

На правах рукописи

ДИКИЙ Дмитрий Валерьевич

**ИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НА  
ОСНОВЕ РЕЗОНАТОРОВ БЕГУЩЕЙ  
ВОЛНЫ**

Специальность 01.04.03 — Радиофизика

Автореферат диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2004

Работа выполнена в ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Научный руководитель — доктор физико–математических наук, профессор Черепанов Андрей Сергеевич.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Ипатов А.В.

кандидат технических наук Федотов А.Н.

Ведущая организация — Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН.

Защита состоится 17 июня 2004 года в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д212.229.01 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, корп. II, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ “СПбГПУ”.

Автореферат разослан 14 мая 2004 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.229.01

доктор физ.–мат. наук, профессор

Водоватов И.А.

# Общая характеристика работы.

## Актуальность темы.

В настоящее время проявляется большой интерес к радиолокационным системам, в которых используются широкополосные сигналы как минимум двух поляризаций. Одним из классов задач, в которых необходимо использование широкополосных антенн, имеющих возможность принимать две поляризации одновременно, являются задачи радиоастрономии.

В рефлекторных антеннах радиотелескопов в качестве первичных облучателей часто используются рупорные антенны в сантиметровом диапазоне длин волн и дипольные или спиральные – в дециметровом. Поэтому, ввиду узкополосности подобной приемной системы, радиотелескоп работает в сравнительно узкой полосе частот (5–10%) и многие задачи, требующие наблюдения источников в широком диапазоне сантиметровых–дециметровых волн приходится решать методом последовательных наблюдений со сменой облучателей и приемников.

В радиоастрономических системах желательно применять широкополосные антенны и вести наблюдения источника сигнала одновременно по двум ортогональным поляризациям (левой и правой круговым или двум линейным). Также необходимо обеспечить малый уровень потерь. Очевидно, что широкополосные печатные антенны не подходят по нескольким причинам – многие диэлектрики разрушаются в космосе, не выдерживают низких температур и т.д.

Поэтому, важнейшим требованием широкополосной (многодиапазонной) приемной системы является совмещение фазовых центров нескольких диапазонов или его стабилизация в широкополосном облучателе. Широкополосные антенны (логопериодические, спиральные, Вивальди) могут не иметь стабильного, а некоторые и вообще фазового центра как такового. В результате КИП зеркальной антенны падает.

Предложенные в 70х — 80х годах облучатели на резонаторах бегущей волны (РБВ) в значительной степени свободны от вышеперечисленных недостатков. Важными достоинствами облучателей на РБВ являются:

- обеспечение возможности одновременного приема (передачи) излучения на нескольких длинах волн путем совмещения фазовых центров нескольких облучателей,
- наличие принципиальной возможности перекрытия широкого диапазона длин волн (до нескольких октав),
- широкая полоса частот одного частотного канала при малом уровне потерь,
- высокое качество поляризации в широкой полосе частот,
- низкие шумовые температуры.

Однако, на протяжении многих лет они существовали как результат экспериментальных исследований, не имеющими последовательно изложенной теории.

**Целью диссертационной работы** является комплексное исследование излучательных и электрофизических характеристик структур на РБВ – поля излучения структуры, а также системы возбуждения излучателя для обеспечения тех или иных электрофизических характеристик (широкополосности, поляризации излученного поля, согласование с приемными устройствами и др.).

Задачей теоретического исследования является нахождение модели излучения структуры на РБВ, позволяющей рассчитать с требуемой точностью излучательные характеристики структуры как таковой, так и в составе многоволнового облучателя. Наличие подобной модели дает представление о поле излучения структуры и положении фазового центра многоволнового облучателя, состоящего из облучателей на РБВ. Расчет системы питания излучающего кольца, а так же распределения тока вдоль излучающего кольца позволяет сделать выводы о поляризации излученного поля, степени эллиптичности, уровне потерь и отражений от входов излучающей структуры на РБВ.

Целью экспериментального исследования является разработка методики проектирования и настройки структуры на РБВ как таковой, так и в составе многоволнового облучателя.

**Научная новизна работы** состоит в том, что в ней:

1. Построена аналитическая модель поля излучения структуры на РБВ, представляющей собой как отдельный облучатель, так и

являющейся элементом многоволнового облучателя на РБВ с совмещенным фазовым центром.

