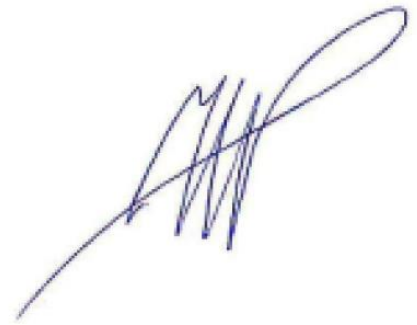


На правах рукописи



**Чернецкий Иван Мирославович**

***АНТЕННЫ И ЭКРАНЫ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО  
СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ***

Специальность 05.12.07 –«Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

**Автореферат**

**диссертации на соискание учёной степени**

**кандидата технических наук**

Москва –2015

Работа выполнена на кафедре радиофизики, антенн и микроволновой техники Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель - доктор технических наук, доцент  
Татарников Дмитрий Витальевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук  
Курочкин Александр Петрович

- кандидат технических наук  
Инденбом Михаил Вульфович

Ведущая организация ОАО «Радиотехнический институт  
имени академика А.Л. Минца» г.  
Москва

Защита состоится «01» декабря 2015 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при Московском авиационном институте по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института (125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4) и на сайте <http://www.mai.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015г.

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



Сычёв М. И.

## **I. Общая характеристика работы**

### ***Актуальность темы диссертации***

В настоящее время позиционирование по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) относится к числу важных областей практики и прикладных исследований. К области высокоточного позиционирования относят устройства, обеспечивающие ошибку порядка 1...2см в режиме реального времени. В отличие от устройств бытового назначения, высокоточные системы работают в дифференциальном режиме. Здесь измерения фазы несущей передаются с базовой станции на подвижный объект (ровер) по радиоканалу. Путем соответствующей обработки, аппаратура позиционирования позволяет определить вектор смещения ровера относительно базы. Антенны позиционирования обладают гладкой ДН в верхней (рабочей) полусфере для приема сигналов спутников, находящихся выше местного горизонта. Антенны предназначены для приема сигналов круговой поляризации правого вращения.

Основной нескомпенсированной ошибкой дифференциального метода является ошибка многолучевости, когда антенна позиционирования принимает не только прямой сигнал со спутников, но также и сигналы, отраженные от местных предметов. В наилучших условиях открытой местности единственным источником отражений является подстилающая поверхность земли. Условия позиционирования на открытой местности являются типичными для применений в целях геодезии, для мониторинга сложных инженерных сооружений, для управления машинами сельскохозяйственного назначения, а также для ряда исследовательских направлений. Для всех этих применений остро стоит вопрос повышения точности позиционирования в реальном времени. Способ повышения точности состоит в уменьшении ошибки многолучевости. Для подавления отражений от подстилающего рельефа

антенна позиционирования должна иметь резкое падение (отсечку) КУ при пересечении местного горизонта.

Антенна с равномерной ДН в верхней (рабочей) полусфере с отсечкой КУ при пересечении местного горизонта представлена в работе Lopez. Эта антенна представляет собой вертикальную антенную решетку длиной (высотой) более 10 длин волн. Возможности применения этой антенны для практики систем позиционирования не публиковались. Татарников и Астахов рассмотрели антенну с импедансным экраном диаметром порядка 15 длин волн (3 метра). В их работах показано, что такая антенна обеспечивает ошибку многолучевости ниже фазового шума системы. При этом экспериментально достигнута среднеквадратичная ошибка позиционирования в 0.7мм при условии сглаживания фазовых шумов за время порядка 1 минуты. Однако, указанные антенны обладают весьма существенным габаритом. Возможности применения этих антенн для целей практического позиционирования ограничены.

Таким образом, актуальным направлением является исследование возможностей построения антенн, пригодных для практического позиционирования, и имеющих равномерную ДН в верхней (рабочей) полусфере с резким уменьшением (отсечкой) при пересечении местного горизонта.

С другой стороны, в связи с продвижением методов и устройств высокоточного позиционирования в практику, нарастает число применений, когда, напротив, позиционируемый объект работает в сложных условиях быстропеременных затенений прямого сигнала спутника. К таковым, например, относится работа автоматической сельскохозяйственной машины (трактора) на границах рабочего хода (поля), когда машина оказывается под кронами зеленых насаждений. В этих условиях непосредственное позиционирование по сигналам спутников с указанной точностью оказывается невозможным. Для поддержания

работоспособности систем позиционирования применяются специальные методы и алгоритмы комплексирования позиционирования по спутникам с другими системами. Однако разработка таких устройств и алгоритмов комплексирования сопряжена со значительными трудностями, связанными с невозможностью обеспечения повторяемости эксперимента. В связи с этим, для практики разработки и испытаний систем спутникового позиционирования актуальной является задача разработки искусственных препятствий для спутниковых сигналов, по своим свойствам приближенным к натуральным – то есть обеспечивающих резкие и хаотические по характеру возмущения спутниковых сигналов, однако, не подверженных нестабильностям природного характера. Сказанное определяет две основные

### ***Цели работы***

1. Поиск путей построения антенн, пригодных для практики спутникового позиционирования на открытых пространствах с суб-сантиметровой точностью в режиме реального времени.
2. Поиск путей построения искусственных препятствий, по своим проявлениям приближенным к естественным зеленым насаждениям, а именно, обеспечивающих резкие хаотичные возмущения спутниковых сигналов по амплитуде и фазе.

Одним из перспективных направлений для достижения суб-сантиметровой точности позиционирования в практических условиях является исследование возможностей применения антенн бегущей волны. Антенны бегущей волны известны значительное время и рассматривались в ряде классических работ отечественных и зарубежных авторов. Эти антенны выгодно отличаются простотой системы возбуждения и общей относительной простотой конструкции. Однако, антенн бегущей волны, удовлетворяющих перечисленным выше требованиям к ДН, в настоящее время не опубликовано.

Для гибкого управления амплитудно-фазовым распределением в антенне бегущей волны перспективным является применение современных материалов с переменной прозрачностью. Основные свойства таких материалов рассматривались в работах Конторовича, Каценеленбаума, Третьякова, Пономарева, Trentini, Ziolkowski и других.

Другим направлением, представляющим интерес, является исследование возможности оснащения существующих практических антенн позиционирования дополнительными экранами в виде вертикальных ребер для повышения крутизны отсечки КУ антенны при пересечении местного горизонта. Возможности уменьшения затекания поля за контур зеркальных антенн путем дополнения контура зеркала полупрозрачными структурами рассматривались Боровиковым, Будагяном и другими. Представляет интерес развитие этих подходов для обеспечения отсечки усиления антенн позиционирования в требуемой области углов.

Полупрозрачные материалы, упомянутые выше, представляют собой удобные структуры для реализации искусственных укрытий для испытательных полигонов. Известны применения полупрозрачных материалов для управления диаграммой направленности антенны. В частности, Каценеленбаум и Ziolkowski рассматривали возможности создания остронаправленного излучения с помощью слабонаправленных возбуждателей. По аналогии с оптикой, такие устройства получили наименование резонаторов Фабри-Перо. Для реализации целей данной диссертации по разработке искусственных препятствий, рассматриваются резонаторы указанного типа с размерами, значительно превышающими длину волны.

