

通道繞線串音最小化問題之研究

李志宏

中原大學電子研究所資訊組
台灣省中壢市普仁 22 號

鍾志敏 傅文佑 謝財明

中原大學資訊工程研究所
台灣省中壢市普仁 22 號

(Received: December 20, 2000 ; Accepted: March 22, 2001)

摘要

本論文利用模擬退火法(Simulated-Annealing, SA)在不改變傳統通道繞線輸入初始解的通道高度下，使用重新排列連線組(net)區段(segment permutation)及連線組分段(dogleg)之方法，在允許一連線組具有多個連線組分段的情形下，針對格子化(gridded)通道繞線串音最小化問題快速地求得繞線解。實驗結果與 track permutation[6]，segment reassignment [9]及線性規劃法[8]等比較，顯示本論文之方法不但能夠同時改善 minslack 與 total crosstalk，而對於大型通道亦無需先加以分割成較小通道再進行處理。

關鍵詞：模擬退火法，重新排列連線組區段，連線組分段。

壹、前言

近年來 VLSI 電路技術快速的發展，使內接線彼此間耦合效應(coupling effects)所產生的串音(crosstalk)問題隨著製程的演進而嚴重影響到電路的效能和良產率(yield)[1]，在繞線階段能夠快速且有效降低串音之演算法，已成為一項重要的研究課題。

由於串音的產生與通道繞線相關(routing-dependent)，因此傳統的通道繞線問題在加入串音限制的考量後，問題將變得更加複雜與困難[7]。在以往的研究裡，通道繞線之串音最小化問題大致可歸類成非格狀繞線(gridless routing)及格狀繞線(grided routing)兩種模式。在非格狀繞線模式中，採用的方法是藉由調整兩相鄰線間的距離來降低串音[4][5][10][11]。而格狀繞線模式中，通常藉由重新排列軌(track permutation)[6]，重新排列線段(segment rearrangement)[7][9]及放置層的重新分配(layer reassignment)[13]等方法來尋求具較小串音的繞線解。

由於通道繞線串音最小化問題較傳統的通道繞線問題複雜許多，因此利用傳統通道繞線演算法的結果作為輸入，再利用演算法針對串音現象尋求最小化的繞線解，以此方式所得到的結果不但可以滿足通道

高度限制，且其在串音方面也較易符合電路的要求。以往的研究中串音最小化問題大多直接採用啟發式演算法[6][9]或整數線性規劃[8]等方法來求解。先前的研究採用重新排列軌的方法[6]與重新排列線段的方法[9]中，並未導入連線組分段之方法；而在採用線性規劃法之研究[8]中，雖將重新排列與連線組分段方法結合，但該方法對初始解中之任一連線組而言，只能有一個連線組分段。對於大型通道，如表一中所列 YK3C 及 Deutsch，方法[8]，[9]均先將通道分割成較小通道，在加以處理以降低演算法複雜度。本論文也採用傳統通道繞線解作為輸入，並以模擬退火演算法來處理格狀通道繞線之串音最小化問題，在求解的過程中，同時加入重新排列線段及連線組分段的方法作為求解時的考量，並以啟發式演算法針對串音最小化進行連線組分段的處理，我們的方法可針對原始繞線解中的一個連線組(net)進行多次連線組分段(doglegs)處理，藉由連線組的分段可將較長之水平線段分解成許多較小的水平線段，增加了水平線段重新排列的機會，且分段前先針對其兩側水平線段的排列狀況進行分析，並參考分析之結果進行線段的分解，因此能快速且有效地找出具較小串音值的繞線解。

接下來的章節裡，第二節將介紹通道繞線問

題、串音問題及相關專有名詞之定義，同時也將探討通道繞線串音最小化問題的研究概況，第三節將介紹本篇論文所提出之模擬退火演算法，第四節及第五節則分別為實驗結果與結論。

貳、問題描述

通道繞線問題中的通道(channel)是由上下兩平行列(rows)所構成之矩形可繞線區域(routing region)，所有固定分佈於可繞線區域上下邊界且必須相接通的接腳集合(pins set)稱為連線組。通道繞線問題即指在一通道範圍內，找出連線解使得能成功地將連線組接腳集合相互接通之問題。

