

УДК 621.391

Вопросы автоматизации конструкторских работ при проектировании комплексов авиационной радиолокации

Анамова Р.Р.^{*}, Рипецкий А.В.^{}**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: anamova.rushana@yandex.ru*

***e-mail: a.ripetskiy@mail.ru*

Аннотация

Рассмотрены особенности автоматизации проектирования и трассировки волноводных линий передачи в фазированных антенных решетках радиолокационных комплексов. Приведен анализ методов и алгоритмов трассировки применительно к задаче проектирования волноводных трактов. Задача решена тополого-геометрическим методом на предложенной авторами сегментной модели рабочего поля в виде адаптивной радиальной сетки. Разработана методика обеспечения равнодлинности волноводных линий тракта. Результаты научных исследований положены в основу программного модуля, интегрированного с системой геометрического моделирования SolidWorks.

Ключевые слова: трассировка, тополого-геометрический метод, волноводный тракт, фазированная антенная решетка, система автоматизированного проектирования

Введение

Комплексы авиационной радиолокации включают в себя наземные и бортовые радиоэлектронные устройства и системы, которые служат для

получения информации об окружающей летательный аппарат воздушной обстановке, координатах различных объектов, метеообразованиях, траекториях полетов, командной информации, а также предоставляют диспетчеру, управляющему полетом, необходимые сведения (данные о бортовом номере, высоте полета, остатке топлива на борту и т.п.). Для решения задачи обнаружения и одновременного сопровождения воздушных целей широко применяются антенные системы, включающие в себя в качестве основного элемента фазированную антенную решетку (ФАР).

Для больших наземных ФАР, у которых размер антенного полотна составляет несколько сотен и даже тысяч длин волн, одним из наиболее трудоемких этапов проектирования (рис.1) является трассировка волноводных трактов, соединяющих выходы делителя мощности с входами излучателей и расположенных внутри апертury ФАР (рис.2).

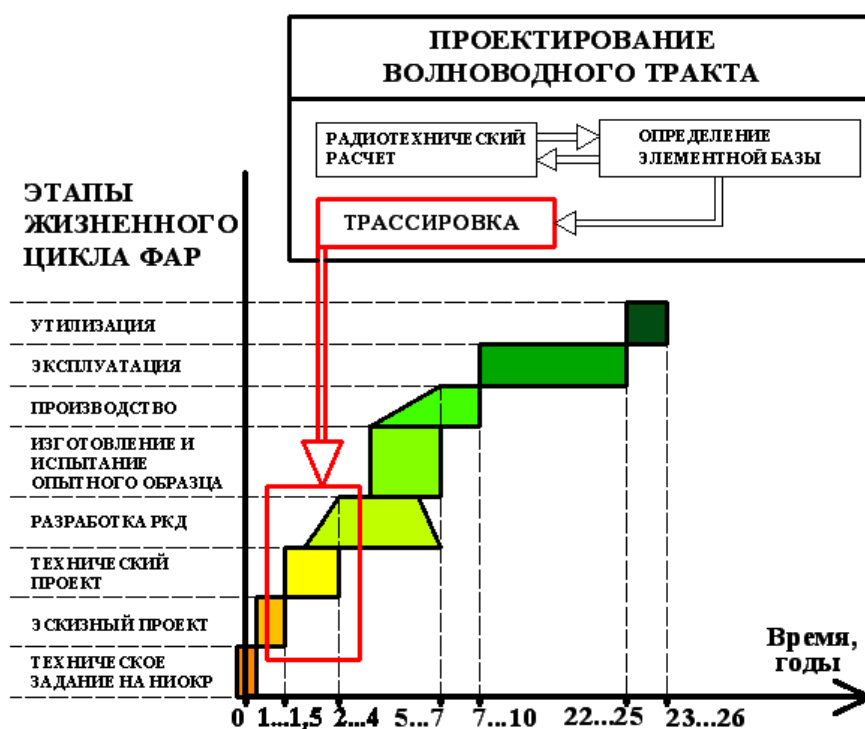


Рис. 1. Этапы жизненного цикла крупноапертурных ФАР.

Трассировка волноводных линий внутри конструкции апертury ФАР обладает следующей спецификой:

- равные длины волноводных линий (ветвей) тракта, соединяющих выходы делителя мощности с излучателями;
- возможно два варианта реализации трассировки: ортогональная разводка и неортогональная в зависимости от сечения основного волновода; в одной волноводной линии могут быть совмещены оба способа;
- трассировка волноводов одного тракта может быть однослойной (все волноводы укладываются в одной плоскости) и многослойной (в нескольких плоскостях);
- трассы имеют «заходные» участки, т.е. прямые начальные и конечные участки трасс, причем участки, идущие от выходов делителя, расположены в радиальном порядке (рис.2).

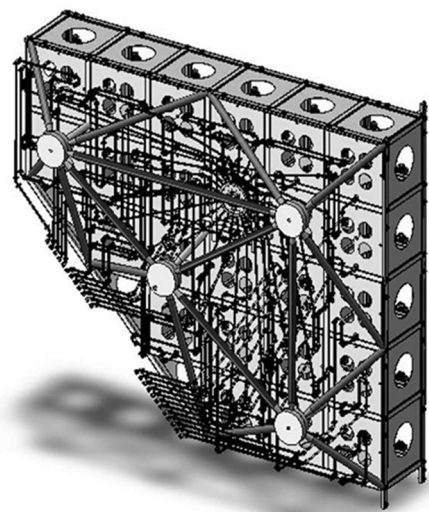


Рис. 2. Общий вид подрешетки ФАР со стороны монтажа.

Кроме того, на трассировку волноводов накладываются технологические и радиотехнические ограничения, в условиях которых трассировка волноводных трактов становится трудоемкой задачей и требует высокой квалификации разработчика. Обзор существующих систем автоматизированного проектирования (САПР) [1] показал актуальность

создания прикладного модуля САПР для автоматизированной трассировки волноводных трактов внутри апертуры ФАР.