2. Решена задача о положении фазового центра многоволнового облучателя на РБВ, а так же оценено поле излучения парциального облучателя на РБВ, являющегося элементом многоволнового облучателя.
3. Решена задача о распределении тока вдоль излучающего кольца, питаемого системой сосредоточенных источников.
4. Решена задача питания излучающего кольца многошлейфным мостом, дающая представление о широкополосности облучателя.
5. Предложен метод конструирования облучателя на РБВ, а так же описана методика измерения основных его параметров и методы их регулировки.

## **Положения диссертации, выносимые на защиту.**

- Фазовый центр многоволновой излучающей структуры на РБВ остается в вершине конуса, представляющего собой аппроксимацию экрана многоволновой структуры и не зависит ни от высоты подвеса кольца над экраном, ни от угла “конуса” экрана.
- Питающая система, состоящая из индуктивных шлейфов, подключенных к кольцу, вносит свой вклад в поле излучения антенны, но ее влияние сказывается только вблизи горизонтального направления и вообще мало сказывается на кросс-поляризационных характеристиках в диапазоне рабочих углов.
- Мост на РБВ с произвольным количеством элементов связи может быть проанализирован с использованием матриц передачи. Мост на РБВ с произвольным количеством резонаторов может быть проанализирован и с использованием матриц рассеяния.

- Наилучшие характеристики моста на РБВ (в смысле широкополосности по заданному уровню режекции) достигаются при четвертьволновой связи с расположением элементов связи один под другим.

**Научная значимость** работы состоит в том, что в ней разработана общая математическая модель излучающей структуры на РБВ: а так же приведена методика построения, изготовления и настройки облучателей на РБВ.

**Практическая ценность** заключается в том, что предложенная модель структуры на РБВ позволяет с рассчитать с требуемой точностью характеристики антенной системы, включающей облучатели на РБВ, обладающие требуемыми параметрами.

**Достоверность результатов** работы подтверждается строгостью использованных методов расчета, соответствием данных, полученных аналитическими и численными методами, а также соответствием между результатами расчетов и экспериментов.

## **Внедрение результатов работы.**

Диссертационная работа выполнялась в СПбГПУ в течении 1993-2004 гг. Результаты, изложенные в работе, использованы при выполнении НИР с САО РАН, китайской солнечной обсерваторией, центром дальней космической связи и др.

## **Апробация работы.**

Положения и результаты работы докладывались на международных (JINA'92 - JINA'98, NICE, France) и всероссийских конференциях (Радиоастрономич. конф. СПб).

## **Публикации.**

Основные материалы работы опубликованы в 4 работах.

## Объем работы.

Диссертация изложена на 141 страницах машинописного текста, основной текст содержит 135 страниц, включая 59 рисунков и 2 приложения. Список литературы на 6 страницах содержит 61 наименований.

## Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы, показана ее научная значимость и практическая ценность, изложено краткое содержание работы и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены основные принципы построения излучательных структур на РВВ. Изложены начальные сведения по конструкции излучательных элементов и системы питания излучательной структуры на РВВ.

В зависимости от конкретных требований к электрическим и эксплуатационным характеристикам (ширина диаграммы направленности (ДН), качество круговой поляризации, широкополосность, совмещение фазового центра нескольких облучателей и т.д.), такие структуры могут обладать целым рядом конструктивных особенностей. Однако все они объединены общей идеей – использование кольцевого резонатора бегущей волны в качестве излучателя круговой поляризации.

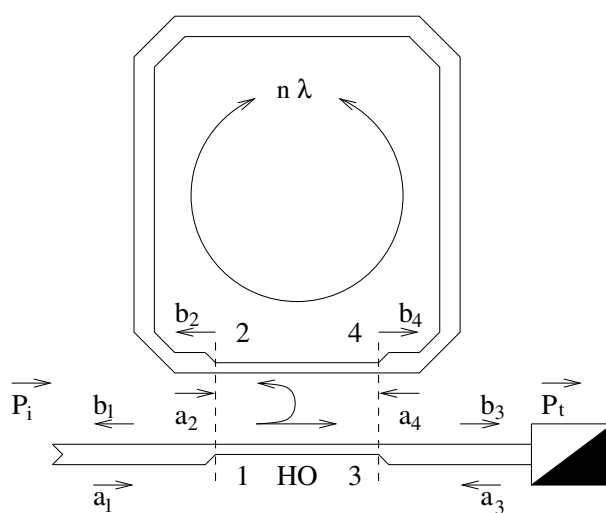


Рис. 1: Эквивалентная схема облучателя на РВВ.