為了在通道繞線問題中針對串音效應最小化尋求繞線解，因此在設計規格(design specification)中，將對於不同的連線組給予一個最大可容忍之串音值(maximum tolerable crosstalk)，以確保電路能滿足其被要求的串音限制(crosstalk constraints) [7]。在一對相鄰的平行線間所產生的串音值，會與兩相鄰連線間的耦合長度成正比，而與兩相鄰連線間的距離成反比[12]。

一、目標函數(Objective function)

在一對平行的連線中，串音效應的大小與此對平行連線的耦合長度成正比，而與兩平行線間的距離成反比。假設 i, j 為兩水平(垂直)連線，則 i, j 間之串音值可表示如下：

$$\text{Crosstalk}_{i,j} = \text{coupling_length}(i, j) / (\text{distance}(i, j))^s \quad (1)$$

其中 $\text{distance}(i, j)$ 為兩水平(垂直)連線間的距離， $\text{coupling_length}(i, j)$ 為兩水平(垂直)連線間耦合的距離， s 為一接近 2 的常數[12]。

為了簡化串音值的計算，我們將假設電路僅在一固定頻率上運作，且相鄰連線間的耦合長度等於它們的串音值，且當 $\text{distance}(i, j) \geq 2$ 時，我們可忽略其間的串音值，因此(1)式可改寫為

$$\text{Crosstalk}_{i,j} = \begin{cases} \text{coupling_length}(i, j), & \text{if } \text{distance}(i, j) = 1 \\ 0, & \text{if } \text{distance}(i, j) \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

對於內含 n 個連線組的通道而言，將各連線組的串音值取出並進行加總，即可得到整個通道內連線組的串音值總和，將其定義為總串音值(total crosstalk)，如公式(3)所示。

$$\text{total_crosstalk} = \sum_{1 \leq i \leq n} \text{Crosstalk}_i \quad (3)$$

若每一個連線組 N_k 所能被接受的最大容忍串音值(maximum tolerable crosstalk)分別為 M_k 。則 M_k 和 Crosstalk_k 之差值稱為連線組 N_k 的串音鬆弛slack S_k ，如下之公式(4)。通道內所有連線組中，最小的 S_k 值即最小串音鬆弛 minslack(minimum slack)。若能求得 $\text{minslack} \geq 0$ 之繞線解便滿足通道繞線串音值的限制，因此可將 minslack 定義如公式(5)。

$$S_k = M_k - \text{Crosstalk}_k \quad ; k=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\text{minslack} = \min \{ S_1, S_2, \dots, S_n \} \quad (5)$$

在本論文探討的問題中，希望找出 minslack 值愈大且同時總串音值愈小之繞線解。因此目標函數之定義可描述如公式(6)：

$$\text{Minimum : } \alpha * \text{total_crosstalk} - \beta * \text{minslack} \quad (6)$$

其中 α 和 β 為權重因子(weight factors)。藉由這個目標函數，可依需求給定 α 和 β 之值，若給定的 β 值遠大於 α 值，則求解的目標將會偏向具有最大化之 minslack。反之，則目標將偏向求總串音值最小化的繞線解。

二、連線組分段(dogleg)

繞線時允許同一連線組的水平連線區段佔用到兩個以上的軌道，此種技巧為連線組分段(dogleg)。由先前的研究中得知，連線組分段技巧應用在解決串音最小化繞線問題時，能有效地降低連線上之串音值[8]。

三、軌道重新排列與連線區段重新安排

針對一組繞線解中的軌道進行重新排列或對不同軌道上並行的連線區段重新排列後，可針對串音最小化問題求得較佳的繞線解。過去的研究中，Gao 和 Liu 所提出的演算法[6]採用重新排列軌道的方式來降低串音值。而 Jhang, Ha 和 Jhon 之演算法[9]則是透過水平連線區段重新安排(segment rearrangement)，進一步求得具較低串音值之繞線解。

