

На правах рукописи

АНАМОВА
РУШАНА РИШАТОВНА

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАССИРОВКИ ВОЛНОВОДОВ
ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК**

Специальность 05.13.12.
«Системы автоматизации проектирования»
(авиационная и ракетно-космическая техника)

*Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук*

Москва
2013

Работа выполнена в **ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)» (МАИ).**

Научный руководитель:

кандидат технических наук **Рипецкий Андрей Владимирович**

Официальные оппоненты:

Комков Владимир Александрович, д.т.н., профессор,
Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), заведующий кафедрой «Теория
машин и механизмов»

Козаченко Дмитрий Александрович, к.т.н.,
ООО «Аутодеск (Си-Ай-Эс)», эксперт по корпоративным решениям

Ведущая организация: **ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР»**

Защита состоится «27» декабря 2013г. в 14-00 часов на заседании
диссертационного совета Д212.125.13 Московского авиационного института
(национального исследовательского университета) по адресу:
125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «26» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д212.125.13
кандидат технических наук, профессор

Л.В. Маркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В состав современных наземных систем связи для управления воздушным движением, радиолокационных станций (РЛС) авиационных комплексов радиолокационного дозора и наблюдения, радиолокационных комплексов противоракетной и противовоздушной обороны входят фазированные антенные решетки (ФАР). Антенная система на основе ФАР является одним из наиболее сложных и дорогостоящих элементов РЛС. Совершенствование антенной техники, повышение тактико-технических требований по дальности действия, по точности и качеству распознавания целей влечет за собой значительное увеличение мощности излучаемого сигнала, повышение рабочей частоты станций и расширение полосы излучаемого и принимаемого сигнала. Зачастую это приводит к увеличению количества излучающих элементов ФАР и, как следствие, к усложнению конструкции. Неотъемлемой частью ФАР являются линии передачи электромагнитной энергии (тракты). Тракты располагаются внутри конструкции апертуры, внутри опорно-поворотного устройства и за его пределами и могут быть выполнены на основе коаксиальных и оптических кабелей или на основе волноводов, что зависит от передаваемой мощности высокочастотных колебаний. Особую важность представляет задача проектирования волноводных трактов, расположенных внутри конструкции апертуры (рис.1), поскольку к ним предъявляются жесткие радиотехнические требования (равнодлинность волноводных ветвей, соединяющих выходы делителя мощности с излучателями, минимальная длина тракта, минимальное количество изгибов волноводов), при реализации которых проектировщик сталкивается с массой ограничений: конструкторских (ограниченное пространство для размещения), технологических (стандартные радиусы изгиба волноводов, унификация длин и конфигураций волноводов),

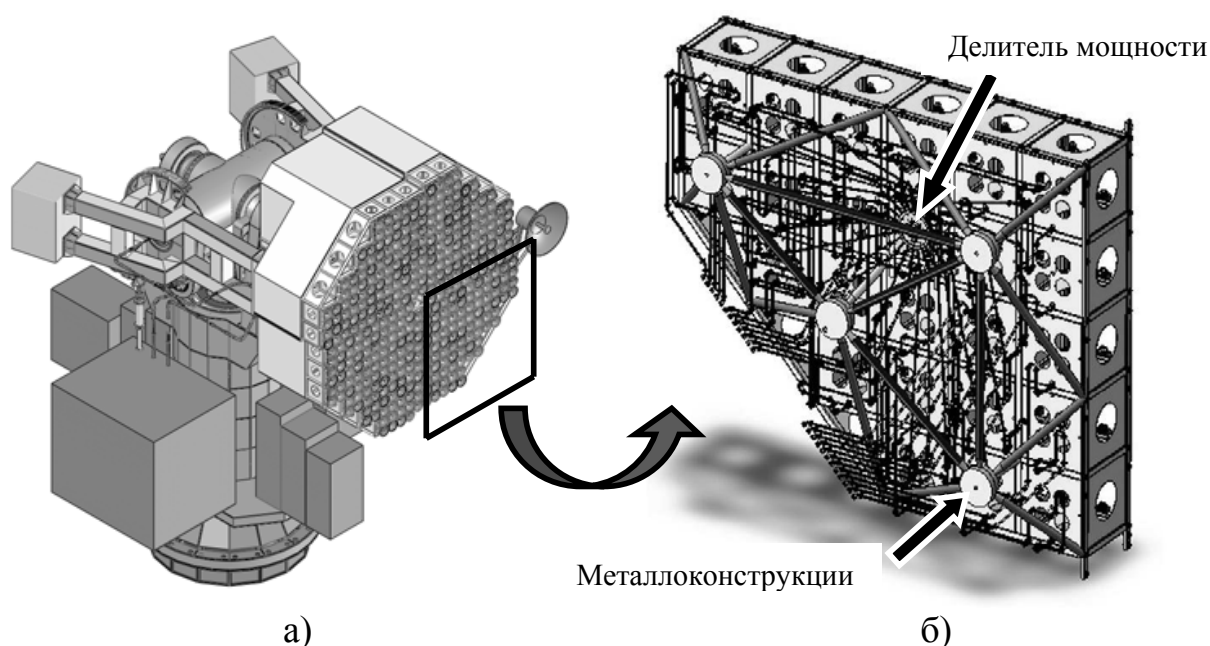


Рис.1. Размещение волноводных трактов внутри конструкции апертуры:
а) ФАР; б) подрешетка ФАР (вид со стороны монтажа трактов)

эксплуатационных (удобство сборки и ремонта конструкции). Определение конкретного исполнения тракта является сложной задачей и выполняется инженером высокой квалификации. Поиск оптимальной по заданным критериям конструкции волноводного тракта значительно увеличивает трудоемкость проектирования антенной системы, что создает предпосылки для автоматизации процесса конструирования тракта. Такая задача актуальна для крупноапертурных ФАР, у которых размер антенного полотна достигает нескольких сотен и даже тысяч длин волн.

Проведенный анализ систем автоматизированного проектирования (САПР), применяемых для проектирования радиолокационных комплексов, показал, что задача автоматизированной трассировки волноводных трактов ФАР, соединяющих выходы делителя мощности с излучателями, не решена в полном объеме и является актуальной как с точки зрения выбора метода трассировки, так и с позиции разработки методики автоматизации проектирования. Это обусловлено, прежде всего, тем, что часть существующих программ трассировки волноводов не предназначена для трассировки с обеспечением условия равнодлинности волноводных ветвей тракта (например, программный модуль САТИА «Waveguide Design»), а часть программ для трассировки волноводов внутри конструкции апертуры ФАР (например, программный модуль «ТРАКТ» в среде AutoCAD) не обладает интеграцией с системами 3D-моделирования и не позволяет выполнять многослойную пространственную трассировку с произвольными углами изгиба. Трассировка волноводов с произвольными углами изгиба позволила бы эффективнее использовать монтажное пространство и сократить суммарную длину тракта за счет более компактного исполнения.

Необходимо отметить, что произвольные углы изгиба возможно реализовать не для всех волноводных трактов. Часто многомодовые волноводы, имеющие круглое сечение, целесообразно изгибать только под 90° .

В связи с тем, что системы 2D-проектирования в настоящее время почти полностью вытеснены системами 3D-проектирования, актуальной является разработка методов пространственной трассировки, а также процедур перехода к 3D-модели после получения эскиза пространственной трассировки. 3D-модель открывает возможности обмена данными с САПР для радиотехнических и инженерных расчетов (в виде файлов нейтрального формата) и позволяет решать задачу проектирования тракта комплексно: построение модели – предварительный радиорасчет – проработка конструкции – окончательный радиорасчет – расчет на резонансные воздействия – корректировка конструкции. В настоящее время построение твердотельной модели трактов, расположенных внутри апертуры, как правило, осуществляется вручную и занимает длительное время.

Методологические и теоретические основы исследования включают фундаментальные труды, посвященные:

✓ методам и алгоритмам трассировки объектов (Абрайтис Л.Б., Базилевич Р.П., Забалуев Н.Н., Петренко А.И., Тетельбаум А.Я., Широ Г.Э., Lee C.I., Gomory R.E.),

✓ разработке математических моделей объектов проектирования (Курейчик В.М., Дендобренько Б.Н.),

✓ автоматизированному проектированию антенн и устройств СВЧ (Воскресенский Д.И., Гринев А.Ю., Кременецкий С.Д.).

В работах Гумербаева Р.Р., Курейчика В.М., Лебедева Б.К. рассмотрены особенности применения генетических алгоритмов для решения задач трассировки. Работы Базилевича Р.П., Дмитриева П.И., Петросяна Г.С., Полубасова О.Б. посвящены методу гибкой трассировки на модели крупнодискретного топологического рабочего поля с триангуляцией Делоне. Топологические алгоритмы трассировки многослойных печатных плат рассмотрены в работах Забалуева Н.Н., Петренко А.И. и Тетельбаума А.Я. Некоторые положения вышеперечисленных авторов легли в основу разработанной соискателем методики обеспечения равнодлинности с применением топологических приемов на квазисегментном рабочем поле.