Основой излучателя на РВВ является свернутая в кольцо линия (рис.1), питаемая направленным ответвителем (НО). Линия выполняется излучающей, причем потерями в линии являются потери на излучение. Поляризация излученного поля является эллиптической, близкой к круговой, причем правой, при питании НО с одного входа и левой — при питании с другого. Такая конструкция имеет малый размер — диаметр излучающего кольца близок к  $\frac{\lambda}{\pi}$  ( $\lambda$  — длина волны). При необходимости реализации многоволновой системы, кольца различных частотных каналов (каждое со своим НО) вставляются друг в друга.

Интересующими параметрами такой системы являются: 1) Уровень мощности, прошедший из плеча 1 в плечо 3 НО, определяющий *режекцию*; 2) *КПД*, которое в отсутствии омических потерь в элементах облучателя есть разность между падающей мощностью в плечо 1, отраженной от плеча 1 и прошедшей в плечо 3. Оно совпадает с излученной облучателем мощностью, отнесенной к падающей.

Для идеального симметричного ответвителя матрица рассеяния имеет вид:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{13} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{12} \\ 0 & S_{13} & S_{12} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Также выполняется соотношение для аргументов коэффициентов матрицы рассеяния:  $\arg S_{12} = \arg S_{13} + \frac{\pi}{2}$ . При наличии согласованной нагрузки на выходе, когда  $a_3 = 0$ , на частоте, определяемой из условия  $-\arg S_{13} + kL' = 2\pi n$  и при условии, что затухание в кольце подчиняется соотношению

$$e^{-\alpha L'} = \frac{|S_{13}|}{|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2} \quad (2)$$

в системе имеет место кольцевой резонанс. При этом амплитуда волны  $b_2$  усилена по сравнению с падающей волной  $a_1$  и составляет

$$|b_2| = \frac{|a_1||S_{12}|}{1 - \frac{|S_{13}|^2}{|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2}} \quad (3)$$

При этом, в силу унитарности матрицы рассеяния НО, можно



показать, что выполняется соотношение  $|S_{12}|^2 = 1 - e^{-2\alpha L'}$  т.е. затухание мощности в кольце равно коэффициенту передачи мощности из плеча 1 в плечо 2 направленного ответвителя (рис.1).

Качественный вид АЧХ такой системы по КПД  $\eta = P_r/P_i$  и по режекции  $\gamma = P_t/P_i$  показан на рис.2.б, кривая 3. Как и в любой резонансной системе, ширина резонансной кривой тем больше, чем больше потери в нем (в данном случае – это потери на излучение).

Расширение полосы требует увеличения затухания в кольце (что может быть достигнуто за счет увеличения ширины кольца и его высоты над экраном) и, соответственно, увеличение коэффициента связи  $S_{12}$  направленного ответвителя. То и другое влечет за собой ухудшение симметрии диаграммы направленности и ухудшает качество круговой поляризации. Поэтому, хороших электродинамических (в частности, поляризационных) характеристик в такой конструкции излучающей структуры на РБВ удастся достигнуть лишь при сравнительно узкой полосе частот.

Однако, если несколько кольцевых РБВ связать каскадно направленными ответвителями (рис.2.а), то в такой системе (как и в любой многорезонаторной) может быть получен эффект расширения полосы пропускания и улучшение прямоугольности АЧХ (рис.2.б).

