

УДК 621.3.049

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛИН ЦЕПЕЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ЭТАПЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ**

**А.Г. Арутюнян**

*Национальный политехнический университет Армении*

Так как на этапе размещения элементов интегральных схем (ИС) еще не известны топологические структуры цепей и, следовательно, их длины, то для оценки задержек сигнала в будущих межсоединениях возникает необходимость моделирования длин цепей ИС. Наличие таких моделей позволяет управлять процессом размещения элементов с точки зрения быстродействия. Основными требованиями для таких моделей являются быстрота и точность оценки длин будущих цепей.

С точки зрения точности, наиболее близкие к фактическим длинам цепей оценки выдает модель дерева Штейнера, так как она положена в основу используемых в автоматизированных системах электронного проектирования алгоритмов трассировки. Однако, поскольку модель Штейнера имеет NP сложность и ее решение требует большого машинного времени, ее применение на этапе размещения неэффективно.

В существующих программных инструментах размещения элементов ИС наибольшее применение получила полупериметрическая модель оценки длин цепей. Она является упрощенной моделью Штейнера и основана на построении ограничивающей контакты данной цепи минимальной прямоугольной рамки и определении ее полупериметра. Однако точность этих моделей убывает с ростом количества контактов цепи.

В условиях растущей интеграции ИС появляется необходимость разработки новых и усовершенствованных моделей оценки длин цепей, которые, с одной стороны, повысят точность оценки, с другой - потребуют относительно небольшого времени оценки.

В настоящей работе предложены новый метод и алгоритм моделирования длин цепей ИС, которые, имея  $O(n \log n)$  сложность, по точности превышают полупериметрическую модель и приближаются к точности модели минимального дерева Штейнера. Предложенный метод основан на том, что точность полупериметрической модели для цепей, имеющих не более трех контактов, совпадает с точностью модели минимального дерева Штейнера. Предлагается разбить монтажное поле цепи на области, содержащие не более трех контактов, с дальнейшей оценкой длины цепи каждой области по полупериметрической модели и дальнейшим соединением этих областей, применяя известные методы построения минимальных связывающих деревьев.

**Ключевые слова:** моделирование длин цепей, минимальное дерево Штейнера, полупериметрическая модель.

**Введение.** Алгоритмы автоматизации физического проектирования ИС основаны на графах связности и используют входную информацию в виде списка цепей схем и конструктивных ограничений на размещение элементов и трассировку межсоединений. В общем случае цепи схемы являются многозвенными, и для правильного их представления следует использовать гиперграфовые модели цепей, в которых количество вершин любого гиперребра соответствует количеству контактов данной цепи. На этапе размещения элементов ИС модели линий связи используются для оценки длин будущих межсоединений и управления процессом размещения с точки зрения их быстродействия. Такие модели основаны на известных в теории графов наименьших покрывающих деревьях, в частности, на минимальном дереве Штейнера [1,2].

В существующих инструментах размещения наибольшее применение получила полупериметрическая модель оценки длины цепи. Такая модель является упрощенной моделью Штейнера, основанной на построении ограничивающей контакты данной цепи минимальной прямоугольной рамки и определении ее полупериметра. Эти модели выделяются своей простотой и удобством использования на этапе размещения элементов.

В общем случае полупериметрическая модель обеспечивает нижний предел оценки длины цепи, а основным ее недостатком является понижение точности оценки для цепей, содержащих более трех контактов. Применение полупериметрической модели на практике обусловлено ее простотой и тем обстоятельством, что цепи с не более чем тремя звеньями в промышленных схемах составляют в среднем 80% всех цепей [3,4].

Учитывая тот факт, что паразитная емкость любого межсоединения зависит от длины цепи, которой принадлежит данное межсоединение, можем сказать, что полупериметрическая модель, помимо оценки длины цепи, также может быть достаточным средством оценки задержки цепи на этапе размещения элементов. Таким образом, расстояния между элементами, которые регулируются на этапе размещения, могут служить средством оценки длины межсоединений и, следовательно, задержек в них.

