизна.** Построена аналитическая процедура синтеза импеданса экрана в приближении геометрической оптики для формирования ДН с отсечкой. Изучены границы применимости этого приближения. Построена численная оптимизационная процедура, позволяющая значительно улучшить результаты, достигаемые аналитически. Получены оценки физически реализуемых величин отсечки поля в нерабочей области углов антенн. Предложена компактная антенная система спутникового позиционирования с полупрозрачным экраном, параллельным направлению максимума ДН, служащим для уменьшения ошибки многолучевости.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Вогнутые экраны с полупрозрачным окончанием позволяют значительно улучшить крутизну отсечки поля при переходе в нерабочую область углов антенны по сравнению с идеально проводящими. Основным фактором, ограничивающим реализуемую крутизну отсечки, является радиус экрана.

2. Экраны с чисто резистивным импедансом, синтезированным на основе приближения геометрической оптики (ГО), обеспечивают отсечку поля в угловом секторе  $\pm 10^\circ$  на величину порядка  $-30\text{дБ}$  и

лучше при радиусе экрана порядка 30 длин волн и более. Для экранов меньшего радиуса, синтезированных на основе численной оптимизационной процедуры, импеданс комплексный, реализуемая отсечка поля в этом же секторе составляет порядка -12..-20дБ при радиусе экрана 1..2 длины волны.

3. Процедуры синтеза на основе методов глобальной оптимизации с применением регуляризации позволяют получить физически реализуемые распределения импеданса с положительной действительной частью. Результаты синтеза на основе усредненных граничных условий тонкого слоя подтверждены строгим электродинамическим моделированием и натурными экспериментами.

4. Экраны размерами порядка 4 длин волн в диаметре с комплексным профилем импеданса обеспечивают отсечку поля на величину порядка -20дБ в угловом секторе  $+10^\circ$ . Таким образом, характеристики этих экранов достаточны для обеспечения миллиметровой точности позиционирования в дифференциальном режиме.

5. Предложенные малогабаритные экраны размерами порядка  $\frac{1}{2}$  длины волны позволяют реализовать подавление поля в направлении анти-нормали к плоскости антенны до величин порядка -17..-20дБ, и, тем самым, обеспечивают сантиметровую точность позиционирования при вдвое меньших габаритах антенной системы по высоте по сравнению с существующими антеннами.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применялись методы вычислительной электродинамики, теории синтеза антенн, численные методы решения интегральных уравнений. В решении обратных задач применялись методы регуляризации. Для синтеза импеданса экрана применялись методы численной оптимизации, алгоритмы первого порядка и стохастические алгоритмы глобальной оптимизации, а также методы многокритериальной оптимизации. Для верификации приближенных численных моделей использовались современные программные средства строгого электродинамического моделирования. Экспериментальные измерения проводились в безэховой камере стандартными методами на лабораторном оборудовании.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость состоит в получении строгих аналитических выражений для импеданса полупрозрачного экрана в приближении геометрической оптики, получении оценок границ применимости этого приближения и

оценок габаритов вогнутых экранов с переменным импедансом для реализации заданных величин отсечки поля.

Практическая значимость состоит в построении опытных образцов компактных антенных систем с вертикальными полупрозрачными экранами, формирующими требуемую для снижения ошибки многолучевости ДН при использовании в малогабаритных устройствах высокоточного позиционирования по сигналам ГНСС. Предложенная конструкция обеспечивает сантиметровую точность позиционирования при вдвое меньших габаритах антенной системы по высоте по сравнению с существующими антеннами.

**Достоверность** обусловлена использованием апробированных методов вычислительной электродинамики, подтверждением результатов приближенного численного решения результатами строгого электродинамического моделирования и согласованностью результатов расчетов с натурным макетированием.

**Реализация и внедрение результатов.** Построенные опытные образцы антенных систем применяются в НИОКР, проводимых компанией «Топкон Позиционинг Системс» в направлении совершенствования антенной техники высокоточных геодезических ГНСС приемников. Соответствующий акт прилагается.

**Апробация результатов работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях: International Conference on Metamaterials and Nanophotonics METANANO (St.-Petersburg, 2019), Photonics & Electromagnetics Research Symposium “PIERS-Spring” (Rome, Italy, 2019), 14-я Международная конференция "Устойчивость и колебания нелинейных систем управления" (конференция Пятницкого) (г.Москва, ИПУ РАН, 2018), International Conference on Metamaterials and Nanophotonics METANANO (Sochi, 2018), The 38<sup>th</sup> Progress in Electromagnetic Research Symposium – “PIERS” (St.-Petersburg, 2017), V Всероссийская Микроволновая Конференция (г.Москва, ИРЭ РАН, 2017), "Иосифьяновские чтения 2017" (г.Истра, АО "НИИЭМ", 2017).

**Публикации.** По результатам проделанной работы опубликованы 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 7 статей в сборниках трудов российских и международных научных конференций, в том числе 5 входящих в перечень Web of Science/Scopus, а также получен патент и подана заявка на патент.

**Личный вклад автора.** В опубликованных в соавторстве научных работах вклад автора заключается в разработке математических моделей, построении численных процедур, проведении расчетов,

создании экспериментальных прототипов антенных систем и проведении натурных экспериментов. Автор принимал непосредственное участие в обработке полученных результатов и подготовке научных публикаций.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 78 наименований и четырех приложений. Текст работы изложен на 163 страницах машинописного текста, включая 88 рисунков и графиков, и 10 таблиц.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** приведена общая характеристика работы, актуальность, научная новизна, сформулированы цели и задачи работы и положения, выносимые на защиту. Проведен обзор текущего состояния и степени разработанности темы исследования. Анализ работ в области антенных экранов, служащих для подавления КУ антенны в нерабочей области углов показал, что известные системы имеют ряд недостатков.

Общим недостатком плоских проводящих, импедансных и полупрозрачных экранов, поперечных по отношению к направлению основного излучения, является сравнительно медленная скорость убыли поля как функция угла в зоне тени и обуславливается тем, что в приближении физической оптики ДН токов, дополняющих экран до неограниченного, оказывается весьма широкой [1].