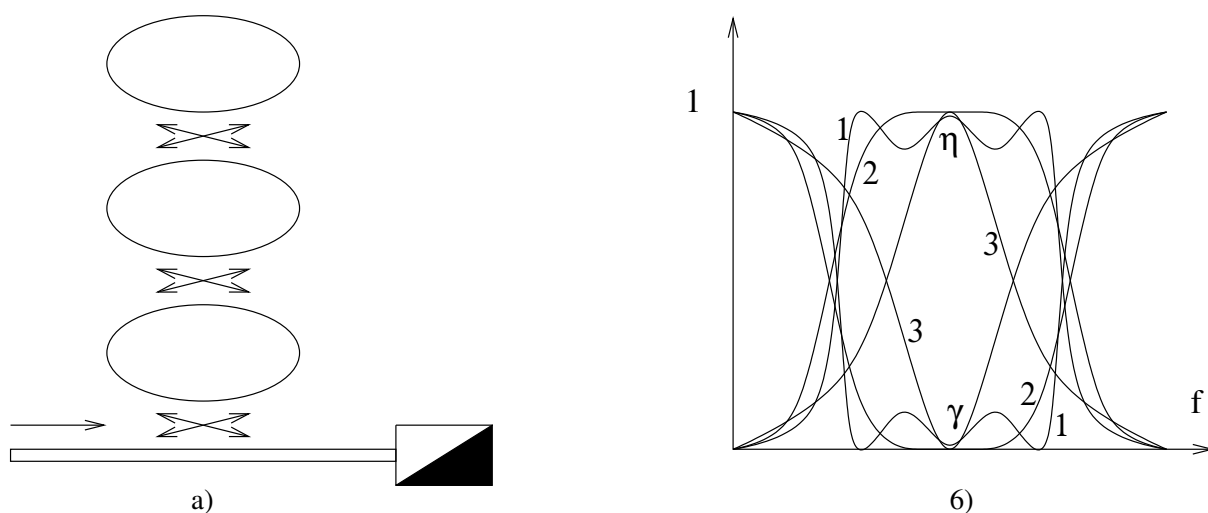


Рис. 2: Многорезонаторная система на РБВ (а) и примерный вид АЧХ по режекции  $\gamma$  и КПД  $\eta$  (б).

При этом, в зависимости от величин коэффициентов связи  $S_{12}$

направленных ответвителей, может быть реализована как многогорбая (кривая 1), например чебышевская, так и максимально плоская форма АЧХ (Баттерворта, кривая 2). Полоса режекции при достаточно жестко заданном допуске на ее качество оказывается большей, чем в случае однозвенного фильтра. Заметим, что излучающим является только верхнее кольцо, два других являются холостыми, не имеют потерь и не принимают участия в формировании поля излучения структуры.

Однако, многорезонаторность как таковая, не влияет на поле излучения конструкции. Для его улучшения (в основном качество поляризации) необходимо распределить связь излучающего кольца, причем таким образом, чтобы кольцо при этом оставалось излучающим.

Если две электродинамически не связанные линии соединить между собой несколькими слабо возмущающими поле в линиях элементами связи, размещенными с некоторым интервалом, то в некоторой полосе частот может возникнуть эффект направленной связи между линиями, даже при отсутствии направленности самих элементов связи, за счет интерференции падающих и отраженных волн. Наилучший эффект (в смысле широкополосности) достигается при интервале между элементами связи в  $\frac{\lambda}{4}$ . Направленность сохраняется также и при другом интервале, важно лишь, чтобы он не был кратен половине длины волны. Примером такого НО может служить многошлейфный направленный мост (рис.3.а) с длиной связи равной  $\frac{\lambda}{4}$ .

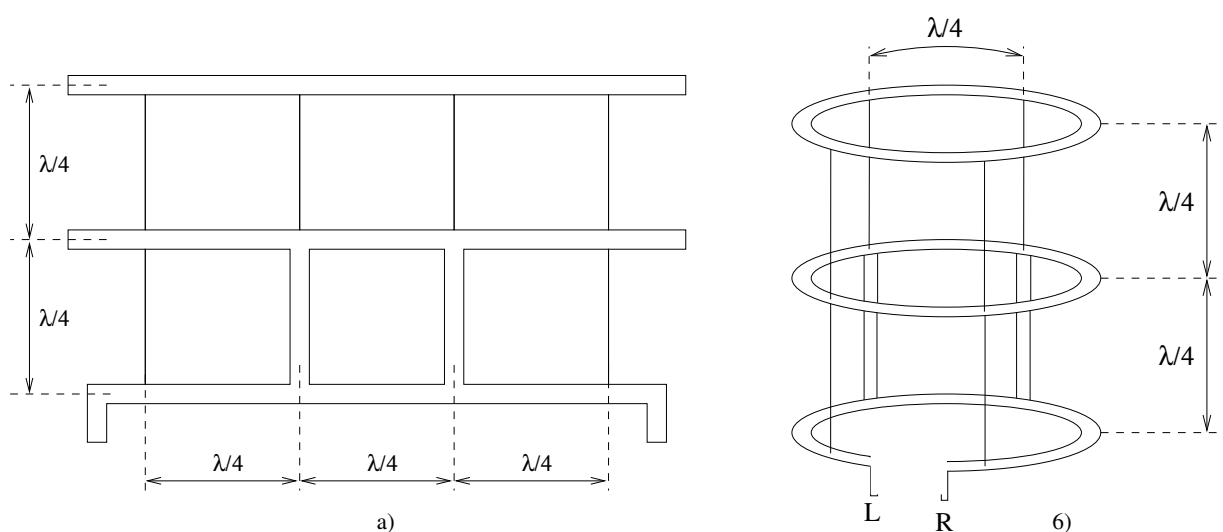


Рис. 3: Использование многошлейфного направленного моста (а) и эквивалентная схема излучателя (б).