Постановка задачи

Целью исследования является разработка научно-методического и программного обеспечения САПР для пространственной трассировки волноводных трактов внутри конструкции апертуры ФАР с заданными ограничениями.

Для достижения цели необходимо решить следующие *задачи*:

- 1) разработать математическое и алгоритмическое обеспечение, позволяющее добиться 100%-ой разводки трасс;
- 2) выбрать метод реализации трассировки, дающий оптимальный результат.

Под оптимальным результатом подразумевается вариант трассировки, который:

- ✓ удовлетворяет условию равнодлинности;

Условие равнодлинности волноводных линий вытекает из радиотехнического требования: для формирования заданного фронта волны необходимо, чтобы сигнал приходил на разные излучатели в одной фазе, т.е. геометрические длины ветвей тракта должны быть равны одной величине - базовой длине L_b . Очевидно, что базовая длина должна быть не меньше длины ветви, которая соединяет выход делителя с наиболее удаленным излучателем: $L_b \geq L_y$.

- ✓ имеет минимальную суммарную длину тракта;

Затухания в волноводных линиях приводят к потерям электромагнитной энергии, следовательно, чем длиннее тракт, тем больше электромагнитной энергии теряется волной при прохождении пути.

- ✓ имеет минимальное количество изгибов.

Повороты трассы (изгибы волноводов) вносят неоднородности, которые порождают высшие типы волн и приводят к потерям электромагнитной энергии.

Таким образом, задача трассировки волноводных трактов представляет собой задачу многокритериальной оптимизации:

$$t^* = \arg \min F(t), \quad (1)$$

где $t \in T$,

$F(t)$ - целевая функция,

t - вариант трассировки, заданный в виде параметрически описанных координат точек трасс: $t = \{x_j(\xi), y_j(\xi), z_j(\xi)\}, j = \overline{1, N}$, где N – число ветвей тракта, равное числу излучателей (выходов делителя),

T - множество вариантов трассировки, удовлетворяющих ограничениям Ω_U и краевым условиям,

t^* - оптимальный вариант трассировки.

Целевая функция представлена в виде:

$$F(t) = \sum_p \lambda_p \varphi_p(t), \text{ где} \quad (2)$$

$\varphi_p(t)$ – критерии оптимизации трассировки:

$\varphi_1(t) = \sum L_j, j = \overline{1, N}$ – суммарная длина тракта, N – число излучателей;

$\varphi_2(t) = K_t$ - число изгибов волноводных линий тракта;

λ_p - весовые коэффициенты (определяются на основе экспертной оценки).

Краевые условия задаются следующим набором параметров:

$$P = \{(X_{1j}, Y_{1j}, Z_{1j}), (X_{2j}, Y_{2j}, Z_{2j})\}, \text{ где} \quad (3)$$

$(X_{1j}, Y_{1j}, Z_{1j}), j = \overline{1, N}$ – координаты входов излучателей,

$(X_{2j}, Y_{2j}, Z_{2j}), j = \overline{1, N}$ – координаты выходов делителя мощности,

N – количество излучателей.

Ограничения задаются набором исходных параметров вида:

$$U = \{g, \alpha, R, l_{\min}, M\}, \text{ где} \quad (4)$$

$g = \{g_k\}$ – геометрические характеристики апертуры ФАР;

$\alpha = \{\alpha_i\}$ – углы изгиба волноводной линии,

$R = \{R_i\}$ – радиусы изгиба волноводной линии,

l_{\min} – минимальная длина прямого участка;

$M = \{(x_m, y_m, z_m), (a_m, b_m, c_m)\}, m = 1, 2, \dots, k_m$ – параметры несущих металлоконструкций, расположенных внутри монтажного пространства апертуры: (x_m, y_m, z_m) - координаты центров; (a_m, b_m, c_m) - габаритные размеры.

Предъявляются следующие ограничения Ω_U .

1. Требование равнодлинности волноводных линий тракта:

$$L_1 = L_2 = \dots = L_N = L_b \quad (5)$$

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

Пусть $A(x_1, y_1, z_1), B(x_2, y_2, z_2)$ - точки изгиба некоторой трассы j , тогда имеем:

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \geq l_{\min}. \quad (6)$$

3. Ограничение на углы изгиба траектории:

$$\alpha = \left\{ \pm \frac{\pi}{2} \right\} - \text{ для волноводов круглого сечения,}$$

α – любое для волноводов с прямоугольным сечением.

4. Ограничение на радиусы изгиба траектории: $R = \{R_i\}$, где множество R состоит из стандартных радиусов изгиба, соответствующих волноводам заданного сечения.

Условия пп.2-4 вытекают из технологических требований.

5. Обеспечение требуемого расстояния между слоями трассировки.

В случае протяженного тракта выполняют трассировку в несколько слоев (как правило, в два слоя). Тогда имеем:

$$|a_{s1} - a_{s2}| = \Delta_s, \quad (7)$$

где $\Delta_s = 2l_{\min}$ - расстояние между слоями трассировки;

a_{s1} - координата точки, принадлежащей первому слою трассировки,

a_{s2} - координата точки, принадлежащей второму слою трассировки.

6. Трассы должны прокладываться в пределах монтажного пространства апертуры: $A_j \in V_g$, где $A_j = (x_j, y_j, z_j)$ - точки j -ой трассы, V_g - объем монтажного пространства, определяемый параметрами $g = \{g_k\}$.

7. Условие, обеспечивающее непересечение трасс друг с другом, и ограничение на расстояние между трассами одного слоя.