四、垂直及水平限制關係之描述

在通道繞線串音最小化問題中，必須在確定無違反垂直限制及水平限制的前提下，才能夠重新排列線段，以取得較佳的繞線解。



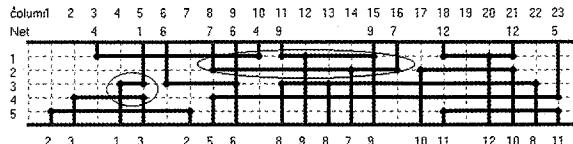


圖 1 應用重新排列技巧時垂直與水平方向遇到的限制

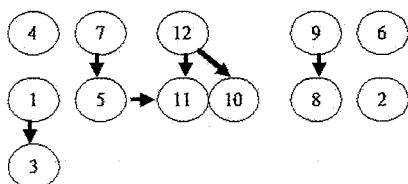


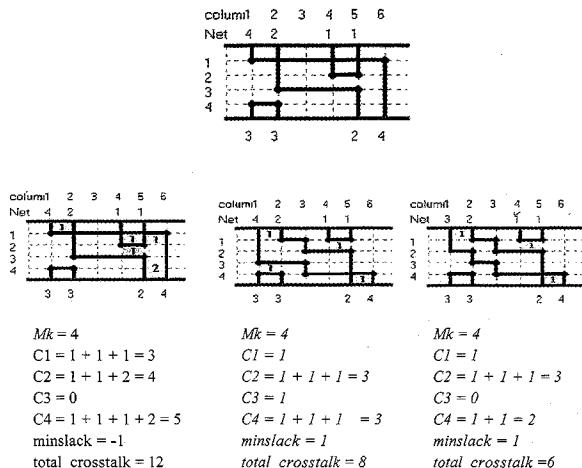
圖 2 垂直限制關係圖

對於圖 1 之繞線解，我們可以建構出如圖 2 之垂直限制關係圖 (VCG)。圖中之相連節點表示在繞線圖中有垂直限制關係，當兩條水平連線區段在重新排列對調其所在之軌道後，垂直連線的部份可能會重疊，而垂直連線的重疊表示繞線結果中的訊號錯亂，將使電路無法正常運作。同樣地，不同訊號的水平連線區段亦不允許重疊現象的發生。例如於圖 1，若針對軌道 3 上屬於連線組 1 的水平線段與軌道 4 上屬於連線組 3 的水平線段進行重新排列，由垂直限制圖中知道垂直方向會造成重疊；如果針對軌道 1 上屬於連線組 9 的水平線段與軌道 2 上屬於連線組 7 的水平線段進行重新排列，在水平方向會造成連線組 7 與連線組 4 之重疊。

針對圖 3 中之原始繞線解，將 Gao 和 Liu 的重新排列軌道(track permutation)的方法[6]與 Jhang, Ha 和 Jhon 的將水平連線區段重新安排的方法[9]分別應用到這個例子時會得到相同的繞線解，此例中每一條水平連線區段分別佔據一個軌道(track)，因此對軌道進行重新排列所得到的結果會與針對水平連線區段重新排列之結果相同，無法改善串音值，如圖 3(a) 所示， $\text{minslack} = -1$ ， $\text{total_crosstalk} = 12$ 。在[8]所提出的方法中，對每一個水平連線區段而言，只能有一個連線組分段，因此得到如圖 3(b) 的繞線結果。在本論文提出的方法中，在處理連線組分段時先針對兩側水平線段的排列進行分析，且能將一連線組分解成多個較短的連線組，而得到如圖 3(c) 之繞線結果，此結果可有效地降低總串音值並同時滿足 minslack 。

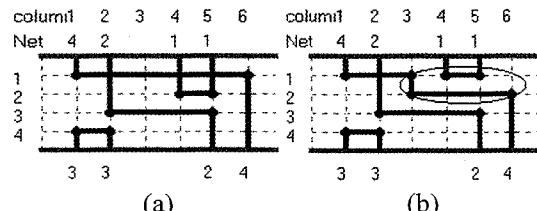
接著以圖 4 及圖 5 為例探討連線組分段與重新排列軌道兩種技巧在合併使用時必須考量的問題以及本論文所採用的解決方法。我們在圖 4 這個例子裡，可以知道我們在作連線組分段時，所選取的水平連線區段的分段，要移動到另一軌道時，若另一軌道無其他水平連線區段，則直接移動連線組分段；

原始繞線解



(a) (b) (c)

圖 3 與過去方法之比較



(a) (b)