В отличие от связанных линий, такой НО является сонаправленным. После замыкания двух верхних линий получим конструкцию, схема которого изображена на рис.3.б. Здесь используется оба отмеченных эффекта – многорезонаторность с одной стороны и распределение связи по длине линий за счет дискретного подключения нескольких ненаправленных элементов связи с другой.

**Во второй главе** рассмотрена модель излучения структуры на РБВ.

В простейшем случае, когда кольцо расположено над плоским, бесконечным экраном на высоте  $h/2$  и в нем возбуждена бегущая волна тока  $I(\varphi) = I_0 e^{-jm\varphi}$ , где  $m$  – целое число, показывающее сколько длин волн укладывается на длине кольца, получены компоненты электрического поля  $E$ . Анализ этих выражений показывает, что  $E_\theta$  и  $E_\varphi$  сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ , а так как они сами находятся в пространственной квадратуре, то в дальней зоне получается поле, поляризация которого эллиптическая, а при  $m = 1$  на оси кольца – круговая. При других значениях  $m > 0$  излучение в направлении нормали кольца отсутствует. Фазовый центр антенны в этом случае находится в начале координат, лежащим в плоскости экрана и на линии, соединяющей центры реального и зеркально изображенного колец.

Ширина ДН по уровню  $-10$ дБ, при малых высотах (менее  $0.1\lambda$ ) кольца над экраном, составляет около  $120^\circ$ . КНД антенны в направлении главного максимума ( $\theta = 0, m = 1$ ) составляет примерно 9. Такая направленность антенны обусловлена наличием зеркально изображенного кольца и интерференцией его поля с полем реального кольца.

Если облучатель на РБВ является элементом многоволновой системы, то последняя может оказать значительное влияние на работу облучателя. Для того, чтобы оценить поле излучения облучателя, работающего в составе многоволновой системы, а так же положение его фазового центра, рассмотрена задача излучения кольца с током, расположенного над коническим экраном, являющимся аппроксимацией многоволновой системы (рис.4).

Решение задачи ищется в виде суперпозиции поперечно магнитных

и поперечно электрических волн, представимых в виде сумм частных производных потенциалов Дебая. Последние удовлетворяют однородному уравнению Гельмгольца, граничным условиям на стенках экрана и условию излучения на бесконечности.

Строгое решение этой задачи методом разделения переменных дает выражения для поля излучения рассматриваемой структуры, анализ которых позволяет сделать два важных вывода: *первый* – фазовый центр облучателя находится в начале координат – вершине воображаемого конуса и не зависит от положения кольца облучателя.

над экраном; *второй* – при углах конуса, близких к  $90^\circ$ , азимутальная и радиальная компоненты не изменяют знак. Это означает, что направление вращения основной поляризации остается постоянным во всем диапазоне допустимых углов. Так же решение показывает, что поле излучения не претерпевает скачков в диапазоне рассматриваемых углов и незначительно отличается от поля излучения кольца над плоским бесконечным экраном при углах конуса, близких к  $90^\circ$ .

Решение задачи о распределении тока вдоль кольца, питаемого системой индуктивных шлейфов, расположенных вдоль кольца показывает, что ток представляет собой затухающую волну от шлейфа к шлейфу и терпит разрыв в точке включения шлейфа на величину тока шлейфа. Решение этой задачи дает соотношение между токами питающих шлейфов и амплитудой тока кольца. Результаты этого расчета используются при моделировании моста на РБВ.

**Во третьей главе** рассмотрена система питания излучающего кольца – моста на РБВ. Мост на РБВ должен обеспечивать питание излучающего кольца, а также должен обеспечивать необходимые

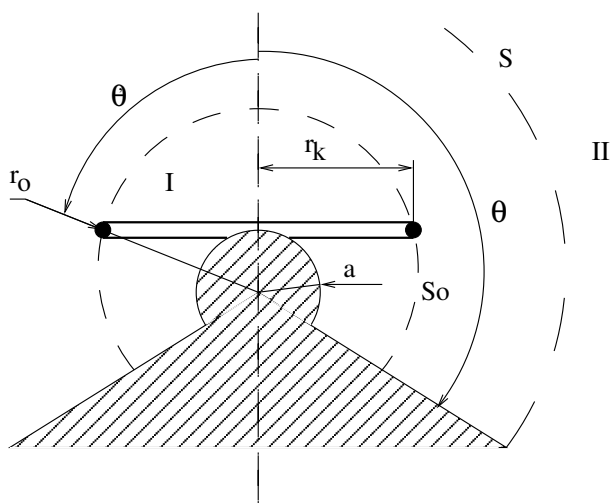


Рис. 4: Аппроксимация многоволнового

характеристики облучателя в целом по КПД и режекции. Для определения характеристик моста на РВВ решена задача анализа частотных характеристик моста при заданных физических его параметрах.

