

А. А. Кириленко, А. О. Перов, В. Н. Скресанов, С. А. Стешенко,
В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, А. И. Шубный

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины, Харьков

МНОГОЧАСТОТНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ПРИЕМНЫХ ФОКАЛЬНЫХ БЛОКОВ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ VLBI2010-СЕТИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: СИНТЕЗ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТ

Предложена новая конфигурация и разработана строгая электродинамическая модель трехдиапазонного S/X/Ka-облучателя для зеркальной антенны VLBI2010 совместимых радиотелескопов. Результаты получены в соответствии с календарным планом первого этапа договора № 8/14 от 05.03.14, который выполняется ИПЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины по распоряжению Президиума НАН Украины № 140 от 04.03.14.

Ключевые слова: РСДБ, радиотелескоп, зеркальная антенна, охлаждаемый S/X/Ka-облучатель, диаграмма направленности, круговая поляризация, система электродинамического моделирования.

ВВЕДЕНИЕ

Конечной целью работ по проекту «Многочастотный облучатель зеркальной антенны для криогенных приемных фокальных блоков (КПФБ) радиотелескопов VLBI2010-сети нового поколения: синтез, проектирование, эксперимент», выполнение которого рассчитано на три года, является разработка трехдиапазонного облучателя с улучшенными показателями качества для зеркальных антенн, совместимых со стандартами, принятыми в рамках международной программы VLBI2010 [9]. Данная программа была разработана международной службой геодезии и астрометрии (IVS) с целью развития сети станций, предназначенных для решения комплекса новых задач астрометрии, геодезии и навигации методами радиоинтерферометрии со сверхдлин-

ной базой (РСДБ, или VLBI — Very Long Baseline Interferometry).

Одна из таких задач, относящаяся к технологиям космической отрасли, — определение параметров вращения Земли и координат опорных станций с погрешностями порядка одного миллиметра, а также оперативное определение всемирного времени в интересах глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS, GNSS) с погрешностью порядка 10 мкс [2]. Необходимость коренного переоборудования технических средств действующих VLBI-сетей обусловлена в том числе и тем, что требования к точности координатно-временного и навигационного обеспечения ГЛОНАСС, GPS, GNSS стали сравнимыми с требованиями координатно-временного обеспечения фундаментальных исследований в астрофизике. Например, если требуемая погрешность определения координат с помощью глобальной навигационной системы составляет тридцать сантиметров, то погреш-

ность определения координат опорных станций должна быть не хуже трех сантиметров. Этого, в свою очередь, можно достичь если комплекс средств прогнозирования и определения параметров вращения Земли будет обеспечивать точность определения 0.1 мс дуги для координат полюса, углов нутации и прецессии и 10 мкс для всемирного времени.

Предполагается, что к 2017 г. в мировую VLBI2010-сеть будет входить до 20 опорных станций наблюдения, расположенных на различных континентах [6], две из которых будут развернуты в обсерваториях Бадары и Зеленчукская. КПФБ для этих телескопов, который также включает в себя разделители круговых поляризаций и охлаждаемые маломощные усилители, был разработан при участии авторов данной работы [3, 12].

Облучатель разрабатывается под геометрию двухзеркальной антенны фирмы “Vertex Antennentechnik GmbH” с диаметром основного зеркала 13.2 м. Антенные системы, выполненные в рамках таких требований, использовались и в других проектах — в реализованном в 2012 г. проекте в Германии [7] и в находящемся на стадии завершения проекте RAEGE в Испании [8]. Радиотелескопы предназначены для приема радиоизлучений квазаров в трех диапазонах частот: в S-диапазоне (2.2—2.6 ГГц), в X-диапазоне (7.0—9.5 ГГц) и в Ka-диапазоне (28—34 ГГц). Диаграммы направленности (ДН) трехчастотного S/X/Ka-облучателя с единым фазовым центром на рабочей и ортогональной круговых поляризациях зависят от геометрии зеркальной системы и, в свою очередь, в значительной степени определяют SEFD (System Equivalent Flux Density) и пространственное распределение коэффициента эллиптичности антенной системы в целом. Эти показатели принадлежат к основным, характеризующим качество радиотелескопов в сети VLBI2010. Определено, что в каждом из трех диапазонов частот:

- ширина ДН на рабочей круговой поляризации по уровню минус 16 дБ должна быть $130 \pm 5^\circ$;
- уровень ДН на ортогональной круговой поляризации не должен превышать минус 22 дБ по

отношению к уровню ДН на рабочей поляризации вдоль оси облучателя;

- отклонение фазы комплексной ДН в секторе $\pm 65^\circ$ относительно единого фазового центра облучателя не должно превышать 20° ;

- уровень обратных потерь не должен превышать минус 20 дБ.