Для любых точек A_i и A_j , принадлежащих соседним трассам t_i и t_j , где $A_i = (x_i, y_i, z_i)$ и $A_j = (x_j, y_j, z_j)$, должно выполняться неравенство:

$$\rho \geq \frac{v_i + v_j}{2} + \delta_{\min}, \quad (8)$$

где $\rho = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$ - 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;

δ_{\min} - минимальное расстояние между фланцами соседних волноводных линий, которое является следствием требований собираемости конструкции и удобства обслуживания.

8. Поскольку внутри апертуры размещаются несущие металлоконструкции, то должны быть предусмотрены зоны, запретные для трассировки: $\Delta = \{\delta_1, \dots, \delta_m\}$.

Пусть (x_m, y_m, z_m) - координаты центра запретной зоны m ; (a_m, b_m, c_m) - габаритные размеры зоны. Для того, чтобы трасса удовлетворяла условию,

необходимо и достаточно, чтобы $\forall Q(x_q, y_q, z_q) \in t$ выполнялась система неравенств:

$$\begin{cases} |x_m - x_q| \geq \frac{a_m + v}{2} + \delta_{\min}, \\ |y_m - y_q| \geq \frac{b_m + v}{2} + \delta_{\min}, \\ |z_m - z_q| \geq \frac{c_m + v}{2} + \delta_{\min}. \end{cases} \quad (9)$$

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

Метод решения задачи

В [2, с.13] методы трассировки поделены на две группы: геометрические и топологические. В [3] в отдельную группу выделены тополого-геометрические методы. Такая классификация основана на применяемой модели коммутационного поля, а также на способе задания макро- и микроструктуры трасс. В последние годы для решения задач трассировки стали применяться адаптивные методы поиска, к которым относятся генетические алгоритмы [4], [5, с.194-229], [6],[7], поэтому, на наш взгляд, их необходимо включить в современную классификацию методов трассировки (рис. 4).

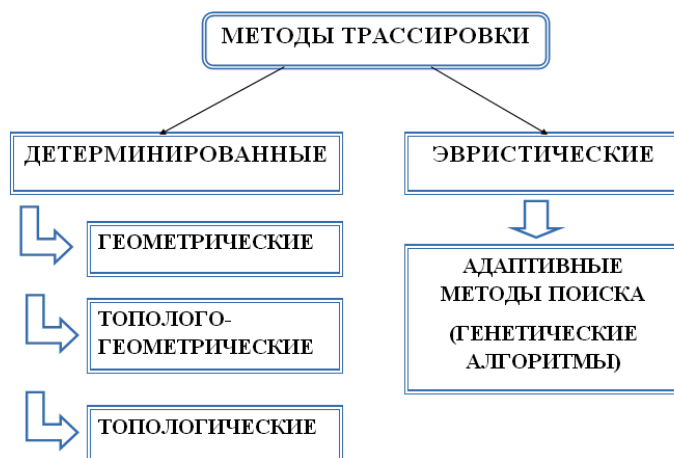


Рис. 4. Классификация методов трассировки.

Генетические алгоритмы относятся к нетрадиционным методам решения задачи трассировки и обладают своими достоинствами и недостатками. К достоинствам генетических алгоритмов относят: возможность их применения в задачах с изменяющейся средой, получение «достаточно хорошего» решения за меньшее время, чем при применении детерминированных алгоритмов [7, с.4]. Среди недостатков таких алгоритмов выделяют: сложность кодирования решения, предварительная сходимость алгоритмов (попадание в локальные оптимумы, выход из которых затруднен) [5, с. 230], генетические методы не гарантируют обнаружения глобального оптимума за полиномиальное время [7, с.4].

Что касается детерминированных методов, то методы геометрической трассировки, которые долгое время применялись для решения задач трассировки благодаря простоте реализации, постепенно изжили себя. Это обусловлено таким их недостатком, как сложность получения 100%-ой разводки в случае необходимости реализовать без пересечений некоторое множество трасс. Применяемая в методе геометрической трассировки модель дискретного рабочего поля (ДРП) не позволяет решить задачу быстро и эффективно. Это связано с тем, что точность решения напрямую зависит от числа ячеек ДРП, но при увеличении количества ячеек возрастает и объем требуемой машинной памяти для хранения описаний их состояний.

Перспективными на сегодняшний день являются топологические методы трассировки [2], [3]. В отличие от геометрического метода, топологические методы основаны на модели крупнодискретного топологического рабочего поля (ДТРП), которая позволяет реализовать прокладывание трасс без жесткой фиксации их геометрии. Благодаря этому топологический метод дает оптимальное решение там, где геометрические методы бессильны. Однако и топологические методы не лишены недостатков. Так, в [8, с.46] отмечается сложность соблюдения метрических ограничений при применении топологического метода трассировки, а в [3, с.158] – трудоемкость программной реализации метода.

Анализ методов решения задачи трассировки приведен в таблице 1.

Группа методов	Метод	Достоинства	Недостатки	Применение
Детерминированные	Геометрический	Простота программной реализации. Возможность отслеживания геометрии трасс на любой стадии трассировки. Соблюдение метрических ограничений.	Большой объем требуемой памяти [2]. Низкое быстродействие [2]. Сложность 100%-ой реализации трассировки из-за жесткой фиксации трасс.	Целесообразно применять при малом количестве трасс и в конструкциях с небольшой степенью заполнения рабочего поля.
	Тополого-геометрический	Более высокое качество трассировки и быстродействие по сравнению с геометрическими методами. Возможность учета метрических ограничений.	Двухэтапность: сложность перехода от геометрического к топологическому этапу трассировки.	Применим для проектирования конструкций различной конфигурации.
	Топологический	Возможность описания нерегулярных структур. Возможность управления качественными показателями трассировки [3].	Сложность соблюдения метрических ограничений [8]. Трудоемкость программной реализации [3].	Применим для проектирования конструкций любой сложности [2].
Эвристические	Генетический	Адаптивность к задачам различного класса. Быстрый поиск локального оптимума.	Сложность кодирования решения. Сложность управления процессом генетического поиска [5]. Сложность поиска глобального оптимума.	Применим к широкому классу задач.