Для экранов, параллельных направлению основного излучения, возможно достичь убыль поля в зоне тени, более резкую по сравнению с пределом геометрической теории дифракции (интегралом Френеля) [3]. Однако задачи синтеза распределения импеданса полупрозрачного экрана для обеспечения ДН с резкой отсечкой [4] систематически не рассматривались. Задача восстановления импеданса экрана, обеспечивающего желаемое распределение результирующего поля, является некорректной обратной задачей электродинамики [5], решение которой принципиально не единственно. Таким образом, возникает необходимость отсеивания физически нереализуемых распределений импеданса. Применение методов регуляризации к решению сформулированных задач ранее не рассматривалось.

Кроме того, экраны, охватывающие источник излучения, представляют большой практический интерес и ранее рассмотрены не были. Обзор работ в области высокоточного спутникового позиционирования по сигналам ГНСС показал, что дополнение

практической геодезической антенны вогнутым экраном для уменьшения ошибки многолучевости и, тем самым, увеличения точности позиционирования представляется перспективным.

Помимо задач с резкой отсечкой поля, отдельным направлением являются компактные высокоточные интегрированные устройства ГНСС. Здесь антенна и навигационный приемник размещаются в едином корпусе, причем корпус выполняет роль проводящего экрана антенны [6]. Габариты таких устройств составляют порядка или меньше  $\frac{1}{2}$  длины волны. С сокращением размеров корпуса уменьшаются размеры экрана микрополосковой антенны, что приводит к заметному росту КУ в области тени (задней полусфере). Таким образом, представляет интерес исследование компактных средств подавления излучения в область тени для интегрированных устройств.

В **первой главе** приведено исследование плоских полупрозрачных экранов, параллельных направлению главного максимума ДН для обеспечения резкой отсечки поля при пересечении нерабочей области углов. Рассматривается дифракция на плоском экране в прямоугольной системе координат (рис.1). В начале координат расположен источник излучения 1, а на некотором расстоянии  $b$  от него расположен экран 2. Экран представляет собой полуплоскость, неограниченную в направлении  $z < 0$  и перпендикулярную плоскости рисунка. Пространство условно разделено на две области. Область I ( $x > b, z > 0$ ) - зона свободного пространства, а область II ( $x > b, z < 0$ ) - нерабочая область углов источника или, по аналогии с геометрической оптикой, зона тени. Экран затеняет нерабочую область углов так, чтобы сформировать желаемую границу свет-тень (ось  $x$  при  $x > b, \theta = \pi / 2$ ) и состоит из двух частей: идеально проводящая часть экрана (сплошная линия, рис.1), ближе к краю экрана переходит в полупрозрачную (пунктир, рис.1). Полупрозрачность понимается в смысле выполнения граничных условий для электрически тонкого слоя [7]:

$$\vec{E}_\tau^+ = \vec{E}_\tau^- \quad (1)$$

$$\left[ \vec{n}_0, \vec{H}_\tau^+ - \vec{H}_\tau^- \right] = \vec{j}^e = \frac{\vec{E}_\tau^+}{Z_g} \quad (2)$$

Здесь  $\vec{E}(\vec{H})_\tau^{+(-)}$  - касательные компоненты полей при  $x = b + (-)0$ ,  $\vec{j}^e$  - поверхностная плотность эквивалентного электрического тока экрана,  $Z_g$  - импеданс, характеризующий прозрачность слоя.



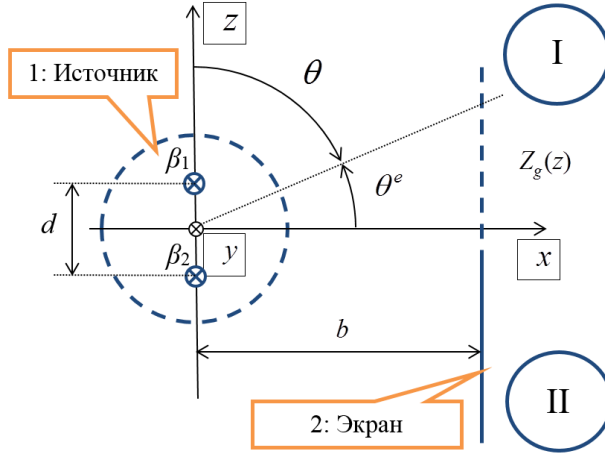


Рис. 1. Геометрия задачи.  $\theta$  - угол места,  $\theta^e = \pi/2 - \theta$  - угол возвышения над границей свет-тень.

Физической реализацией такого слоя в диапазоне СВЧ являются сетки с включенными комплексными нагрузками [1]. В качестве источника рассматривалась система из двух нитей тока, расположенных симметрично вблизи начала координат на оси  $z$  и неограниченно протяженных по оси  $y$  (рис.1). Здесь  $d \ll \lambda$  - расстояние между нитями,  $\beta_{1,2}$  - амплитуды токов, связанные соотношением  $\beta_2 = -\beta_1 e^{-ikd}$ , где  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число. Такой источник формирует кардиоидную ДН  $F^S(\theta) = (1 + \cos(\theta))/2$ . На рис.2 пунктиром приведена желаемая ДН  $F^D(\theta)$ , которая гладко обращается в ноль в пределах углового сектора  $10^\circ$  при пересечении зоны тени; ДН источника  $F^S(\theta)$  показана сплошной кривой.

Задача синтеза распределения импеданса  $Z_g(z)$ , обеспечивающего резкую убыль (отсечку) результирующей ДН при пересечении желаемой границы свет-тень ( $\theta = \pi/2$ ) рассматривалась в двумерном приближении для двух случаев  $\{H; E\}$  поляризации источника с вектором  $\vec{H}(\vec{E})$  перпендикулярным к плоскости рис.1. Для  $H$ -поляризации ток источника магнитный, а для  $E$ - электрический.