Таким образом, *задачи, решаемые в диссертационной работе*, состоят в следующем:

1. Оценка потенциальных возможностей реализации ДН с отсечкой при пересечении местного горизонта с помощью антенны бегущей волны

путем рассмотрения математической модели в виде плоскопараллельного волновода с полупрозрачными стенками.

2. Разработка практического воплощения антенны бегущей волны в виде четырехзаходной спирали с включенными реактивными компонентами.
3. Разработка численной математической модели возбуждения системы вертикальных ребер с полупрозрачными окончаниями и модели экрана антенны позиционирования с такими ребрами. Проведение расчетов и экспериментальных исследований таких экранов.
4. Создание математической модели возбуждения резонатора типа Фабри-Перо с размерами, значительно превышающими длину волны.
5. Разработка полупрозрачного укрытия антенны позиционирования и полевые испытания таких укрытий с целью получения возмущений в ДН приемной антенны, приближенных к естественному лесу.

Для решения сформулированных задач в работе применяются обоснованные *методы* математического моделирования и разработки алгоритмов и программ, расчеты с помощью пакетов программ электродинамического уровня и экспериментальные исследования в безэховой камере и на испытательном полигоне.

*Научная новизна* работы состоит в следующем:

1. Показана возможность получения ДН, равномерной в верхней (рабочей) полусфере с отсечкой на 20дБ при пересечении местного горизонта с помощью антенн бегущей волны габаритом порядка 1.5 длины волны. Разработан образец такой антенны в виде четырехзаходной спирали с включенными реактивными компонентами.
2. Показана возможность увеличения крутизны спада КУ при пересечении местного горизонта у слабонаправленных антенн позиционирования

путем введения дополнительного экрана в виде системы вертикальных ребер с полупрозрачными окончаниями.

3. Выявлена возможность применения резонаторов типа Фабри-Перо большого электрического размера для внесения возмущений в ДН антенны позиционирования, аналогичных естественным зеленым насаждениям.

***Практическая значимость работы*** состоит в следующем:

1. Достигнута суб-сантиметровая точность спутникового позиционирования на открытых пространствах в режиме реального времени с помощью антенн бегущей волны габаритом порядка 1.5 длины волны.
2. Показана возможность улучшения характеристик подавления многолучевости антеннами спутникового позиционирования за счет применения экранов в виде системы вертикальных ребер с полупрозрачными окончаниями.
3. Разработаны искусственные укрытия для испытательных полигонов спутникового позиционирования, приближенные к естественным зеленым насаждениям по степени влияния на затенение приемной антенны.

***Реализация и внедрение результатов работы.*** Построенные опытные образцы спиральной антенны и искусственных укрытий использованы в НИОКР, проводимых компанией «Топкон Позиционинг Системс» в направлении совершенствования автоматической и полуавтоматической строительной и сельскохозяйственной техники. Результаты из глав 2 и 3 диссертации были использованы для подготовки и чтения лекций по курсу «Теоретические основы технической электродинамики антенн» на кафедре



№406 МАИ. Соответствующие Акты о внедрении приведены в приложениях к диссертации.

**Достоверность** полученных результатов обусловлена применением апробированных методов математического моделирования и соответствия результатов расчетов экспериментально полученным данным.

**Апробация** результатов работы. Результаты работы докладывались на 2 международных конференциях.

**Публикации.** По результатам выполненной работы опубликованы 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 2 статьи в сборниках трудов международных конференций, поданы 3 заявки на патенты.

***Основные положения, выносимые на защиту.***

- антенны бегущей волны габаритом порядка 1.5 длины волны позволяющие улучшить точность позиционирования по сигналам спутников ГЛОНАСС и других систем.

- экраны в виде вертикальных ребер с полупрозрачными окончаниями, улучшающие степень подавления многолучевости антеннами позиционирования

- укрытия в виде резонаторов на основе выпуклой полупрозрачной поверхности радиусом порядка 10 длин волн для испытательных полигонов аппаратуры позиционирования, вносящие искажения в ДН приемной антенны, сходные с естественными зелеными насаждениями.

***Объем и структура работы.***

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и 7 приложений. Текст работы изложен на 137 страницах

машинописного текста, общий объем 198 страниц машинописного текста, работа включает 100 рисунков, список литературы включает 56 наименований.

*Личный вклад автора* состоит в разработке математических моделей, алгоритмов и программ, проведении расчетов, разработке экспериментальных макетов, проведении натуральных экспериментов и обработке полученных результатов.

## II. Краткое содержание работы

### *Введение*

Во введении обоснована актуальности темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведена структура диссертации, форма апробации и внедрения результатов.

### *ГЛАВА 1. Антенны бегущей волны, формирующие ДН П-образной формы.*

В начале главы исследуется математическая модель антенны бегущей волны в виде плоскопараллельного волновода с полупрозрачными стенками. Рассматриваемая геометрия изображена на рис. 1.1. Здесь плоскопараллельный волновод возбуждается ТЕМ-волной, распространяющейся в положительном направлении оси  $z$ . Ширина волновода  $a$  выбирается таким образом, чтобы все высшие моды были закритическими. Полупрозрачные окончания волновода имеют длину  $h$  и обозначены на рис. 1.1 штриховой линией. Под полупрозрачностью понимается выполнение граничных условий вида:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_\tau^+ &= \mathbf{E}_\tau^- = \mathbf{E}_\tau \\ [\mathbf{n}_0, \mathbf{H}_\tau^+ - \mathbf{H}_\tau^-] &= \mathbf{j}_s^e = \mathbf{E}_\tau / Z_L \end{aligned} \quad (1.1)$$

В выражении (1.1)  $\mathbf{E}(\mathbf{H})_{\tau}^{+,-}$  - тангенциальные компоненты электрического и магнитного полей по обе стороны поверхности,  $\mathbf{n}_0$  - единичный вектор нормали, направленный от отрицательной "-" к положительной "+" стороне поверхности (см. рис. 1.1),  $\mathbf{j}_s^e$  - поверхностная плотность электрического тока, скобки  $[ \ ]$  - векторное произведение,  $Z_L$  - импеданс тонкого слоя. Предполагается, что импеданс варьируется в направлении  $z$ .