Изученные источники содержат работы по трассировке печатных плат и больших интегральных схем (Дмитриев П.И., Лузин М.С., Петросян Г.С., Полубасов О.Б. и др.), по трассировке трубопроводов (Егоров С.Я., Малыгин Е.Н., Немтинов В.А. и др.). Анализ работ показал, что задача трассировки волноводов в случае многослойной разводки более близка к задаче трассировки многослойных печатных плат по характеру накладываемых ограничений к геометрии трасс и по принципу трассировки. Выявленная аналогия между трассировкой дифференциальных пар в печатном монтаже и трассировкой волноводных трактов внутри апертуры ФАР по накладываемым условиям равнодлинности трасс позволила рассмотреть возможность применения решений по трассировке проводников печатных плат для трассировки волноводов.

Целью диссертационной работы является разработка научно-методического и программного обеспечения (ПО) САПР для пространственной трассировки волноводных трактов внутри конструкции апертуры ФАР с заданными ограничениями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- выявить геометрические особенности волноводных трактов;
- разработать математические модели монтажного пространства и элементов конструкции ФАР, участвующих в трассировке;
- разработать методику пространственной трассировки волноводов,
- разработать методику обеспечения равнодлинности волноводных ветвей тракта;
- разработать алгоритмическое и программное обеспечение САПР для трассировки волноводов;
- осуществить интеграцию разработанного ПО с современной системой геометрического моделирования (СГМ);
- провести верификацию разработанного ПО на предмет корректности получаемых результатов и применимости на этапах проектирования ФАР.

Объект исследования – геометрическая модель волноводного тракта, соединяющего выходы делителя мощности с излучателями и расположенного внутри конструкции апертуры ФАР.

Предмет исследования - математические модели и методы трассировки, позволяющие реализовать трассировку волноводного тракта с учетом заданных радиотехнических требований и конструкторско-технологических ограничений.

Методы исследования. Для решения вышеуказанных задач в работе применялись методы теории графов, теории множеств, методы линейного программирования, технологии баз данных. Выявление особенностей геометрии тракта осуществлено на основе анализа конструкций крупноапертурных ФАР наземного базирования. Математическая задача трассировки волноводных трактов внутри конструкции апертуры ФАР представлена как задача многокритериальной дискретной оптимизации.

Научная новизна:

1. Разработана методика трассировки волноводных трактов внутри конструкции апертуры ФАР, отличающаяся от известных пространственной реализацией (однослойной и многослойной трассировки) и произвольными углами изгиба трасс.

2. Разработана методика обеспечения равнодлинности трасс, основанная на переходе к квазисегментному рабочему полю и отличающаяся от существующих методик тем, что позволяет проводить трассы равной длины под произвольным углом и с минимальным количеством изгибов.

3. Предложена модель сегментного рабочего поля на основе адаптивной радиальной сетки, отличающаяся от известных моделей рабочего поля возможностью проведения неортогональных трасс и свойством адаптивности, позволяющим уменьшить время решения задачи.

4. Разработан алгоритм корректировки длин трасс. Алгоритм не требует больших вычислительных и временных затрат.

5. Разработана архитектура программного модуля трассировки волноводных трактов, отличающегося от существующих программных решений по трассировке волноводных трактов внутри конструкции апертуры ФАР интеграцией с СГМ SolidWorks.

Практическая ценность.

1. На основе разработанного методического и алгоритмического обеспечения создан программный модуль пространственной трассировки волноводных трактов Waveguide Design Solution (WDS), поддерживающий интеграцию с СГМ SolidWorks. Разработанный программный модуль позволяет:

- производить однослойную и многослойную трассировку волноводов внутри апертуры ФАР с заданными ограничениями;
- реализовывать трассы произвольной конфигурации с обеспечением условия их равнодлинности;
- экспортировать рассчитанные трассы в SolidWorks в виде 3D-модели.

2. Использование разработанного программного модуля WDS при проектировании реальных конструкций ФАР позволило:

- сократить сроки на проектирование волноводных трактов в 3 раза по сравнению с ручным проектированием,
- сократить суммарную длину тракта на 4%,
- сократить стоимость изготовления тракта на 34% за счет уменьшения количества изгибов волноводных ветвей тракта.

Внедрение результатов работы. Разработанная методика пространственной разводки волноводных трактов, методика обеспечения равнодлинности трасс и программный модуль WDS внедрены на предприятии ОАО «Радиофизика», а также в учебный процесс на кафедре 904 «Инженерная графика» МАИ в качестве составляющей практических работ, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Достоверность разработанных методик и моделей подтверждается тестированием программного модуля WDS при проектировании конструкции волноводных трактов реальных ФАР. Геометрия осевых линий тракта, рассчитанных с помощью WDS, удовлетворяет предъявляемым требованиям. Отклонение характеристик рассчитанных трасс от эталонных требований (погрешность на равнодлинность, указанная в техническом задании на конструирование волноводного тракта) не превышает 5%.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических (НТК) и научно-практических (НПК) конференциях: IX Молодежная НТК «Радиолокация и связь – перспективные технологии» (ОАО «Радиофизика», 2011 г.), Московская молодежная НПК «Инновации в авиации и космонавтике –2013» (Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2013 г.), Международная НПК «Наука и образование XXI века», г. Уфа (Научный центр «Аэтерна», 2013 г.), 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо'2013, г. Севастополь, Украина (Севастопольский национальный технический университет (СевНТУ), 2013 г.), IX Международная конференция по теории и технике антенн, г. Одесса, Украина (Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, 2013), IV НТК молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО» (ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», 2013 г.).

Содержание диссертационной работы отражено в 11 печатных работах [1-11], в том числе в 4 периодических изданиях, рекомендованных ВАК [1-4].

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, библиографического списка (112 работ отечественных и зарубежных авторов) и приложения. Общий объем диссертации – 136 страниц, включая 13 таблиц и 34 рисунка.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика трассировки волноводных трактов внутри апертуры ФАР с возможностью пространственной реализации (однослойной и многослойной

трассировки) и произвольными углами изгиба трасс.

2. Методика обеспечения равнодлинности трасс, основанная на переходе к квазисегментному рабочему полю.

3. Модель сегментного рабочего поля на основе адаптивной радиальной сетки.

4. Алгоритм корректировки длин трасс.

5. Архитектура программного модуля пространственной трассировки волноводных трактов WDS, интегрированного с СГМ SolidWorks.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дан обзор существующих решений автоматизированной трассировки волноводных трактов, обоснована актуальность предметной области, описаны методологические и теоретические основы исследования, приведены полученные научные результаты, сформулирована практическая ценность диссертационной работы, а также дана общая характеристика диссертации.

Первая глава посвящена постановке задачи. Сформулированы цель, объект и предмет исследования. Обозначены задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

В работе формализованы следующие конструкторские и технологические ограничения Θ_W на трассировку волноводных трактов:

1) требование равнодлинности волноводных ветвей тракта:

$$L(t_1) = L(t_2) = \dots = L(t_N); \quad (1)$$

2) ограничение на длины начального и конечного («заходных») участков и на длины прямых участков между точками изгиба трассы:

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \geq l_{\min}, \quad (2)$$

где $A_1(x_1, y_1, z_1), A_2(x_2, y_2, z_2)$ - точки изгиба трассы, либо начальная и конечная точки заходного участка,

l_{\min} - минимальная длина прямого участка, задаваемая из технологических соображений;

3) радиусы изгиба траектории по ОСТ 4ГО.010.019-72 «Трубы волноводные. Радиусы и углы изгибов. Основные параметры и размеры»;

4) условие проведения трасс с произвольными углами изгиба:

$0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ - область определения угла изгиба волновода, отсчитываемая от оси волновода в направлении его гибки;

5) обеспечение требуемого расстояния между слоями трассировки:

$$|z_{S1} - z_{S2}| = \Delta_S \geq 2l_{\min}, \quad (3)$$

где $|z_{s1} - z_{s2}| = \Delta_s$ - расстояние между слоями трассировки, определяемое как разность координат точек перехода на второй слой;

б) прокладывание трасс в пределах монтажного пространства конструкции апертуры:

$$A_j(x_j, y_j, z_j), V_g = F(g_k), A_j \in V_g, \quad (4)$$

где $A_j(x_j, y_j, z_j)$ - точка, принадлежащая трассе t_j ,

$V_g = F(g_k)$ - объем монтажного пространства апертуры, являющийся функцией от геометрических характеристик апертуры g_k (в случае прямоугольной конструкции $g_k = \{a, b, c\}$, где a, b, c - длина, ширина, высота конструкции апертуры соответственно);

7) условие, обеспечивающее непересечение трасс друг с другом, и ограничение на расстояние между трассами одного слоя - для любых точек $A_i = (x_i, y_i, z_i)$ и $A_j = (x_j, y_j, z_j)$, принадлежащих соседним трассам t_i и t_j , должно выполняться неравенство:

$$d \geq \frac{v_i + v_j}{2} + d_{\min}, \quad (5)$$

где $d = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$ - расстояние между точками; параметр v определяет геометрическую характеристику фланца волновода: для круглых фланцев v является диаметром фланца; для прямоугольных v рассматривается как диаметр окружности, описанной вокруг фланца; d_{\min} - минимальное расстояние между фланцами соседних волноводных линий, которое является следствием требований собираемости конструкции и удобства обслуживания;

8) обход зон, запретных для трассировки.