В приближении геометрической оптики (ГО) при  $b \gg \lambda$  была построена аналитическая процедура синтеза импеданса экрана, формирующего желаемую ДН. Для  $\{H; E\}$  поляризации источника выражение для импеданса имеет вид соответственно:

$$Z_g(\theta_z) = R_g(\theta_z) = W_0 \frac{\gamma(\theta_z)}{2(1 - \gamma(\theta_z))} \{ \sin \theta_z; 1/\sin \theta_z \} \geq 0 \quad (3)$$

Здесь  $W_0 = 120\pi$  Ом - характеристическое сопротивление свободного пространства,  $\theta_z = \pi/2 - \arctan(z/b)$  - координата рассматриваемой точки на поверхности экрана,  $\gamma(\theta) = F^D(\theta)/F^S(\theta)$  - коэффициент трансформации ДН: равен нулю в области тени, равен единице в области свободного пространства и гладко спадает от единицы к нулю в переходной области. При этом  $\gamma(\theta)$  не вносит искажений в фазовую диаграмму источника, а импеданс  $Z_g(\theta_z)$  (3) получается чисто активным и приведен на рис.3; для двух случаев поляризации эти распределения фактически совпадают.

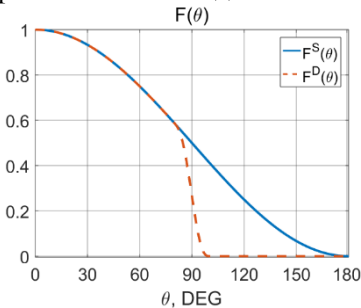


Рис.2 ДН источника  $F^S(\theta)$  (сплошная) и желаемая ДН  $F^D(\theta)$  (пунктир).

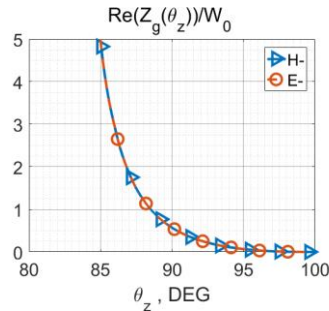


Рис.3  $Z_g(z)$  в предположении ГО, формирующий желаемую ДН для случаев  $H$ - и  $E$ -поляризации.

Для установления границ применимости приближения геометрической оптики был проведен численный расчет. Анализ сводился к решению интегрального уравнения по методу моментов:

$$\int_S G(z-z') j^e(z') dz' + E_\tau(z) = Z_g(z) j^e(z) \quad (4)$$

Здесь  $S$  - поверхность экрана,  $G$  - функция Грина,  $j^e$ -плотность эквивалентного электрического тока на поверхности экрана,  $E_\tau$  - касательная составляющая поля источника. Результаты расчета показаны на рис.4 при  $b=1..100\lambda$  для  $H$ -поляризации. Слева приведены реализуемые ДН  $F^1(\theta)$ , а справа - соответствующие им величины отношения «низ-верх»  $DU(\theta^e) = F^1(-\theta^e)/F^1(\theta^e)$ . Пунктиром показана желаемая ДН  $F^D(\theta)$ . Для  $E$ -поляризации результаты аналогичны.

Таким образом, синтез экрана в приближении ГО обеспечивает отсечку ДН в угловом секторе  $10^\circ$  на 40дБ относительно желаемой границы свет-тень ( $DU(10^\circ) = -40$ дБ) при  $b=100\lambda$ . В сравнении с идеально проводящими экранами, применение полупрозрачного окончания позволяет улучшить величину отсечки на 20дБ; 5дБ при  $b=100\lambda$ ;  $b=10\lambda$  от источника до экрана соответственно.

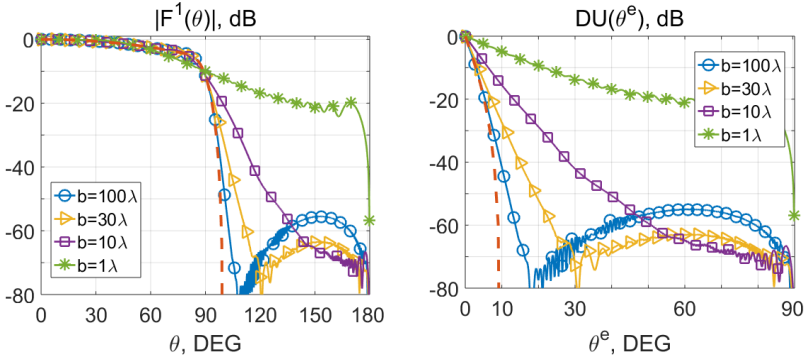


Рис.4. Анализ ГО.  $H$ -поляризация. Слева – ДН, справа -  $DU(\theta^e)$ .

Отдельно рассматривался синтез импеданса для меньших значений  $b$ , когда приближение ГО не применимо. Для этого использовались методы восстановления поля в пространстве по его асимптотике в дальней зоне [7]. Выражение для формирования импеданса по восстановленному полю для случая  $H$ -поляризации ( $E_y=0$ ) имеет вид:

$$Z_g = \frac{E_z^D}{2(H_y^D - H_y^S)}. \quad (5)$$

Это выражение является точным, и при  $b \gg \lambda$  оно переходит в ГО (3). Здесь  $E^D$ ,  $H^D$  и  $E^S$ ,  $H^S$  - компоненты восстанавливаемого желаемого поля и компоненты известного поля источника на поверхности экрана при  $x = b + 0$  соответственно. Компоненты желаемого поля восстанавливаются из требуемой асимптотики в дальней зоне [7]. Показано, что в сравнении с приближением ГО (3), для которого при  $b = 30\lambda$  в секторе углов  $10^\circ$  достигается отсечка поля источника на величину порядка -30дБ, предложенный подход позволяет получить отсечку порядка -40дБ вплоть до  $b = 10\lambda$ . По сравнению с приближением ГО, импеданс обретает реактивную составляющую.