Для моделирования излучения волновода применяется метод моментов. Для этой цели вводится идеально проводящая перегородка между стенками волновода при  $z=0$ . Расстояние  $L$  выбирается достаточно большим, чтобы выполнялись два условия: а) в сечении  $z=0$  распространяются только падающая и отраженная ТЕМ-волны; б) электрические токи, протекающие на внешней стороне волновода в области  $z < 0$  затухают достаточно для того, чтобы вкладом этих токов в диаграмму направленности можно было пренебречь. Для компенсации идеально проводящей перегородки, вводится эквивалентный магнитный ток по обе стороны от перегородки. Магнитный ток показан тонкими пунктирными линиями на рис. 1.1 В области  $z > 0$  вводятся базисные функции электрического и магнитного тока. Амплитуды этих токов определяются путем решения системы линейных уравнений. По полученным формулам составлены алгоритмы и программы. В результате проведенных расчетов, профиль импеданса полупрозрачной части полуплоскостей оптимизирован таким образом, чтобы были достигнуты ДН и отношение низ/верх, показанные на рис. 1.2. В легенде графиков, соответствующая ширина волновода показана в долях длины волны. Таким образом, отношение верх/низ не превышает -20дБ по абсолютной величине, начиная с 10 градусов. При этом габаритный размер полупрозрачной части антенны составляет порядка 1.5 длины волны.

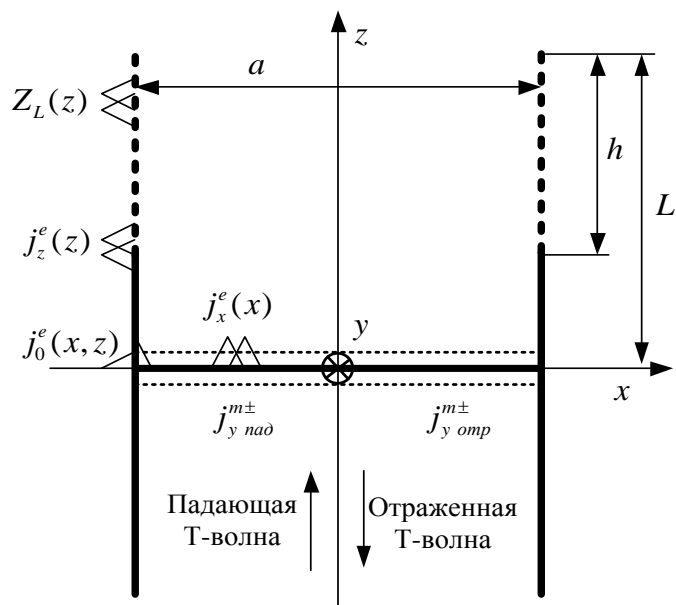


Рис. 1.1. Геометрия плоскопараллельного волновода с полупрозрачными стенками

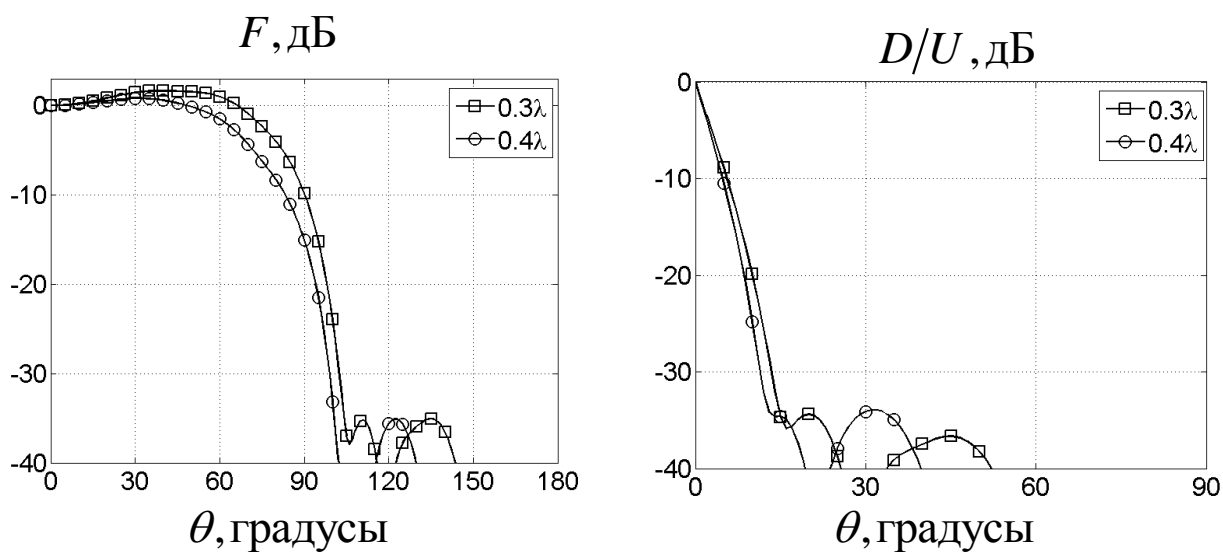


Рис. 1.2. Результаты вычислений ДН ( $F$ ) и отношения низ/верх ( $D/U$ ) для плоскопараллельного волновода с полупрозрачными стенками

Для практической реализации принципа антенны бегущей волны была синтезирована спиральная антенна с включенными в витки реактивными

компонентами. Общий вид антенны показан на левой части рис. 1.3. Антенна предназначена для полосы L1 GNSS (1560 ... 1610MHz).



Рис. 1.3. Общий вид спиральной антенны (слева) и антенны, установленной на полигоне (справа)

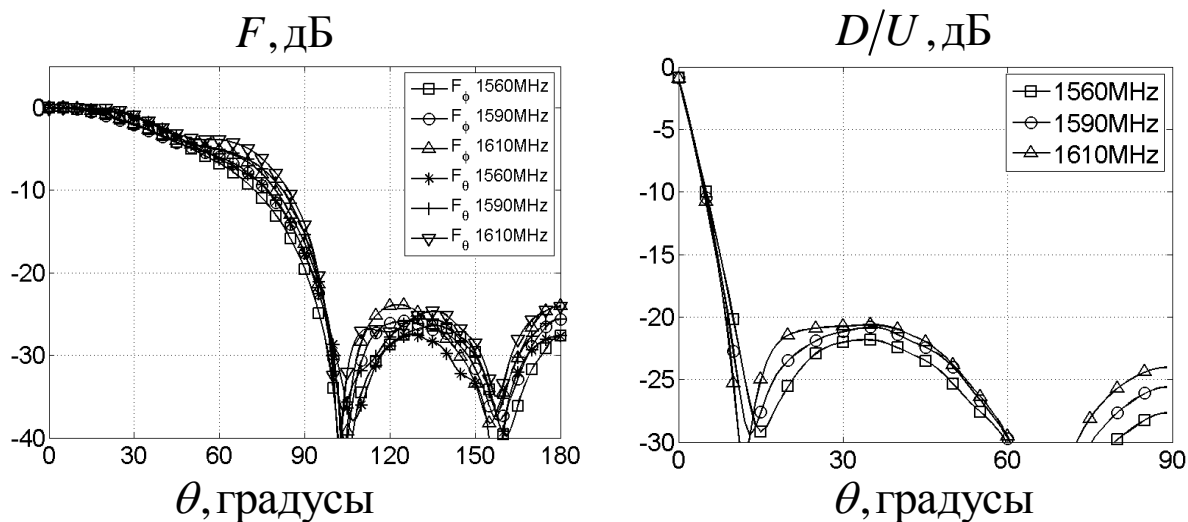


Рис. 1.4. Измеренная диаграмма направленности и отношение вниз-вверх для спиральной антенны с включенными реактивными компонентами

Измеренные диаграммы направленности этой антенны для  $\theta$ -й и  $\varphi$ -й линейно поляризованных компонент и отношения вниз-вверх в по полной мощности показаны на рис. 1.4. Как видно, перепад диаграммы направленности антенны от зенита до 10 градусов над горизонтом не превышает 15 дБ, что является характерным показателем антенн для спутникового позиционирования. Отношение низ-верх не превышает по абсолютной величине 20дБ, начиная от угла 10 градусов к горизонту.

