

В силу неполной определенности объекта эксперимента на всех уровнях управления должны быть применены методы самонастройки и адаптации [5], [6].

## Л и т е р а т у р а

1. Маркова Е.В., Лисенков А.Н. Планирование эксперимента в условиях неоднородностей. М., "Наука", 1973, 219 с.
2. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., "Наука", 1976, 278 с.
3. Круг Г.К., Сосулин Ю.А., Фатеев В.А. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. М., "Наука", 1977, 208 с.
4. Пупков К.А., Костюк Г.А. Оценка и планирование эксперимента. М., "Машиностроение", 1977, 118 с.
5. Методы алгоритмизации непрерывных производственных процессов. Под ред. В.В. Иванова. М., "Наука", 1975, 400 с.
6. Срагович В.Г. Теория адаптивных систем. М., "Наука" 1976, 319 с.

Г.Н. Томников

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ СБОРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В настоящее время отечественная промышленность освоила выпуск агрегатированных комплексов наземных и бортовых средств электроизмерительной и вычислительной техники. На этой основе создан ряд систем автоматизации экспериментальных исследований и производственных испытаний промышленных объектов различного назначения. Их важной составной частью являются подсистемы (в большинстве случаев с магистральными или древовидными структурами [8], [9]), обеспечивающие сбор и регистрацию измерительной информации и состоящие

стандартных элементов: индивидуальных и групповых согласующих устройств, коммутаторов, аналого-цифровых преобразователей, блоков управления и синхронизации, а также магнитных регистраторов. В последующем изложении такие системы будем называть системами выбора измерительной информации (ССИ).

В целом ряде прикладных задач (например, функционального контроля в процессе эксплуатации средств авиационной техники) требуется решение вопросов рациональной организации структур ССИ и размещения их элементов на борту летательных аппаратов (ЛА). Это связано тем, что в настоящее время в связи и прогрессом в области микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры ее масса стала сопоставима с массой межблочных линий связи (ЛС), а иногда и значительно меньше последней [1]. Поэтому одной из важных проблем является сокращение длин, а, следовательно, и массы межблочных ЛС. Решение связано с решением трех основных классов задач оптимизации: размещения элементов ССИ на борту ЛА; выбора типа (радиальная, магистральная и др.) и синтеза структуры сети межблочных связей; трассировки отдельных ЛС, в зависимости от топологии источников и приемников измерительной информации.

Процесс выбора наилучшего варианта, в основе которого лежит распределение решения трех указанных классов задач (совместное [14] и раздельное), приемлемого в смысле некоторого критерия эффективности будем называть топологической оптимизацией, а полученное размещение отдельных элементов, структуру межблочных связей и массы ЛС-топологией ССИ.

При этом минимум общей длины межблочных связей является наиболее часто используемым критерием, так как в большинстве случаев обеспечивает уменьшение задержек измерительных сигналов и помеховлияния ЛС, а, следовательно, повышение надежности и помехоустойчивости функционирования ССИ в целом [12].

Однако топология системы, определяющая минимум длины сети межблочных связей, в условиях действия электрических и электромагнитных наводок на ЛС не всегда оптимальна в смысле критериев точности и верности результатов измерений. Поэтому одной из важных задач является оценка выбранной топологии с точки зрения указанных критериев.

Кроме того, учет ряда практических ограничений (машинное время, требуемое для решения задач оптимизации: объем памяти и т.д.)

приводит к необходимости исследования характеристик самих алгоритмов топологической оптимизации (точности, вычислительной сложности) и их реализуемости на ЭВМ.

Одной из особенностей монтажа современных бортовых ССИ является то, что сети межблочных связей выполняются в виде жгутов, прокладка которых в пространстве осуществляется по трассам, образованным попарно ортогональными прямолинейными отрезками. Это определяет необходимость нормировки ЛС типичной для большинства прикладных задач квадратональной метрикой вида [4], [6], [14]:

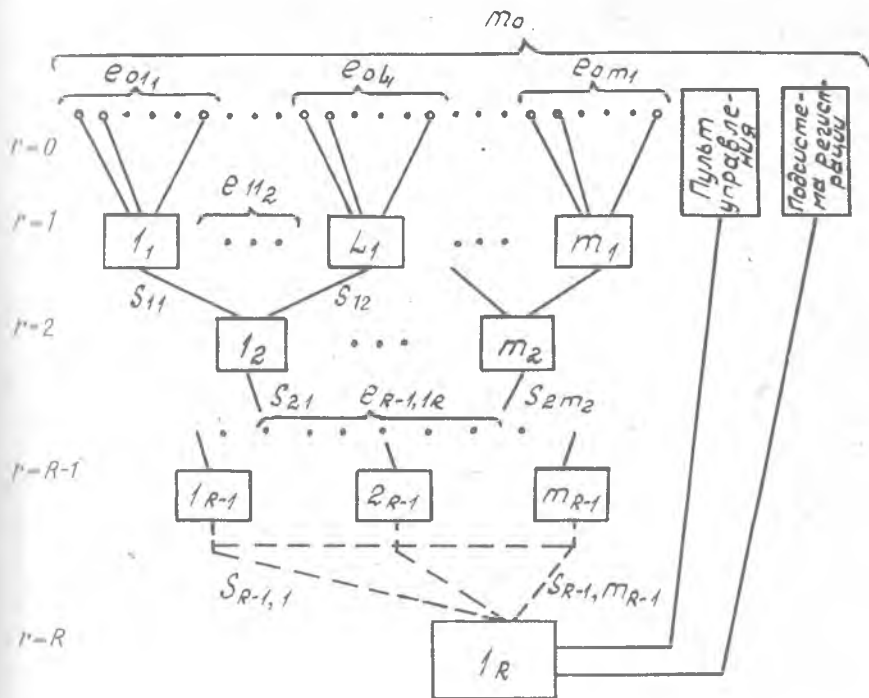
$$L_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| + |z_i - z_j|, \quad (I)$$

где  $x_i, x_j; y_i, y_j; z_i, z_j$  - соответственно, абсциссы, ординаты и аппликаты любых двух соединяемых ЛС элементов ССИ. Кроме того, элементы оптимизируемых систем, за исключением редких случаев, когда не накладывается дополнительных пространственных ограничений на их размещение, могут быть установлены лишь в априори выделенных, как правило, многосвязных разреженных областях:

$$\{y_p(x, y, z) = 0\} \text{ при } p \in \overline{1, P},$$

где  $P$  - количество областей (их геометрические размеры в большинстве случаев значительно превосходят устанавливаемые блоки аппаратуры). Таким образом, задача топологической оптимизации сводится к задаче нелинейного (в общем виде целочисленного) математического программирования с невыпуклым множеством допустимых решений, определяемым топологией областей, разрешенных для размещения элементов ССИ, и формулируется следующим образом.

Постановка задачи. Пусть известны координаты априори размещенных и перемещаемых в процессе топологической оптимизации элементов ССИ (источников и приемников измерительной информации  $\{u_{oi_0}\} = \{x_{oi_0}, y_{oi_0}, z_{oi_0}\}$  при  $i_0 \in \overline{1, m_0}$ ). Будем считать, что такие элементы образуют нижний уровень структуры  $r = 0$ , а перемещаемые элементы ССИ - остальные  $r \in \overline{1, R}$  уровней, их связи определяются схемой возможных соединений и логикой работы оптимизируемой системы. Анализ типовых ССИ [8], [9], [13] показал отсутствие в графах их функциональных структур циклов, поэтому любая из них может быть представлена в общем случае как  $R$  - уровневая древовидная, изображенная на рис. I. Причем в отдельных случаях структура сети межблочных связей элементов уровней  $r \in \overline{R-1, R}$  радиальная или магистральная (на рис. I показана пунктиром), а пос-



Р и с. I. Функциональная структурная схема типовой  $R$ -уровневой ССИ

последовательность подсоединения элементов уровня  $r=R-1$  к блоку высшего уровня  $r=R$  выбирается в процессе топологической оптимизации. Кроме того, пусть каждый уровень  $r \in \overline{0, R-1}$  системы представлен  $m_r$  элементами с удельными сложностями связей с уровнем  $r+1$ , определяемыми вектором  $S_r = \{S_{ri_{r+1}}\}, i_r \in \overline{1, m_r}$ , а структура межблочных связей такова, что каждый элемент  $i_{r+1} \in \overline{1, m_{r+1}}$  уровня  $r+1$  связан с совокупностью из  $e_{ri_{r+1}}$  элементов уровня  $r$ , причем элементам этой совокупности присвоены номера, принадлежащие индексному множеству  $\mathcal{I}_{i_{r+1}}^r = \{i_r\}$ , а  $i_r = \sum_{j \in \mathcal{I}_{i_{r+1}}^r} e_{rj_{r+1}}$ , где  $k \in \overline{1, e_{ri_{r+1}}}$ . Под удельной сложностью межблочных связей в данном случае понимается удельный вес проводников, либо их количество в ЛС и т.д. Таким образом, каждый уровень структуры ССИ задается векторами  $S_r = \{S_{ri_{r+1}}\}$  при  $i_r \in \overline{1, m_r}$  и  $E_r = \{e_{ri_{r+1}}\}, i_{r+1} \in \overline{1, m_{r+1}}$  и топология ССИ характери-