Как было нами показано, для облучателя [3] сформулированные требования выполняются не в полной мере, и улучшение характеристик облучателя остается актуальной задачей. Результаты разработки усовершенствованного облучателя по данному проекту могут быть востребованы разработчиками подобных систем в Германии [7] и в Испании [8]. Украина также обладает радиотелескопами, которые при соответствующей доработке облучателя могли бы функционировать в составе всемирной VLBI-сети.

В данной работе нами исследованы причины снижения показателей качества облучателя [3] и, как следствие, предложено усовершенствованное техническое решение облучателя. Помимо этого наш опыт синтеза двух и трех диапазонных облучателей радиотелескопов с заданными характеристиками [1, 10] показал плодотворность использования быстрых численно-аналитических алгоритмов метода частичных областей в сочетании с методами градиентной оптимизации. Синтез выполнялся с использованием системы электродинамического моделирования MWD II [4, 5]. Данная система, однако, не может быть применена для синтеза предложенного облучателя в полной конфигурации, поскольку в ней до настоящего времени отсутствовали ключевые элементы для анализа диэлектрических вставок в волноводах. Разработка таких ключевых элементов была выполнена как первый этап данного проекта и введена в систему MWD II, что позволило создать полную математическую модель S/X/Ka-облучателя.

КОНФИГУРАЦИЯ S/X/KA ОБЛУЧАТЕЛЯ В СОСТАВЕ КПФБ

Предложенное нами техническое решение апертурного узла КПФБ представлено на рис. 1. Опишем кратко назначение элементов конструкции. Круглый волновод 1 Ka-диапазона и коаксиа-

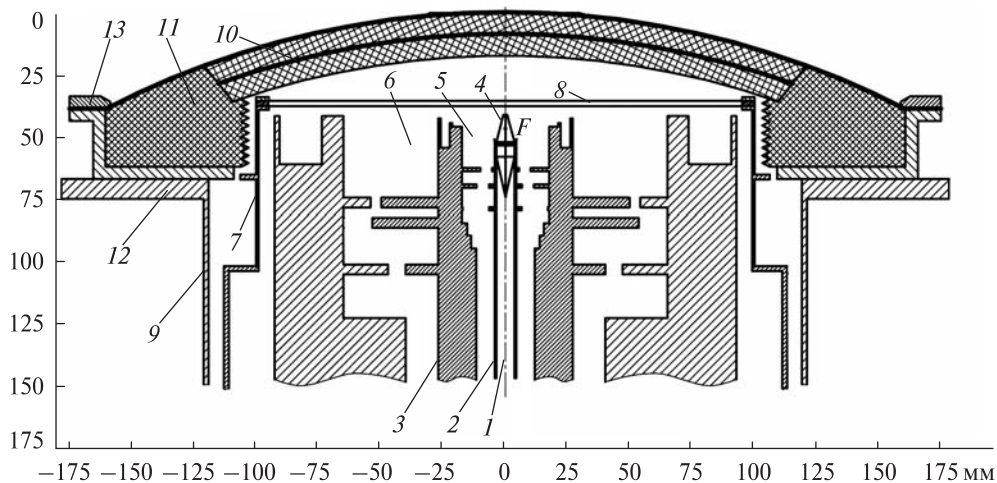


Рис. 1. Техническое решение апертурного узла КПФБ: 1 — круглый волновод Ka-диапазона, 2 — коаксиал X-диапазона, 3 — коаксиал S-диапазона, 4 — облучатель Ka-диапазона, 5 — облучатель X-диапазона, 6 — облучатель S-диапазона, 7 — радиационный экран, 8 — трехслойный ИК-фильтр, 9 — корпус криостата, 10 — четырехслойное вакуумное окно, 11 — радиопоглощающее кольцо, 12 — фланец криостата, 13 — прижимное кольцо