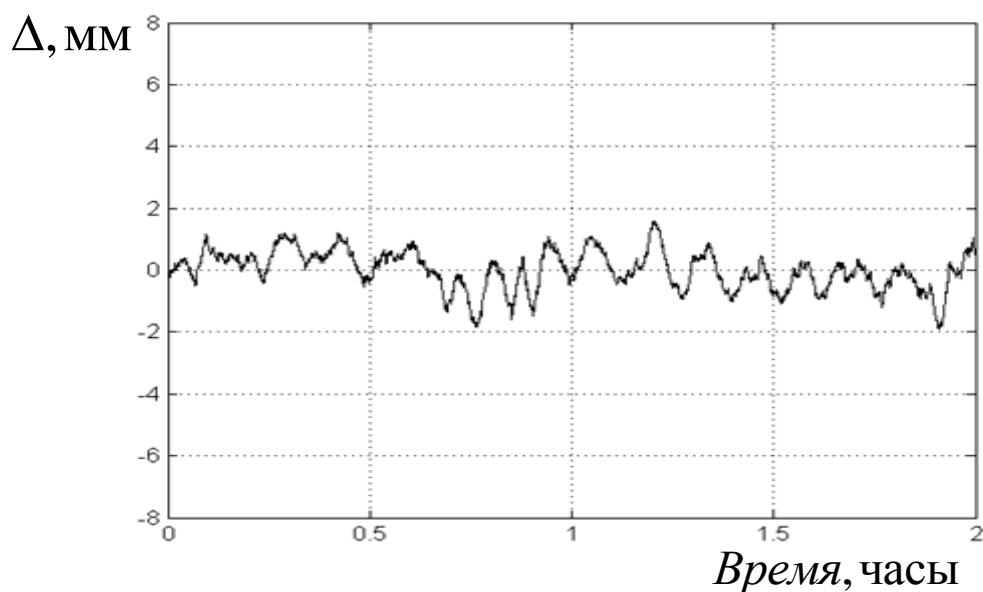


Рис. 1.5. Ошибка в режиме реального времени по вертикальной координате при сглаживании теплового шума за 1 минуту

Антенна, установленная на бетонном основании испытательного полигона, показана на правой панели рис. 1.3. При дифференциальном позиционировании, антенна базовой станции используется того же типа. Ошибка позиционирования в режиме реального времени по вертикальной координате показана на рис. 1.5. Шум системы был сглажен в пределах временного интервала порядка 1 минуты. Как видно, оставшаяся ошибка не превышает  $\pm 1.7$ мм. При этом, среднеквадратическое отклонение от точного значения оценивается в 0.65мм.

**ГЛАВА 2. Вертикальные экраны в виде ребер с полупрозрачными окончаниями для антенн позиционирования.**

Эти экраны предназначены для уменьшения ошибки многолучевости путем увеличения крутизны уменьшения КУ практических антенн при пересечении местного горизонта. В начале главы численно исследуется дифракция поля слабонаправленного источника на полуплоскости с полупрозрачным окончанием. Электродинамическая задача решается методом моментов. Геометрия модели, а также расчетные характеристики ДН и отношения низ-верх при возбуждении источником Н-поляризации для случая расстояния до источника  $a/2 = 3.75\lambda$ , показаны на рис. 2.1.

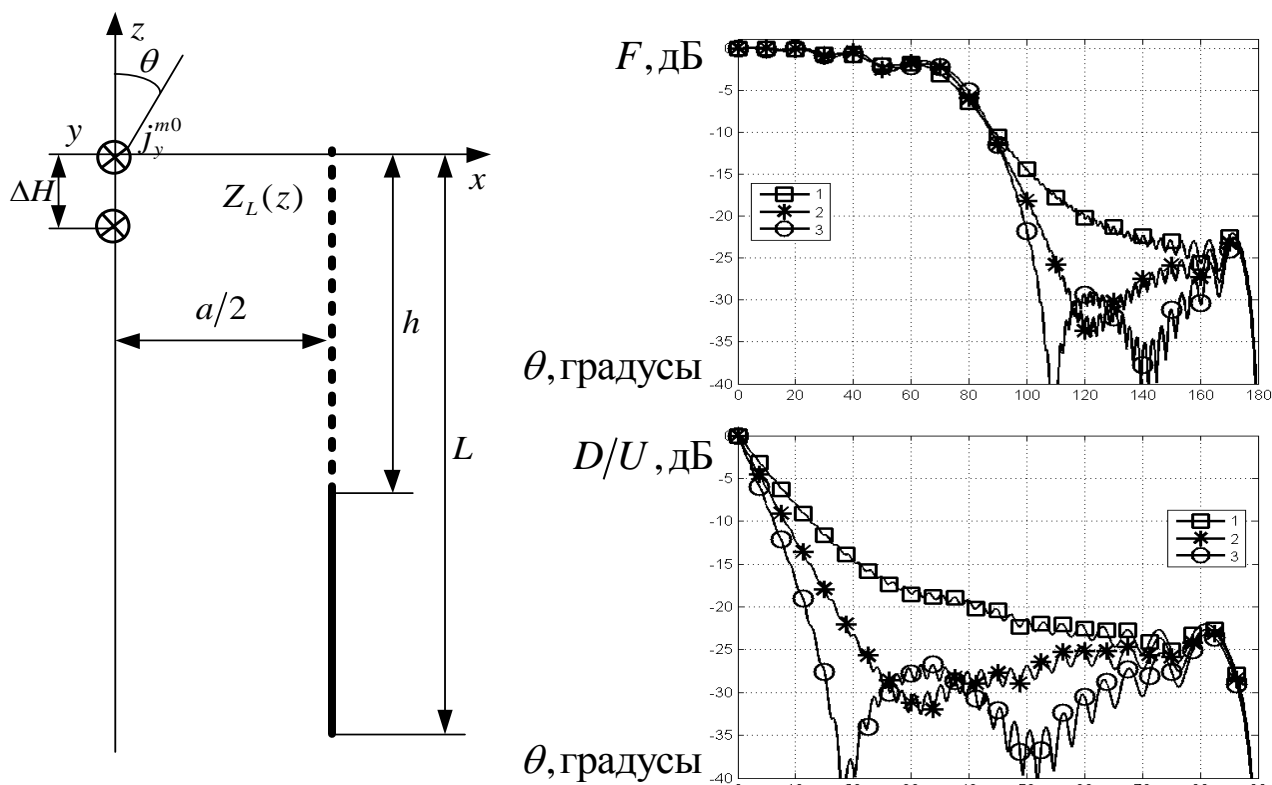


Рис. 2.1. Геометрия модели дифракции на полуплоскости, характеристики ДН и отношения низ-верх (Н-поляризация)

Кривые 1 соответствуют идеально проводящей полуплоскости. Кривые 2 и 3 соответствуют двум разным распределениям импеданса. Таким образом, обосновывается возможность синтеза профиля импеданса окончания,

обеспечивающего более быстрое затухание поля в области полутени по сравнению с идеально проводящей (металлической) полуплоскостью.