зуется тремя матрицами: матрицей координат элементов (неперемещаемых и перемещаемых)  $u = \|u_r\|$  для всех  $r \in \overline{0, R}$ , где  $u_r = \{u_{ri_r}\}$ ,  $u_{ri_r} = \{x_{ri_r}, y_{ri_r}, z_{ri_r}\}$  при  $i_r \in \overline{1, m_r}$ ; матрицей связей элементов  $E = \|E_r\|$  для всех  $r \in \overline{0, R}$ ; матрицей удельных сложностей связей  $S = \|S_r\|$  для всех  $r \in \overline{0, R}$ . Кроме того, во многих прикладных задачах на значения критериев эффективности ССИ (длина сети межблочных связей, помехоустойчивость функционирования и т.п.) и варьируемые переменные (координаты перемещаемых блоков) накладываются различные ограничения, определяемые главным образом требованиями к точности и верности данных, передаваемых по измерительному тракту системы. Допустимые пределы измерения варьируемых в процессе оптимизации переменных определяются пространственными ограничениями на размещение элементов и условиями, устанавливающими предельные значения длин ЛС в соответствующих сечениях структур систем. Причем критерии оценки эффективности получаемой топологии, как правило, являются многоэкстремальными функционалами координат перемещаемых блоков [6], что не позволяет найти глобальный оптимум известными методами нелинейного программирования. Кроме того, задача усложняется особым видом метрики (I).

Существующие методы топологической оптимизации главным образом ориентированы на использование в процессах автоматизации проектирования средств вычислительной техники и интегральных микросхем, среди них в соответствии с направленностью на решение указанных выше основных классов задач выделяются следующие.

Методы оптимизации размещения элементов сложных систем по используемым принципам объединяют следующие основные группы алгоритмов [10], [12], [14]: алгоритмы, использующие силовые функции; итерационные комбинаторно-аналитические алгоритмы; алгоритмы парных перестановок; эвристические алгоритмы последовательного размещения. Основным недостатком алгоритмов размещения первой, третьей и четвертой групп является зависимость результатов оптимизации от начальных условий, последовательности выбора, предварительного размещения элементов систем и т.д. и вследствие этого невысокая точность получаемых результатов [14]. Требуемое для реализации алгоритмов первой и второй групп машинное время резко возрастает с увеличением количества разрешенных областей и размещаемых в них элементов систем [7], [12], [14]. Кроме того, алгоритмы, использующие силовые функции, в основном ориентированы на решение за-

дич, в которых размещение производится на континуальном множестве возможных позиций (когда разрешенные области значительно превосходят по размерам перемещаемые блоки) при нормировании пространства евклидовой метрикой [10], [14]:

$$L_{ij} = \left[ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

что эквивалентно соединению элементов размещаемых систем прямолинейными ЛС, неприемлемым для задач оптимизации бортовых ССИ. Достижение глобального оптимума гарантируется лишь итерационными комбинаторно-аналитическими алгоритмами, использующими метод ветвей и границ, что, как правило, сопряжено со значительными затратами машинного времени [7]. Алгоритмы второй, третьей и четвертой групп, в большинстве случаев предназначены для оптимизации размещения элементов систем на счетном множестве разрешенных областей (соизмеримых с размещаемыми блоками), когда метрика пространства не играет решающей роли. Алгоритмы последовательного размещения (поэтапной оптимизации) наиболее просто реализуются на ЭВМ, не требуют сложных вычислений и предварительного размещения всех элементов системы [10], поэтому в настоящее время, несмотря на низкую точность получаемых результатов, они считаются наиболее перспективными.