Однако, с уменьшением  $b$ , синтез по методу восстановления поля (5) не обеспечивает желаемой отсечки ДН. Поэтому рассматривался синтез с использованием оптимизационной процедуры: при заданном  $b$  найти  $Z_g(z)$ ;  $\text{Re}[Z_g(z)] > 0$  доставляющее минимум функции штрафа:

$$P = q_0 \left( g_+^2(DU(\theta_0) - C_0) \right) + q_1 \left( \sum_{n=1}^N g_+^2(DU(\theta_n) - C_1) \right). \quad (6)$$

Здесь  $g_+(x) = \{x \text{ при } x > 0 / 0 \text{ при } x \leq 0\}$ ,  $q_{0,1} \geq 0$  – веса целевой функции,  $C_{0,1}$  - штрафные константы. На каждом этапе для определения реализуемой ДН  $F^1(\theta)$  при заданном  $Z_g(z)$  находилось численное

решение интегрального уравнения (4) методом моментов. На первом шаге оптимизационной процедуры для средних расстояний от источника до экрана (при  $b = 5; 10; 20\lambda$ ) в качестве начального приближения выступало приближение ГО (3). Оптимизационный процесс был построен с использованием квазиньютоновского алгоритма BFGS в MATLAB. В качестве практически значимого ориентира [6], выступала величина  $DU$  порядка  $-20..-40$ дБ при углах возвышения начиная с  $\theta^e = 10^\circ$ . Характерные значения штрафных констант  $C_{0,1} = -20..-40$ ,  $\theta_0 = 10^\circ$ ,  $q_0/q_1 = 10..100$ . Было показано, что при  $b \sim 5..10\lambda$  реализуется отсечка  $DU(10^\circ) \sim -30..-40$ дБ; импеданс при этом комплексный с положительной действительной частью.

Для малых расстояний от источника до экрана  $b \leq 2\lambda$  ввиду отсутствия хорошего начального приближения импеданса была разработана численная процедура синтеза без начального приближения с применением генетического алгоритма.

Таким образом, синтез импеданса экрана на основе оптимизационной процедуры с использованием методов восстановления поля позволяет значительно улучшить результаты, полученные с чисто резистивным импедансом в приближении ГО. На рис.5 показано сравнение результатов синтеза на основе процедуры оптимизации, формирования импеданса по восстановленному полю и синтеза в приближении геометрической оптики.

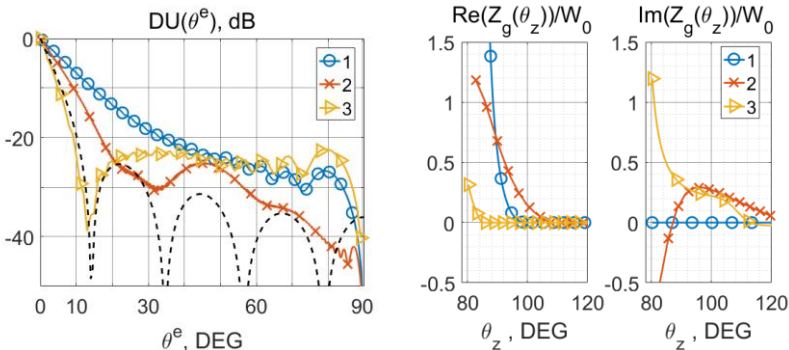


Рис.5 Сравнение результатов синтеза при  $b = 2\lambda$ ,  $H$ -поляризация. 1-ГО, 2-метод восстановления поля, 3-оптимизационная процедура. Пунктиром показана желаемая ДН с отсечкой  $-20$ дБ.

Показано, что основным фактором, ограничивающим реализацию ДН с резкой отсечкой поля, является расстояние  $b$  от источника до экрана. Для достижения отсечки порядка  $-40$ дБ начиная с  $10^\circ$  относительно желаемой границы свет-тень,  $b$  достигает  $\sim 10..20\lambda$ , а для отсечки в  $-20$ дБ – порядка  $2\lambda$ . Частотные зависимости реактивных

компонент импеданса не вносят существенных ухудшений в характеристики в полосе частот порядка 15%.

Для проверки результатов синтеза, полученных с применением усредненных граничных условий, рассматривалась модельная задача в среде электродинамического моделирования CST. В качестве источника использовалась пластинчатая (patch-) антенна с собственным экраном размером порядка полуволны (слева на рис.6). Моделирование проводилось в двумерном режиме, предполагая периодичность в направлении оси  $y$ . Полупрозрачная часть экрана реализована в виде ленточной структуры (сетки) с периодом много меньше длины волны [7]. В узлы сетки включены сосредоточенные компоненты с заданным импедансом. Размер полупрозрачной части составляет  $2\lambda$ . Вниз от полупрозрачной части по оси  $z$  простирается непрозрачная идеально проводящая часть экрана размером  $1\lambda$ . Результаты расчетов показаны справа на рис.6 (CST) в сравнении с полученными ранее для усредненных граничных условий (MATLAB). Символом Patch показано отношение  $DU(\theta^\circ)$  антенны в отсутствие вертикального экрана.

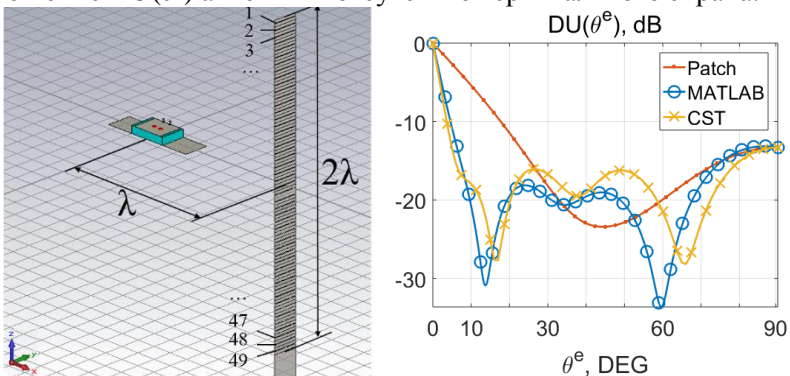


Рис.6 Имитационная модель CST (слева) и результаты моделирования в сравнении с численной процедурой (справа).

Таким образом, результаты синтеза на основе усредненных граничных условий были подтверждены строгим электродинамическим моделированием, что указывает на физическую реализуемость синтезированного распределения импеданса. В обоих случаях (CST, MATLAB) достигнуты величины отсечки порядка -20дБ в секторе углов  $10^\circ$  в области пересечения желаемой границы свет-тень.