Далее исследуется возможность применения системы ребер для получения дополнительного увеличения скорости спада отношения низ-верх по сравнению со случаем одной полуплоскости с полупрозрачным окончанием при тех же габаритах. Показывается, что введение дополнительных полуплоскостей позволяет получить выигрыш порядка 3дБ.

Третий параграф Главы 2 посвящен оценке влияния замкнутого экрана с полупрозрачными ребрами (рис. 2.2).

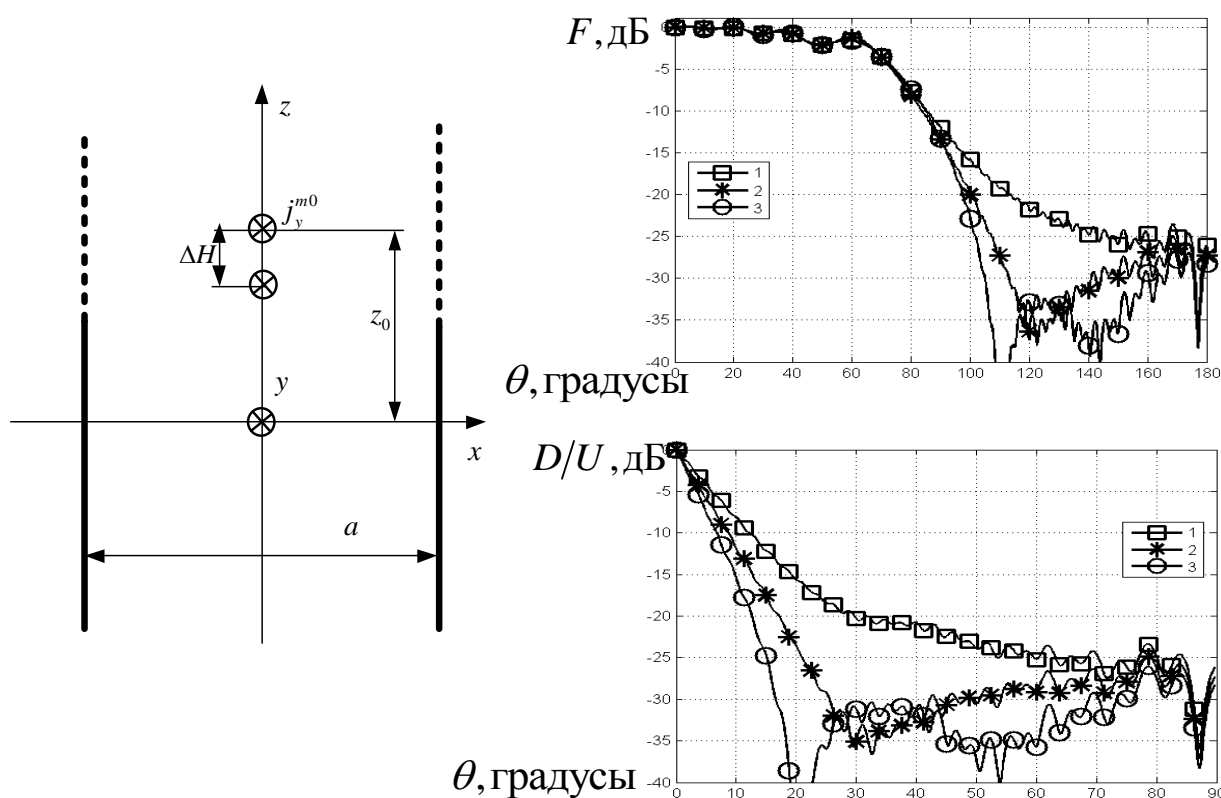


Рис. 2.2. Геометрия модели возбуждения замкнутого экрана в двумерном приближении, характеристики ДН и отношения низ-верх (Н-поляризация)

Необходимость такого рассмотрения обусловлена явлениями переотражения поля между ребрами экрана, расположенными по разные стороны от источника. Математическая модель замкнутого экрана в двумерном приближении строится



аналогично модели плоскопараллельного волновода, рассмотренной в Главе 1. Ее отличие состоит в выборе источника  $j_y^{m0}$  в виде двух нитей магнитного тока, расположенных на расстоянии  $\Delta H$  друг от друга, а также в учете высших гармоник плоскопараллельного волновода. Верхняя нить магнитного тока расположена на расстоянии  $z_0$  от начала координат.

На рис. 2.2 также показаны расчетные характеристики ДН и отношения низ-верх для случая ширины экрана  $a = 7.5\lambda$  при возбуждении источником Н-поляризации. Кривые 1 соответствуют идеально проводящему замкнутому экрану. Кривые 2 и 3 соответствуют двум разным распределениям импеданса. Из сравнения рис. 2.3 и рис. 2.1 видно, что введение замкнутого экрана не приводит к существенным изменениям ДН по сравнению с одним ребром.

Глава завершается экспериментальными исследованиями влияния экрана в виде ребра с полупрозрачным окончанием на ДН практической антенны позиционирования. Фотография установки показана на рис. 2.3.