лы 2 и 3 X- и S-диапазонов связаны, соответственно, с облучателями 4, 5 и 6 диапазонов посредством согласующих трансформаторов в виде кольцевых диафрагм и образуют собственно S/X/Ka-облучатель. Ka-облучатель 4 представляет собой диэлектрический конус, выступающий из открытого конца круглого волновода 1. Облучатели 5 и 6 в X- и S-диапазонах представляют собой открытые коаксиальные полости, снизу ограниченные трансформаторами. Кольцевые канавки в торцах внешних проводников коаксиалов служат для симметрирования ДН в E- и H-плоскостях.

S/X/Ka-облучатель, находящийся при температуре 15–20 К, помещен в цилиндрический радиационный экран 7, который сверху заканчивается трехслойным ИК-фильтром 8. Радиационный экран и ИК-фильтр имеют температуру порядка 60 К и служат для ослабления тепловых радиационных потоков. Именно необходимость введения в конструкцию КПФБ металлического радиационного экрана 7 с многослойным ИК-фильтром 8 в торце дали возможность построить электродинамическую модель S/X/Ka-облучателя в виде многоступенчатой декомпозиционной схемы, опирающейся на быстрый расчет многомодовых волноводных матриц рассеяния, от-

дельных ключевых элементов и собственно облучателя и подводящих волноводных трактов.

S/X/Ka-облучатель с радиационным экраном целиком размещен в корпусе 9 криостата. Радиоизлучение фокусируется антенной в фазовом центре облучателя, расположенном внутри криостата через радиопрозрачное многослойное вакуумное окно 10. Вакуумное окно с внешней стороны должно быть защищено вакуум-плотной (полиэтилентерефталат толщиной 0.05 мм) и гидрофобной (фторопласт толщиной 0.1 мм) пленками. Вакуумное окно 10 через радиопоглощающее кольцо 11 смонтировано на фланце 12 криостата. Кольцо 13 служит для натяжения вакуум-плотной и гидрофобной пленок.

На рис. 2 представлены результаты выполненных нами измерений ДН облучателя-прототипа [3] на избранных частотах S/X/Ka-диапазонов. На всех рисунках верхние кривые есть ДН облучателя на рабочей круговой поляризации (кополярная диаграмма), а нижние кривые — на ортогональной круговой поляризации (кроссполярная диаграмма). Указаны также допуски на ширину и допустимую «изрезанность» ДН кополярной диаграммы и допустимый уровень кроссполярной диаграммы согласно требованиям ТЗ на [3] ДН. Представленные результаты,

с одной стороны, иллюстрируют выявленные недостатки облучателя-прототипа, а с другой — поясняют суть новых технических решений в апертурном узле КПФБ на рис. 1.

В S-диапазоне наблюдаем уширение ДН на рабочей поляризации (рис. 2, а) и зауженную полосу рабочих частот, что обусловлено неудачным выбором конфигурации облучателя-прототипа в S-диапазоне. В облучателе рис. 1 конфигурация S-облучателя коренным образом изменена. Как показали предварительные расчеты (см. далее), для этого облучателя может быть получена требуемая ширина ДН облучателя и расширена полоса рабочих частот.

В Ka-диапазоне (рис. 2, б) наблюдаем сильную «изрезанность» ДН на рабочей поляризации и резкие изменения уровня кросс-ДН. Как показало дополнительное исследование, это обусловлено рассеянием излучения Ka-диапазона на металлических элементах крепления вакуумного окна в криостате прототипа. В новом решении введено радиопоглощающее кольцо II таким образом, что влияние элементов корпуса криостата на ДН в Ka-диапазоне сведено к минимуму.