Во **второй** главе приведено исследование вогнутых полупрозрачных экранов, охватывающих источник излучения и пригодных для практических применений. Рассматриваемый экран 2 представляет собой цилиндрическую поверхность, в геометрическом

центре которой расположен источник излучения 1 (рис.7). Экран состоит из двух частей: идеально проводящая часть экрана (сплошная линия), ближе к краям экрана переходит в полупрозрачную (пунктир). Полупрозрачные края возвышаются над границей свет-тьнь (ось  $x$ ) вплоть до уровня  $\theta^e=10^\circ$ . Полупрозрачность понимается в смысле выполнения граничных условий для электрически тонкого слоя (1)-(2). В качестве источника выступала модель, описанная в первой главе.

Задача синтеза импеданса экрана  $Z_g(\theta)$ , формирующего резкий спад (отсечку) ДН при переходе из зоны I в зону II рассматривалась в двумерном приближении для двух случаев поляризации источника. Аналогично первой главе, была построена аналитическая процедура синтеза импеданса и исследованы границы применимости приближения геометрической оптики (ГО) для вогнутых экранов.

В приближении ГО выражение для распределения импеданса вогнутого экрана в цилиндрических координатах справедливо для обоих типов поляризации волн и имеет вид:

$$Z_g(\theta) = R_g(\theta) = W_0 \frac{\gamma(\theta)}{2(1-\gamma(\theta))} \geq 0 \quad (7)$$

Выражение (7) совпадает с выражением (3) для плоского экрана если положить  $\sin \theta_z = 1$ , где  $\theta_z$  - угол падения.  $\gamma(\theta)$  определяет желаемую трансформацию ДН источника, не внося искажений в фазовую диаграмму, а импеданс  $Z_g(\theta)$  (7) получается чисто активным.

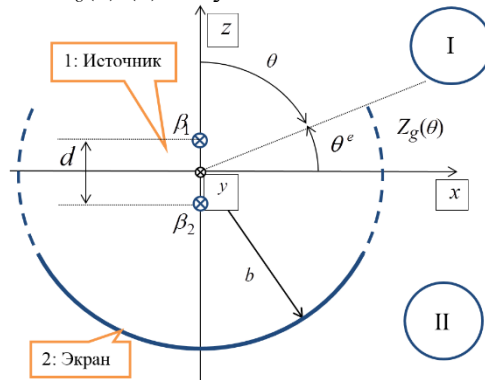


Рис.7 Геометрия задачи. I – зона свободного пространства, II – зона тени,  $\theta$  – угол места.  $\theta^e = \pi/2 - \theta$  – угол возвышения над уровнем границы «свет-тьнь».

Границы применимости приближения ГО исследовались численно, решением интегрального уравнения по методу моментов:

$$\int_S G(\theta - \theta') j^e(\theta') d\theta' + E_r(\theta) = Z_g(\theta) j^e(\theta) \quad (8)$$

Здесь  $S$ -поверхность экрана,  $G$  – функция Грина,  $E_\tau$  - касательная к экрану составляющая стороннего поля источника,  $j^e$ -плотность эквивалентного электрического тока на поверхности экрана. Результаты численного расчета представлены на рис.8 для  $H$ - поляризации. Для  $E$ - поляризации результаты аналогичны. Слева приведены реализуемые диаграммы  $F^1(\theta)$ , а справа соответствующие отношения «низ-верх»  $DU(\theta^e)$  для ряда размеров экрана  $b$ . Желаемая ДН  $F^D(\theta)$  показана пунктиром. При  $b=100\lambda$  реализуется ДН с резкой отсечкой (-40дБ) в зоне тени. Для  $b \geq 30\lambda$  достигается  $DU(10^\circ) \leq -30$ дБ.

Таким образом, чисто резистивный импеданс, полученный в приближении ГО (7) обеспечивает отсечку ДН для больших  $b$ . При этом, возмущение ДН источника в рабочей области углов за счет отражений от проводящей части экрана сравнительно незначительное.

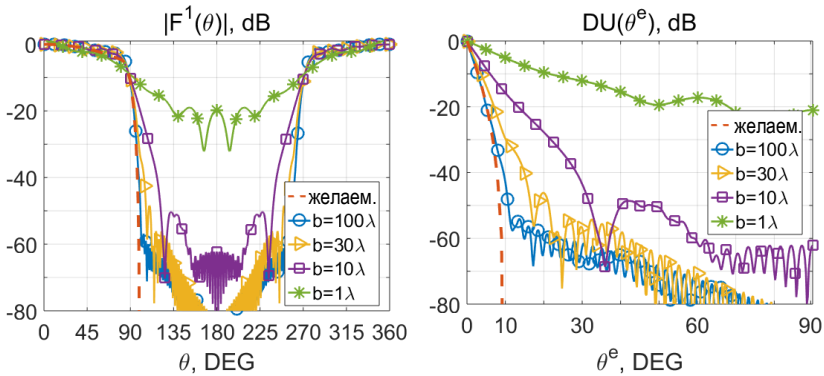


Рис.8 Реализующиеся ДН  $F^1(\theta)$  и  $DU(\theta^e)$  для случая  $H$ -поляризации.

Для синтеза импеданса с уменьшением размера экрана  $b$  была построена численная оптимизационная процедура с использованием методов восстановления поля из дальней зоны. В качестве целевой функции рассматривалась функция штрафов за отклонение реализуемой диаграммы от желаемой. Поскольку задача восстановления импеданса экрана, обеспечивающего желаемое распределение результирующего поля является нелинейной обратной задачей электродинамики, то для того, чтобы ограничить класс возможных решений, в целевую функцию был добавлен член, имеющий вид штрафа на величину производной решения, подобно методу регуляризации Тихонова [5]. Целевая функция принимает вид:

$$P = q_0 \left( g_+^2 (DU(\theta_0) - C_0) \right) + q_1 \left( \sum_{n=1}^N g_+^2 (DU(\theta_n) - C_1) \right) + w \left\| \frac{dZ}{d\theta} \right\|_2 \quad (9)$$

Здесь  $g_+(x) = \{x \text{ при } x > 0 / 0 \text{ при } x \leq 0\}$ ,  $q_{0,1} \geq 0$ ,  $w$  - веса целевой функции,  $C_{0,1}$  - штрафные константы. Производная  $dZ/d\theta$  вычисляется в дискретных точках методом конечных разностей,  $\|\cdot\|_2$  - евклидова норма вектора. Для минимизации (9) использовался инструмент численной оптимизации `particleswarm` в MATLAB на базе алгоритма роя частиц.