Как известно, с уменьшением технологических размеров ИС и увеличением степени их интеграции доля задержек в межсоединениях в общей задержке увеличивается, и в современных ИС 80...90% задержек приходится именно на межсоединения [1,5]. Так как от результатов размещения зависят, в основном, успешность трассировки и длины межсоединений, следовательно, размещение в большей степени может способствовать обеспечению быстродействия схемы.

Однако в условиях растущей интеграции ИС появляется необходимость разработки новых и усовершенствованных моделей оценки длин цепей, которые, с одной стороны, повысят точность оценки, с другой - потребуют относительно

небольшого времени оценки. Очевидно, что из-за противоречивости этих двух условий выбор такой модели является проблемой инженерного компромисса.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод, что с уменьшением технологических размеров ИС повышается важность задачи разработки методов моделирования длин цепей ИС, обеспечивающих достаточную точность и быстродействие на этапе размещения элементов.

В настоящей работе предложены метод и алгоритм оценки длин цепей, которые, имея приемлемое быстродействие, по точности превышают полупериметрическую модель оценки и приближаются к точности модели минимального дерева Штейнера.

**Предлагаемый метод моделирования длин цепей ИС.** Поскольку на этапе размещения еще не известны структуры топологии цепей, для оценки задержек в них появляется необходимость разработки методов виртуальной трассировки цепей и оценки их длин. С этой целью используются различные сетевые модели представления топологии цепей. На рис. 1 представлены примеры графической интерпретации различных моделей топологии многозвенной цепи с указанием оценочных длин  $L$  [1,4].

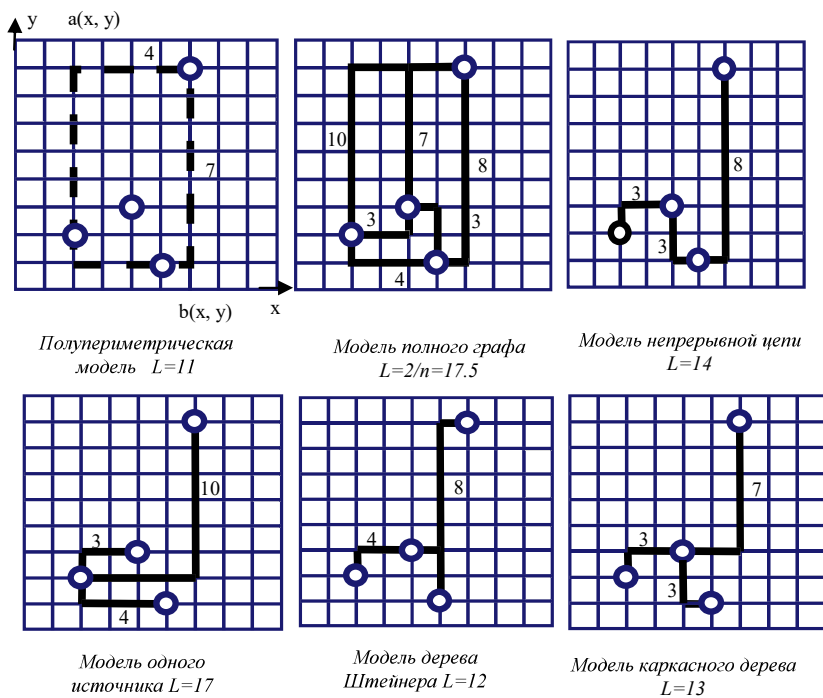


Рис. 1. Примеры моделей цепи

Среди этих моделей наиболее высокую точность обеспечивает модель дерева Штейнера, так как она максимально совпадает с результатами окончательной трассировки цепей. Однако, поскольку проблема Штейнера имеет NP сложность, то на этапе размещения элементов ИС использование модели Штейнера в ее исходной форме ограничено по причине сложности и, следовательно, большого времени реализации. Поэтому на этом этапе используют различные упрощенные модели дерева Штейнера, которые отличаются друг от друга своей сложностью и точностью. Как уже отмечалось, среди этих моделей наиболее распространенным и простейшим методом моделирования является полупериметрическая модель [1].