Разрезав многоэтажную конструкцию в сечении одного из входов, в общем случае получим следующую эквивалентную схему, изображенную на рис.5.

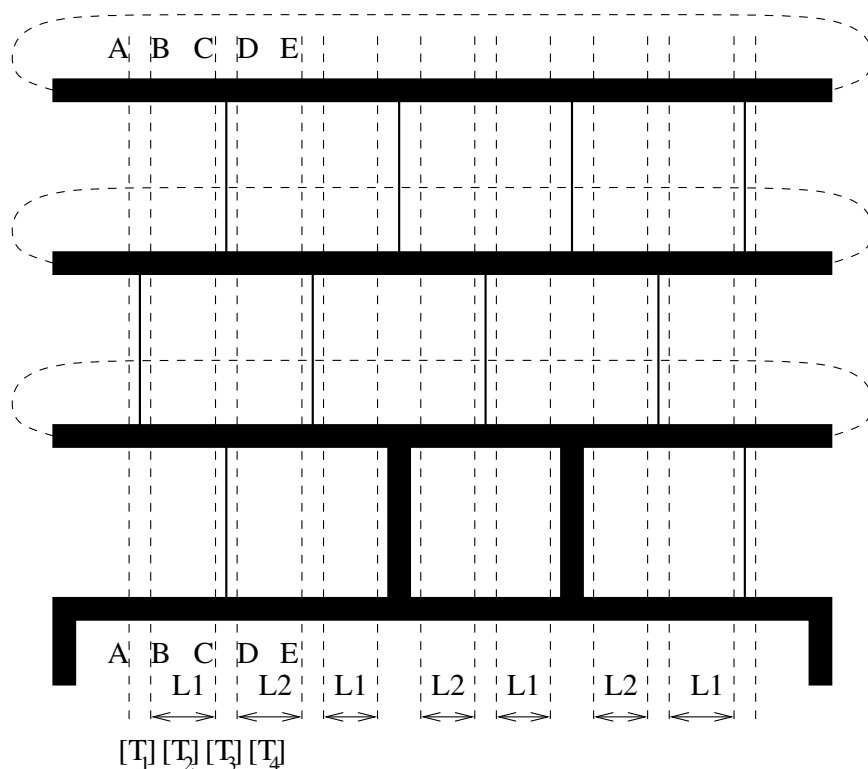


Рис. 5: Эквивалентная схема моста на РВВ.

Анализ такой схемы состоит в анализе многополюсников (в данном случае шестнадцатиполюсников), получающихся в результате сечения конструкции по линиям А-А, В-В, С-С, D-D и Е-Е. Здесь, для определенности, положим связь четвертьволновой, хотя рассматриваемый подход справедлив для любого вида ненаправленной связи в любом сечении моста. Общая матрица передачи получается в результате перемножения парциальных матриц передачи многополюсников А-А, В-В и т.д. Окончательное уравнение задачи получается после приравнивания падающих и отраженных волн каждого резонатора.

Однако, для оценки поляризационных характеристик необходимо

найти падающие и отраженные волны во всех сечениях многополюсника.

Более наглядное решение задачи получается при рассмотрении матриц рассеяния многополюсников получающихся в результате сечения моста моста на РВВ вблизи точек включения элементов связи (рис.6).