Регуляризация обеспечивает ограничение класса искомых решений в условиях оптимизации без начального приближения. Без применения регуляризации, распределения импеданса получаются физически нереализуемыми и должны быть выведены из рассмотрения. Результаты синтеза для некоторых  $b$  для случая  $E$ -поляризации показаны на рис.9.

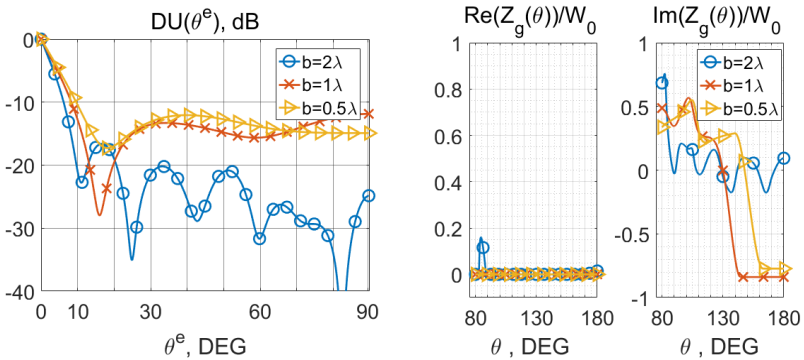


Рис.9 Результаты синтеза.  $E$ -поляризация:  $DU(\theta^e)$  и  $Z_g(\theta)$ .

При  $b \sim 0.5 \cdot 2\lambda$  синтезированные распределения обеспечивают отсечку порядка -10...-20дБ и ведут себя достаточно гладко как функция угловой координаты, что указывает на возможность их физической реализации. Влияние отклонений реактивных компонент импеданса в полосе частот порядка 15% относительно невелико.

Таким образом, основным фактором, ограничивающим реализуемую крутизну отсечки поля, является размер экрана  $b$ . Для достижения отсечки порядка -20дБ радиус экрана  $b$  достигает порядка  $2\lambda$ . По сравнению с предложенным ранее в [8], для достижения схожей величины отсечки и обеспечения миллиметровой точности позиционирования в дифференциальном режиме, диаметр плоского импедансного экрана составил около  $13\lambda$ .

В данной главе также был рассмотрен пример практического применения вогнутых полупрозрачных экранов для подавления задних лепестков антенных решеток и формирования ДН с резкой отсечкой. В качестве источника использовалась двумерная модель из 11 нитей



магнитного тока, отстоящих друг от друга на  $0.5\lambda$  и расположенных на конечном металлическом экране протяженностью  $6\lambda$ . Размер экрана незначительно превосходит размер решетки ( $b=5\lambda$ ) (рис.10).

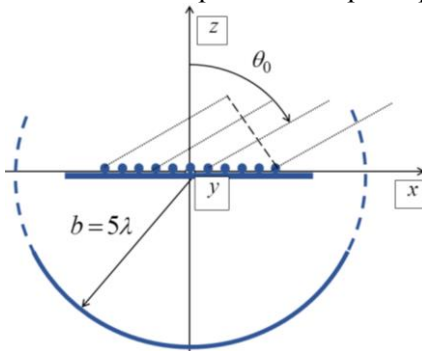


Рис.10 Экран решетки.

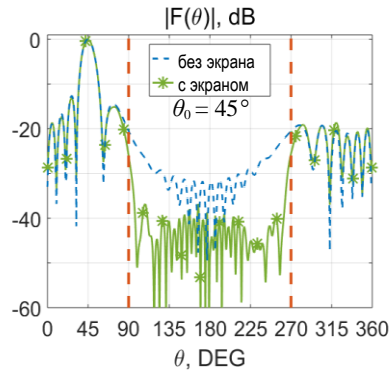


Рис.11. Результирующая ДН в сравнении с ДН источника.  
 $\theta_0 = 45^\circ$

Для импеданса экрана использовалось распределение  $Z_g(\theta)$ , полученное в результате предшествующего синтеза. На рис.11 приведена результирующая ДН в сравнении с ДН источника (показана пунктиром) для направления главного луча ДН решетки  $\theta_0 = 45^\circ$ . Так, уровень заднего лепестка удается снизить на 10..18дБ, начиная от углов, близких к касательным к плоскости решетки. При этом, возмущений ДН антенной решетки в рабочей области углов не наблюдается.

**Третья глава** посвящена разработкам антенной системы с полупрозрачным экраном, позволяющим снизить коэффициент усиления антенны в нерабочей области углов и уменьшить влияние ошибки многолучевости при использовании в малогабаритных устройствах высокоточного позиционирования по сигналам ГНСС.

Для интегрированных устройств относительно малого габарита, когда антенна конструктивно совмещена с блоком электроники, остро стоит проблема минимизации общего габарита антенны при сохранении отношения «низ-верх» порядка -12...-15дБ в направлениях, близких к анти-зениту (надиру). Эти цифры приняты на практике для уменьшения ошибки многолучевости и являются достаточными для обеспечения сантиметровой точности позиционирования [6]. Однако экраны типичных микрополосковых (пластинчатых) антенн размером менее  $\frac{1}{2}$  длины волны таких характеристик не обеспечивают [1,6].

Была рассмотрена система (рис.12), состоящая из пластинчатой антенны 1, установленной на проводящий корпус интегрированного приемника 2,4 и вертикального полупрозрачного экрана 5. Корпус

имеет поперечник порядка  $1/3\lambda$  на нижней границе диапазона. Экран 5 состоит из четырех ребер, симметрично расположенных по периметру корпуса 4 (рис.12). В составе системы использовалась двухдиапазонная пластинчатая антенна с искусственным диэлектриком 3 [6].