В X-диапазоне наблюдаем «подъемы» и «провалы» уровня рабочей ДН в направлении оси облучателя (рис. 2, в и г). Как показало дополнительное исследование, это обусловлено ре-

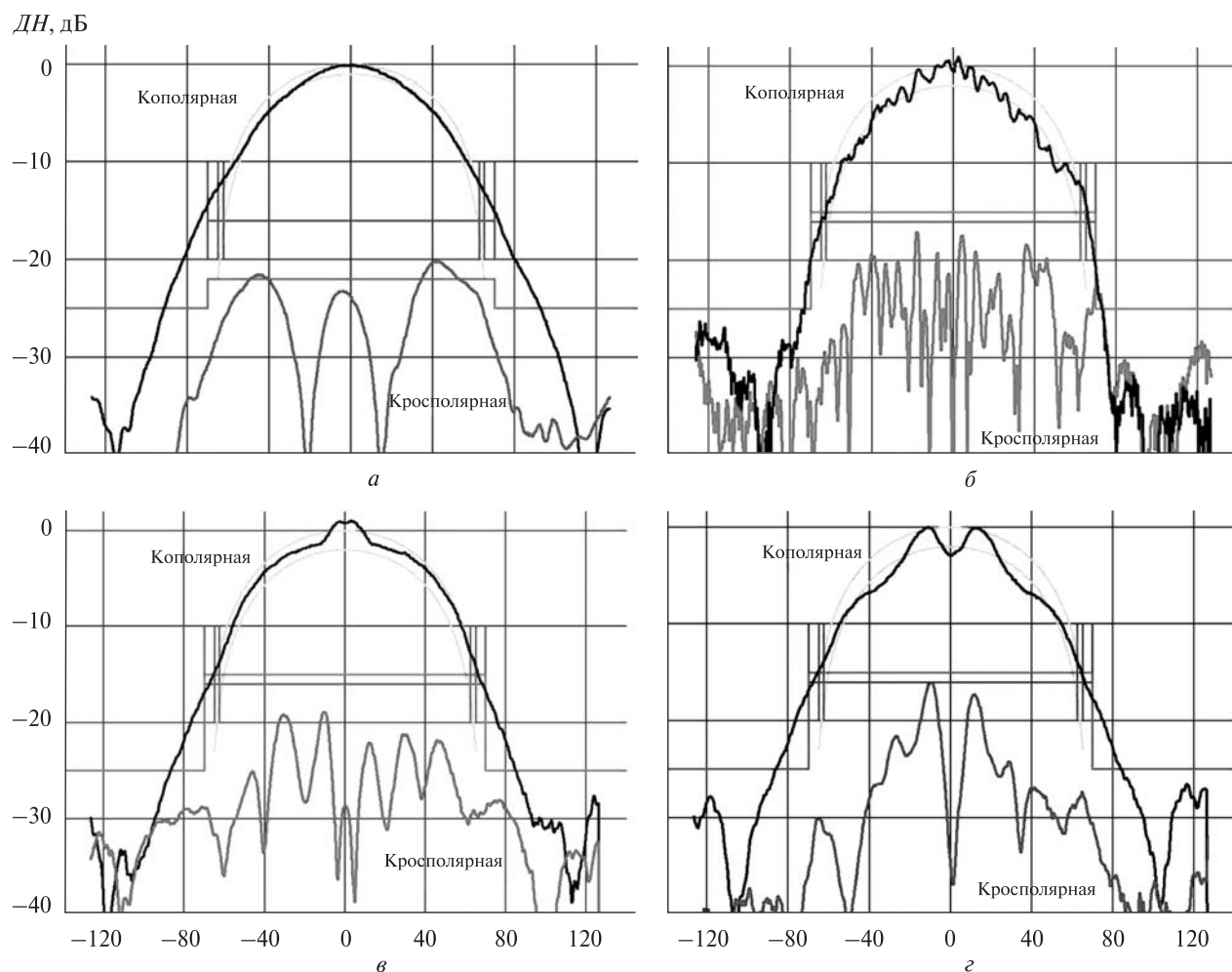


Рис. 2. Кополярная и кроссполярная диаграммы направленности на частотах: а — на 2450 МГц, б — на 30 ГГц, в — на 7000 МГц, г — на 7750 МГц