Синтез структур ССИ в соответствии с критерием минимума общей длины сети межблочных связей в большинстве случаев (если не сформулированы дополнительные требования к надежности функционирования оптимизируемых систем, обуславливающие введение дополнительных ЛС и узлов сети), сводится к построению кратчайшего дерева, соединяющего предварительно размещенные элементы системы и удовлетворяющего различным ограничениям. Для топологической оптимизации сложных систем, функционирующих под воздействием электрических и электромагнитных полей, наиболее типичны ограничения на интенсивности наводок в отдельных ЛС (что эквивалентно установлению предельных значений длины соответствующих связей) [10], [14]. При этом на совокупности предварительно размещенных в соответствии с некоторым промежуточным критерием оптимальности элементов систем строится граф (как правило полный) возможных межблочных связей и ищутся покрывающие его кратчайшие деревья.

Известно большое количество методов построения кратчайших или минимальных и ним сетей межблочных связей при фиксированном размещении элементов систем, объединяющих следующие наиболее типичные группы алгоритмов:

группа алгоритмов оптимизации без введения в граф системы дополнительные вершины, использующих при отсутствии ограничений на степень узлов минимизируемой сети различные процедуры полного [2], [3], [14], либо частичного (основанного на известном методе Прима [11] перебора возможных связей или, в противном случае, методов математического программирования, [3], [14];

группы алгоритмов, предусматривающих введение дополнительных узлов [3], в этом случае оптимальная сеть связи имеет форму дерева Штейнера.

Как правило, существующие алгоритмы, за исключением предусматривающих полный перебор возможных связей, не позволяют получать точные оптимумы при решении задач большой размерности. Среди точных методов наиболее типичны методы, обеспечивающие на каждом шаге последовательный выбор минимального из оставшихся ребер графа возможных связей, не образующих циклов с уже выбранными [2], [14]. Такая процедура обеспечивает выбор кратчайших деревьев, покрывающих граф воздушных связей [2], однако при большом количестве вершин проверка на цикличность и связность сопряжена со значительными трудностями.

В целом ряде технических приложений (например, в случае равномерного распределения в объеме ЛА паразитных электрических и электромагнитных полей, влияющих на ЛС), конфигурации трасс межблочных связей (если не учитывать влияние между ЛС самой ССИ) не оказывают существенного влияния на оценки эффективности функционирования систем. Поэтому в этих случаях достаточно использовать методы топологической оптимизации, объединяющие алгоритмы решения лишь первых двух классов задач оптимизации: размещения элементов ССИ и синтеза структур сетей межблочных связей.

Таким образом, большинство разрабатываемых в настоящее время методов предназначены для топологической оптимизации систем на счетном множестве возможных позиций размещения отдельных элементов и из-за своей сложности, как правило, могут быть использованы лишь для решения задач на плоскости (в двумерном пространстве).

Алгоритмы, использующие силовые функции позволяют оптимизировать размещение элементов систем на континууме возможных позиций (решения задач топологической оптимизации в непрерывной постановке), но допускают нормирование длин межблочных связей лишь квадр-

ичной метрикой (2). Кроме того, существующие алгоритмы подразумевают учет требований к помехоустойчивости функционирования проектируемых систем в условиях действия электрических и электромагнитных наводок на ЛС в форме неравенств, устанавливающих их критические интенсивности в отдельных сечениях структур. Такой подход неприменим для топологической оптимизации ССИ в связи с информацией помех, наводимых в соответствующих ЛС, при передаче информационных сигналов через преобразующие их элементы [9], [13], так как в данном случае необходим учет точности и помехоустойчивости функционирования всего измерительного тракта.

Поэтому для топологической оптимизации ССИ требуется разработка методов рационального размещения элементов систем и синтеза структур сетей межблочных связей как на континууме, так и на конечном множестве разрешенных областей при нормировании пространств квадрагональной метрикой (1) с учетом требований на точность и верность передачи данных через весь тракт преобразования измерительной информации. Такие методы уже созданы и рассмотрены в работах [5], [6], их использование, например, для решения задач оптимизации ССИ, предназначенных для функционирования на борту современных средних и тяжелых самолетов, во многих практических случаях обеспечивает сокращение массы ЛС на 35-45% относительно технологии, получаемой неформальными методами (эвристически) без улучшения точности и верности результатов измерений в условиях действия электрических и электромагнитных наводок на межблочные линии.