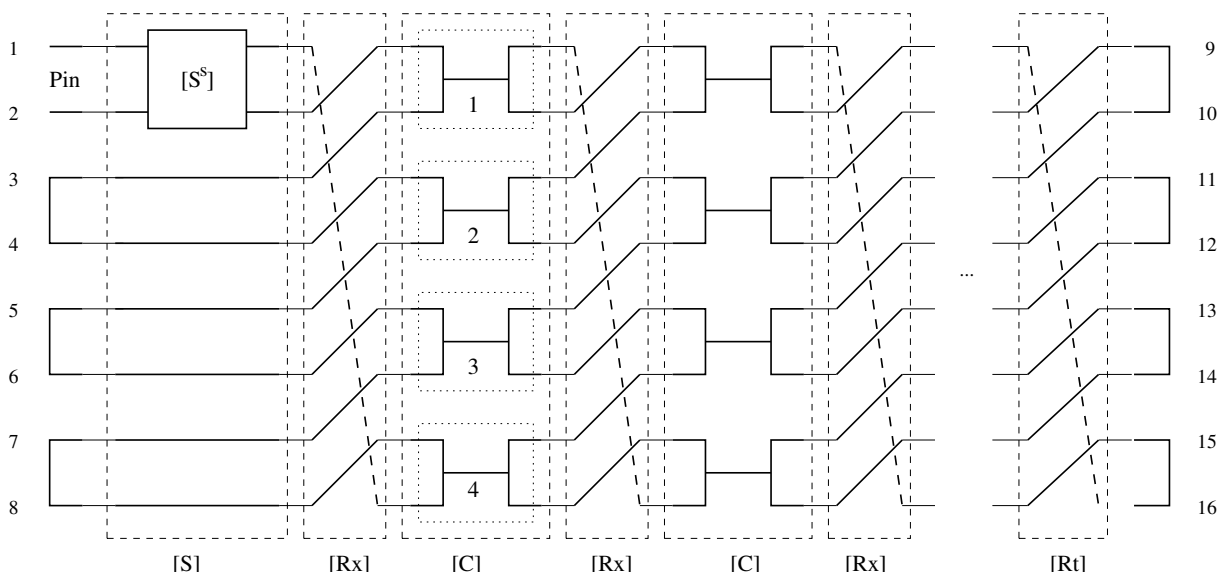


Рис. 6: Представление моста на РВВ в виде каскадно соединенных многополюсников.

При этом используются матрицы рассеяния для парциальных элементов  $[S]$ ,  $[Rx]$ ,  $[C]$  и находится матрица рассеяния  $[S]$  их каскадного соединения. В этом случае коэффициент  $S_{21}$  матрицы рассеяния конструкции определяет АЧХ облучателя, а анализ коэффициентов  $S_{91} - S_{16,1}$  позволяет сделать вывод о поляризационных характеристиках облучателя без дополнительных вычислений. Этот подход справедлив для любого вида связи, включая направленную.

Как следует из теоретических расчетов, по уровню режекции 10дБ, КСВ не хуже 1.2 и при коэффициенте эллиптичности более 0.9, максимально достижимая полоса пропускания составляет порядка 20%. А это означает, что при использовании облучателя на РВВ в составе многоволнового облучателя с совмещенным фазовым центром с расстоянием между соседними частотными каналами 1.5 возможно почти непрерывное перекрытие всего частотного диапазона.

**Четвертая глава** посвящена вопросам экспериментального исследования излучательных структур на РВВ. Также приведены

результаты экспериментальных исследований, проводимых в течении ряда лет на кафедре Радиофизики применительно в основном к задачам радиоастрономии и радиосвязи. Описаны несколько реальных конструкций антенн на РБВ.

Основной целью экспериментальных исследований являлось определение основных факторов, влияющих на работу реальной излучательной структуры на РБВ, а также степени адекватности теоретической модели. Кроме того, задачей экспериментов была оптимизация конструкции облучателя, а также методы сборки, настройки и конструкции отдельных компонентов.

Измерение диаграмм направленности многоволновой структуры на РБВ показывает, что существуют искажение диаграммы направленности парциального элемента, обусловленные присутствием второго (более длинноволнового) кольца. Также происходит изменение направления вращения поляризации под некоторым углом, что, скорее всего, обусловлено наличием конечного экрана и обрывом радиального тока на кромке этого экрана.

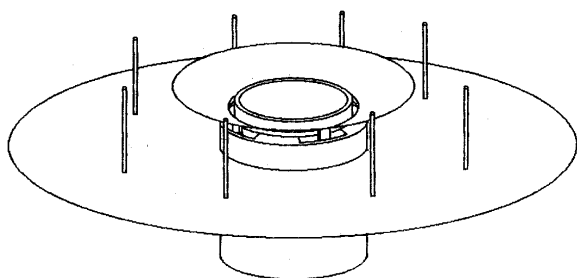


Рис. 7: Схема компенсации токов экрана.

В дальнейших экспериментах было предложено скомпенсировать излучение токов экрана токами нескольких резонансных вибраторов, специально установленных на некотором радиусе ( $\approx 0.5\lambda - 0.8\lambda$ ) вокруг

излучающего кольца – рис.7.