Табл.1 Анализ методов трассировки.

В [1] предложена методика автоматизации проектирования волноводных трактов с применением топологического метода (гибкой трассировки). В процессе реализации методики возникли трудности с определением окончательной геометрии каждой трассы. Поскольку метод гибкой трассировки не предусматривает жесткую фиксацию трасс на этапе макротрассировки, то определение базовой длины (длина волноводной линии, соединяющей выход делителя с наиболее удаленным излучателем) возможно произвести только в пределах определенного промежутка: $l_b = \{l_{1b}, \dots, l_{mb}\}$. В случае, когда требуется обеспечить равнодлинность с высокой точностью (менее 5% от суммарной длины тракта), метод гибкой трассировки не всегда позволяет решить задачу.

В связи с вышесказанным нами выбран тополого-геометрический метод. К особенностям метода относится задание макроструктуры трасс геометрическими методами, а микроструктуры в небольших областях - с использованием топологических приемов. На первом этапе трассировки – проведение трасс минимальной длины – применяется жесткая фиксация трасс в реальных физических координатах. Это позволяет точно определить длину каждой трассы и величину, на которую требуется ее скорректировать для получения равнодлинности всех трасс. На втором этапе – достижение равнодлинности – выделяются допустимые области для удлинения трасс, внутри которых применяется топологический метод трассировки.

Существующие алгоритмы трассировки, как правило, классифицируют по принципу обработки связей [2], либо по принципу проведения трасс (волновые, ортогональные, эвристические [9]). Причем, в первом случае, иногда разбивают алгоритмы трассировки на две группы: последовательные и параллельные [2, с. 13], а в некоторых источниках выделяют в отдельную группу параллельно-последовательные алгоритмы (рис. 5).



Рис. 5. Классификация алгоритмов трассировки.

На наш взгляд, принцип обработки связей является определяющим при выборе алгоритма, поэтому остановимся на этой классификации подробнее. Последовательные алгоритмы предполагают проведение трасс последовательным способом, одну за другой. К таким алгоритмам относятся волновые алгоритмы. В параллельных алгоритмах трассы проводятся в два этапа. На первом этапе ведется построение множества трасс, а на втором этапе из них выбираются наиболее предпочтительные. К представителям параллельных алгоритмов можно отнести каналный алгоритм. В параллельно-последовательных алгоритмах параллельный алгоритм применяется либо для трассировки фрагментов трасс, либо для трассировки групп связей. Проведенный анализ алгоритмов трассировки представлен в таблице 2.

Для решения задачи трассировки волноводов выбран параллельный алгоритм, благодаря следующим его достоинствам:

- 1) независимость результата от порядка трассировки связей;
- 2) более высокое качество трассировки по сравнению с последовательными и параллельно-последовательными алгоритмами.

Группа алгоритмов	Алгоритмы	Достоинства	Недостатки	Применение
Последовательные [3]	Волновой и его модификации	Простота реализации. Удобство соблюдения конструктивных ограничений [9].	Сложность достижения 100%-ой реализации соединений при разводке множества трасс. Большие объемы вычислений и требуемой памяти [10]. Зависимость качества трассировки от порядка обработки связей.	Эффективны при применении ДРП с числом клеток менее 10^5 , либо на начальных стадиях трассировки [10].
	Лабиринтные	Более короткое время поиска, чем у волновых алгоритмов [10].	Обеспечивают разводку около 80% соединений [10]. Большое число параллельно идущих трасс.	Целесообразно применять для трассировки с небольшой степенью заполнения рабочего поля.
	Эвристические	Быстродействующие и простые в программировании [9].	Постоянный порядок построения трасс и, как следствие, неоптимальность результата [9].	Применяются в случае, когда не предъявляется жестких требований к качеству трассировки [9].
Параллельно-последовательные	Комбинированные	Качество трассировки лучше, чем в последовательных методах.	Недостатки зависят от применяемой комбинации методов.	Регулярные и нерегулярные структуры.
Параллельные [3]	Канальные	Независимость результата от порядка трассировки. Высокое быстродействие.	Ортогональность трасс. Проблема качества трассировки [10].	Ортогональная трассировка. Регулярные структуры.
	Гибкие	Высокое качество разводки. Возможность проведения трасс произвольной конфигурации.	Сложность перехода от модели топологии к модели геометрии трасс [10].	Нерегулярные структуры.
	Графо-теоретические	Простота программной реализации.	Трудоемкость описания графовых моделей элементов и монтажного пространства [10]. Большой объем обрабатываемых данных.	Структуры произвольной конфигурации.

Табл.2 Анализ алгоритмов трассировки.

Параллельный алгоритм, несомненно, не лишен недостатков. Так, в [2] отмечается, что поскольку в параллельных алгоритмах общее число вариантов огромно, то вероятность найти среди них оптимальное решение невелика. Однако в настоящее время вычислительные мощности ЭВМ позволяют обрабатывать довольно большие объемы данных, в связи с чем преимущество параллельных алгоритмов очевидно.

К рассматриваемой задаче применен принцип декомпозиции, согласно которому задача разбивается на несколько разнотипных подзадач, каждая из которых обладает своей спецификой [3, с.8]. Выделены следующие подзадачи:

- 1) проведение трасс минимальной длины и нахождение базовой длины трасс;
- 2) решение задачи равнодлинности.

Исходя из вышесказанного, трассировка производится в два этапа. На первом этапе ведется построение трасс, соединяющих выходы делителя мощности с входами излучателей, и в качестве критерия применяется минимальная суммарная длина трасс. Для решения данной подзадачи были применены методы линейного программирования.

