

УДК 621.391

Проблемы трассировки волноводов в антенных устройствах авиационной спутниковой связи

Анамова Р. Р.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

e-mail: anamova.rushana@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрены некоторые особенности проектирования и трассировки волноводных трактов в фазированных антенных решетках наземных локационных станций. Предложена методика автоматизации процесса на основе метода топологической (гибкой) трассировки.

Ключевые слова

топологическая трассировка, волноводный тракт, фазированная антенная решетка, система автоматизированного проектирования

Введение

Авиационные системы спутниковой связи выполняют функции контроля над воздушными судами, обеспечивают безопасность движения авиатранспорта, доступ к услугам голосовой связи, доступ в Интернет и передачу данных на высоких скоростях в сетях подвижной спутниковой связи различных систем: Иридиум (Iridium), Инмарсат (Inmarsat) и др. Спутниковая связь необходима как гражданской авиации для выполнения полетов по международным трассам, трассам зональной навигации европейского региона, полетов в зоне Северной Атлантики, так и государственной авиации [1]. В состав наземных систем связи для управления воздушным движением входят локационные станции нового поколения. Такие системы способны одновременно обнаруживать и сопровождать большое количество воздушных целей (в том числе низколетящих и малоразмерных). Одновременное сопровождение большого числа целей возможно в случае применения в качестве антенного устройства локационной станции фазированной антенной решетки (ФАР) с интеллектуальным компьютерным управлением.

Внутри апертуры ФАР радиолокационных комплексов размещается несколько видов трактов: тракт высокого уровня мощности - ВУМ (работает на передачу электромагнитной энергии), тракт низкого уровня мощности – НУМ (работает на прием сигнала), метрологический тракт и др. Поэтому трассировка волноводных трактов внутри апертуры зачастую представляет собой очень трудоемкий и весьма длительный процесс. Задача усложняется тем, что все волноводные линии, соединяющие выходы делителя мощности с переключателями, должны иметь равные длины, чтобы сигнал от делителя мощности с переключателями, должны иметь равные длины, чтобы сигнал от делителя мощности приходил на разные излучатели в одной фазе и обеспечивал требуемый фронт волны.

Для ФАР с большим количеством излучателей (см. рисунок 1а) проблема трассировки волноводов особенно актуальна, что связано с многочисленностью волноводных элементов и необходимостью их размещения внутри ограниченного пространства апертуры ФАР с определенными габаритами (см. рисунок 1б).