## Л и т е р а т у р а

1. А ц ю к о в с к и й В.А. Построение систем связей комплексов оборудования летательных аппаратов. М., "Машиностроение", 1976, 240 с.
2. Б е р к К. Теория графов и ее применения. М., "Иностранная литература", 1962, 319 с.
3. Б р е у э р М.А. Последние достижения в области автоматизации проектирования и анализа цифровых систем. - В сб: Автоматизация в проектировании. Под ред. Д. Каллахана и др., перевод с англ. М., "Мир", 1972, 19-48 с.



4. В е н и к о в Г.В., Г а р м а ш В.А., Р а д у ц - к и й О.Ф. Сеть сбора информации минимального веса. -В сб: Сети связи и дискретные устройства управления. М., "Наука", 1976, 24-27 с.
5. В и т т и х В.А., Д е р я б к и н В.П., К у к - л и н Г.Н., Т о м н и к о в Г.Н. Проектирование рациональных бортовых систем сбора и обработки измерительной информации. Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по планированию и автоматизации эксперимента в научных исследованиях. Системы и средства автоматизации научных исследований. М., МЭИ, 1976, 86-89 с.
6. В и т т и х В.А., К у к л и н Г.Н., Ц ы б а т о в В.А. Т о м н и к о в Г.Н. Топологическая оптимизация систем сбора информации. "Проблемы управления и теории информации", 1978, т. 7 № I с. 21-36.
7. Г о л ь ш т е й н Е.Г., Ю д и н Д.Б. Задачи линейного программирования транспортного типа. М., "Наука", 1969, 382 с.
8. Д е р я б к и н В.П., Т о м н и к о в Г.Н. Тенденции развития аэрокосмических систем сбора и обработки измерительной информации. "Зарубежная радиоэлектроника", №10, 69-93 с., №11, 3-38 с.
9. К а в а л е р о в Г.И., М а н д е л ь ш т а м С.М. Введение в информационную теорию измерений. М., "Энергия", 1974, 376 с.
10. К а р а п е т я н А.М. Автоматизация оптимального конструирования ЭВМ. М., "Советское радио", 1973, 152 с.
11. П р и м Р.К. Кратчайшие связывающие сети и некоторые обобщения. Перевод с англ. Кибернетический сборник, М., "Иностранная литература", 1961, №2, 95-107 с.
12. М е д и х о в А.Н., Б е р я т е й н Л.С., К у р е й ч и к В.М. Применение графов для проектирования дискретных устройств. М., "Наука", 1974, 304 с.
13. Ш е н б р о т И.М., Г и н з б у р г И.Я. Расчет точности систем централизованного контроля. М., "Энергия", 1970, 400 с.

14. Штейн М.Е., Штейн Б.Е. Методы машинного проектирования цифровой аппаратуры. М., "Советское радио", 1973, 288 с.

М.А. Шамашов

#### ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ЭМУЛЯЦИИ СУВМ

Все более широкое использование специализированных ЭВМ (СУВМ) для решения задач управления сложными техническими системами ставит целый ряд задач по совершенствованию разработки вычислителей подобного класса. Следует отметить, что в то время как стоимость аппаратного обеспечения СУВМ снижается, стоимость программного обеспечения (ПО) проявляет тенденцию к непрерывному росту. Одним из путей снижения стоимости ПО является использование методов автоматизации программирования. Однако, как правило, ограниченный состав внешних устройств и малый объем оперативной памяти не могут обеспечить функционирование подобных систем на СУВМ. Это приводит к необходимости разработки эмуляторов СУВМ на больших универсальных ЭВМ. (В дальнейшем будем называть их инструментальными ЭВМ).

Эмуляция (от англ. *emulation* - соревнование, состязание) - термин, введенный специалистами фирмы IBM для определения процесса совмещения входных языков ЭВМ. Первоначально аппаратно-программные эмуляторы использовались преимущественно для ускорения процесса реализации программ написанных для машин второго поколения на машинах третьего поколения [1]. Внимание при этом акцентировалось на аппаратных методах эмуляции. Резкое различие в архитектуру моделируемых СУВМ и инструментальных ЭВМ вынуждают отказаться от использования дополнительного комплекса аппаратуры и более внимание уделять программным методам. За последнее время привнес целый ряд работ по совершенствованию программных методов эмуляции. В частности, общепринятую схему "идентификация - интерпретация" [2]-[4] заменяют двухэтапная схема [5,6] и метод "открытых подпрограмм" [7], позволяющие значительно ускорить процесс отладки ПО СУВМ. Исследования существующих и оригинальных методов эмуляции и практическая реализация конкретных эмуляторов