В дальнейшем выходы делителя мощности будем называть «источниками» для трасс, а входы излучателей – «потребителями». Трассы, соединяющие источники с потребителями, будем называть «загруженными».

Задача максимизации общего числа разведенных трасс сведена к задаче линейного целочисленного программирования (ЗЦП):

$$F = \sum_{i=1}^N T_i \rightarrow \max, \quad (10)$$

где N – количество излучателей, т.е. под T_i понимаются такие трассы из все возможных, которые соединяют один выход делителя с одним излучателем.

Задача минимизации суммарной длины тракта записана в виде:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N a_i T_i \rightarrow \min, \quad (11)$$

где под коэффициентами a_i понимаются длины соответствующих трасс:
 $a_i = L(T_i)$.

Связь делителя с излучателем может быть реализована различными трассами. Поэтому все возможные группы трасс объединяются в матрицу $A = (a_{ij})$. На рис.3 матрица A разбита на несколько подматриц. Для решения ЗЦП применен метод Гомори.

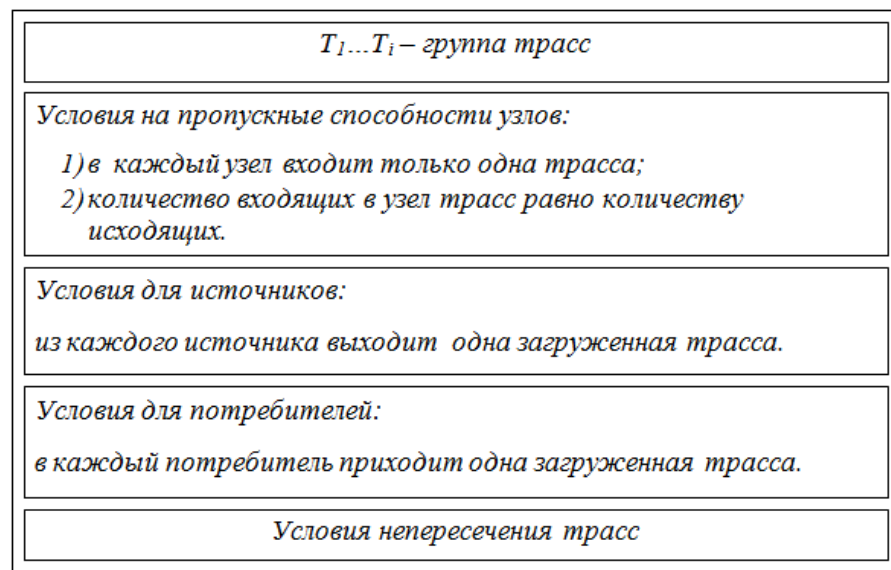


Рис.3. Структура матрицы $A = (a_{ij})$.

На втором этапе производится корректировка длин трасс с помощью разработанной методики. Методика включает в себя следующую последовательность:

- 1) расчет длин трасс и выбор максимальной из них («базовой» длины):

$$l_i = \sqrt{(x_{1i} - x_{2i})^2 + (y_{1i} - y_{2i})^2 + (z_{1i} - z_{2i})^2}, \quad (12)$$

$$L_j = \sum_i l_i,$$

$$l_b = \max\{L_j\}.$$

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

$$L_i \subset \Omega, L_i^{\min} \leq L_i \leq L_i^{\max}, \quad (13)$$

$$L_b \in \{\bar{L}_i\} \Rightarrow L_i = L_b,$$

$$L_b \notin \{\bar{L}_i\} \Rightarrow \Omega \rightarrow \Omega_1.$$

- 3) освобождение фиксации трасс в выделенных областях (переход от геометрического этапа к топологическому);
- 4) «растягивание» трассы в выбранную область до достижения базовой длины.

На данном этапе в качестве критерия оптимальности принимается минимальное количество изгибов трассы.

Если первый этап проводится с применением жесткой фиксации трасс в реальных физических координатах рабочего поля и определяет макроструктуру трасс, то на втором этапе определение микроструктуры трасс производится с использованием топологического метода.

Построение математической модели

Структурная математическая модель представляет собой ориентированный нагруженный граф. Вершинами графа являются узловые точки сети, выходы делителя и входы излучателя. Дугами графа являются сегменты волноводных линий, соединяющие следующие упорядоченные пары вершин в графе: выход делителя \rightarrow излучатель; выход делителя \rightarrow узел; узел \rightarrow излучатель; узел \rightarrow узел. Физическим смыслом веса дуги в графе является длина участка волноводной линии. Путь в графе представляет собой маршрут от выхода делителя к излучателю, проходящий через множество узловых вершин.

Для решения задачи разработана структурная геометрическая модель [10, с.89], позволяющая представлять подрешетку ФАР различных размеров и с различным количеством излучателей. Предложена модель сегментного рабочего поля (СРП) в виде адаптивной радиальной сетки (рис. 6).

Далее под волноводной линией будем понимать трассу, соединяющую выход делителя с входом излучателя, а под сегментом волноводной линии – условный «отрезок» волноводной линии, соединяющий две вершины графа. Сегменты в совокупности с вершинами образуют сеть, покрывающую рабочее поле. Трасса в предложенной модели рабочего поля может входить и выходить из узлов сетки только по сегментам. Если два соседних узла не соединены сегментом, то между ними не может быть проложена трасса. Сегмент представляет собой вектор, то есть для него задаются не только начальная и конечная вершина, но и направление. Тем самым, два соседних узла могут быть соединены двумя сегментами, имеющими противоположные направления.