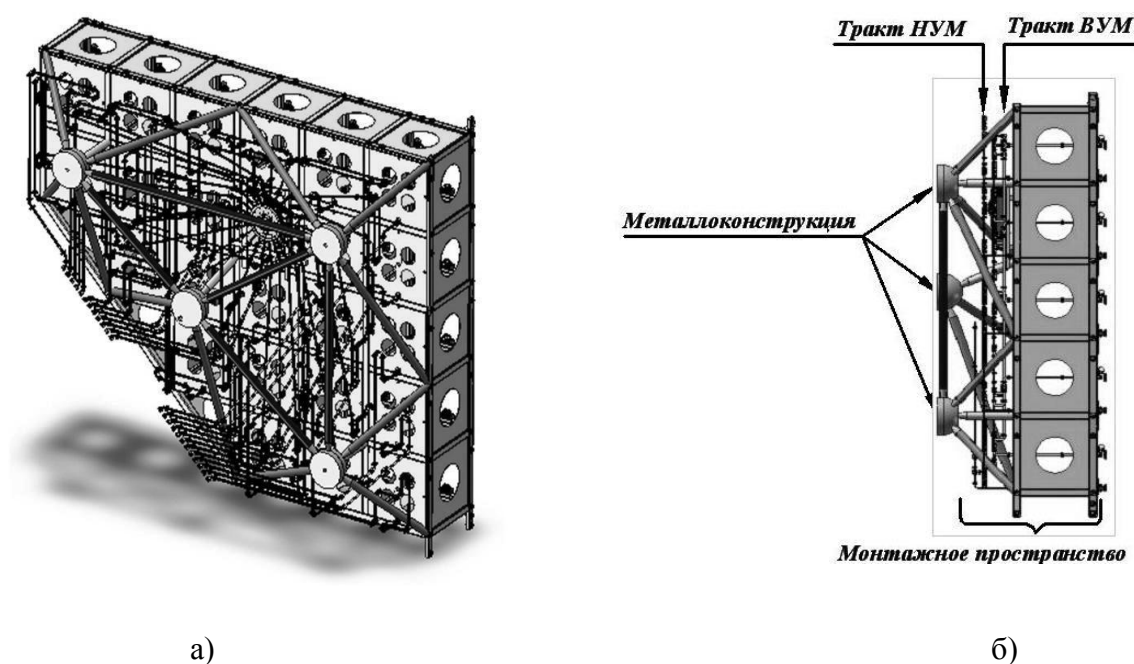
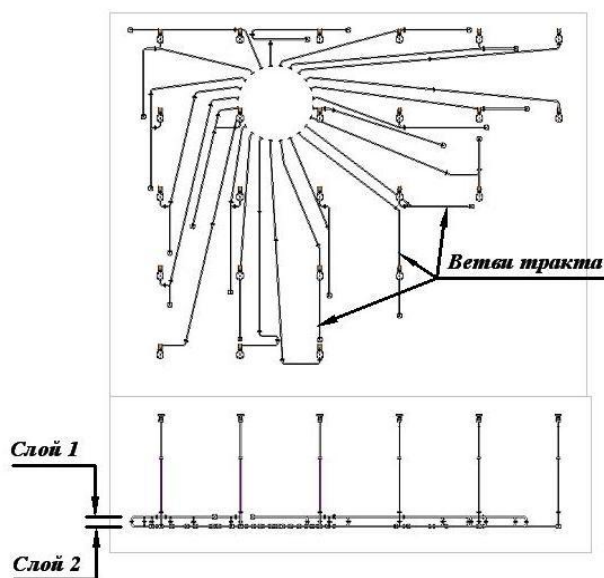


Рис.1. Подрешетка ФАР (24 секции, 96 излучателей): а – общий вид, б – размещение волноводных трактов в апертуре.



Кроме того, как правило, приходится делать многослойную разводку трактов (т.е. волноводы занимают две, три и более плоскостей). Так, например, на рисунке 2 представлена разводка тракта ВУМ. На боковой проекции видно, что разводка тракта двухслойная. Такая трассировка позволяет обойти металлоконструкции ФАР (см. рисунок 1б) и избежать

высокой концентрации волноводов в отдельных областях апертуры.

Рис.2. Тракт ВУМ подрешетки ФАР (вверху – вид со стороны раскрыва, внизу – боковая проекция).

Решением описанной проблемы могла бы стать система автоматизированного проектирования (САПР) для трассировки волноводных трактов.

В настоящее время в помощь проектировщикам существует множество программных средств, предназначенных для трассировки различных объектов: кабелей (SWR-Электрика), печатных плат (P-CAD, SPECCTRA, QuickRoute, PC-ROUTE), трубопроводов (Pro/ENGINEER Piping Design, SolidWorks Routing, AutoCADModelStudioCS«Трубопроводы») и т.п. Задача трассировки волноводов во многих аспектах сходна с задачами трассировки печатных плат. Поэтому основные методы, применяемые для трассировки проводников на печатной плате, могут быть использованы и для трассировки волноводов.