Сами вибраторы не излучают вдоль оси антенны, однако наведенные в них токи, при должном подборе их длины (порядка  $\lambda/4$ ), текут в противофазе с токами экрана и компенсируют поле излучения (а также вызванные ими эффекты) последних. Варьируя форму, длину, количество и радиус установки вибраторов, можно существенно влиять на форму ДН антенны. Наилучший результат получается при примерно четвертьволновой длине вибраторов. Эффект компенсации достигается

при наличии уже четырех вибраторов. Однако наилучший результат достигнут при восьми.

Как показывает эксперимент, влияние вибраторов настолько сильно, что влияние соседнего канала (более длинноволнового) практически не сказывается на форме ДН.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты работы.

**В приложениях** определены выражения для компонент электрического поля в цилиндрической системе координат, создаваемые элементарным током, текущем вдоль координатных осей, а так же матрица рассеяния каскадного соединения двух многополюсников.

## **Основные результаты работы.**

Показано, что излучательные структуры на РБВ могут быть синтезированы методом последовательных приближений, каждый из которых включает в себя оценку излучательных характеристик структуры в целом, расчет многосвязанного моста — системы возбуждения излучающего элемента и оптимизацию характеристик методом варьирования геометрии экрана и излучающего элемента.

Установлено, что поле излучения структуры на РБВ, при возбуждении бегущей волны тока в кольце, а также при длине окружности кольца равной примерно длине волны, является эллиптически поляризованным и кругополяризованным в направлении нормали к кольцу при соответствующем выборе системы питания кольца.

Произведены исследования поля излучения кольцевой структуры и показано, что если кольцо расположено над проводящим экраном, то излучающая структура на РБВ обладает направленным действием — КНД в направлении главного максимума при малых высотах кольца над экраном составляет примерно 9. При этом ширина диаграммы направленности облучателя по уровню -10дБ составляет примерно  $110^\circ$ — $130^\circ$ . Фазовый центр многоволновой излучающей структуры на РБВ остается в вершине воображаемого конуса и не зависит ни от высоты



подвеса кольца над экраном, ни от угла “конуса” экрана.

Произведено теоретическое изучение распределения тока в излучающем кольце и его зависимости от высоты подвеса кольца над экраном. Показано, что распределение тока вдоль кольца представляет собой экспоненциально затухающую волну. Установлено, что в основном на кросс-поляризационные характеристики влияет наличие конечного экрана и (или) наличие более длинноволнового совмещенного облучателя.

Задача синтеза возбуждающей системы решена методом анализа–последовательных приближений. Показано, что мост на РБВ может быть проанализирован различными методами.

Наилучших характеристик моста на РБВ (в смысле широкополосности по заданному уровню режекции) удается достичь при четвертьволновой связи с расположением элементов связи один под другим. При требовании уровня режекции не хуже -10дБ, КСВ не хуже 1.2 и коэффициенте эллиптичности более 0.9, полоса пропускания может быть порядка 20% и больше. А это означает, что при использовании облучателя на РБВ в составе многоволнового облучателя с совмещенным фазовым центром с расстоянием между соседними частотными каналами 1.5 возможно почти непрерывное перекрытие всего частотного диапазона. Расчетные и экспериментальные характеристики антенны на РБВ по КПД совпадают в пределах точности эксперимента. Варьировать АЧХ облучателя на РБВ можно в пределах 5 – 10 процентов.

Проведены экспериментальные исследования излучательных структур на РБВ различной конфигурации. Исследованы характеристики “на проход” и излучательные характеристики излучателей на РБВ. В целом установлено, что теоретическая модель с хорошей степенью точности описывает излучательные структуры на РБВ и совпадает с экспериментальными результатами.

## Основное содержание работы опубликовано в следующих работах

1. Способ возбуждения бегущей волны тока в кольцевой рамке. / Дикий Д. В. / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. - СПб, 2004. - 9 с., ил., библи. 7. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 11.03.2004, N 426-B2004
2. Увеличение направленности облучателя на резонаторах бегущей волны путем сегментирования излучающего элемента. / Дикий Д. В. / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. - СПб, 2004. - 4 с., ил., библи. 4. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 11.03.2004, N425-B2004
3. V.N.Dikiy, D.V.Dikiy, V.K.Nuzhin. Proceedings of JINA 94, Nice, 1994, pp.548-549.
4. Богод В.М., Коржавин А.Н., Дикий В.Н., Дикий Д.В., Комар Н.П., Возможные радиопредвестники падений некоторых фрагментов кометы Шумейкера-Леви-9 на Юпитер по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 на частоте 29 МГц, 26-я радиоастрон.конф.18-22 сент.1995 г.: Тезисы докл., СПб, 1995 г.