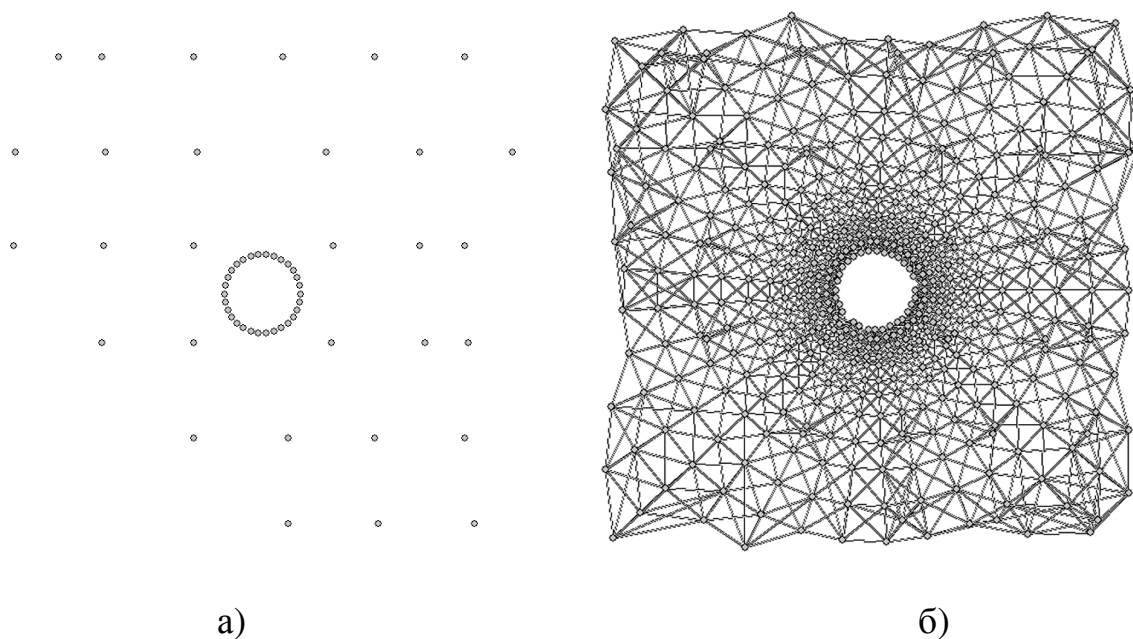


Рис. 6. Модель сегментного рабочего поля:

а) начальные и конечные точки трасс; б) адаптивная сетка.

На СРП накладывается ограничение: в каждый узел может входить и выходить из него только одна трасса.

Важным свойством предложенной модели СРП является возможность изменения структуры сетки путем добавления и удаления сегментов (рис.7).

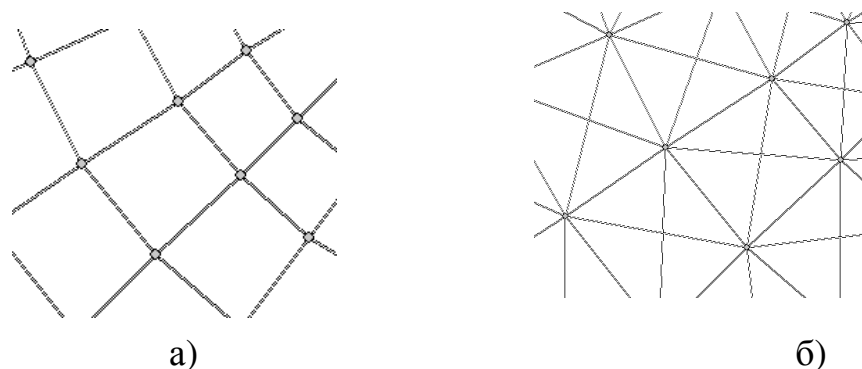


Рис.7. Варианты структуры сетки:

- а) количество ближайших узлов равно 4;
- б) количество ближайших узлов равно 8.

Изменение структуры сетки осуществляется следующим образом. Для узла пользователь имеет возможность задать количество ближайших узлов, которые могут быть соединены с ним сегментами. Варьируя это количество, можно изменять углы проведения трасс и точность решения задачи. Таким образом, на этапе эскизного проектирования возможно решить задачу в первом приближении, на более разреженной сетке, а на этапе технического проекта – на частой сетке, что дает более детальную трассировку.

Параметры, определяющие частоту сетки, а именно радиусы окружностей и углы лучей, на которых размещены узлы, также настраиваются пользователем. Благодаря этому существует возможность проведения трасс под произвольными углами. Адаптивная сетка по сравнению с регулярной позволяет улучшить качество решения задачи, и при этом уменьшить затраты памяти и увеличить быстродействие.

Программная реализация

Метод программно реализован в прикладном модуле Waveguide Design Solution (WDS). Модуль представляет собой Windows-приложение, которое интегрируется с СУБД MS Access для импорта исходных данных и с

системой трехмерного моделирования SolidWorks для экспорта результатов расчета в виде графической схемы (эскиз SolidWorks), содержащей осевые линии ветвей тракта.

Укрупненная блок-схема программы представлена на рис.8.

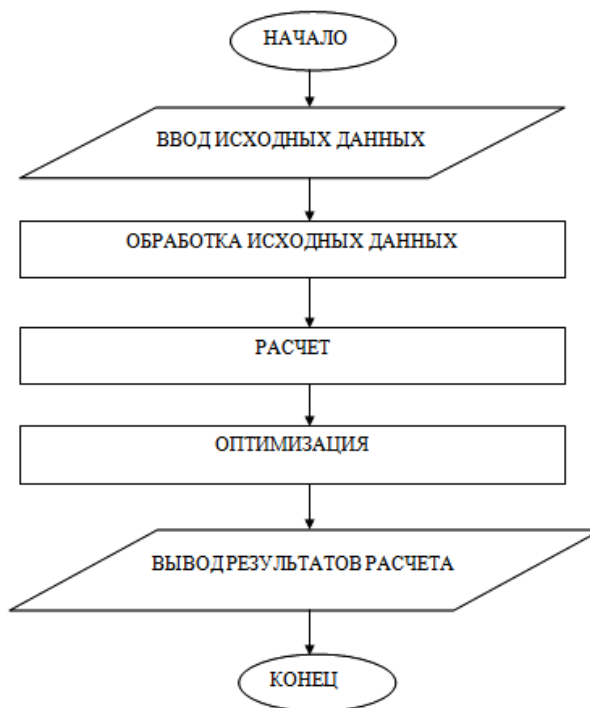


Рис. 8. Блок-схема программного модуля.