Если величины  $a(x, y)$  и  $b(x, y)$ , приведенные на рис. 1, являются вершинами диагонали минимального прямоугольника, охватывающего контакты цепи, то длина цепи, оцененная полупериметрической моделью, определится следующим образом:

$$L = |a(x) - b(x)| + |a(y) - b(y)|. \quad (1)$$

Однако, как уже отмечалось, для многозвенных цепей полупериметрическая модель не обеспечивает достаточную точность. Предлагаемый метод моделирования длин многозвенных цепей на этапе размещения элементов основан на том, что точность полупериметрической модели для цепей, имеющих не более трех контактов, совпадает с точностью модели минимального дерева Штейнера. С учетом сказанного предлагается разбить монтажное поле многозвенных цепей на области, содержащие не более трех контактов, с дальнейшей оценкой длины цепи каждой области с помощью полупериметрической модели и дальнейшим соединением этих областей, применяя известные методы построения минимальных связывающих деревьев.

Предлагаемый метод реализует последовательное решение следующих задач:

1. Разбиение монтажного поля многозвенной цепи на области, содержащие не более трех контактов.

С этой целью производится иерархическое ортогональное разбиение монтажного поля по линиям сбалансированного среднего по осям  $x$  и  $y$  по следующей формуле:

$$x_{cp} y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{n}, \quad (2)$$

где  $x_{cp} (y_{cp})$  - сбалансированное среднее по оси  $x (y)$ ;  $x_i (y_i)$  - координаты

$i$ -го контакта;  $n$  – количество контактов цепи.

2. Оценка длин, полученных в результате решения первой задачи фрагментов цепи по полупериметрической модели, используя формулу (1).

3. Определение длины минимального дерева, связывающего подмножества контактов, что подразумевает решение следующих подзадач:

- вычисление минимальных расстояний между локальными полупериметрическими моделями подмножеств;
- построение полного взвешенного графа расстояний подмножеств;
- выделение минимального дерева из полного графа.

4. Оценка длины цепи как суммы длин отдельных фрагментов, определенных по п. 2, и минимального дерева - по п.3.

Приведенный выше метод по сложности совпадает со сложностью алгоритмов построения минимальных связывающих деревьев, таких как алгоритм Прима или Крускала, и оценивается величиной  $O(n \log n)$  [6].

**Пример реализации алгоритма моделирования длин цепей ИС.** Работу алгоритма моделирования длин цепей рассмотрим на примере 9- контактной цепи, приведенной на рис. 2.

Как видно из рисунка, в приведенном примере длина цепи, оцененная по полупериметрической модели ( $L_{\text{пм}}$ ), равна 20-и единицам (рис. 2 а), а минимальное дерево Штейнера ( $L_{\text{шт}}$ ) имеет длину, равную 28-и единицам (рис. 2 б).

Алгоритм предлагаемого метода реализует следующие шаги:

1. Разбиение монтажного поля на две части А и В по вертикали, проходящее через сбалансированное среднее по оси  $y$ , округленное до ближайшего целого числа:

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^9 y_i}{9} = \frac{44}{9} = 4,88(8) \approx 5 \quad (3)$$

2. Разбиение монтажного поля на две части каждого из фрагментов А и В по горизонтали, проходящее через сбалансированное среднее по оси  $x$ , округленное до ближайшего целого числа:

$$x_A' = \frac{\sum_{i=1}^n x_{Ai}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^4 x_{Ai}}{4} = \frac{23}{4} = 5,75 \approx 6 \quad (4)$$

$$x_B' = \frac{\sum_{i=1}^n x_{Bi}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^5 x_{Bi}}{5} = \frac{22}{5} = 4,4 \approx 4 \quad (5)$$