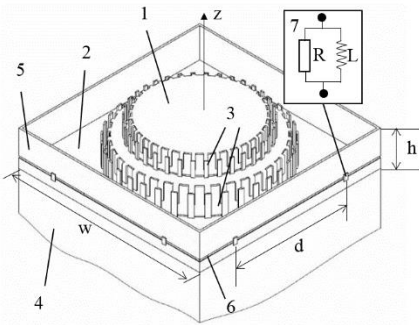


Рис.12 Эскиз конструкции.

1-антенный элемент, 2-плоский проводящий экран, 3-подложка из искусственного диэлектрика, 4-корпус приемника, 5-вертикальный полупрозрачный экран, 6-щель, 7-наборы сосредоточенных компонентов.

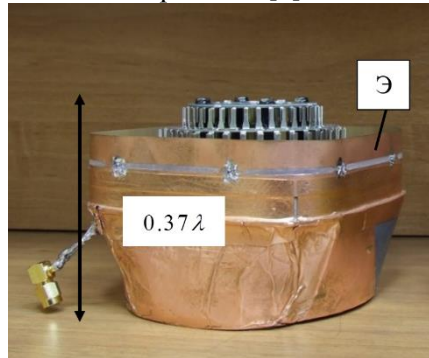


Рис.13 Экспериментальный прототип антенной системы.  
Э – вертикальный полупрозрачный экран.

Каждое ребро представляет из себя печатную плату из лавсана с щелевой структурой 6 (рис.12), в которую включены наборы сосредоточенных компонентов 7 (резистор  $R$  и индуктивность  $L$ , включенные параллельно). Номиналы компонентов и период их размещения обеспечивают необходимый импеданс в щели экрана в НЧ диапазоне ГНСС (1165-1300МГц). Параметры были синтезированы в среде CST. В соответствии с рис.12:  $w=0.43\lambda$  – ширина корпуса,  $d=0.21\lambda$  – расстояние между соседними наборами компонентов,  $h=0.05\lambda$  – высота ребра. Указанная длина волны соответствует центральной частоте диапазона (1225МГц). По результатам синтеза был построен экспериментальный прототип (рис.13), где антенна помещена в состав корпуса интегрированного устройства, а в целях подавления КУ в задней полусфере по периметру корпуса присутствует экран (Э) с щелью и впаянными в неё сосредоточенными компонентами. Натурные испытания подтвердили правильность расчетных моделей. На Рис.14 приведены экспериментально измеренные ДН на частоте 1225 МГц для двух типов поляризации: RHCP – правая круговая и LHCP – левая круговая. ДН в случае отсутствия вертикального полупрозрачного экрана приведены пунктиром (случай а), а при наличии экрана - сплошной кривой (случай б). Так, в передней полусфере ДН по правой

круговой поляризации для случаев а) и б) совпадают. В области задней полусферы в случае б) происходит подавление левой круговой поляризации на величины порядка 10дБ в сравнении со случаем а). На рис.15 приведена зависимость степени подавления поля в направлении надира по отношению к полю в зените  $DU(90^\circ)$  от частоты в полосе 1145..1305МГц. В полосе частот порядка 70МГц (1210-1280 МГц) величина  $DU(90^\circ)$  не хуже -16дБ, а в диапазоне частот сигналов GPS/ГЛОНАСС L2 (1215-1260 МГц) степень подавления заднего поля достигает величин порядка -17дБ и лучше.

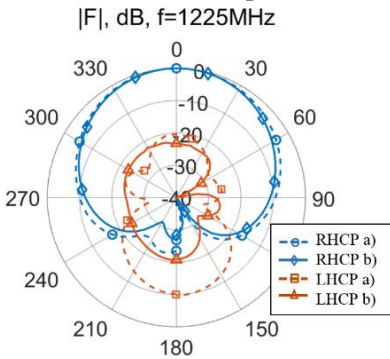


Рис. 14 ДН  $|F(\theta)|$  на частоте 1225МГц. RHCP - правая круговая поляризация, LHCP – левая круговая поляризация. а) – без экрана, б) – с экраном.

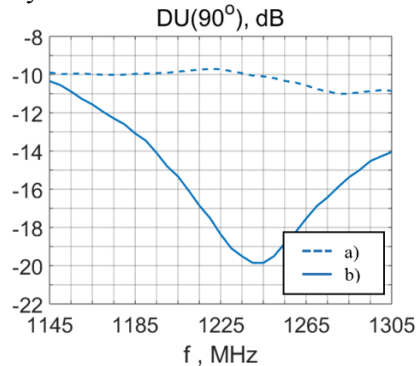


Рис. 15  $DU(90^\circ)$  в НЧ диапазоне ГНСС (1150..1300МГц). а) - без экрана, б) - с экраном.

Также было проведено исследование влияния полупрозрачного экрана на КПД антенной системы. Для этого с помощью навигационного приемника были измерены отношения сигнал-шум с использованием эталонной антенны и экспериментального макета. Различий по отношению к стандартной геодезической антенне не выявлено, что указывает на отсутствие заметных вносимых полупрозрачным экраном потерь и дополнительного рассогласования антенны с трактом. Для обеспечения одновременной работы экрана в двух поддиапазонах частот, конструкция была доработана созданием двух импедансных щелей. Для прототипа достигается подавление поля в надира по отношению к полю в зените на величины порядка -13дБ в НЧ (1165..1300МГц) и ВЧ (1558..1605МГц) диапазонах ГНСС.

Таким образом, предложенная конструкция компактной антенной системы с вертикальным экраном позволила вдвое уменьшить габарит антенной части устройства по высоте в сравнении с существующими образцами [6]. Достигнутые характеристики являются достаточными

для достижения сантиметровой точности позиционирования. На основании приведенных результатов подана заявка на патент [5].