Для того, чтобы трасса удовлетворяла условию, необходимо и достаточно, чтобы для любой точки $Q(x_q, y_q, z_q) \in t$ выполнялась система неравенств:

$$\begin{cases} |x_m - x_q| \geq \frac{a_m + v}{2} + d_{\min}, \\ |y_m - y_q| \geq \frac{b_m + v}{2} + d_{\min}, \\ |z_m - z_q| \geq \frac{c_m + v}{2} + d_{\min}, \end{cases} \quad (6)$$

где (x_m, y_m, z_m) - координаты центра запретной зоны m ;

(a_m, b_m, c_m) - габаритные размеры зоны.

Поскольку рассматриваются крупногабаритные ФАР наземного базирования, то в работе не учитываются ограничение по массе конструкции, а также тепловыделения ввиду обязательного наличия системы охлаждения в антенных устройствах подобного типа.

Дана математическая постановка задачи трассировки волноводных трактов внутри конструкции апертуры ФАР. Поскольку приходится учитывать несколько критериев, которые могут оказаться противоречивыми, то задача представлена как задача многокритериальной дискретной оптимизации:

$$\text{найти } t^* = \arg \min \{ \Psi(t) \mid t \in T \}, \quad (7)$$

где $\Psi(t)$ - целевая функция;

t - вариант трассировки, в виде совокупности трасс t_j ;

T - множество вариантов трассировки, удовлетворяющих ограничениям Θ_W ,

t^* - оптимальный вариант трассировки.

Целевая функция записана в аддитивной форме:

$$\Psi = \sum_{i=1}^p \lambda_i \tilde{\varphi}_i, \quad (8)$$

где Ψ – аддитивный критерий,

λ_i – весовой коэффициент,

$\tilde{\varphi}_i$ – частный критерий в приведенной форме: $\tilde{\varphi}_i = \frac{\text{extr} \varphi_i(t)}{\varphi_i(t)} * 100$,

где $\text{extr} \varphi_i(t)$ - экстремум функции $\varphi_i(t)$;

p – число частных критериев.

Исходя из предъявляемых к тракту требований, рассмотрены несколько частных критериев. По результатам экспертной оценки выбраны два наиболее значимых критерия:

1) суммарная длина тракта (вес критерия $\lambda_1 = 0,5$):

$$\varphi_1(t) = \sum_{j=1}^N L(t_j), \quad (9)$$

где $t_j = \{x_j, y_j, z_j\}$ – трасса, заданная в виде координат ее точек;

N - число излучателей.

2) суммарный угол изгиба тракта – сумма всех углов изгиба трасс (вес критерия $\lambda_2 = 0,5$):

$$\varphi_2(t) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{K_j} \arccos \frac{\vec{t}_{ij} \cdot \vec{t}_{(i+1)j}}{|\vec{t}_{ij}| \cdot |\vec{t}_{(i+1)j}|}, \quad (10)$$

где t_{ij} и $t_{(i+1)j}$ - участки трассы t_j , образующие i -й угол излома трассы,

K_j - количество изгибов j - й трассы.

Оба критерия подлежат минимизации. Весовые коэффициенты (веса) критериев определены на основе экспертной оценки. Экспертная оценка произведена в виде опроса экспертов (специалистов в области разработки антенных систем, инженеров высокой квалификации) с последующей статистической обработкой результатов.

Исходными данными для трассировки являются:

- набор параметров, задающих краевые условия (координаты входов излучателей, координаты выходов делителя мощности);
- набор исходных параметров, задающих ограничения (геометрические характеристики апертуры ФАР; радиусы изгиба волноводной линии; минимальная длина прямого участка; параметры несущих металлоконструкций, расположенных внутри монтажного пространства апертуры).

Определено место трассировки волноводных трактов на этапах проектирования наземных ФАР радиолокационных комплексов (рис.2).



Рис.2. Этапы жизненного цикла крупноапертурных ФАР

Проектирование волноводного тракта начинается с определения базового состава элементов на основании требуемых радиотехнических характеристик (эскизный проект). Посредством радиотехнического расчета производится уточнение номенклатуры элементов, после чего осуществляется трассировка волноводных линий (технический проект). Параллельно ведется разработка рабочей конструкторской документации (твердотельное моделирование и выпуск чертежей). Задача трассировки является одной из самых трудоемких при проектировании волноводного тракта.

Проведен анализ конструкций ФАР с волноводной разводкой трактов с целью выявления особенностей геометрии волноводных трактов, расположенных внутри конструкции апертуры ФАР.

Рассмотрены четыре конструкции крупноапертурных ФАР наземного базирования:

1. РЛС «Руза»: ФАР, содержащая 4 подрешетки по 30 излучателей в каждой (делитель мощности 1:31);

2. РЛС «Самара»: ФАР из 19 унифицированных модулей (делитель мощности 1:19);

3. РЛС «Дон»: ФАР, содержащая 4 подрешетки по 30 излучателей в каждой (делитель мощности 1:30);

4. ФАР миллиметрового диапазона длин волн: 4 подрешетки по 24 секции с 4 излучателями в каждой (делитель мощности 1:24).

В результате анализа конструкции волноводных трактов подрешеток выявлены следующие особенности трассировки.

1. Возможно два варианта реализации трассировки: ортогональная и неортогональная. В одной волноводной линии могут быть совмещены оба способа.
2. Трассировка может проводиться в одной и в двух плоскостях.
3. Трассы имеют «заходные» участки, т.е. начальные и конечные участки трасс прямые, причем участки, идущие от выходов делителя, расположены в радиальном порядке.

Вторая глава посвящена разработке научно-методического обеспечения САПР для трассировки волноводов.

Оценена применимость существующих методов трассировки объектов к задаче трассировки волноводных трактов, указаны их достоинства и недостатки. По результатам анализа выбран тополого-геометрический метод.

Проанализированы модели рабочего поля, используемые для решения задачи трассировки объектов. По результатам анализа применение существующих моделей рабочего поля (непрерывное метрическое, дискретное метрическое, топологическое) для решения задачи трассировки волноводных трактов внутри апертуры ФАР признано неэффективным из-за следующих недостатков: жесткая фиксация трасс (непрерывное метрическое, дискретное метрическое), ортогональность (дискретное метрическое) и сложность контроля метрических ограничений (топологическое). Тем самым обоснована необходимость разработки новой модели рабочего поля, которая была бы

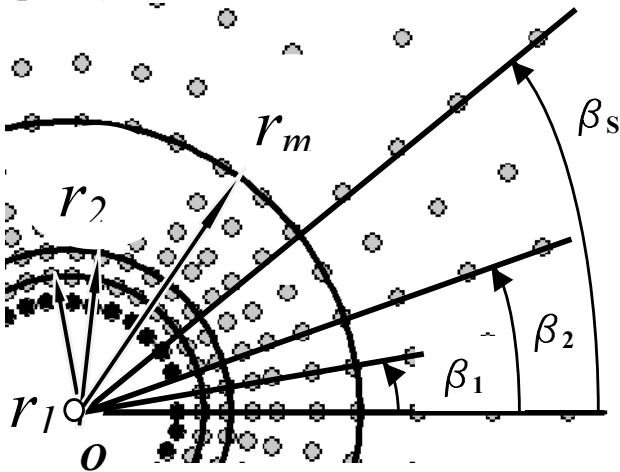
лишена выявленных недостатков, позволила реализовать выбранный метод трассировки и обеспечить выполнение заданных ограничений.

Предложена модель сегментного рабочего поля (СРП) в виде адаптивной радиальной сетки (АРС).

Плоскость, в которой расположены выходы делителя мощности, названа плоскостью проектирования, а область на плоскости проектирования, соответствующая монтажному пространству конструкции апертуры ФАР, - полем проектирования.