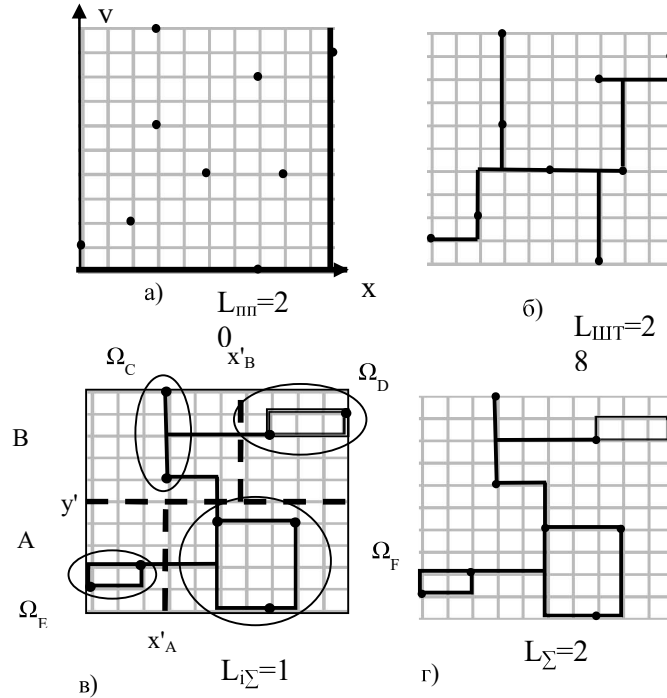


Рис. 2. Геометрическая интерпретация предложенной модели оценки длины цепи: а - размещение контактов цепи с указанием полупериметрической модели, б - минимальное прямоугольное дерево Штейнера, в - полупериметрические модели локальных фрагментированных зон, г - окончательный вид предложенной модели оценки длины цепи

3. Рекурсивное повторение шагов 2 и 3, пока во всех полученных фрагментах останется не более трех контактов.

4. Оценка длины соответствующей части цепи по полупериметрической модели для каждого фрагмента контактов:

$$L_i = 0,5(|\max_{x_i \in \Omega_i} x_i - \min_{x_i \in \Omega_i} x_i| + |\max_{y_i \in \Omega_i} y_i - \min_{y_i \in \Omega_i} y_i|); i = 1, 2, \dots, k, \quad (6)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  - координаты контактов подмножества  $\Omega_i$ ;  $k$  - количество подмножеств контактов.

Отметим, что для приведенного на рис. 2 примера получаются 4 фрагмента контактов, суммарная длина которых, рассчитанная по полупериметрической модели, равна 18.

5. Определение длины минимального ортогонального дерева, связывающего подмножества контактов.

Для этого сначала вычисляются минимальные расстояния между локальными полупериметрическими моделями подмножеств  $\Omega_i$ ;  $i = 1, 2, \dots, k$ . Для любой пары подмножеств  $\Omega_i$  и  $\Omega_j$  это расстояние будет:

1) при  $\max_{x_i \in \Omega_i} x_i < \min_{x_j \in \Omega_j} x_j$ ;  $\min_{y_i \in \Omega_i} y_i > \min_{y_j \in \Omega_j} y_j$ , т.е.  $\Omega_j$  расположено правее и вниз от  $\Omega_i$ :

$$L_{ij} = \left| \max_{x_i \in \Omega_i} x_i - \min_{x_j \in \Omega_j} x_j \right| + \left| \min_{y_i \in \Omega_i} y_i - \max_{y_j \in \Omega_j} y_j \right|; i, j = 1, 2, \dots, k; i \neq j;$$

2) при  $\max_{x_i \in \Omega_i} x_i < \min_{x_j \in \Omega_j} x_j$ ;  $\min_{y_i \in \Omega_i} y_i < \min_{y_j \in \Omega_j} y_j$ , т.е.  $\Omega_j$  расположено правее и вверх от  $\Omega_i$ :

$$L_{ij} = \left| \max_{x_i \in \Omega_i} x_i - \min_{x_j \in \Omega_j} x_j \right| + \left| \max_{y_i \in \Omega_i} y_i - \min_{y_j \in \Omega_j} y_j \right|; i, j = 1, 2, \dots, k; i \neq j;$$

3) при  $\min_{x_i \in \Omega_i} x_i > \min_{x_j \in \Omega_j} x_j$ ;  $\min_{y_i \in \Omega_i} y_i > \max_{y_j \in \Omega_j} y_j$ , т.е.  $\Omega_j$  расположено левее и вниз от  $\Omega_i$ :

$$L_{ij} = \left| \min_{x_i \in \Omega_i} x_i - \max_{x_j \in \Omega_j} x_j \right| + \left| \min_{y_i \in \Omega_i} y_i - \max_{y_j \in \Omega_j} y_j \right|; i, j = 1, 2, \dots, k; i \neq j;$$