Исходные данные задачи представляются в виде набора множеств:

- множество выходов делителя мощности (начальные точки трасс);
- множество входов излучателей (конечные точки трасс);
- множество узлов;
- множество сегментов волноводных линий.

Отсутствуют программные ограничения на количество излучателей, выходов делителя, узлов и сегментов волноводных линий.

Обработка исходных данных включает:

- 1) генерацию узлов;
- 2) адаптацию сетки;
- 3) генерацию допустимых сегментов трасс.

Апробация программного модуля произведена на ПК со следующими характеристиками:

- операционная система Windows XP Professional;
- Intel Core 2 Duo CPU;
- 1,58 ГГц, 3.00 ГБ ОЗУ.

Расчет произведен для подрешетки с габаритами 3000x3000 мм, 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 (рис. 9,10).

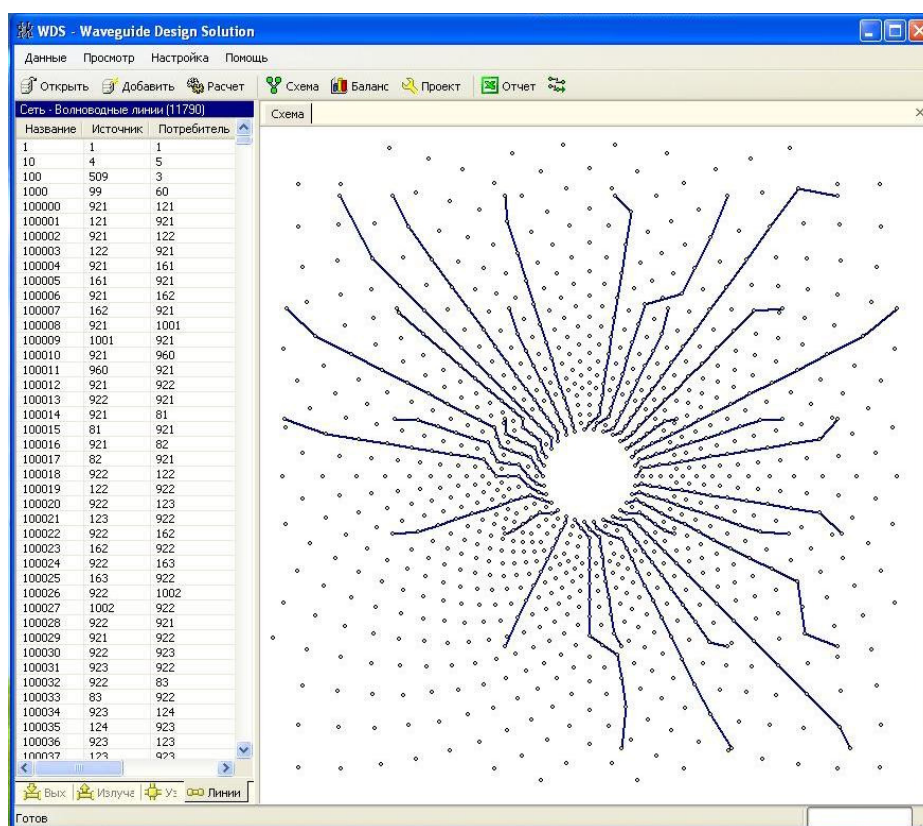


Рис. 9. Реализация первого этапа трассировки: трассы минимальной длины.

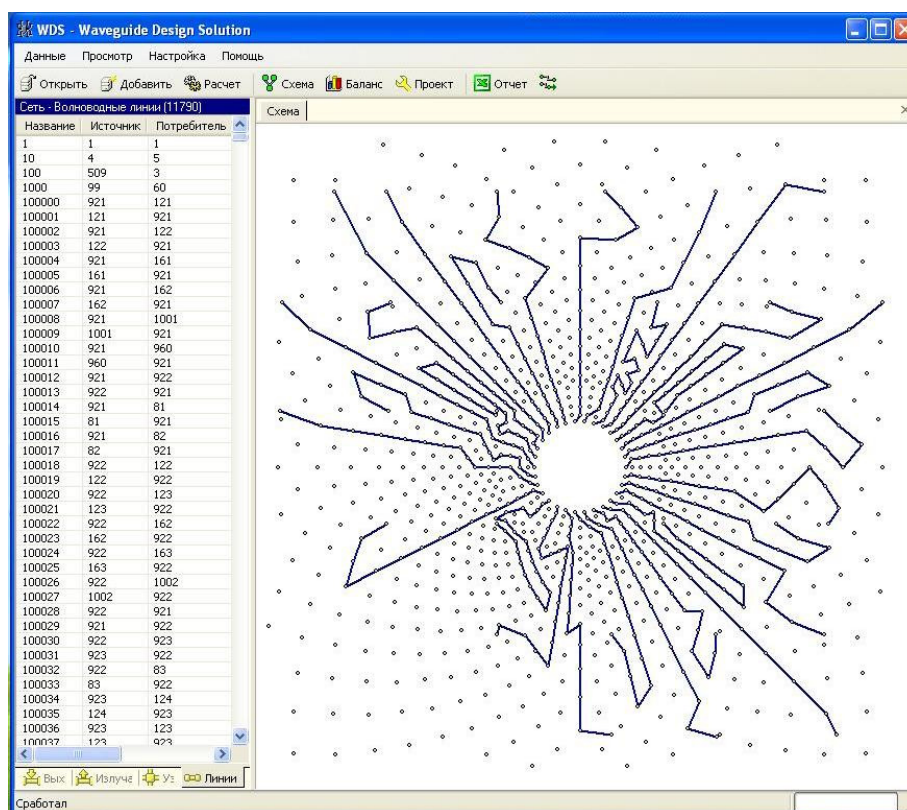


Рис. 10. Второй этап трассировки: удлинение трасс.