Актуальность исследования

В последнее время наблюдается тенденция к универсальности представленных на рынке САПР программных продуктов: разработчики стремятся включить в состав своих программных пакетов как можно больше модулей, предназначенных для решения узкоспециализированных задач различных отраслей промышленности. В статье [2] описаны широкие возможности модулей программы CATIA V5 «Схемы волноводов» (Waveguide Diagram) и «Проектирование волноводов» (Waveguide Design) для разработки волноводных линий коммуникационных систем в судостроении. Модули позволяют осуществлять трассировку волноводных систем по палубе корабля, а также проектировать узлы их крепления. При всем разнообразии САПР, применяемых для нужд радиотехнической промышленности, можно заявить, что задача автоматизированной разводки волноводных трактов внутри апертуры ФАР не решена в полном объеме. Первые попытки создания такого модуля САПР предприняты в 1990-х гг. на предприятии ОАО «Радиофизика». З.А. Янукьян и Ю.Б. Иншаковой был разработан модуль «ТРАКТ» в среде графического пакета AutoCAD, который позволяет получить плоскую трассировку волноводов с применением углов изгиба 90° и 45° , а также содержит базу наиболее часто применяемых волноводных элементов. Графические аспекты трассировки реализованы с применением функций, предоставляемых AutoCAD, а сам алгоритм трассировки заложен в дополнительный программный модуль «Трасса» (Trassa), написанный на языке AutoLisp в среде AutoCAD. Программа «Трасса» позволяет производить расчет длины основного тракта, выдает информацию о длинах сегмента и тракта в процессе редактирования, выполняет расчет участков под основной волновод и постоянные элементы при операции разбивки тракта на участки. Однако модуль «ТРАКТ» нельзя применить для пространственной трассировки волноводного тракта (в том числе и для многослойной разводки), а также для разводки с произвольным углом изгиба волноводов. Кроме того, учитывая тот факт, что с развитием компьютерных технологий все шире используются системы твердотельного моделирования, применение вышеупомянутого

модуля в современных условиях нецелесообразно. Исходя из вышесказанного, актуальным является вопрос создания САПР, осуществляющей автоматическую трассировку волноводов, как в двумерном, так и в трехмерном пространстве.

Целью исследования является разработка методического обеспечения САПР, соответствующей отечественной системе отраслевых стандартов радиопромышленности и позволяющей производить автоматическую трассировку волноводных трактов внутри апертуры ФАР. Такой модуль САПР предоставляет проектировщику возможность оптимизировать конструкцию за счет рассмотрения нескольких вариантов трассировки, сократить сроки проектирования, снизить затраты на создание новой техники.

Постановка задачи

Задача трассировки волноводных трактов заключается в определении оптимального расположения трасс волноводных линий, которые составляют множество $E = \{e_1, \dots, e_m\}$, внутри монтажного пространства ФАР. В общем случае считаем, что разводка многослойная и монтажное пространство (рабочее поле) F включает в себя несколько параллельных плоскостей трассировки (в дальнейшем будем их называть слоями). Исходной информацией являются координаты множества X выходов делителя мощности и выходов переключателей. Эти координаты образуют множество $P = \{p_1, p_2\}$. Тогда множество X можно разбить на два подмножества:

$$\chi^E = \{X(e_1), \dots, X(e_m)\}, \quad X(e_i) \cap X(e_j) = \emptyset (i \neq j), \quad \bigcup_{i=1}^m X(e_i) = X, \quad (1)$$

$$\chi^P = \{X(p_1), X(p_2)\}, \quad X(p_1) \cap X(p_2) = \emptyset, \quad X(p_1) \cup X(p_2) = X. \quad (2)$$

Каждое $X(e_i) \in \chi^E$ соответствует множеству пар выходов делителя и переключателя, подлежащих соединению трассой $e_i \in E$.

Каждое $X(p_i) \in \chi^P$ соответствует множеству выходов одного типа:

p_1 - выходы делителя мощности, p_2 - выходы переключателей.

В случае, когда выходы делителя и переключатели расположены в параллельных плоскостях, а не в одной плоскости, применяется отображение множества выходов переключателей на плоскость, содержащую выходы делителя мощности.

В качестве критериев оптимизации, а также ограничений выступают следующие параметры:

- 1) количество разведенных без пересечений трасс волноводных линий множества E ;
- 2) суммарная длина тракта;
- 3) длины трасс волноводных линий в отдельности;

4) количество слоев разводки;

5) количество «перекидных участков» (при многослойной трассировке).

Под перекидным участком понимается перекидной волновод, соединяющий разводки, выполненные в двух параллельных плоскостях, либо соединение двух изогнутых волноводов (см. рисунок 3).