Разработанная АРС представляет собой множество точек (вспомогательные узлы сетки), расположенных на поле проектирования. К основным узлам сетки относятся точки, соответствующие центрам выходов делителя мощности и входов излучателей. На АРС накладывается условие: окрестности точек, определяющих положение зон запрета трассировки - несущих металлоконструкций (центры фигур, которые получаются при мысленном рассечении металлоконструкций плоскостью поля проектирования) не должны содержать вспомогательных узлов. Местоположение узлов АРС на поле проектирования однозначно определено в полярной системе координат, центр которой связан с центром делителя мощности.

Адаптивность описанной радиальной сетки заключается в возможности изменения параметров, определяющие частоту сетки, а именно: шаг изменения радиусов окружностей $\Delta r = r_{m+1} - r_m$ и шаг изменения углов лучей $\Delta\beta = \beta_{s+1} - \beta_s$, на которых размещены вспомогательные узлы АРС (рис.3).



Эти параметры настраиваются исходя из следующих соображений:

- требуемая точность трассировки;
- расположение основных конструктивных элементов (несущих металлоконструкций, делителя мощности, излучателей).

Рис.3. Параметры, определяющие адаптивную радиальную сетку

Предложенное СРП включает в себя узлы АРС и соединяющие их отрезки, названные сегментами (рис.4). Проведение трасс осуществляется по сегментам через узлы АРС в направлении от выходов делителя мощности к излучателям. На СРП накладывается ограничение: в каждый узел может входить и выходить из него только одна трасса. Важным свойством предложенной модели СРП является возможность изменения его структуры путем добавления и удаления сегментов, что достигается заданием для каждого узла максимального

количества ближайших узлов к соединению (для начальных точек трасс – «источников» (выходы делителя), для конечных точек трасс – «потребителей» (излучатели), для промежуточных точек трасс – вспомогательных узлов АРС).

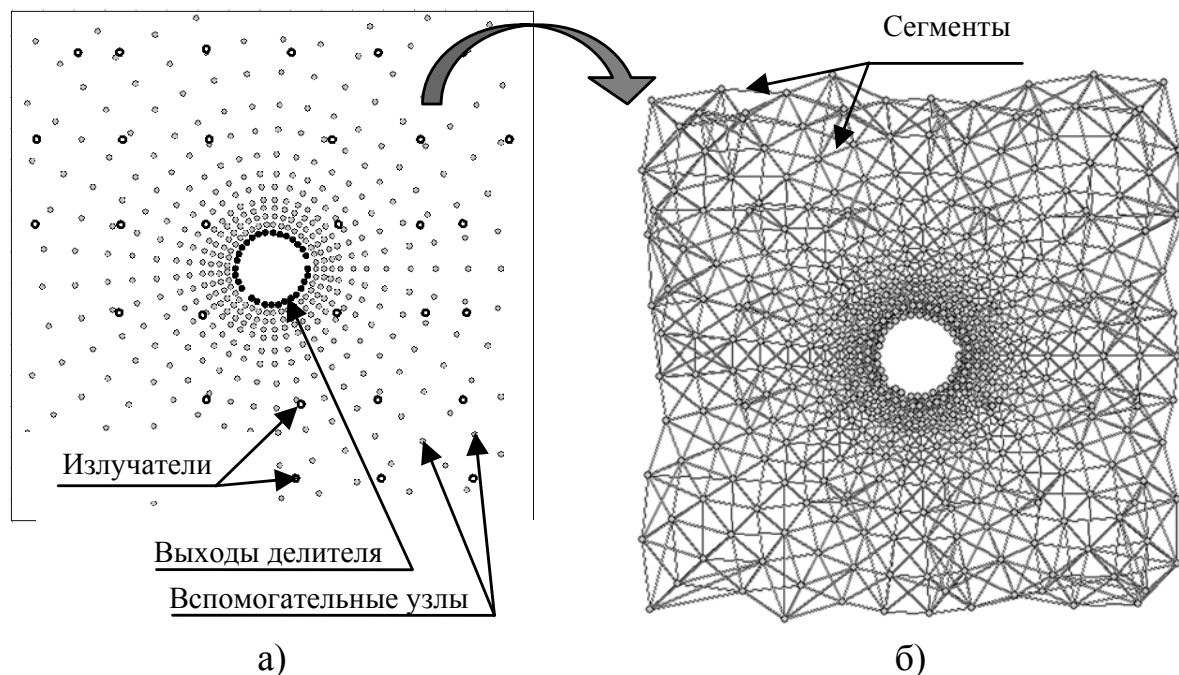


Рис.4. Адаптивная радиальная сетка (а) и построенная на ней модель сегментного рабочего поля (б)

Разработанная модель СРП на основе АРС обладает следующими преимуществами: позволяет проводить трассы под произвольным углом, по сравнению с регулярным дискретным рабочим полем требует меньших затрат памяти ЭВМ и времени при программной реализации. Это достигается за счет компромисса между точностью решения и временем и ресурсами для его реализации: учащенная сетка, требующая большего количества вычислений, применяется только в критических областях рабочего поля (вблизи делителя мощности, излучателей и зон запрета трассировки). Такой подход позволяет получить достаточно точное решение в наиболее ответственных областях и избежать излишних вычислений в менее ответственных. Свойство радиальности разработанной АРС дает возможность проводить трассы от делителя мощности сразу в радиальных направлениях, без изгибов вблизи заходных участков, которые были бы неизбежны при применении других моделей рабочего поля.

Однако, при программной реализации описанной модели СРП возможны следующие проблемы:

- необоснованное увеличение частоты сетки ведет к увеличению времени решения задачи;
- в случае большого шага сетки по радиусу и малого по углу при генерации сегментов могут возникать «дыры» в сетке и, как следствие, отсутствие 100%-ой разводки трасс.

В связи с вышесказанным проведены исследования по влиянию параметров АРС и СРП на результат трассировки и выработаны проектные рекомендации по их настройке. Рекомендации по настройке параметров СРП: оптимальное количество узлов к соединению для источников (выходы делителя) – 3, для потребителей (излучатели) – 4, для узлов – 8. Рекомендации по настройке параметров АРС: оптимальная частота узлов АРС - чем ближе к конструктивным элементам, тем выше; четырехугольник, образованный соседними сегментами, стремится к равносторонности.

Для описания модели конструкции элементов ФАР, участвующих в трассировке (выходы делителя мощности, входы излучателей, волноводный тракт, монтажное пространство апертуры), применена теория графов, поскольку использование графов позволяет получить наглядное описание конструкции и построить по нему удобные для реализации на ЭВМ алгоритмы. Разработанная структурная (геометрическая) математическая модель элементов конструкции подрешетки ФАР, дающая сведения о геометрических свойствах объектов, их взаимном расположении и форме, представляет собой ориентированный граф $G(V, U)$. Множество вершин V графа состоит из точек, соответствующих положению металлоконструкций, выходов делителя и входов излучателей, а также вспомогательных точек АРС. Множество дуг U графа образовано вектор-сегментами волноводных линий, соединяющих следующие упорядоченные пары вершин в графе: выход делителя \rightarrow излучатель; выход делителя \rightarrow узел; узел \rightarrow излучатель; узел \rightarrow узел. Направление дуг соответствует направлению распространения электромагнитной энергии в тракте.

Построенный ориентированный граф $G(V, U)$ обладает следующими свойствами.

1. Граф $G(V, U)$ – нагруженный. Подразумевает, что на множестве дуг графа определена весовая функция:

$$l(t_i) = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}, l: U \rightarrow \mathbb{R}. \quad (11)$$

Физическим смыслом веса дуги в графе является длина сегмента, соответствующего волноводной линии.

2. Граф $G(V, U)$ - топологически ассоциированный. Подразумевает взаимно однозначное соответствие вершин и ребер графа топологии монтажного пространства и соединяемых элементов. Топологическая ассоциативность достигается присвоением каждой вершине графа реальных физических координат в соответствии с размерами конструкции.

Путь в графе $G(V, U)$ есть маршрут от выхода делителя мощности к излучателю, проходящий через множество узловых вершин. Согласно геометрии волноводного тракта данный маршрут не имеет повторяющихся ребер, а следовательно, по определению, применяемому в теории графов, представляет собой незамкнутую простую цепь.

Для формулировки ограничений Θ_w (пп.1-8) на языке теории графов дано определение метрики построенного графа $G(V, U)$:

$$\text{функция } d(v_i, v_j) = \sum_k l_k(U), \quad (12)$$

определенная на множестве U ребер графа $G(V, U)$, является метрикой графа $G(V, U)$,

$v_i, v_j \in V$ - вершины графа $G(V, U)$,

$l(U)$ - вес дуги графа (длина ребра),

k - количество дуг графа, образующих кратчайшую цепь, соединяющую вершины v_i, v_j (т.е. волноводную ветвь тракта).