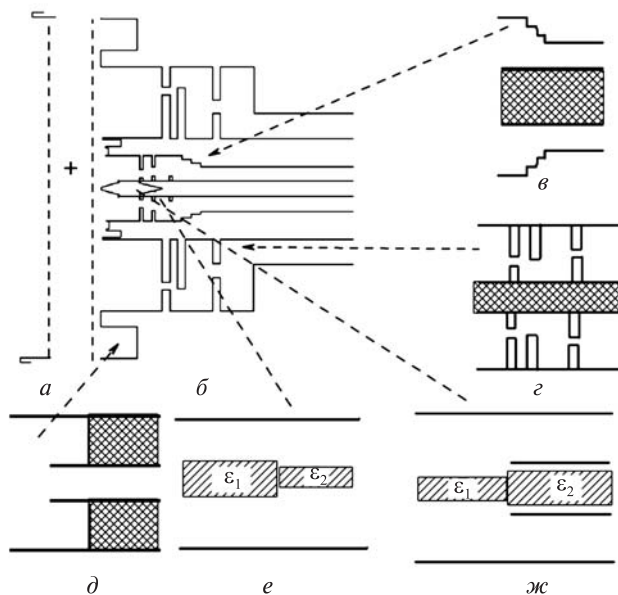


Рис. 3. Декомпозиция геометрии облучателя и новые базовые элементы

зонансами вследствие отражений излучения от вакуумного окна и обратно от поверхности облучателя. То же явление наблюдалось и в Ка-диапазоне. В облучателе на рис. 1 предложено многослойное вакуумное окно *10* со сниженным уровнем коэффициента отражения. Пенопластовый купол разделен по толщине на две половины, между которыми расположена фторопластовая пленка. Расчеты показали, что для такого окна обратные потери не превышают минус 30 дБ в полосах рабочих частот X- и Ка-диапазонов. Во всех диапазонах наблюдаем высокий уровень (до –15 дБ вместо желаемого значения –22 дБ) кросс поляризационной ДН. Правда, такой уровень допустим согласно скорректированному техническому заданию на разработку [3].

Предложенная конструкция облучателя принципиально допускает снижение уровня кросс ДН до желаемой величины, что возможно только в результате оптимизации геометрических параметров конструкции S/X/Ка-облучателя в полной конфигурации. Разработанные в рамках данного проекта математическая модель облучателя и быстрые алгоритмы анализа позволяют провести синтез S/X/Ка-облучателя с требуемым уровнем кросс ДН.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ S/X/КА-ОБЛУЧАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ

Для численного моделирования использовался метод обобщенных матриц рассеяния (GSMM — generalized scattering matrix method), сводящий задачу анализа объекта сложной структуры (рис. 1) к расчету электромагнитного взаимодействия простых ключевых элементов или их «сборок», отвечающих за фрагменты антенны сложной конфигурации (рис. 3). Такой подход позволяет использовать проблемно-ориентированные численно-аналитические методы расчета, наиболее эффективные для каждого конкретного узла и использовать предварительную крупноблочную оптимизацию. Важно то, что такой подход обеспечивает самую высокую скорость расчетов, открывая принципиально возможными постановки и решения задач многопараметрической оптимизации геометрии антенны «в целом» с учетом характеристик во всех трех диапазонах.

Анализируемый S/X/Ка-облучатель представляется как объект из нескольких крупных составляющих: излучающей круглой апертуры (рис. 3, *а*) и внутренней секции (рис. 3, *б*), в свою очередь состоящей из радиационного экрана и трех антенных облучателей, вложенных друг в друга коаксиально. Для каждого из этих узлов используются свои алгоритмы расчета S-матриц, реализующие наиболее эффективные численные модели.

На первом шаге метод частичных областей (ММО — mode-matching technique) используется для расчета S-матриц ключевых элементов внутренней геометрии облучателя (рис. 3, *б*). На втором — вычисляется S-матрица излучающей «апертуры» (рис. 3, *а*) на основе разработанного ранее алгоритма, реализующего решение задачи об открытом конце круглого волновода методом Винера — Хопфа. Ввиду особых требований к точному расчету кроссполаризованных компонентов в диаграмме направленности для ее анализа использовался ранее созданный авторами специальный алгоритм (OCW — opened circular waveguide) предварительного накопления данных и построения суррогатной модели, по ско-