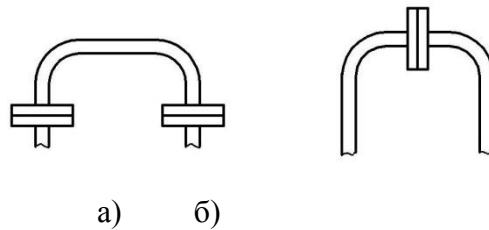


Рис.3. Варианты конструктивного исполнения перехода волноводных линий тракта со слоя на слой: а – перекидной волновод, б – соединение двух изогнутых волноводов.

Если рассматривать эти критерии в качестве составляющих *целевой* функции, то для нахождения оптимального решения задачи необходимо стремиться *максимизировать* первый из вышеперечисленных критериев и *минимизировать* остальные. Дополнительные ограничения создаются метрическими параметрами монтажного пространства F (расстояния между слоями, габариты и форма апертуры), значениями радиуса скругления R и минимальными длинами прямых участков изогнутых волноводов, требованием к равномерности размещения волноводных линий в апертуре. Поэтому задача трассировки волноводных трактов является задачей *многокритериальной дискретной оптимизации*.

Поскольку задача определения геометрии каждой волноводной линии зависит от ряда факторов, для выбора оптимального варианта трассировки предлагается использовать мультипликативную форму оценочной функции:

$$\Psi = \sum_{i=1}^p \lambda_i \varphi_i \quad (3)$$

где Ψ - аддитивный критерий, λ_i - весовой коэффициент, φ_i - частный критерий, p – число частных критериев.

Значимость каждого критерия представлена в таблице 1.

№	Частный критерий, φ	Весовой коэффициент, λ
1	Процент реализованных соединений	0,2
2	Суммарная длина тракта	0,15
3	Число монтажных слоев	0,1

4	Число изгибов волноводов	0,15
5	Число фланцевых соединений	0,1
6	Равномерность размещения волноводных линий в тракте	0,1

Табл. 1. Критерии оценки качества трассировки волноводных трактов.

Из таблицы 1 видно, что среди критериев трассировки волноводов есть и противоречивые требования. Например, чем меньше монтажных слоев требуется для разводки волноводов тракта, тем проще сборка тракта и его обслуживание в процессе эксплуатации. В то же время, чем больше волноводных элементов мы пытаемся уместить в пределах одной плоскости монтажа, не прибегая к переходу на следующий слой, тем сложнее обеспечить требования к геометрии трассы. Поэтому требования под номерами «3» и «6» конкурируют друг с другом. Приведенные в таблице 1 весовые коэффициенты определены методом экспертной оценки.

Отметим, что любой полученный оптимальный вариант трассировки является компромиссом критериев, представленных в таблице 1. Поэтому окончательный выбор из нескольких оптимальных вариантов остается за проектировщиком.

Выбор метода решения задачи

Трассировка соединений любого типа является сложной, NP-полной, задачей. К формализации такой задачи не существует единого математического подхода. На сегодняшний день сформировались три основные группы методов трассировки.

1. Геометрические методы. Все геометрические характеристики трасс однозначно определены в реальных физических координатах рабочего поля. Фиксация трасс жесткая.

2. Тополого-геометрические методы. Макроструктура трасс задается с помощью геометрических методов, а определение микроструктуры в небольших областях трассировки производится с применением некоторых топологических приемов. Фиксация трасс частичная.

3. Топологические методы. Задание макроструктуры трасс осуществляется топологическими методами (фиксация трасс отсутствует), а на завершающем этапе микроструктура уточняется с помощью геометрических методов. Предварительно определяют топологические характеристики трасс, их взаимное расположение на всей поверхности рабочего поля. При этом метрические параметры трасс могут не учитываться вообще, либо учитываются только наиболее значимые метрические ограничения. Первой работой, где упоминается о топологической трассировке, является статья Широ Г.Э. [3], изданная в 1967 г. Дальнейшее развитие этот метод получил в работах Базилевича Р.П., Тетельбаума А.Я., Петренко А.И., Забалуева Н.Н., Полубасова О.Б., Петросяна Г.С. и др [4-7].