圖 4 連線組分段時之考量(一)
—水平連線區段之交換

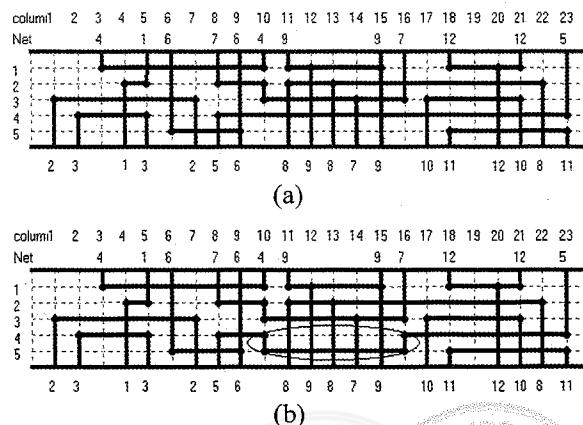


圖 5 連線組分段時之考量(二)
—多個連線組分段

若另一軌道有一較短的水平連線區段，則是將連線組的分段與另一軌道的水平連線區段作交換。

而圖 5(a)中我們選擇針對軌道 4 上的連線組 5 作連線組分段，若選取在行 10 處進行分段，此時若引進兩個連線組分段，可發現我們能在軌道 5 上的行 10 到行 16 間產生一新的連線線段，而可得到如圖 5(b)之繞線解。圖 5(b)之總串音值明顯較圖 5(a)為低，且該解為先前之研究所無法產生的繞線解。

參、演算法

模擬退火法是一個針對組合最佳化問題所發展且被廣泛使用的演算法。本論文以傳統的繞線解作為輸入，利用重新排列連線區段或連線組分段產生局部改變得到新的繞線解，如此重複(iterative)局部移動的迭代改善工作，並以模擬退火法求得滿足目標函式的繞線解。在模擬退火的過程中由於可暫時接受某些較差解並藉由隨機參數之影響，以降低求解過程終止在局部最佳解的或然率。一般在應用模擬退火法時必須考量下列要素：(1)適當的描述解集，(2)定義鄰近解，(3)選擇適當的計價函數，(4)訂定退火步驟。

對於兩組繞線解而言，若其中一組解可利用重新排列區段或連線組分段之處理而得到另一組解，則我們稱這兩組繞線解互為鄰近解。

本論文以傳統通道繞線演算法所產生的繞線解為輸入，而計價函數之定義為：

$$\text{minimun} : \alpha * \text{total_crosstalk} - \beta * \text{minslack}$$

計價函數中之係數 α 及 β 可依實驗的目標需求進行調整。

在退火步驟中，針對溫度 T ，本論文採用固定比率 r 來逐漸降溫，其式子如下：

$$T_i = T_{i-1} * r, \text{其中 } i=1,2,3,\dots$$

在每個溫度下，對初始繞線解進行重新排列區段或連線組分段處理，以局部移動的方式探查鄰近解，我們將嘗試足夠多的移動直到向下移動(Downhill move)次數為 C_1N 或是總移動次數為 C_2N 才終止該溫度下之移動。

整個退火過程將持續直到溫度降至 T_e ，或在某溫度下被接受之移動數與總移動數之比小於 a ，或是總下降移動次數與總移動數之比大於 d 。

本論文的模擬退火演算法 XTALK(X) 敘述如下：

Algorithm XTALK(X)

Input: the initial solution X .

Output: a new channel routing solution optimized with respect to the object function.

Object function:

$$f(X) = \alpha * \text{total_crosstalk}(X) - \beta * \text{minslack}(X)$$

begin

initialize the initial temperature T ;

initialize the terminating temperature T_e ;

initialize the probability weight p for choosing move type;

initialize the boundary of accept ratio a ;

initialize the boundary of downhill ratio d ;

initialize the boundary of downhill move C_1N ;

initialize the boundary of total move C_2N ;

while((downhill move ratio < d) **and** (accept ratio > a)

and (T > terminating temperature T_e)) **do**

begin

while((downhill move < C_1N) **and** (total move < C_2N)) **do**

begin

if (random(0,1) < p)

then $X' = \text{dogleg}(X)$

else $X' = \text{segment_permutation}(X)$;

$\Delta = f(X') - f(X)$;

if ($\Delta < 0$) **then**

begin

$X = X'$;

update count of downhill;

end

else if (random(0,1) < $e^{-\Delta/T}$) **then**

begin

$X = X'$;

update count of uphill;

end

end

$T = T * r$;

end

output X ;

end

在每一溫度下，我們以隨機的方式來決定新鄰近解 X' 的產生方式，我們可藉參數 p 之設定，來決定對初始解進行移動處理時採用重新排列連線組區段與採用連線組分段的比率。

其中 $\text{dogleg}(X)$ 及 $\text{segment_permutation}(X)$ 分述如下：

Algorithm $\text{dogleg}(X)$

Input: an initial solution X .