Применение рассмотренного метода позволяет обеспечить равнодлинность трасс с точностью, заданной конструктором, поскольку при использовании адаптивной сетки можно дробить ее шаг в локальных областях, улучшая точность решения задачи. В рассмотренном расчетном случае погрешность на равнодлинность составила ± 10 мм, что удовлетворяет предъявляемым к конструкции тракта требованиям согласно ТЗ и составляет менее 5 % от суммарной длины тракта.

Анализ результатов

Среди САПР для трассировки объектов программных продуктов, позволяющих производить разводку волноводных трактов не так много. К таковым относятся отечественная САПР «ТРАКТ», разработанная в 1990-х гг. на предприятии ОАО «Радиофизика» (г. Москва), и модуль программы САТИА V5 «Проектирование волноводов» (Waveguide Design). Последний предназначен для разработки волноводных линий коммуникационных систем

в судостроении, трассировки волноводных систем по палубе корабля, а также проектирования узлов их крепления. Поскольку требования равнодлинности при решении таких задач не возникает, то применение данного модуля для трассировки волноводных трактов внутри апертуры ФАР не представляется возможным. Программа «ТРАКТ» изначально предназначалась для разводки волноводных трактов ФАР, поэтому в ее состав входит программный модуль «Трасса» (Trassa), позволяющий рассчитывать длины трасс и корректировать их до достижения равнодлинности. Произведено сравнение разработанного программного модуля с программой «ТРАКТ» Преимущества модуля WDS очевидны из таблицы 3.

САПР	Признаки сравнения					
	Вид трассировки	Угол прокладки трасс	Обеспечение условия равнодлинности	Интеграция с САПР	Оптимизация	Применение
ТРАКТ	плоская	90° и 45°	да	AutoCAD	нет	разработка КД
WDS	плоская и пространственная	произвольный	да	SolidWorks	да	разработка 3D- модели и КД

Табл.3 Сравнение программных модулей WDS и «ТРАКТ».

Необходимо отметить, что методика обеспечения равнодлинности, заложенная в программу «ТРАКТ», предполагает автоматизированную корректировку длин трасс, т.е. при участии инженера-конструктора. Участки трасс, подлежащие удлинению, выбираются конструктором, после чего рассчитывается длина сегмента, который нужно добавить для достижения равнодлинности, и выбирается одна из типовых конфигураций удлиняющего участка. К недостаткам такой методики относится сложность оптимизации трассировки. Программный модуль WDS определяет области для удлинения автоматически, без участия конструктора, при этом существует возможность сдвигания уже проложенных трасс, а следовательно, получения оптимальной разводки.

Кроме того, к преимуществам разработанного модуля трассировки стоит отнести интеграцию с системой геометрического моделирования SolidWorks. Существует возможность экспорта рассчитанных волноводных линий в файл сборки SolidWorks в виде эскиза, состоящего из примитивов SolidWorks. С применением библиотеки волноводных элементов в SolidWorks может быть получена 3D-модель волноводного тракта.

Выводы и рекомендации

Таким образом, обоснована целесообразность применения тополого-геометрического метода для решения задачи автоматизированной трассировки волноводных трактов. Разработана модель сегментного рабочего поля и методика реализации равнодлинности трасс на топологическом этапе решения задачи. Возможно использование предложенной в статье модели сегментного рабочего поля после некоторой корректировки параметров адаптивной сетки для решения задач трассировки трубопроводов.

Верификация метода совместно с методикой обеспечения равнодлинности показала удовлетворительные результаты. Получена 100%-ая разводка трасс без пересечений. Равнодлинность ветвей тракта обеспечена в пределах допуска. Схема волноводных линий экспортируется в SolidWorks. Разработанный программный модуль WDS может быть применен на этапах эскизного и технического проектирования волноводных трактов с целью оптимизации конструкции, а также сокращения сроков и затрат на проектирование крупногабаритных ФАР.

Библиографический список

1. Анамова Р.Р. Проблемы трассировки волноводов в антенных устройствах авиационной спутниковой связи // Труды МАИ: электронный журн. 2013. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40232> (дата обращения: 27.07.2013).
2. Петренко А.П., Тетельбаум А.Я., Забалуев Н.Н. Топологические алгоритмы трассировки многослойных печатных плат. М.: Радио и связь. 1983. 152 с.
3. Базилевич Р.П. Декомпозиционные и топологические методы автоматизированного конструирования электронных устройств. Львов: Вища школа. 1981. 168 с.
4. Гумербаев Р.Р. Трассировка на коммутационном пространстве генетическим алгоритмом. URL: <http://nit.miem.edu.ru/sbornik/2009/sec1/007.html> (дата обращения: 27.08.2013).
5. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы и их применение. – Таганрог: Изд-во ТРТУ. 2002. 242 с.
6. Лебедев Б.К. Канальная трассировка на основе генетических процедур. Материалы всероссийской конференции «Интеллектуальные САПР-96». Известия ТРТУ. 1996. с.53-60.
7. Батищев Д.И. и др. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации. – Нижний Новгород. 2007. 85 с.
8. Лузин С.Ю., Полубасов О. Б. Топологическая трассировка: реальность или миф?//EDA Expert. 2002. № 5 С. 42-46.
9. Деньдобренъко Б.Н. Автоматизация конструирования РЭА. Учебник для вузов. - М.: Высшая школа. 1980. 384с.

10. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР. М.: Радио и связь. 1990. 352 с.