Для каждого метода трассировки применяется своя модель рабочего поля [8].

В геометрических методах используются два типа моделей рабочего поля: непрерывное метрическое рабочее поле (НМРП) и дискретное метрическое рабочее поле (ДМРП).

Модель НМРП используется в некоторых лучевых методах трассировки. Модель обладает свойствами двумерного непрерывного евклидова пространства. При этом произвольная точка рабочего поля рассматривается как элемент модели. Трассировка осуществляется в реальных физических координатах. Каждая очередная прокладываемая трасса жестко фиксируется на рабочем поле. Такая модель удобна для нерегулярных структур произвольной конфигурации, позволяет прокладывать трассы разных ширин.

В модели ДМРП рабочее поле разбивается регулярной сеткой на квадратные дискреты. Размер дискретов зависит от ширины прокладываемой трассы и допустимого минимального расстояния между соседними трассами. Модель обладает свойствами двумерного дискретного евклидова пространства. При этом по каждому дискрету может пройти только одна трасса. Модель ДМРП используется в волновом алгоритме Ли и его модификациях и получила широкое распространение в САПР благодаря своей применимости к большому классу регулярных структур.

В тополого-геометрических методах применяются модели НМРП и ДМРП с выделением вертикальных и горизонтальных каналов. Такой подход позволяет уменьшить затраты памяти, увеличить быстродействие, а также дает возможность использовать топологическое описание положения трасс в некоторых ограниченных областях рабочего поля. Вертикальные фрагменты трасс при этом располагаются на одном слое, а горизонтальные - на другом. Возможные деформации трасс допускаются только в пределах канала. Уменьшить количество переходов со слоя на слой можно лишь на заключительном этапе трассировки с помощью переноса фрагментов трасс с одного слоя на другой.

В топологических методах используется два типа моделей рабочего поля: непрерывное топологическое рабочее поле (НТРП) и крупнодискретное топологическое рабочее поле (ДТРП). Метрические параметры модели определяются расстояниями между смежными макродискретами и пропускной способностью промежутков. В отличие от ДМРП, через каждый макродискрет разрешается проходить нескольким трассам. При этом допускается произвольная конфигурация трасс.

Для решения поставленной задачи выбран топологический метод. Были приняты во внимание такие достоинства метода, как:

- возможность производить неортогональную трассировку;
- возможность осуществлять корректировку трассы в пределах дискрета, не затрагивая при этом положения остальных трасс;
- высокое быстродействие алгоритмов на основе этого метода благодаря тому, что количество дискретов определяется только количеством соединяемых выходов.

Топологическая (аналоговая) модель рабочего поля

Для описания монтажного пространства воспользуемся моделью ДТРП. Она формируется множествами $X(p_i)$, а также множеством $X(e_i)$, которое образует систему промежутков рабочего поля, разбивающих его на множество W макродискретов в виде выпуклых многоугольных граней.

Дискретная топологическая (аналоговая) модель рабочего поля представляет собой плоский граф G , вершины которого соответствуют выходам делителя мощности и переключателям, а ребра – промежуткам между ними. Многоугольные области рабочего поля образуют грани. Каждая внутренняя точка грани может принадлежать любой трассе. Метрические параметры модели $M=f(L, K)$, где L – система расстояний между смежными макродискретами, K – система пропускных способностей промежутков множества χ^E . Положение трасс определено только с точностью до макродискретов множества W .

Поскольку волноводный тракт представляет собой нерегулярную структуру, то для алгоритмической и программной реализации в качестве элементов модели выбираются треугольные грани, образующие плоскую триангуляцию, в частности, триангуляцию Делоне. Все углы треугольников в триангуляции Делоне острые (треугольники стремятся к равноугольности). Триангуляция Делоне может быть получена из произвольной триангуляции путем перестановки ребра в двух соседних тупоугольных треугольниках (см. рисунок 4). Опыт применения триангуляции Делоне для решения задач трассировки топологическим методом описан в работах Полубасова О.Б., Дмитриева П.И. Важное преимущество такой триангуляции состоит в том, что каждая вершина всегда соединена ребром с ближайшей к ней вершиной. Благодаря этому можно точно определять расстояния между ближайшими друг к другу вершинами. Практическая реализация алгоритмов построения триангуляции Делоне известна и подробно описана в [9]. Трудоемкость алгоритмов составляет в лучшем случае $O(N)$, в худшем – $O(N \log N)$.