Проведенная оценка математической модели показала, что разработанная структурная (геометрическая) математическая модель элементов конструкции ФАР удовлетворяет предъявляемым требованиям адекватности, точности, универсальности и экономичности.

Предложена методика трассировки волноводного тракта внутри конструкции апертуры ФАР. Методика заключается в декомпозиции задачи на два этапа (проведение трасс минимальной длины и корректировка длин трасс до достижения равнодлинности) с последующим ее решением тополого-геометрическим методом. Базилевичем Р.П. дано следующее определение тополого-геометрического метода: макроструктура трасс определяется геометрическими методами, а микроструктура в небольших областях – с применением некоторых топологических приемов. Исходя из этого определения, предложена методика, заключающаяся в следующем:

1) на первом этапе трассировки – проведение трасс минимальной длины – применяется жесткая фиксация трасс в реальных физических координатах, что позволяет точно определить длину каждой трассы и величину, на которую требуется ее скорректировать для получения равнодлинности всех трасс.

2) на втором этапе – достижение равнодлинности – применяется разработанная методика на основе перехода к топологическому (квасисегментному) рабочему полю.

Проведен анализ существующих методик, позволяющих получать трассы заданной длины: вписывание меандра в прямоугольную область (применяется в САПР для трассировки печатных плат «SPECCTRA»), вписывание «змейки» в трапецеидальную область (Попов Ю.И., Попов С. И., применяется в САПР для трассировки печатных плат «ТороR»), использование геометрических шаблонов удлинения трассы (Иншакова Ю.Б., Янукьян З.А., применяется в САПР для трассировки волноводов «ТРАКТ»). Данные методики неэффективны для обеспечения равнодлинности волноводных ветвей тракта по следующим причинам: большое количество изгибов трассы; фиксированные углы изгиба (90° и 45°). Любые изгибы волноводной ветви приводят к потерям электромагнитной энергии в тракте. Фиксированные углы изгиба (90° и 45°) не позволяют эффективно использовать монтажное пространство и приводят к необоснованному увеличению суммарной длины тракта. В связи с этим возникла необходимость разработки новой методики

корректировки длин трасс, которая позволила бы обеспечить равнодлинность с минимальным количеством изгибов и произвольными углами изгиба трассы.

Предложена методика обеспечения равнодлинности трасс на основе топологических приемов. Разработанная методика включает в себя следующую последовательность действий:

1) расчет длин трасс и выбор «базовой» длины (под «базовой» понимается длина волноводной ветви, соединяющей выход делителя с наиболее удаленным излучателем);

2) определение свободных областей Ω для удлинения трасс (если для какой-либо трассы такая область отсутствует, то происходит сдвиг соседних трасс для ее высвобождения);

3) освобождение фиксации трасс в выделенных областях (переход от геометрического этапа к топологическому – переход на квазисегментное рабочее поле) (рис.5б);

4) «растягивание» трассы в выбранную область до достижения базовой длины (рис.5в);

5) фиксация трасс и проверка выполнения условия равнодлинности.

Термин «квазисегментное» рабочее поле введен по аналогии с термином «квазитриангуляция», предложенным Полубасовым О.Б. При переходе от геометрического этапа к топологическому сегменты СРП, через которые прошла трасса, заменяются прямоугольными дискретами (либо параллелограммами), названными в работе «квазисегментами». Принцип, по которому осуществляется замена, проиллюстрирован на рис.5а.

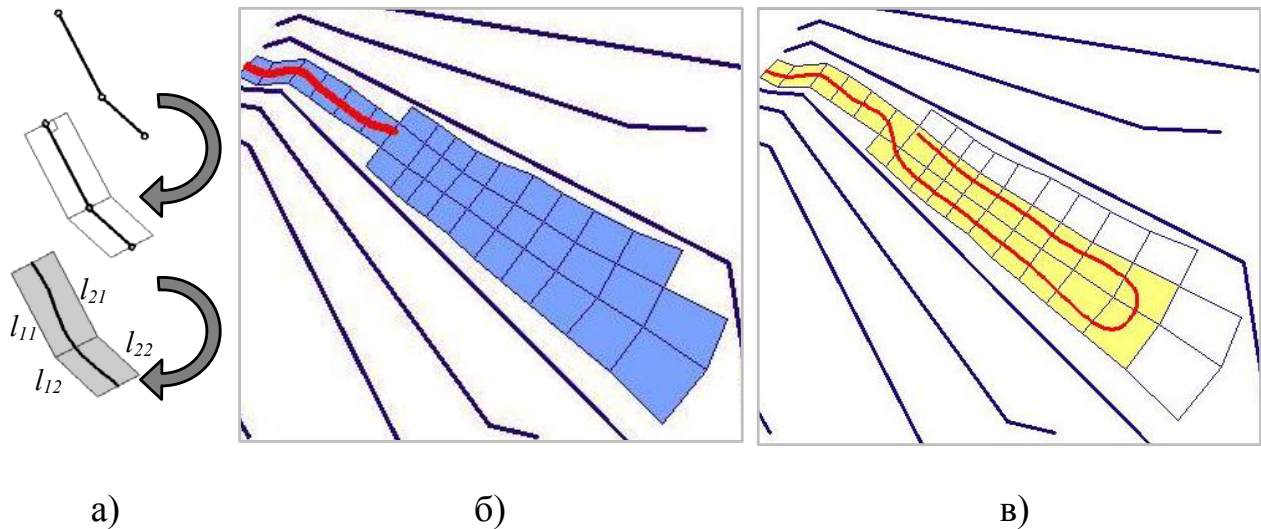


Рис.5. Квазисегментное рабочее поле: а) замена сегментов квазисегментами; б) топологизация области для удлинения; в) удлинение трассы

Такая замена дает возможность перейти к топологическому рабочему полю, т.е. когда положение трассы на рабочем поле определяется уже не координатами узлов АРС, через которые она проходит, а площадью дискретов – квазисегментов. При этом трассе разрешается свободно перемещаться внутри квазисегментов, за исключением начальной и конечной точек трасс, соответствующих выходу делителя мощности и входу излучателя.

Квазисегментами также покрывается область, выделенная для удлинения трассы.

Длина трассы на квазисегментном рабочем поле может быть вычислена только внутри «коридора», образованного сторонами квазисегментов l_{1n}, l_{2n} (рис.5а), т.е. может принимать значения в пределах множества длин:

$$L_i = \{L_{1n}, \dots, L_{2n}\}, L_{1n} = \sum_n l_{1n}, L_{2n} = \sum_n l_{2n}.$$

Исходя из того, как соотносится значение базовой длины L_b с элементами множества $L_i = \{L_{1n}, \dots, L_{2n}\}$, осуществляется разбиение квазисегмента с целью уточнения области размещения трассы. Обратный переход от топологического квазисегментного рабочего поля к реальным физическим координатам осуществляется путем замены области квазисегмента, содержащей трассу, на отрезок, концы которого фиксируются на рабочем поле.

Переход к квазисегментному рабочему полю дает следующие преимущества:

- ✓ возможность удлинять трассу независимо от узлов АРС, что позволяет избежать ломаных участков трасс с недопустимыми (технологически нереализуемыми) углами изгиба;

- ✓ возможность более эффективно использовать пространство поля проектирования, что достигается за счет получения трасс произвольной конфигурации.

Показаны преимущества предложенной методики по сравнению с существующими методиками корректировки длин трасс:

- ✓ минимальное количество изгибов волноводных линий тракта;
- ✓ трассировка под произвольными углами.

Вышеперечисленные преимущества обеспечиваются применением принципов «гибкой» трассировки (Базилевич Р.П.) на предложенной модели топологического квазисегментного рабочего поля.

Третья глава посвящена вопросам разработки алгоритмического обеспечения САПР для трассировки волноводов и его программной реализации.

Проведен анализ существующих алгоритмов трассировки объектов, отмечены их достоинства и недостатки. Выбран параллельный подход к проведению трасс, когда все волноводные ветви тракта трассируются одновременно.

Задача нахождения трасс минимальной длины сведена к задаче линейного целочисленного программирования (ЗЦП). На основе проведенного анализа методов математического программирования для решения ЗЦП выбран метод Гомори (третий алгоритм Гомори), поскольку он позволяет свести к минимуму ошибки, связанные с округлениями при поиске целочисленного решения. Метод основан на многоэтапной линейной аппроксимации ЗЦП, где переход к следующему этапу осуществляется с помощью целочисленного правильного отсечения.

Для решения второго этапа задачи разработан алгоритм корректировки длин трасс для реализации предложенной методики обеспечения равнодлинности. Алгоритм включает в себя следующую последовательность действий.