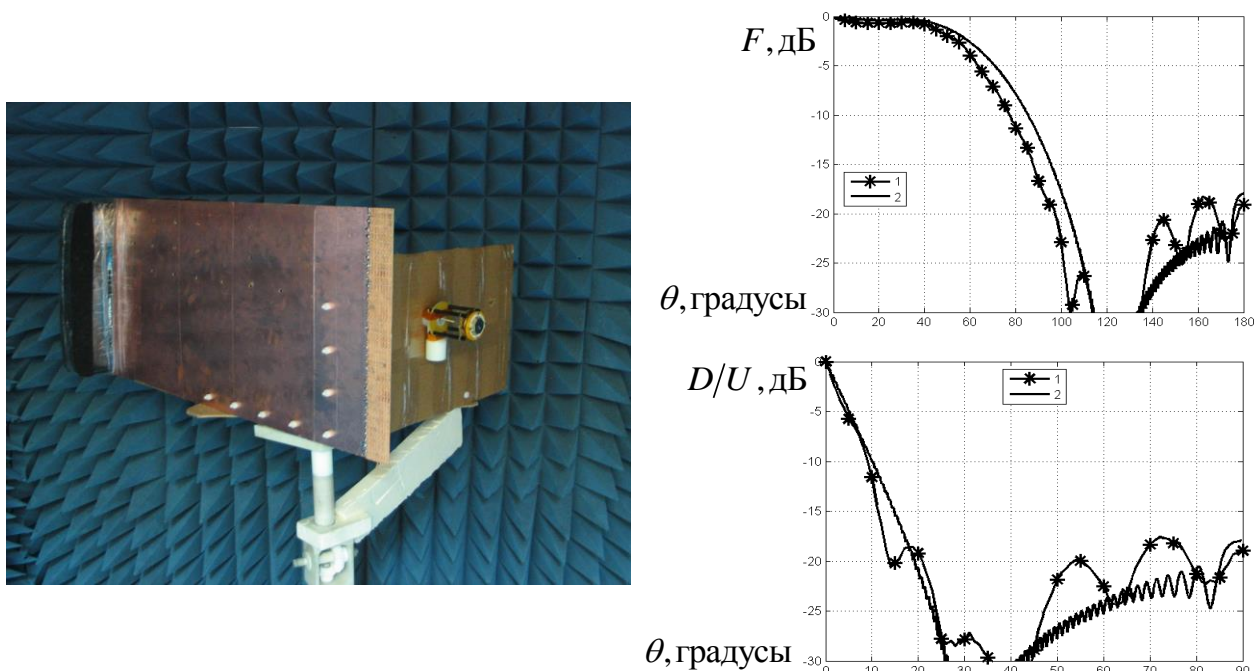


Рис. 2.3. Общий вид экспериментальной установки, экспериментальные (кривая 1) и расчетные (кривая 2) графики ДН и отношения низ-верх

Из графиков на этом же рисунке видно, что введение ребра приводит к резкой отсечке ДН антенны на величину порядка 15дБ при пересечении горизонта. Также видно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных в области углов, представляющих интерес.

### ***ГЛАВА 3. Искусственные препятствия для испытательных полигонов аппаратуры спутникового позиционирования***

Исследуемая в данной главе конфигурация представляет собой полупрозрачную полусферу большого электрического размера, размещенную над проводящим экраном (рис.3.1). Внутри образуемой полости помещается антенна позиционирования. На полупрозрачной полусфере выполняются граничные условия (1.1)

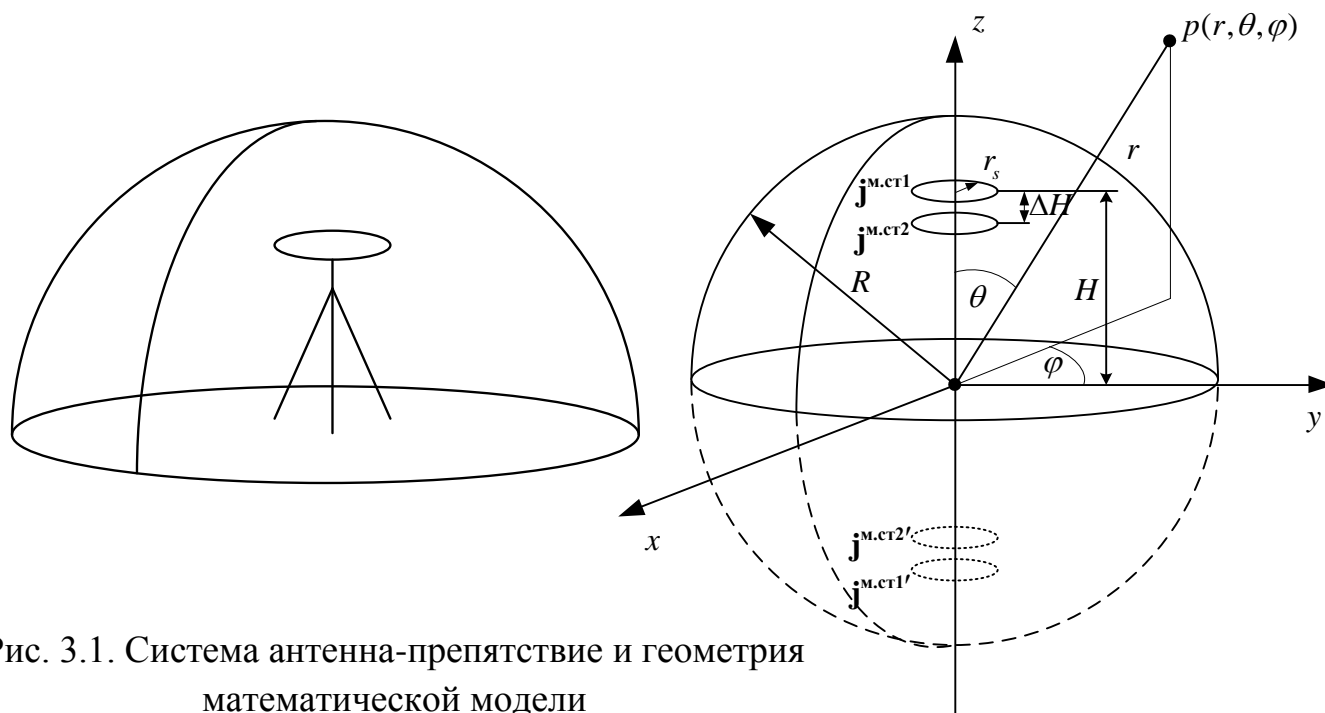


Рис. 3.1. Система антенна-препятствие и геометрия математической модели

Для решения электродинамической задачи, на высоте  $H$  внутри полости размещается модель приемной антенны ГНСС в виде двух колец магнитного тока с амплитудами  $I_1$  и  $I_2$  (правая часть рис.3.1). Указанные амплитуды

подбираются так, чтобы ДН системы из двух колец в свободном пространстве в угломестной плоскости представляла собой кардиоиду. Такая ДН свойственна антеннам позиционирования. Плотность магнитного тока источника записывается в виде

$$\mathbf{j}^{\text{м.ст}} = \mathbf{j}^{\text{м.ст}1} + \mathbf{j}^{\text{м.ст}2} = \mathbf{i}_\varphi I_1 e^{-im\varphi} \frac{\delta(r-r_1)}{r_1^2} \frac{\delta(\theta-\theta_1)}{\sin\theta_1} + \mathbf{i}_\varphi I_2 e^{-im\varphi} \frac{\delta(r-r_2)}{r_2^2} \frac{\delta(\theta-\theta_2)}{\sin\theta_2}, \quad (3.1)$$