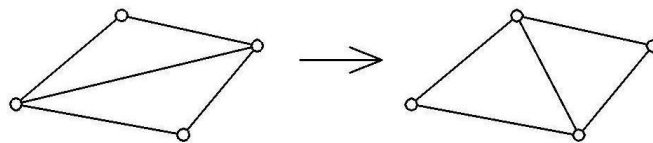


Рис.4. Получение триангуляции Делоне из произвольной триангуляции.

Для модели ДТРП задачу трассировки можно рассматривать как задачу присвоения элементов рабочего поля трассам множества E . Т.е. ставится задача определения однозначного отображения $E \rightarrow W$, оптимизирующего заданную целевую функцию. Каждой трассе $e_i \in E$ присваивается некоторое подмножество дискретов $W(e_i) \in W$. Трассы внутри дискретов множества W должны быть планарны.

Пусть поверхность рабочего поля состоит из двух непересекающихся областей F^D и F^3 . Область F^3 включает множество выходов X и запрещенные для трассировки зоны

δ_i , образующие множество $\Delta = \{\delta_1, \dots, \delta_i\}$. Остальная область рабочего поля F образует зону F^D , дозволенную для трассировки, через каждую точку которой может проходить любая трасса. Область F^D содержит область поля F , исключая области, принадлежащие F^3 , т.е. имеет сложную конфигурацию. Поэтому для математического описания разбиваем ее на макродискреты ω_i , внутри которых отсутствуют элементы области F^3 . Разбиение осуществляем так, чтобы области ω_i были выпуклыми многоугольными гранями. Множество $V = \{V_1, V_2, \dots\}$ ребер множества граней $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots\}$ состоит из подмножества $V^C = \{V_1^C, V_2^C, \dots\}$ внешних ребер, образующих край области F^D , и множества $V^A = \{V_1^A, V_2^A, \dots\}$ внутренних ребер. Любым трассам запрещается проходить через ребра множества V^3 и разрешается проходить только через ребра множества V^D . Ребра множества V^3 задаются исходными данными.

Т.о. для описания топологической ситуации можно применять плоский граф $G(X^T, V)$, где множество X^T содержит точки расположения выходов делителя мощности и выходов переключателей, а также характерные точки краев апертуры и запрещенных для трассировки зон (см рисунок 5). Характерные точки должны содержать точки, определяющие изломы контура апертуры и наиболее узкие промежутки.

Модель топологии трасс

Произвольная волноводная линия (трасса) в графе G может быть представлена парой $\langle X(e_i), V(e_i) \rangle$, где $X(e_i) \in X$ – множество соединяемых ею вершин, $V(e_i) \in V$ – множество пересекаемых ею ребер. Трасса в методе геометрической трассировки «плавает» в допустимом для трассировки пространстве, зафиксированы только ее начальная и конечная точки.

Макротрассировка

Дано множество $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ волноводных линий (трасс), подлежащих проведению. Для каждой волноводной линии e_i задана пара выходов (делитель+переключатель), которые необходимо соединить: $X(e_i) = \{x_{i1}, x_{i2}\}$. Все выходы

составляют множество $X = \bigcup_{i=1}^m X(e_i)$.