Шаг 1. Определение базовой длины. Запись одномерного массива $M[i] = \{L_1, L_2, \dots, L_i\}, i = \overline{1, N}$, элементам которого присваивается значение длин проложенных трасс. Поиск в массиве элемента с максимальным значением $L_b := \max \{L_1, \dots, L_i\}$ (требует в худшем случае N операций).

Шаг 2. Вычисление разностной длины. Под «разностной длиной» понимается величина, на которую необходимо увеличить длину трассы до достижения базовой длины. В массиве $M[i]$ для каждого элемента вычисляется разность: $L_i - L_b$ и записывается в массив $Mr[i]$ (требует выполнения N операций).

Шаг 3. Определение областей для удлинения трасс. Для каждого узла трасс минимальной длины, начиная с конечного, подсчитывается количество ближайших незанятых узлов по обе стороны от трассы. Результат записывается в двумерный массив $Mm[i, j]$ (счетчики массива: $i = \overline{1, \dots, N}; j = \overline{1, 2}$). По результатам сравнения элементов массива определяется область для удлинения каждой трассы путем выбора максимального элемента массива (требует выполнения N операций).

Шаг 4. Построение квазисегментов в выделенных областях. Для каждого сегмента (далее - отрезка), по которому проходит трасса минимальной длины, начиная с конечного узла трассы:

{
на расстоянии δ (определяется как половина расстояния до соседнего узла, лежащего на той же окружности АРС) от конца первого отрезка (соответствует излучателю) построение точек на прямой, перпендикулярной отрезку, по обе стороны от него;
для остальных концов отрезков построение точек на прямой, параллельной предыдущей;
построение четырехугольника на каждом из четырех узлов;
}.

Для каждого построенного квазисегмента:

{
выбрать сторону, принадлежащую выделенной для удлинения области;
достроить ее до квазисегмента, добавив два узла и три стороны;
повторить, пока не будет занята вся выделенная для удлинения область;
}.

Таким образом, для каждого квазисегмента в памяти хранится 4 указателя на образующие его узлы и 4 указателя на смежные с ним квазисегменты.

Шаг 5. **Корректировка длины.** Для каждой трассы, начиная с конечного узла:

{
добавлять к квазисегменту следующий
(выбор каждого последующего квазисегмента из всех возможных вариантов (рис.6) производится по результатам расчета углов, образованных векторами средних линий текущего квазисегмента и потенциальных последующих квазисегментов, при этом выбирается вариант с **наименьшим** значением угла и в пределах $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$),
пока сумма длин наибольших продольных (параллельных трассе) сторон квазисегмента не будет больше или равна базовой длине;
}

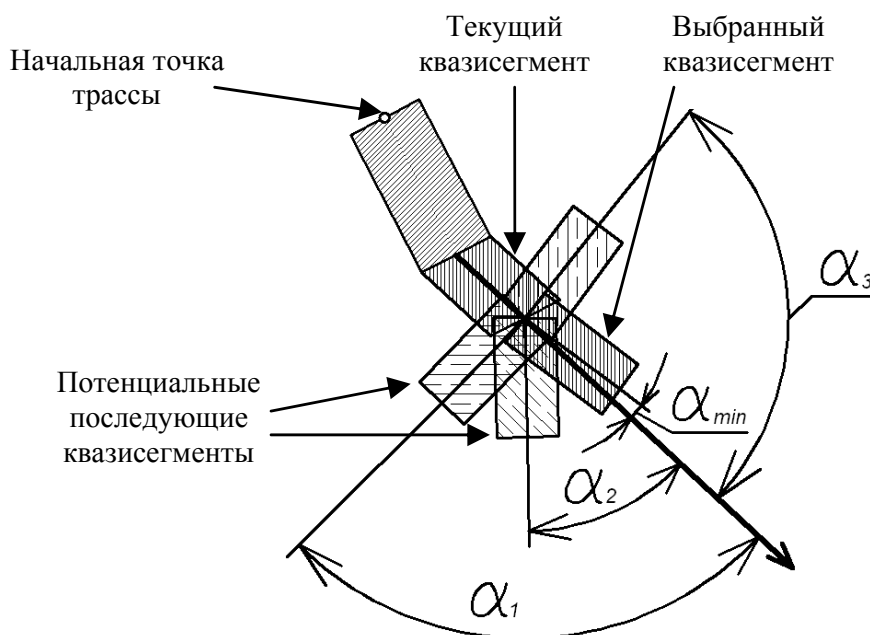


Рис.6. Выбор квазисегментов при удлиннении трассы

Шаг 6. **Фиксация трассы.** Для каждой трассы:

- {
6.1. вычислить сумму длин наибольших и наименьших сторон квазисегментов, образующих трассу: $L_{1i} = \sum_i l_{1i}$ и $L_{2i} = \sum_i l_{2i}$;
6.2. если $(L_{1i} - L_b) > (L_b - L_{2i})$,
то выбираем часть квазисегмента, содержащую сторону l_{1i} ;
иначе
6.3. если $(L_{1i} - L_b) < (L_b - L_{2i})$,
то выбираем часть квазисегмента, содержащую l_{2i} ;
иначе

6.4. трасса проходит посередине квазисегмента;

};

Для пунктов 6.2. и 6.3. повторяем пп.6.1-6.3, пока не получим п.6.4.

Далее для каждой загруженной (содержащей трассу) части квазисегмента заменяем часть квазисегмента ее средней линией.

Шаг 7. Проверка равнодлинности. Повторить шаги 1, 2.

Найти максимальный элемент в массиве $\Delta_{abc} := \max Mr[i]$. Сравнить с заданной погрешностью на равнодлинность $\bar{\Delta}$:

{

если $\Delta_{abc} \leq \bar{\Delta}$,

то завершить алгоритм;

иначе повторить шаги 3-7

};

Описанный алгоритм позволяет за конечное число шагов реализовать трассы равной длины и не требует больших вычислительных и временных затрат.

Алгоритм проведения трасс минимальной длины и предложенный алгоритм корректировки длин трасс реализованы в разработанном автором программном модуле трассировки волноводных трактов WDS, который представляет собой Windows-приложение (рис.7).

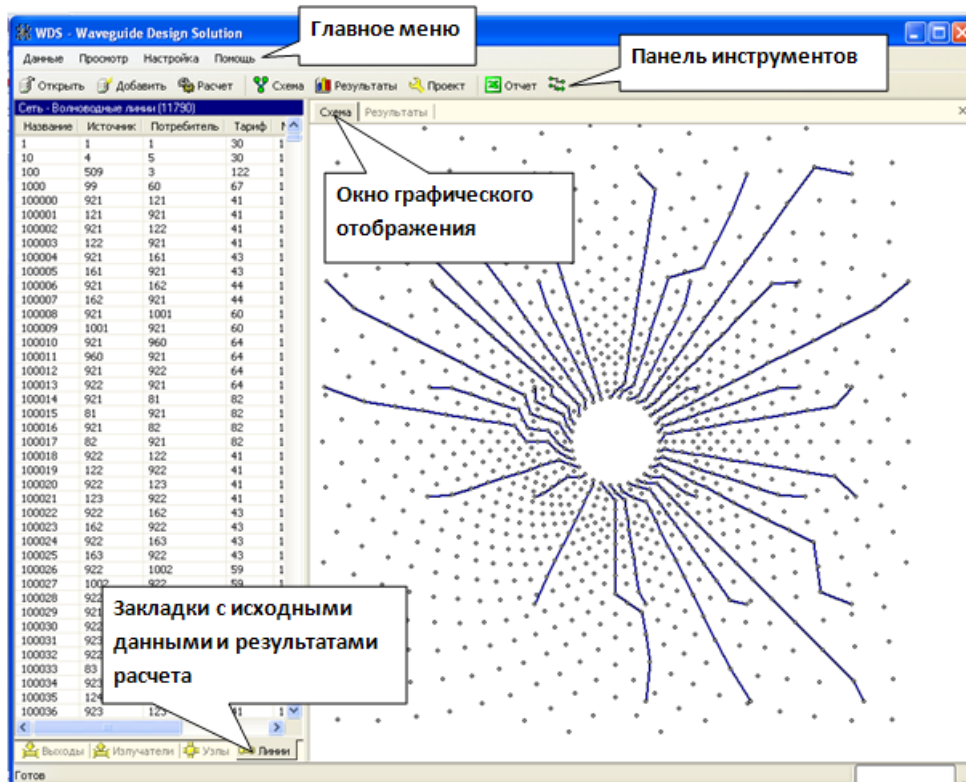


Рис.7. Внешний вид главного окна программного модуля WDS

Принцип работы программного модуля WDS заключается в интеграции вычислительного блока, включающего математические модели, методы и алгоритмы, с системой объемного геометрического моделирования

SolidWorks. Подобный подход позволяет не только решить задачу трассировки с требуемой точностью, но и получить на выходе 3D-модель тракта.