Output: a new channel routing solution using dogleg .

begin

select one horizontal segment S ;

find the coordinate of S 's left terminals (track number i , column number a);

find the coordinate of S 's right terminals (track number i , column number b);

check the channel density from column number a to column number b ;

find the lowest channel density column which was numbered as c and column c is between column a and column b ;

select one point P located on (track number i , column number c);

split S at the point P and get two new segments S_1 and S_2 ;

try to rearrange the track number for S_1 and S_2 ;

output the result as X

end

Algorithm $\text{segment_permutation}(X)$

Input: the initial solution X

Output: a new channel routing solution using $\text{segment_permutation}$

begin

select one horizontal segment S randomly;

find the coordinate of S 's left terminals (track number i , column number a);

find the coordinate of S 's right terminals (track number i , column number b);

randomly select a horizontal segment H on other track and H is located on [column number a , column number b];

check the vertical constraint for swapping S and H ;

if S and H can be swapped successfully then output the result as X

end

肆、實驗結果

本論文已經利用 C 語言將演算法實現，以 IBM 相容之個人電腦作為測試平台，並針對數個測試電路

進行實驗，這些電路之規格如表 1 所載。其中 ex1 是本論文中之圖 4(a)，ex2 則是從[9]中所得，而 random 則為[4]中的 random 測試電路，YK3C 取自於[8]，而 Deutsch 則是取自於知名的 Deutsch 困難問題[2]。

由於我們提出的方法針對初始電路中的任一水平連線區段而言，因為連線組分段之處理是依據位於該連線區段相鄰軌道上的連線區段分佈狀況而決定，且較長的水平連線區段在連線組分段處理後可能被數個較短的水平連線區段取代，同時也能讓重新排列連線區段處理的機會增加，因此能夠對串音最小化之處理有明顯的效果。

在本論文的實驗中，所有測試電路中每個連線組皆被預設成具有相同的最大可容忍串音值。且將本論文提出之方法得到的繞線結果分別與重新排列軌道演算法[6]、重新分配水平連線區段之演算法[9]及允許連線組分段處理並採用整數線性規劃演算法[8]之結果進行比較並將其列於表 2。實驗結果得知在 total-crosstalk 和 min-slack 皆較先前提出之方法[6][8][9]有明顯的改進，且在執行時間上較[8]改善許多。圖 6 為電路 YK3C 之初始解及本方法所得之新繞線解。

表 1 測試電路規格

Circuit name	Initial routing solution			
	No. of tracks	No. of columns	No. of nets	No. of segments
Ex.1 [8]	4	6	4	4
Ex.2 [9]	5	23	12	12
Random [6]	5	20	10	12
YK3C[28]	18	79	54	54

伍、結 論

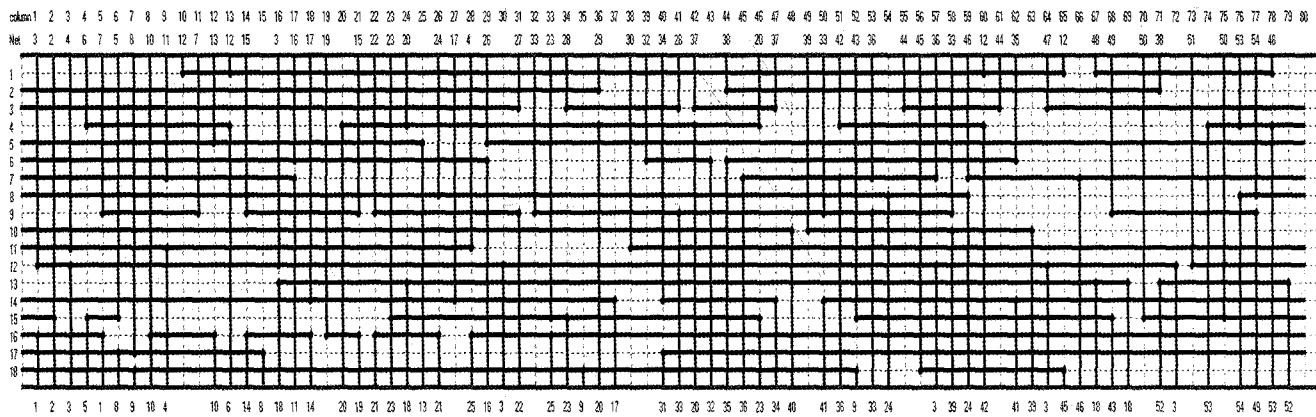
我們利用傳統繞線演算法所得的初始解作為本實驗的輸入，在不改變繞線通道的高度前提之下，進行串音最小化的處理使得結果仍能維持原有的通道密度。