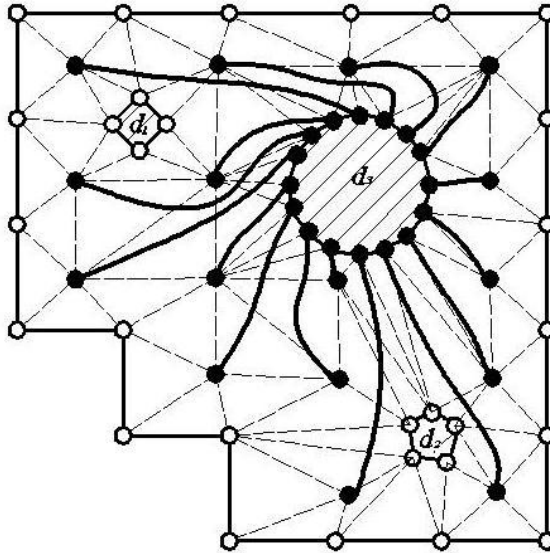


Рис.5. Модель рабочего поля и модель топологии трасс на этапе макротрассировки: d_1, d_2, d_3 – зоны запрета трассировки; черным цветом показаны выходы делителя мощности и переключателей.

Выходы делителя и выходы переключателя образуют две группы выходов. Их расположение указано в техническом задании на конструирование. Вершины, принадлежащие одной группе выходов, образуют промежутки с нулевой пропускной способностью (их нельзя соединять трассой). Тогда все множество выходов делится на два подмножества: X_1 – множество выходов делителя, X_2 – множество выходов переключателя: $X = X_1 \cup X_2$, $X_1 \cap X_2 = \emptyset$. Эти подмножества образуют так называемые контактные структуры.

В процессе решения задачи трассировки необходимо определить:

- 1) разбиения множества E на $r+1$ подмножеств с максимальным количеством проведенных без пересечений на r слоях трасс;
- 2) оптимальное разбиение на r слоев;
- 3) местоположение переходов со слоя на слой, обеспечивающих реализацию непроведенных соединений.

Однако, поскольку в задаче трассировки волноводов существуют еще и дополнительные ограничения, выбор оптимального решения должен осуществляться из множества решений, удовлетворяющих оптимальным значениям рассматриваемых критериев.

На этапе макротрассировки определяется пропускная способность ребер, т.е. количество трасс, которые можно провести в промежутках между характерными точками.

Основным для трассировки волноводных трактов является условие равных длин волноводных линий. Поскольку в методе топологической трассировки трассы «плавают»

в допустимом пространстве, т.е. не фиксируются, можно определить только их минимальную и максимальную возможные длины. Т.о. все возможные длины трасс, образуют множество длин $L_i^L = \{L_1^L, L_2^L, \dots\}$. Тогда базовая длина ветвей тракта $L_a = L_1 = L_2 = \dots = L_m$, где m - число ветвей тракта, будет выбираться из множества $P = L_1^L \cap L_2^L \cap \dots \cap L_m^L$, $P \neq \emptyset$. Выбрав минимальное из элементов множества P , получим искомое значение базовой длины.

При поиске множества P возможно два результата:

- 1) $P \neq \emptyset$, тогда $P = L_1^L \cap L_2^L \cap \dots \cap L_m^L$ (см. рисунок 6а);
- 2) $P = \emptyset$ (см. рисунок 6б): среди множеств длин $L_i^L = \{L_1^L, L_2^L, \dots\}$ есть множества, пересечение которых с k множествами образует пустое множество, либо есть изолированные, т.е. такие множества, пересечение которых со всеми остальными множествами является пустым множеством.

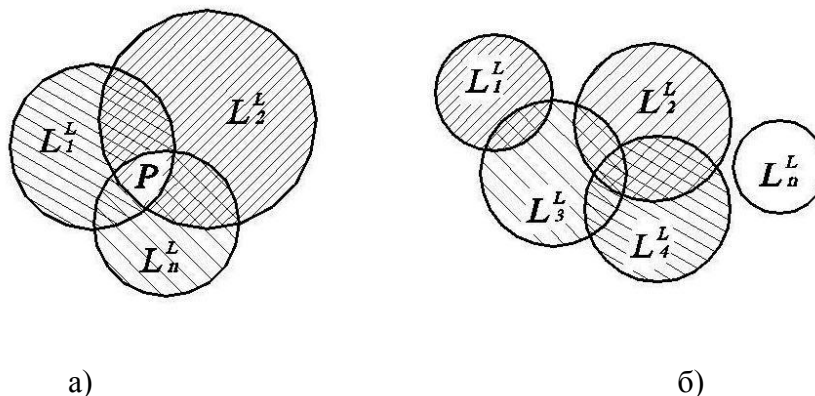


Рис.6. Поиск базовой длины ветвей тракта: а - множество $P \neq \emptyset$, б - множество $P = \emptyset$.