4) при  $\min_{x_i \in \Omega_i} x_i > \min_{x_j \in \Omega_j} x_j$ ;  $\max_{y_i \in \Omega_i} y_i < \min_{y_j \in \Omega_j} y_j$ , т.е.  $\Omega_j$  расположено левее и вверх от  $\Omega_i$ :

$$L_{ij} = \left| \min_{x_i \in \Omega_i} x_i - \max_{x_j \in \Omega_j} x_j \right| + \left| \max_{y_i \in \Omega_i} y_i - \min_{y_j \in \Omega_j} y_j \right|; i, j = 1, 2, \dots, k; i \neq j;$$

5) при  $\max_{x_i \in \Omega_i} x_i > \min_{x_j \in \Omega_j} x_j$ ;  $\min_{y_i \in \Omega_i} y_i < \max_{y_j \in \Omega_j} y_j$ ;  $\max_{y_i \in \Omega_i} y_i < \min_{y_j \in \Omega_j} y_j$ , т.е.  $\Omega_j$  расположено вверх (вправо) от  $\Omega_i$ :

$$L_{ij} = \left| \max_{y_i \in \Omega_i} y_i - \min_{y_j \in \Omega_j} y_j \right|; i, j = 1, 2, \dots, k; i \neq j;$$

б) при  $\max_{x_i, y_i \in \Omega_i} x_i y_i > \min_{x_j, y_j \in \Omega_j} x_j y_j$ ;  $\min_{x_i, y_i \in \Omega_i} x_i y_i < \max_{x_j, y_j \in \Omega_j} x_j y_j$ ;  
 $\max_{x_i, y_i \in \Omega_i} x_i y_i < \min_{x_j, y_j \in \Omega_j} x_j y_j$ , т.е.  $\Omega_j$  расположено вниз (влево) от  $\Omega_i$ ;

$$L_{ij} = \left| \min_{y_i, x_i \in \Omega_i} y_i x_i - \max_{y_j, x_j \in \Omega_j} y_j x_j \right|; i, j = 1, 2, \dots, k; i \neq j.$$

На рис. 3а приведен полный взвешенный граф расстояний подмножеств, приведенных на рис. 2 в, веса которого рассчитаны по пункту 5.

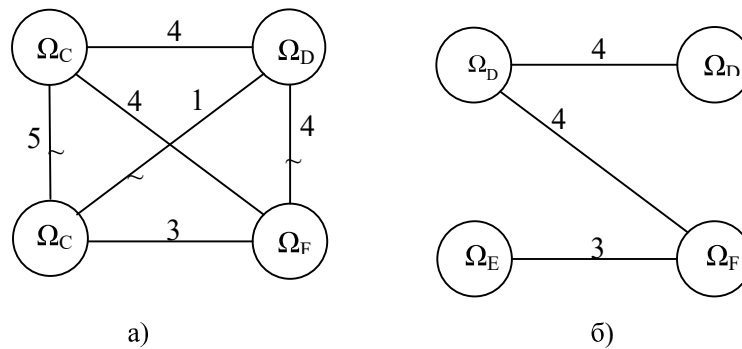


Рис. 3. Взвешенный граф расстояний подмножеств контактов:  
 а - полный взвешенный граф расстояний подмножеств,  
 б - минимальное связывающее дерево подмножеств

Во взвешенном графе расстояний подмножеств контактов выделяется минимальное связывающее дерево, приведенное на рис. 3б. Суммарная длина этого дерева равна 11. Отметим, что если количество таких минимальных деревьев больше одного, то оставляется любое из них.

6. Оценка суммарной длины цепи по следующей формуле:

$$I_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^k L_i + \min \sum_{i,j=i;i \neq j}^k L_{ij} = 18 + 11 = 29,$$

где  $\sum_{i=1}^k L_i$  - суммарная длина фрагментов цепи, рассчитанная по полупериметрической модели;  $\min \sum_{i,j=i;i \neq j}^k L_{ij}$  - длина минимального связывающего дерева подмножеств контактов.