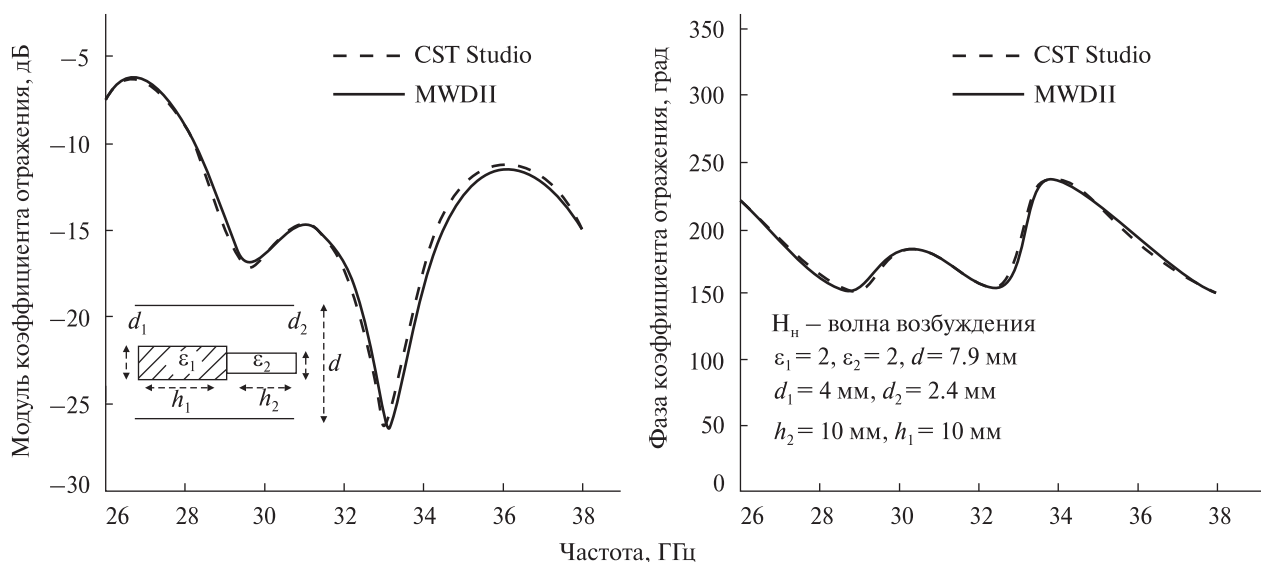


Рис. 4. Численное сравнение результатов моделирования скачка диаметра диэлектрической вставки

рости сравнимой с приближением Кирхгофа, и в то же время реализующий расчет с высокой точностью [11]. На последнем шаге методом обобщенных матриц рассеяния находятся численные данные о рассеянных полях, учитывающих влияние всех эффектов дифракции, как во «внутренней» структуре антенны, так и на собственно «апертуре». Ввиду чрезвычайно широкого диапазона рабочих частот 3-диапазонного облучателя и одновременного возбуждения антенны из нескольких портов, используемый метод расчета позволяет реализовать наиболее эффективный расчет устройства.

Численное моделирование нового облучателя в рамках первого этапа проекта разделено на две самостоятельные задачи, включающие в себя моделирование металлического корпуса и учет влияния новых элементов облучателя Ка-диапазона, содержащих диэлектрик. Если на втором этапе проекта синтез геометрии облучателя будет проведен последовательно в несколько шагов, то на первом этапе реализована соответствующая алгоритмическая база. Это алгоритмы предварительного синтеза «подборок», отдельных фрагментов облучателей X- и S-диапазонов:

1) синтез облучателя X-диапазона, внутренний проводник подводящего волновода которого является внешним для Ка-диапазона;

2) синтез волноводных диафрагм (рис. 3, з) коаксиального волновода, используемых для согласования в X-диапазоне;

3) синтез согласующих переходов (рис. 3, в) коаксиального волновода, используемых для согласования в X-диапазоне;

4) синтез геометрии апертуры (рис. 3, д) облучателя S-диапазона, внутренний проводник подводящего волновода которого является внешним для X-диапазона;

5) синтез волноводных диафрагм коаксиального волновода, используемых для согласования в S-диапазоне;

6) учет взаимного влияния облучателей на характеристики рассеяния.