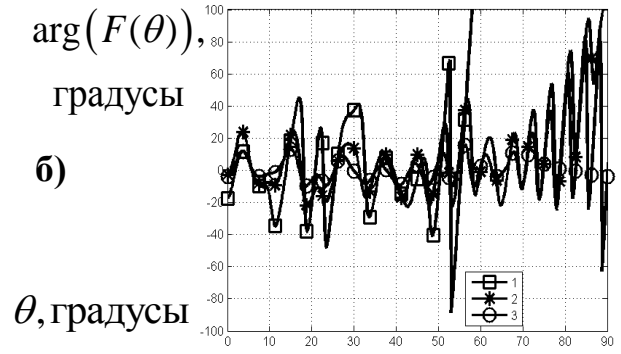
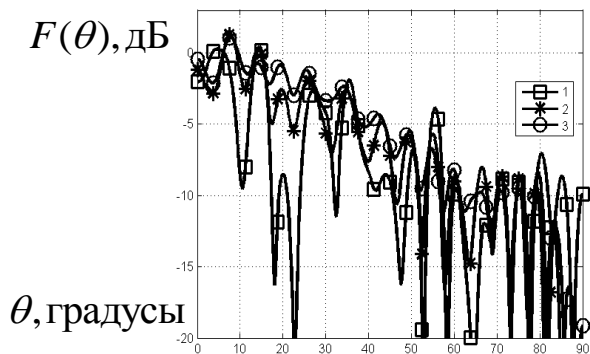
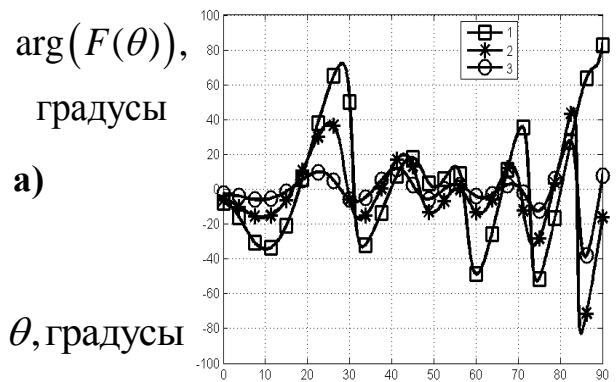
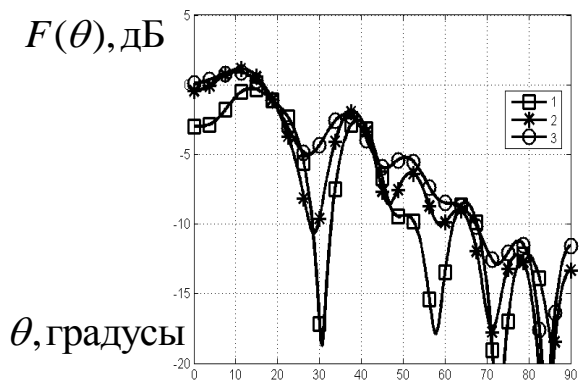
где  $I_1$  - амплитуда верхнего кольца тока;  $I_2 = I_1 e^{-i(k\Delta H + \pi)}$  - амплитуда нижнего кольца тока;  $m$  - номер азимутальной гармоники;  $\theta_1 = \arctg \frac{r_s}{H}$ ,  $\theta_2 = \arctg \frac{r_s}{H - \Delta H}$  - угломестные координаты верхнего и нижнего колец магнитного тока;  $r_1 = \frac{r_s}{\sin\theta_1}$ ,

$r_2 = \frac{r_s}{\sin\theta_2}$  - радиальные координаты верхнего и нижнего колец магнитного тока;

$\Delta H \sim 0.05\lambda$  - расстояние между кольцами магнитного тока. Задача возбуждения полости кольцом магнитного тока решается с помощью разложения на электрические и магнитные волны распространяющихся вдоль оси  $r$  в сферической системе координат. Наличие проводящего экрана учитывается методом зеркальных изображений.

В качестве поверхности с требуемой для реализации искусственного препятствия прозрачностью в работе использована щелевая структура с квадратными ячейками с малым, по сравнению с длиной волны, шагом. Структура расположена на диэлектрической подложке.

На рис. 3.3а-б представлены расчетные амплитудные и фазовые ДН системы антенна-препятствие. Параметры, использованные при расчете, указаны в подписи. Здесь  $W_0$  - волновое сопротивление свободного пространства,  $Z_L$  - импеданс препятствия,  $\lambda$  - длина волны в вакууме,  $R$  - радиус препятствия,  $H$  - высота поднятия антенны над землей.



а)  $R = 5.23\lambda$ ,  $R - H = 2.61\lambda$ . 1:  $Z_L = -0.4iW_0$ , 2:  $Z_L = -0.7iW_0$ , 3:  $Z_L = -1.2iW_0$

б)  $R = 10.46\lambda$ ,  $R - H = 2.61\lambda$ . 1:  $Z_L = -0.4iW_0$ , 2:  $Z_L = -0.7iW_0$ , 3:  $Z_L = -1.2iW_0$

Рис. 3.3. Результаты расчета характеристик системы антенна-препятствие

Таким образом, данная конфигурация обеспечивает возможность реализации ДН системы антенна-препятствие с резкими возмущениями по амплитуде и фазе, по характеру близкими к хаотическим.

Фотография созданного опытного образца препятствия показана на рис. 3.4. Препятствие представляет собой полусферу радиусом 2 метра. Полусфера выполнена из щелевой сетки с импедансом  $Z_L \approx -0.4iW_0$ . Испытуемая антенна типа Торсон G3-A1 помещалась внутрь полусферы на штативе на высоте порядка 1.5 метра над землей. Антенна подключена к приемнику геодезического класса точности типа Торсон NET-G3A. Для сравнения антенна такого же типа располагалась в лесу.



а)



б)

Рис. 3.4. Фотография препятствия (а) и антенны, установленной в лесу (б)

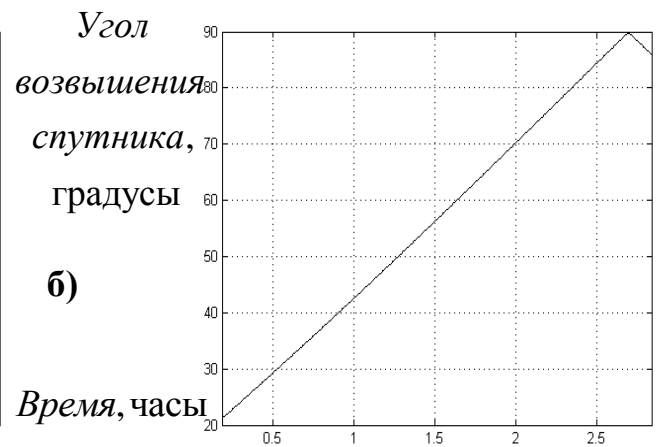
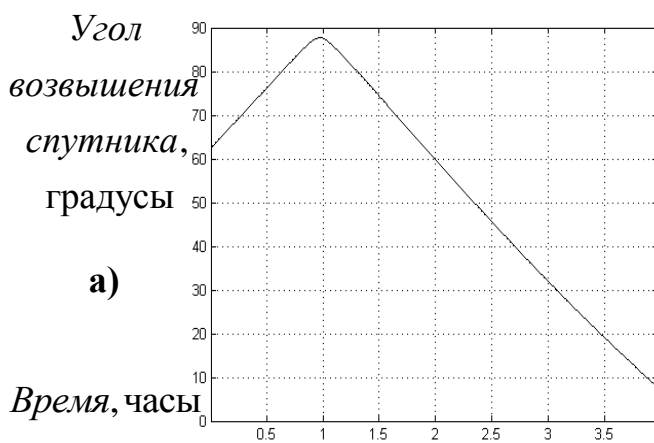