Возможности программного модуля WDS включают:

- ✓ расчет трасс минимальной длины;
- ✓ расчет трасс равной длины с заданной точностью;
- ✓ экспорт рассчитанных трасс в файл SolidWorks в виде эскиза, состоящего из примитивов SolidWorks (точки, дуги, отрезки), а также построение 3D-модели тракта по экспортированным трассам;
- ✓ вывод отчета в виде файла MS Excel, содержащего информацию о суммарной длине тракта и суммарных углах изгиба трасс.

При выборе СГМ для интеграции с программным модулем WDS, определяющими явились следующие преимущества системы SolidWorks по сравнению с другими САПР:

- ✓ наличие интерфейса прикладного программирования;
- ✓ широкие возможности по трехмерному моделированию;
- ✓ возможности обмена данными в виде файлов нейтральных форматов (step, sat, stl и др.) со специализированными программами для радиотехнических (CST Microwave Studio, HFSS) и инженерных расчетов (FEMAP);
- ✓ оптимальное соотношение «цена» - «качество».

Программный модуль написан на языке C++ с применением Microsoft Visual Studio 2010. Интеграция программного модуля WDS с системой SolidWorks (версия 2012) реализована с помощью разработанного автором программного приложения WDS-export, написанном на языке C# с использованием прикладного интерфейса программирования SolidWorks API. Объем памяти, который занимает программный модуль, составляет 450 КБ.

Приведены результаты тестирования программного модуля WDS для расчета реальных конструкций трактов подрешеток ФАР с 30 и 24 излучателями. Апробация программного модуля была произведена на ПК со следующими характеристиками: операционная система Windows XP Professional; Intel Core 2 Duo CPU; 1,58 ГГц, 3.00 ГБ ОЗУ.

Произведен расчет трассировки тракта для подрешетки с габаритами 3000x3000 м, состоящей из 30 излучателей. Количество узлов сетки: 550. Время расчета минимальных трасс (волноводных линий минимальной длины) составило 10 мин. Получена 100%-ая разводка трасс без пересечений с обеспечением равнодлинности трасс с заданной точностью (рис. 8а) и последующим получением 3D-модели тракта (рис. 8б) после экспорта рассчитанных трасс с помощью WDS-export.

Произведен расчет трассировки тракта для подрешетки с габаритами 2530x2110 мм, состоящей из 24 излучателей (рис.9). Количество узлов сетки – 760. Время расчета минимальных трасс составило 10 мин. Реализована двухслойная 100%-ая разводка трасс без пересечений с обеспечением равнодлинности трасс с заданной точностью (совмещенная топология трасс представлена на рис. 9а) и последующим получением 3D-модели тракта (рис. 9б).

ОКНО WDS

ОКНО SOLIDWORKS

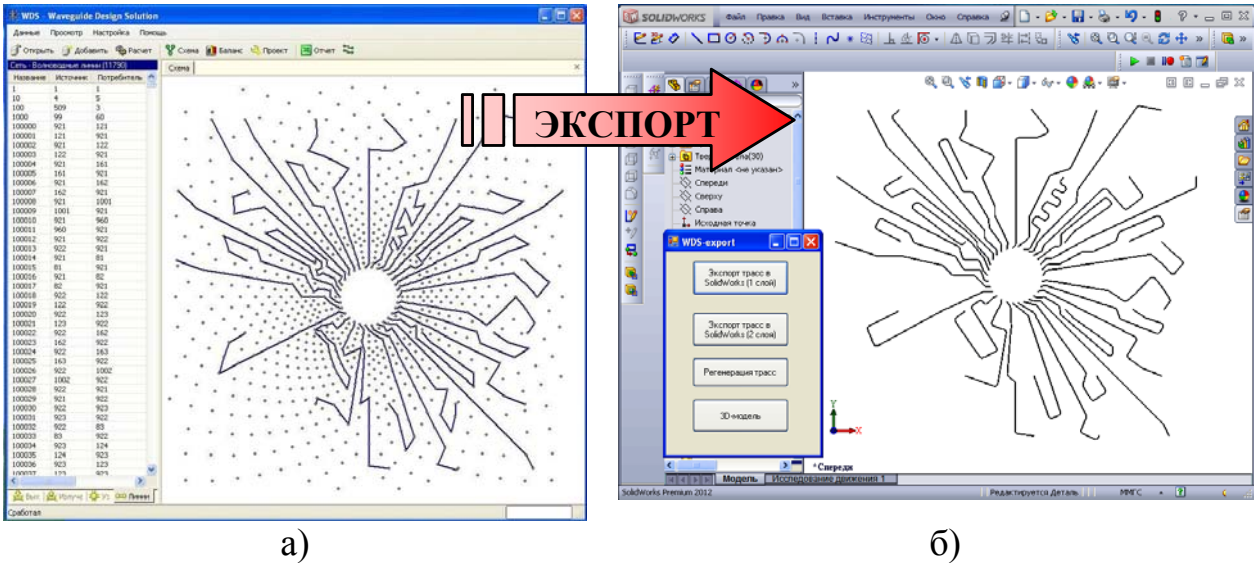


Рис.8. Результаты расчета трассировки тракта подрешетки из 30 излучателей:
 а) трассы, рассчитанные в программе WDS (один слой);
 б) 3D-модель экспортированных трасс в CGM SolidWorks

ОКНО WDS

ОКНО SOLIDWORKS

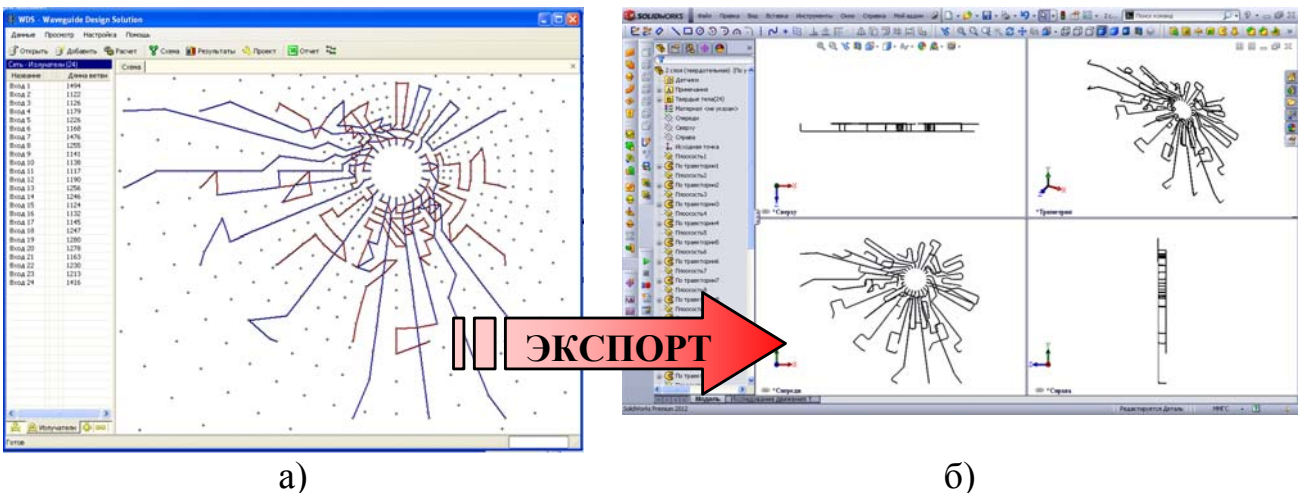


Рис.9. Результаты расчета трассировки тракта подрешетки из 30 излучателей:
 а) трассы, рассчитанные в программе WDS (два слоя);
 б) 3D-модель экспортированных трасс в CGM SolidWorks

С целью подтверждения адекватности расчетной модели и точности алгоритмов, заложенных в программный модуль WDS, проведена процедура верификации. Верификация представляет собой подтверждение соответствия схемы волноводных линий тракта, рассчитанной с помощью программного модуля WDS, предопределённым требованиям Θ_W . Верификация основана на анализе результатов, полученных при тестировании программного модуля. Рассчитанные параметры трассировки сравнены с эталонными (под эталонными параметрами подразумеваются данные, указанные в техническом задании для конкретной ФАР).

Верификация подтвердила адекватность расчетной модели и точности алгоритмов, заложенных в программный модуль WDS. Отклонение характеристик рассчитанных трасс от эталонных не превышает 5%.

В четвертой главе приведены результаты сравнения однослойной трассировки волноводного тракта подрешетки из 30 излучателей, выполненной в разработанном программном модуле WDS, с трассировкой того же тракта, полученной с применением программы «ТРАКТ». Сравнение показало, что использование программного модуля позволило сократить суммарную длину тракта на 4% и суммарный угол изгиба тракта на 18% (рис.10).