Таким образом, для рассматриваемого примера, содержащего 9 контактов, длина цепи, определенная предлагаемым методом, отличается от длины минимального дерева Штейнера всего на одну единицу.



Реализация описанного выше метода моделирования для ряда тестовых примеров цепей, содержащих до 30 контактов, показала на 25% больше точности по сравнению с полупериметрической моделью.

**Заключение.** Разработаны метод и алгоритм моделирования и оценки длин многозвенных цепей на раннем этапе размещения элементов ИС, которые за счет многоуровневого иерархического представления широко используемой в настоящее время полупериметрической модели обеспечивают по сравнению с ней на 25% большую точность. Предложенная модель имеет несравненно малую сложность по сравнению с моделью минимального связывающего дерева Штейнера и составляет  $O(n \log n)$ .

Разработанный метод моделирования длин цепей может быть использован на этапе размещения элементов ИС с целью оперативной оценки длин будущих межсоединений и задержек сигнала в них с приемлемой точностью для многозвенных цепей.

### Литература

1. **Sherwani Naveed A.** Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Intel Corporation.- Kluwer Academic Publishers, 2007. -572 p.
2. **Chu and Yiu-C, Wong.** FLUTE: Fast Lookup Table Based Rectilinear Steiner Minimal Tree Algorithm for VLSI Design// IEEE Transactions on Computer-aided Design.-2008.-Vol. 27, No. 1.- P. 70-83.
3. **Մելիքյան Վ.Շ., Հարությունյան Ա.Գ., Գևորգյան Ա.Ա.** Միկրոէլեկտրոնային սխեմաների ֆիզիկական նախագծման մեթոդներ: Մենագրություն/ ՀՊՃՀ.- Եր.: Ճարտարագետ, 2015.-240 էջ:
4. **Pan D.Z., Halpin B., and Ren H.** Timing-Driven Placement: In Handbook of Algorithms for VLSI Physical Automation (edited by Charles J. Alpert, Dinesh P. Mehta, and Sachin S. Sapatnekar).- CRC Press, 2007 (Invited) (Amazon) (ISBN: 0849372429). -2008. -1024p.
5. The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), 2013 <http://www.itrs.net/Links/2013ITRS/2013Chapters/2013SysDrivers.pdf>.
6. **Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.** Алгоритмы: построение и анализ.- 2-е изд. - М.: Вильямс, 2013. - 1328 с.

*Поступила в редакцию 18.10.2018.  
Принята к опубликованию 17.01.2019.*

## ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆՏԵԶԱՆԵՐԻ ԵՂԹԱՆԵՐԻ ԵՐԿԱՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ՏԱՐԵՐԻ ՏԵՂԱԲԱՇԽՄԱՆ ՓՈԽՈՒՄ

### Ա.Գ. Հարությունյան

Ինտեգրալ սինտեզների (ԻՍ) տարրերի տեղաբաշխման փուլում դեռևս հայտնի չեն շղթաների տոպոլոգիական կառուցվածքները և, հետևաբար, դրանց երկարությունները: ՌԻ-ստի ապագա միջմիացումներում ազդանշանների հապաղումների գնահատման համար շղթաների երկարությունների մոդելավորման անհրաժեշտություն է առաջանում: Այդպիսի մոդելների առկայությունը հնարավորություն է տալիս սինտեայի արագագործության տեսանկյունից կառավարել տեղաբաշխման ընթացքը: Այդ մոդելներին ներկայացվող հիմնական պահանջն ապագա շղթաների երկարությունների արագ և համարժեք գնահատումն է:

Համարժեքության և ճշտության տեսանկյունից շղթաների իրական ծրագծմանը համապատասխանող երկարության ամենամոտ արժեքները կապահովի Շտեյնների ծառի մոդելը, քանի որ այն դրված է էլեկտրոնային նախագծման ավտոմատացման համակարգերում օգտագործվող ծրագծման ալգորիթմների հիմքում: Սակայն Շտեյնների խնդիրն ունի NP բարդություն, և դրա լուծումը պահանջում է մեքենայական մեծ ժամանակ: ՌԻ-ստի տեղաբաշխման փուլում վերջինիս կիրառումը արդյունավետ չէ:

ԻՍ-երի տարրերի տեղաբաշխման գոյություն ունեցող ծրագրային գործիքներում ամենաշատ կիրառվում է շղթաների երկարությունների գնահատման կիսապարագծային մոդելը: Այն Շտեյնների պարզեցված մոդելն է, որը հիմնված է տվյալ շղթայի կոնտակտներն ընդգրկող նվազագույն շրջանակի կառուցման և նրա կիսապարագծի որոշման վրա:

Սակայն ԻՍ-երի ինտեգրման աճի պայմաններում շղթաների երկարությունների գնահատման նոր և կատարելագործված մոդելների մշակման անհրաժեշտություն է առաջանում, որը մի կողմից՝ կբարձրացնի գնահատման ճշտությունը, մյուս կողմից՝ կապահովի գնահատման համեմատաբար փոքր ժամանակ:

Մշակվել են շղթաների երկարությունների մոդելավորման նոր մեթոդ և ալգորիթմ: ՌԻ-նենալով  $O(n \log n)$  բարդություն՝ մոդելը ճշտությամբ գերազանցում է կիսապարագծային մոդելին և մոտենում է Շտեյնների նվազագույն ծառի մոդելի ճշտությանը: Մոդելի հիմքում ընկած է այն դրույթը, որ ոչ ավելի, քան 3 կոնտակտ պարունակող շղթաների համար կիսապարագծային և Շտեյնների մոդելների ճշտությունները համընկնում են: Առաջարկվում է բազմաճյուղ շղթաներով մոնտաժային դաշտը բաժանել ոչ ավելի, քան 3 կոնտակտ պարունակող մասերի՝ յուրաքանչյուր մասի համար կիսապարագծային մոդելի կիրառմամբ, հետագայում այդ մասերի միացմամբ՝ օգտվելով նվազագույն կապող ծառերի կառուցման մեթոդներից:

**Առանցքային բաներ.** շղթաների երկարությունների մոդելավորում, Շտեյնների նվազագույն ծառ, կիսապարագծային մոդել:

## MODELING THE LENGTH OF THE CHAINS OF INTEGRATED CIRCUITS AT THE STAGE OF CELL PLACEMENT

**A.G. Harutyunyan**

Since the topological structures of chains and, consequently, their lengths are not yet known at the stage of placement of cells of integrated circuits (ICs), it is necessary to model the lengths of circuits to estimate the signal delays in future interconnects. The presence of such models allows managing the process of cell placement in terms of performance. The main requirements for such models are the fast and adequate validation of the length of the future chains.

From the point of view of accuracy, the model of the Steiner tree gives the closest to the actual length of validating chains, since it is imposed on the basis of routing algorithms used in automated electronic design systems. However, since the Steiner problem has NP complexity and its solution requires a lot of machine time, its application at the placement stage is inefficient.

In the existing software tools for the placement of IC cells, the semi-perimeter model for validating the net length has found the widest application. It is a simplified Steiner model and is based on the construction of a minimum rectangular frame, bounding the contacts of this circuit and determining its semi-perimeter.

However, in the context of growing integration of ICs, there arises a need to develop new and improved models for estimating the length of the chains, which, on the one hand, will increase the accuracy of the validation, on the other hand, will require a relatively short validation time.

In the present work, a new method and algorithm for modeling the lengths of IC circuits are proposed, which, having the  $O(n \log n)$  complexity, exceed the semi-perimeter model in accuracy and approaches the accuracy of the Steiner minimum tree model. The proposed method is based on the fact that the accuracy of the semi-perimeter model for circuits having no more than 3 contacts coincides with the accuracy of the model of the minimal Steiner tree. It is proposed to divide the circuit's field into areas containing not more than 3 contacts, with a further validation for each area by a semi-perimeter model and a further connection of these areas using the known methods for constructing the minimal connectivity trees.

**Keywords:** modeling of the chain length, minimal Steiner tree, semi-perimeter model.