Рис. 3.5. Зависимость угла возвышения спутника от времени

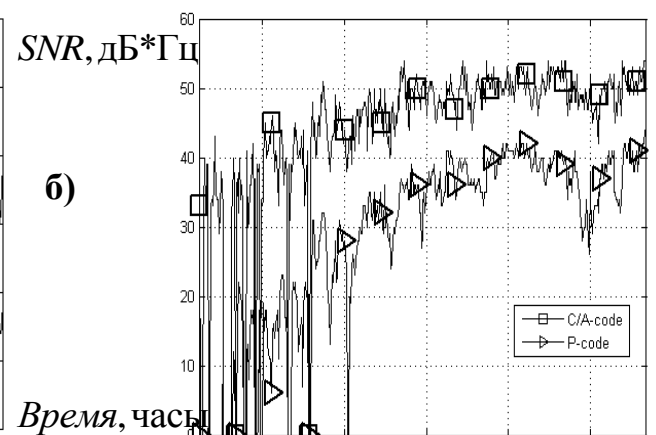
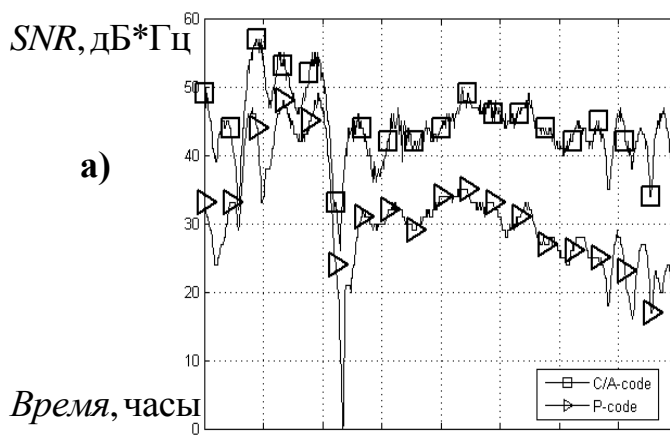


Рис. 3.6 Зависимость отношения сигнал-шум от времени

Из сравнения графиков рис. 3.6а-б видно, что установка антенны под полупрозрачным препятствием и в лесу приводит к осцилляциям отношения сигнал/шум (SNR) сходным по характеру, однако, для не слишком малых углов возвышения, уровень осцилляций в условиях действия препятствия составляет порядка 20дБ, а при нахождении приемника в данном лесу - 10дБ. Расчеты показали, что, для данного конкретного участка леса, лучшим приближением является величина импеданса  $Z_L \approx -0.7iW_0$ . Таким образом, искусственное препятствие может имитировать различные естественные препятствия. Соответствие между измерениями под искусственным препятствием и измерениями в условиях действия естественных препятствий достигается путем выбора соответствующих радиуса и импеданса препятствия.

### ***Основные результаты и выводы***

В работе рассмотрены антенны и экраны для систем спутникового позиционирования, формирующие ДН с отсечкой при пересечении местного горизонта и искусственные препятствия для испытательных полигонов. Основные выводы по работе состоят в следующем.

1. Разработанная модель антенны бегущей волны в виде плоскопараллельного волновода с полупрозрачными стенками показала, что равномерная ДН в верхней (рабочей) полусфере с падением КУ на 20 дБ при пересечении горизонта достигается при габаритном размере антенны порядка 1.5 длины волны. Эти характеристики сохраняются в полосе частот 1550...1620МГц.
2. Предложена спиральная антенна бегущей волны с включенными реактивными компонентами, обеспечивающая неравномерность ДН в верхней (рабочей) полусфере в пределах 12...15дБ и резкое уменьшение КУ на 20дБ в секторе углов +/- 10 градусов

относительно местного горизонта. Антенна работает в полосе частот сигналов ГНСС L1.

3. В результате полевых испытаний спиральной антенны в составе аппаратуры позиционирования установлено, что среднеквадратичная ошибка позиционирования в реальном времени в условиях открытой местности составляет 0.65мм при сглаживания тепловых шумов аппаратуры за время порядка 1 минуты.
4. Развита математическая модель экранов антенн ГНСС в виде системы вертикальных ребер с полупрозрачными окончаниями. Показано, что такие экраны обеспечивают отсечку (падение) КУ антенн ГНСС на 15...17 дБ в секторе углов +/- 10 градусов при пересечении местного горизонта при расстоянии между антенной и экраном порядка 2...3 длин волн. Данные моделирования подтверждены экспериментально.
5. Предложено выпуклое искусственное препятствие для сигналов ГНСС, вносящее возмущения в ДН антенны позиционирования, сходные по характеру с естественным лесом. Развита математическая модель такого препятствия, показано, что при размере порядка 10 длин волн, препятствие обеспечивает возмущения ДН хаотического характера с угловой протяженностью в 1...5 градусов при размахе осцилляций до 20дБ по амплитуде и до 180 градусов по фазе. Полевые испытания препятствия подтвердили вывод о соответствии вносимых возмущений естественным зеленым насаждениям.

### ***Основные публикации по теме диссертации***

***В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1. Татарников Д. В., Чернецкий И. М., Затенение полуплоскостью с полупрозрачным окончанием. Электронный журнал “Журнал радиоэлектроники”, №12, 2012, 0.4 п. л.
2. Татарников Д. В., Чернецкий И. М., Искусственные препятствия для испытательных полигонов аппаратуры позиционирования по сигналам GPS/ГЛОНАСС, Антенны, 2015, выпуск 2 (253), с. 47-54

***В других изданиях:***

1. Татарников Д. В., Чернецкий И. М., Затенение полуплоскостью с полупрозрачным окончанием. 6-я Всероссийская научно-техническая конференция “Радиолокация и радиосвязь”, Москва, 2012
2. Tatarnikov D., Chernetsky I., Artificial Obstructions Employing Fabry-Perot Principles for GNSS Positioning Equipment Test Ranges, Proc. of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, Florida, September 2014, pp. 486-489

***Заявки на патенты:***

1. Tatarnikov D., Chernetsky I., “Impedance helical antenna forming П-shaped directional diagram”. International Application Number PCT/RU2014/000753, Filing date 10/07/2014
2. Stepanenko A., Astakhov A., Tatarnikov D., Chernetsky I. “Broadband helical antenna with cutoff pattern” International Application Number PCT/RU2015/000234, Filing date 04/09/2015
3. Tatarnikov D., Chernetsky I., “Methods for modeling multipath reflections of GNSS signals using a testinstallation and apparatuses for implementing test methods”. International Application Number PCT/RU2014/000022, Filing date 01/16/2014