Они будут использованы при пошаговом синтезе объединенного S/X/Ка-облучателя именно в представленной последовательности. Заключительные шаги синтеза трехдиапазонного облучателя состоят в учете характеристик излучения из внутреннего круглого волновода Ка-диапазона с диэлектрической вставкой на его конце. С целью расширения возможностей MWD II на случай волноводов с частичным диэлектрическим заполнением на первом этапе проекта решены такие задачи:

1) аналитическая формулировка алгоритмов расчета волноводных базисов и S-матриц плоских поперечных соединений,

2) программная реализация и отладка,

3) подключение новых ключевых элементов в библиотеку базовых алгоритмов MWD II.

В рамках первого этапа проекта были реализованы: алгоритм расчета базисов круглого волновода с диэлектрическим включением; алгоритм расчета соединения круглого волновода с диэлектрическими вставками различных радиусов (рис. 3, *е*) и алгоритмы расчета перехода с круглого волновода с диэлектрическим включением на коаксиальный волновод и на круглый волновод с диэлектрической вставкой другого размера (рис. 3, *ж*). Оценка достоверности проведена путем сравнения с расчетом на коммерческом пакете CST.

Для примера на рис. 4 показаны модуль коэффициента отражения (рис. 4, *а*) и его фаза (рис. 4, *б*) для скачка диаметра диэлектрической вставки в круглом волноводе. Видно хорошее совпадение результатов трудоемких расчетов CST Studio, с нашими результатами, потребовавшими доли секунды.

ВЫВОДЫ

На основе анализа спецификаций параметров радиотелескопов VLBI2010-сети и основываясь на опыте разработки КПФБ для телескопов российской РСДБ нового поколения, определены технические параметры к разработке нового охлаждаемого S/X/Ka-облучателя для VLBI2010-совместимой зеркальной антенны фирмы "Vertex Antennentechnik GmbH".

На основе проведенного в рамках данного проекта экспериментального исследования причин ухудшения характеристик диаграмм направленности и коэффициента эллиптичности S/X/Ka-облучателя радиотелескопов РСДБ [3] предложено новое техническое решение апертурного узла КПФБ, в котором выявленные недостатки устранены.

Разработаны алгоритмы, обеспечивающие анализ характеристик S/X/Ka-облучателя с учетом диэлектрических компонентов в составе конструкции. Алгоритмы введены в систему электродинамического моделирования MWD II, ранее разработанную в ИПЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины при участии авторов данного проекта.

Созданные алгоритмы позволяют на втором этапе проекта осуществить синтез и оптимизацию

всей конструкции облучателя с использованием современных оптимизационных алгоритмов, поскольку время расчета характеристик всего облучателя на фиксированной частоте составляет лишь доли секунды в S-диапазоне и несколько секунд в Ka-диапазоне.

1. Гламаздин В. В., Евсимгнеев А. А., Зотов М. Б. и др. Предложения по модернизации приёмных устройств радиотелескопов РТ-70 с целью обеспечения их совместимости с РСДБ-комплексом «Квazar-KBO» // Тез. докл. Всерос. радиоастрон. конф. (ВРК — 2014). — Пушкино, Россия, 2014. — С. 83—84.
2. Инатов А. В. Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физ. наук. — 2013. — **183**, № 7. — С. 769—777.
3. Инатов А. В., Чмиль В. М., Скресанов В. Н. и др. Криогенный приемный фокальный блок для телескопов радио интерферометрического комплекса нового поколения // Радиофизика и радиоастрономия. — 2014. — **19**. — С. 81—96.
4. Приколотин С. А., Кириленко А. А. Метод частичных областей с учетом особенностей во внутренних задачах с произвольными кусочно-координатными границами. Часть 1. Спектры собственных волн ортогонных волноводов // Радиофизика и электроника. — 2010. — **15**, № 1. — С. 17—29.
5. Стешенко С. А., Приколотин С. А., Кириленко А. А. и др. Метод частичных областей с учетом особенностей во внутренних задачах с произвольными кусочно-координатными границами. Часть 2. Плоско-поперечные соединения и «in-line» объекты // Радиофизика и электроника. — 2013. — **18**, № 4. — С. 3—12.
6. Hase H., Behrend D., Ma C. The future global VLBI2010 network of the IVS // Earth rotation, reference systems, and celestial mechanics: synergies of geodesy and astronomy / Eds H. Schuh, S. Böhm, T. Nilsson, N. Capitaine. — Vienna, 2012. — P. 243—248. — (Journées 2011 "Systèmes de référence spatio-temporels", Vienna, Austria, 2011).
7. Hase H., Dassing R., Klugel T., et al. Twin Telescope Wettzell (TTW) — A VLBI2010 project. Presentation at the IVS VLBI 2010 Workshop on Future Radio Frequencies and Feeds, <http://www.fs.wetzell.de/veranstaltungen/vlbi/frff2009/Part8/ttwvlbi2010e.pdf>, 2009 (Download 2011-05-29).
8. José Antonio López-Fernández. The RAEGE VLBI radio telescope // IVS VLBI2010 Workshop on TecSpec. — Bad Kötzing, Germany, 2012. — doi:10.1117/12.926535.
9. Niell A., Whitney A., Petrachenko B., et al. VLBI2010 — a vision for geodetic VLBI, current and future requirements for geodetic VLBI systems". — IVS Document: http://ivscc.gsfc.nasa.gov/about/wg/wg3/IVS_WG3_report_050916.pdf.
10. Perov A. O., Glamazdin V. V., Skresanov V. N. Design and optimization of tri-band coaxial feed horn for the radio telescope antenna // Proceedings of the 9th Int. conf.