На практике случаи 2 и 3 наиболее вероятны. При возникновении такой ситуации производится перетрассировка волноводных линий с последующим повторным расчетом множества P . Критерием остановки процесса перетрассировки является нахождение множества $P \neq \emptyset$.

Следующий этап – корректировка длин ветвей тракта до величины найденной базовой длины L_0 – осуществляется на этапе микротрассировки, когда производится фиксация трасс на рабочем поле.

Микротрассировка

На этапе микротрассировки определяется геометрия каждой трассы. Исходной информацией для микротрассировки является модель топологии трасс, полученная на этапе макротрассировки. Модель содержит значения пропускных способностей промежутков. В первом приближении координаты точек пересечения трасс с ребрами определяются исходя из требования равномерности расположения трасс. При этом для

реализации технологических требований по обеспечению стандартного угла изгиба волновода предлагается представление трассы в виде отдельных прямых линий, соединяющих точки пересечения трасс с ребрами между собой, которые сопрягаются участками окружностей заданного радиуса. Далее производится корректировка длин всех трасс до достижения базовой длины. Важным моментом при этом является обеспечение минимального зазора между трассами в процессе фиксации их геометрии. Отмечаются точки пересечения трасс с ребрами (назовем их «плавающими» точками). При необходимости корректировки длины трассы ребра, пресеченные этой трассой, делятся на несколько равных частей дополнительными точками. После этого плавающие точки притягиваются к дополнительным точкам, переключаясь с одной на другую, до достижения необходимой длины трассы (производится своего рода натяжка трасс).

Заключение

Показана актуальность автоматизации трассировки волноводных трактов крупногабаритных ФАР. На основе анализа существующих методов трассировки соединений предложена методика автоматизации проектирования волноводных трактов с применением метода гибкой трассировки. Разработаны модели волноводного тракта и монтажного пространства ФАР, учитывающие особенности и ограничения топологического подхода. Предложен способ обеспечения равнодлинности проложенных трасс.

Разработанная методика может стать основой алгоритмической базы для САПР трассировки волноводных трактов. Подобная САПР позволит осуществлять автоматическую трассировку волноводных трактов (как плоскую, так и пространственную) внутри апертуры крупногабаритных ФАР.

Библиографический список

1. Новиков В. Безопасность полетов авиации обеспечивают спутники связи и навигации // Технологии и средства связи. 2011. №4. С.64-65.
2. Лях С. Проектирование промышленных объектов, оборудования и систем с помощью САТIAV5 // Рациональное управление предприятием. 2009. №9. С.60-62.
3. Широ Г.Э. Метод проектирования печатного монтажа, основанный на эвристических принципах. – В кн.: Методы разработки схем и конструкций цифровых систем. Ч.2. Л.: ЛДНТП.1967.
4. Базилевич Р.П. Основные принципы и обобщения алгоритмических методов гибкой трассировки межсоединений // Управляющие системы и машины. 1977. №6. С.103-112.

5. Петренко А.П., Тетельбаум А.Я., Забалуев Н.Н. Топологические алгоритмы трассировки многослойных печатных плат. М.: Радио и связь. 1983. 152 с.
6. Полубасов О.Б. Математические модели и алгоритмы автоматизированной разводки соединений печатных плат и БИС. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПбГЭТУ (ЛЭТИ). 2001. 112 с.
7. Петросян Г.С. Математическое обеспечение интеграции процессов оптимизации и редактирования топологии печатного монтажа в системе гибкой топологической трассировки. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПбГУТ им.проф. М.А. Бонч-Бруевича. 2005. 106 с.
8. Базилевич Р.П. Декомпозиционные и топологические методы автоматизированного конструирования электронных устройств. Львов: Вища школа. 1981. 168 с.
9. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Издательство Томского университета. 2002. 128 с.