Изгибы волноводных ветвей оказывают влияние не только на величину потерь электромагнитной энергии в тракте, но и напрямую влияют на его стоимость. Стоимость изготовления волновода с одним изгибом составляет примерно 1,2 от стоимости изготовления прямого волновода (по данным предприятия-изготовителя). Применение разработанного программного модуля WDS позволило снизить стоимость изготовления тракта на 34% за счет уменьшения количества изгибов тракта.

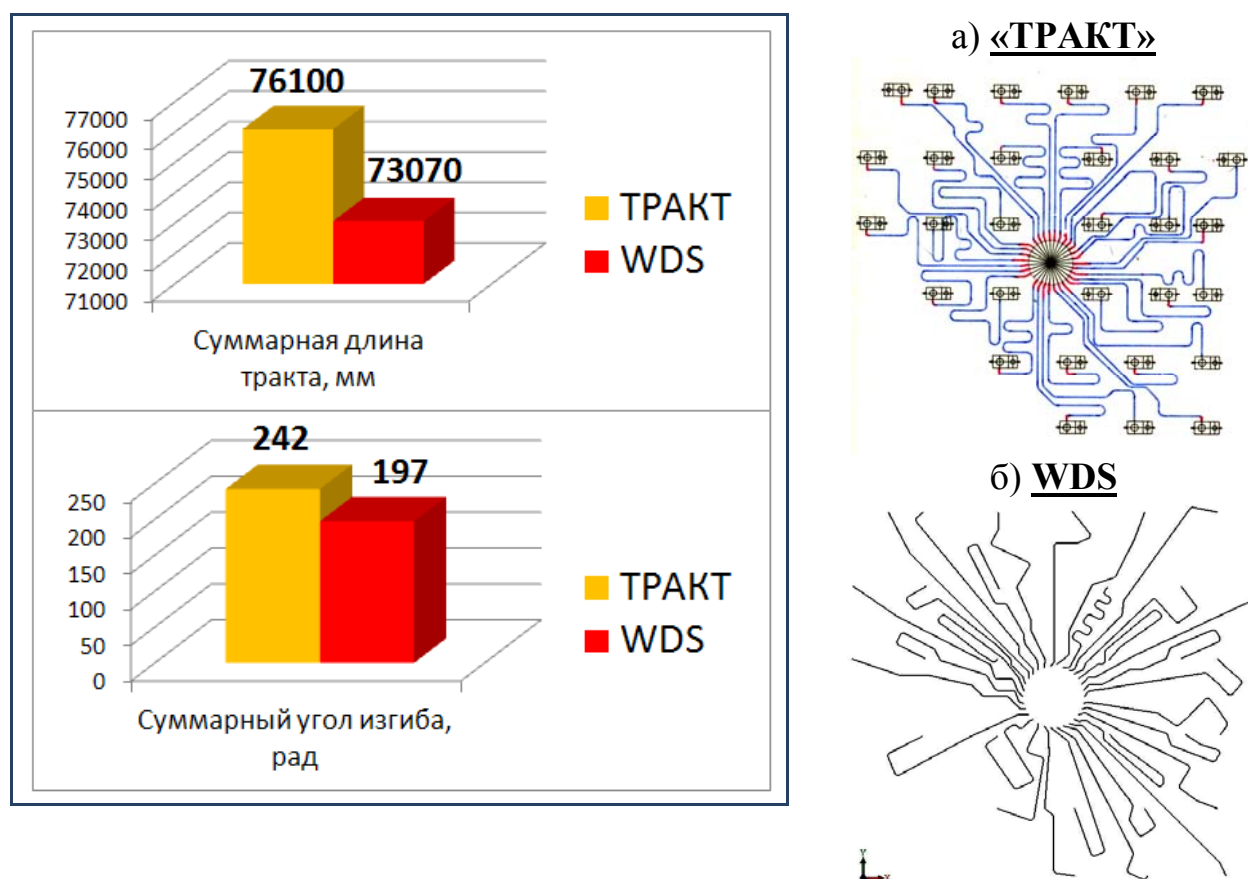


Рис.10. Сравнение трассировки для подрешетки из 30 излучателей, рассчитанной в программе «ТРАКТ» (а) и в программном модуле WDS (б)

Необходимо отметить, что методика обеспечения равнодлинности, заложенная в программу «ТРАКТ», предполагает автоматизированную корректировку длин трасс, т.е. при участии инженера-конструктора. К недостаткам такой методики относится сложность оптимизации трассировки.

Программный модуль WDS определяет области для удлинения автоматически, без участия конструктора, при этом существует возможность сдвига уже проложенных трасс, а следовательно, получения оптимальной разводки. Кроме того, к преимуществам разработанного модуля трассировки стоит отнести интеграцию с системой геометрического моделирования SolidWorks. Такая интеграция позволяет автоматически получать 3D-модель тракта по рассчитанным волноводным линиям.

Даны проектные рекомендации по применению разработанного программного модуля.

Приложение содержит результаты внедрения, дистрибутив и демонстрационную презентацию программного модуля трассировки волноводных трактов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана методика трассировки волноводных трактов внутри апертуры ФАР на основе тополого-геометрического метода. Методика позволила реализовать пространственную трассировку волноводного тракта с произвольными углами изгиба трасс.
2. Разработана методика обеспечения равнодлинности трасс на квазисегментном рабочем поле. Методика позволила провести трассы равной длины под произвольным углом и с минимальным количеством изгибов. Отклонение погрешности на равнодлинность рассчитанных трасс от эталонного значения не превышает 5%.
3. Предложена модель сегментного рабочего поля на основе адаптивной радиальной сетки. Модель СРП позволила уменьшить время решения задачи по сравнению с существующими моделями рабочего поля за счет компромисса между точностью решения и временем и ресурсами для его реализации. Свойство радиальности разработанной АРС позволило провести трассы от делителя мощности в радиальных направлениях без изгибов вблизи заходных участков.
4. Предложен алгоритм корректировки длин трасс, реализующий разработанную методику обеспечения равнодлинности. Алгоритм не требует больших вычислительных и временных затрат.
5. Создан программный модуль трассировки волноводных трактов, интегрированный с SolidWorks. Программный модуль позволил подтвердить адекватность разработанных математических моделей и методик.
6. Использование разработанного программного модуля при проектировании реальных конструкций ФАР позволило:
 - сократить сроки на проектирование волноводных трактов в 3 раза по сравнению с ручным проектированием,
 - сократить суммарную длину тракта на 4%,
 - сократить стоимость изготовления тракта на 34% за счет уменьшения количества изгибов волноводных ветвей тракта.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Анамова Р.Р. Проблемы трассировки волноводов в антенных устройствах авиационной спутниковой связи // Труды МАИ: электронный журн. 2013. №66.
URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php>
2. Анамова Р.Р., Рипецкий А.В. Вопросы автоматизации конструкторских работ при проектировании комплексов авиационной радиолокации // Труды МАИ: электронный журн., 2013. №70.
URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php>
3. Анамова Р.Р. Проблемы трассировки волноводных трактов наземных фазированных антенных решеток // Журнал «Нелинейный мир», 2013. №11.
4. Анамова Р.Р., Рипецкий А.В. Методика автоматизации пространственной трассировки волноводных трактов // Известия Тульского государственного университета, 2013. №11.
5. Анамова Р.Р., Рипецкий А.В., Зеленов С.В. Анализ методов трассировки применительно к задаче разводки волноводных трактов фазированных антенных решеток // Молодой ученый: ежемесячный научный журнал, 2013. №9 (56), с.62-72.
URL: <http://www.moluch.ru/archive/56/>
6. Анамова Р.Р. Автоматизация трассировки волноводов в комплексах авиационной радиолокации // Сб. докл. Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». Москва. 2013. С.201-202.
7. Анамова Р.Р. Разработка алгоритмического обеспечения автоматизированной трассировки волноводных трактов фазированных антенных решеток // Сб. докл. Международной научно-практической конференции «Наука и образование XXI века». Уфа. 2013. С.16-23.
8. Анамова Р.Р., Рипецкий А.В. Волноводные тракты: некоторые аспекты автоматизации проектирования // Сб. докл. 23-ей Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). Севастополь. 2013. Т.2. С. 626-628.
9. **Anamova R.R.** Antenna arrays: waveguide layout designing automation // IX International Conference on Antenna Theory and Techniques. Odessa. 2013. pp.258-260.
10. Анамова Р.Р., Рипецкий А.В. Обзор современных САПР антенных систем // Сб. докл. IX Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». Москва. 2011. С.19-22.
11. Анамова Р.Р. Разработка автоматизированной системы трассировки волноводных трактов // Сб. докл. IV НТК молодых ученых и специалистов «Антенная техника и СВЧ-электроника». Москва. 2013. С.108-113.