В **заключении** формулируются основные выводы по результатам проведенных исследований:

1. Разработаны аналитические и численные процедуры синтеза вогнутых полупрозрачных экранов для уменьшения излучения антенн в нерабочую область углов. Выполнены расчеты характеристик экранов, разработаны экспериментальные макеты и проведены натурные испытания.
2. Сформулирована аналитическая процедура синтеза импеданса полупрозрачного экрана в приближении геометрической оптики (ГО). Здесь реализуется ДН с резкой отсечкой при пересечении зоны тени при чисто активном распределении импеданса. За пределами применимости приближения ГО построена численная процедура синтеза с использованием алгоритмов глобальной оптимизации и методов регуляризации.
3. Показано, что основным параметром, определяющим реализуемые величины отсечки, является расстояние от источника до экрана в плоском и радиус экрана в вогнутом случаях соответственно. Для достижения отсечки порядка  $-40\text{дБ}$  в угловом секторе  $+10$  градусов относительно желаемой границы зоны тени, радиус вогнутого экрана достигает порядка 20 длин волн, а для отсечки в  $-20\text{дБ}$  порядка 2 длин волн. При этом возмущение ДН в рабочей области углов вследствие переотражений от металлической части экрана незначительно. Достигнутые характеристики являются недостаточными для миллиметровой точности позиционирования в дифференциальном режиме.
4. Предложена новая конструкция компактной антенной системы с вертикальным полупрозрачным экраном, позволяющая вдвое уменьшить габарит антенной части высокоточного навигационного приемника по сравнению с существующими образцами со встроенными средствами подавления многолучевости. Установлены характеристики полупрозрачного экрана, позволяющие снизить коэффициент усиления антенны в нерабочей области углов до значений порядка  $-13\text{дБ}$  в двух диапазонах частот L1 и L2. Предложенная антенная система с экраном обладает характеристиками, необходимыми для обеспечения сантиметровой точности позиционирования в дифференциальном режиме.

5. Основные результаты работы подтверждены строгим электродинамическим моделированием и натурными экспериментами.

Основные результаты работы изложены в следующих **публикациях**:

#### **Из перечня ВАК:**

1. Татарников Д.В., **Генералов А.А.**, Вогнутые полупрозрачные экраны для отсечки поля в нерабочей области углов антенны, М.: Радиотехника, Антенны, №10, 2018, с.3-14.
2. Татарников Д.В., **Генералов А.А.**, Вогнутые полупрозрачные экраны для отсечки поля в зоне тени, Журнал радиоэлектроники [электронный журнал].№1, 2018, <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/7/text.pdf>
3. Татарников Д.В., **Генералов А.А.**, Синтез полупрозрачного плоского транспаранта, формирующего ДН с отсечкой. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал].№2, 2017, <http://jre.cplire.ru/jre/feb17/7/text.pdf>

#### **Патенты:**

4. Tatarnikov D., **Generalov A.**, Chernetskiy I., “Antenna radomes forming a cut-off pattern”, патент US 15124071 B2, 23.04.2019.
5. Tatarnikov D., **Generalov A.**, Astakhov A., “Compact integrated GNSS antenna system with vertical semitransparent screen for reducing multipath reception”, PCT RU 2018/000240, заявка от 18.04.2018.

#### **Публикации Scopus:**

6. Tatarnikov D.V., **Generalov A.A.**, Semi-transparent lossy surfaces for cutoff of the fields in microwave shadow domain, METANANO 2019 - IV International Conference on Metamaterials and Nanophotonics, St. Petersburg, Russia, 2019.
7. Tatarnikov D., **Generalov A.**, Voskresenskiy D., Synthesis of Microwave Concave Semitransparent Screen for Reduction of Radiation in the Shadow Domain, Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring), Rome, Italy, 2019.
8. Tatarnikov D.V., Astakhov A.V., Stepanenko A.P., **Generalov A.A.**, Periodic structures, high impedance and semitransparent surfaces in antennas for centimeter and millimeter precision of positioning with the Global Navigation Satellite Systems, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, Vol.1092, 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1092/1/012150>.

9. Tatarnikov D., **Generalov A.**, On impedance synthesis of a semitransparent screen for high-precision navigation antennas, Proc. of 2018 14th International Conference "Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems" (Pyatnitskiy's Conference) (STAB), M.: IEEE, 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8408406>.
10. Tatarnikov D., **Generalov A.**, Semitransparent screen for cutoff of the far fields in the shadow domain. / Proc. of Progress in Electromagnetic Research Symposium PIERS 2017, St. Petersburg, Russia, pp.800–05.

#### Другие публикации:

11. Татарников Д.В., **Генералов А.А.** Характеристики вогнутых полупрозрачных экранов для подавления поля излучения в зоне тени, Иосифьяновские чтения, Истра: АО"НИИЭМ", 2017, с.290-94.
12. Татарников Д.В., **Генералов А.А.**, Вогнутые полупрозрачные экраны для отсеки поля в зоне тени / V Всероссийская Микроволновая Конференция, ИРЭ РАН, г.Москва, 2017, с.47-51.

#### Список цитируемой литературы:

1. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D., GPS Satellite Surveying, 4-th Ed., Wiley, New York, 2015. -807 p.
2. Teunissen P., Montenbruck O., Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, 1st ed., Springer, New York, 2017 – 1327 p.
3. Татарников Д.В., Чернецкий И.М., Затенение полуплоскостью с полупрозрачным окончанием, Журнал Радиоэлектроники ИРЭ РАН, №12, 2012, стр. 1684-1719.
4. Lopez A.R., Sharp Cutoff Radiation Patterns, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1979, 52(1), pp. 820-824.
5. Кабанихин С.И., Обратные и некорректные задачи, Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009, 457 с.
6. Татарников Д.В., Астахов А.В., Степаненко А.П., Шаматульский П.П., Емельянов С.Н., Антенные технологии высокоточного спутникового позиционирования, М.: Радиотехника, Антенны, №10(230), 2016, стр. 77-91.
7. Электродинамика антенн с полупрозрачными поверхностями / Под ред. Б.З. Каценеленбаума и А.Н. Сивова, Москва, Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 176 с.
8. Tatarnikov D., Astakhov A., Large Impedance Ground Plane Antennas for mm-Accuracy of GNSS Positioning in Real Time, Proc. of Progress in Electromagnetic Research Symposium PIERS 2013, Stockholm, Sweden, pp.1825-1829.