on antenna theory and techniques (ICATT). — Odessa, Ukraine, 2013. — P. 441—443.

11. *Perov A. O., Tkachenko V. I., Kirilenko A. A.* Comparative analysis of open-ended waveguide characteristics, obtained by exact and aperture models // Telecommunications and Radio Engineering. — 2006. — **65**, N 17. — P. 1571—1583.
12. *Skresanov V. N., Glamazdin V. V., Kirilenko A. A., et al.* Circular polarization splitters for three-band feed of radiotelescope reflector antenna // Proceedings of the 9th Int. conf. on antenna theory and techniques (ICATT). — Odessa, Ukraine, 2013. — P. 43—48.

Стаття надійшла до редакції 24.12.14

*А. О. Кириленко, А. О. Перов,
В. М. Скресанов, С. О. Стещенко,
В. В. Гламаздин, М. П. Натаров, О. І. Шубний*

Институт радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук України, Харків

**БАГАТОЧАСТОТНИЙ ОПРОМІНЮВАЧ
ДЗЕРКАЛЬНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ КРИОГЕННИХ
ПРИЙМАЛЬНИХ ФОКАЛЬНИХ БЛОКІВ
РАДІОТЕЛЕСКОПІВ VLBI2010-МЕРЕЖІ
НОВОГО ПОКОЛІННЯ: СИНТЕЗ,
ПРОЕКТУВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТ**

Запропоновано нову конфігурацію і розроблено стро-
гу електродинамічну модель тридіапазонного S/X/Ka-
опромінювача для дзеркальної антени VLBI2010 спо-

лучених радіотелескопів. Результати отримано у відпо-
відності до календарного плану першого етапу договору
№ 8/14 від 05.03.14, що виконується ІРЕ ім. О. Я. Усико-
ва НАН України згідно з розпорядженням Президії НАН
України № 140 від 04.03.14.

Ключові слова: РНДБ, радіотелескоп, дзеркальна антена,
охолоджуваний S/X/Ka-опромінювач, діаграма спрямо-
ваності, колова поляризація, система електродинаміч-
ного моделювання.

*A. A. Kirilenko, A. O. Perov, V. N. Skresanov,
S. A. Steshenko, V. V. Glamazdin, M. P. Natarov, A. I. Shubny*
O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

**MULTIFREQUENCY FEED OF REFLECTOR
ANTENNA FOR THE RADIOTELESCOPE
CRYOGENIC RECEIVER FOCAL BLOCK FOR
THE NEW GENERATION VLBI2010 NETWORK:
SYNTHESIS, DESIGN, EXPERIMENT**

The new configuration of three-band S/X/Ka feed of a radio
telescope reflector antenna for VLBI2010-compatible radio
telescopes is proposed. We discuss its parameters as well as the
developed rigorous electrodynamic model.

Key words: VLBI, radiotelescope, reflector antenna, cooled
S/X/Ka feed, pattern, circular polarization, electrodynamic
simulation system.