由於重新排列軌道與重新排列連線區段均可改良通道內之串音值，但是當通道內水平連線區段很長且存在著許多垂直和水平的限制關係時，將使可重新排列的水平連線區段被交換排列的機率變得很低，而無法得到較佳的解。因此我們除了採用重新配置水平連線區段的技巧外，進一步結合連線組分段來處理通道繞線串音最小化的問題，尤其本論文之方法允許將一個原始水平連線區段以連線組分段技巧分解成多個較小水平連線區段，以增加連線區段被重新排列的機率。實驗結果與重新排列軌道演算法及重新排列連線區段演算法比較，本論文之方法能同時改善 total-crosstalk 和 min-slack，且不需先將通道分割成較小通路。

表2 實驗結果

Cir. Name	Initial solution		Track permutation[6]				Segment reassignment[9]				Segment reassignment+dogleg[8]				Our algorithm					
	min-sl ack	total-c ross	min-sl ack	total-c ross	Improvement		min-sl ack	total-c ross	Improvement		min-sl ack	total-c ross	Run time (min.)	Improvement		min-sla ck	total-c ross	Run time (min.)	Improvement	
					min-sla ck	total-c ross			min-sl ack	total-c ross				min-sl ack	total-c ross				min-sl ack	total-c ross
Ex. 1	-5	18	-2	12	3	6	-2	12	3	6	0	8	0.5	2	10	0	6	0.05	5	12
Ex. 2	-16	158	-15	164	1	-6	-2	138	14	20	0	128	7.5	16	30	0	124	0.13	16	34
Ran-dom	-12	200	6	156	18	44	11	134	23	66	11	130	6.3	23	70	11	128	0.1	23	72
YK3C	-10	2902	11	2752	21	150	24	2732	34	170	53	2720	50	63	182	59	2672	7.5	69	230
Deutsch	-11	7570	5	7556	16	14	6	7474	17	96	21	7396	95	32	174	29	7260	24.16	40	310
Total	-54	10848	5	10640	59	208	37	10490	91	358	85	10382	159.3	139	466	99	10190	31.94	153	658

初始繞線解



滿足串音限制的新繞線解

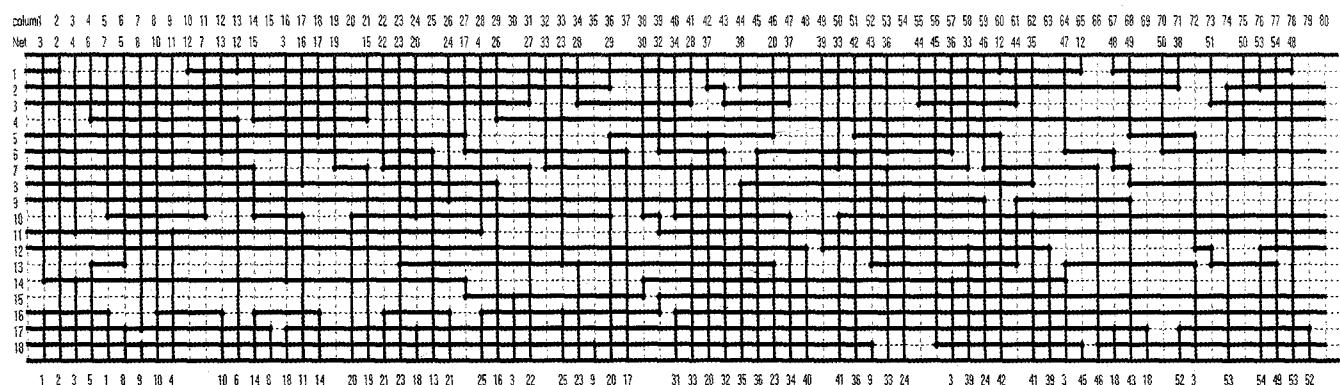
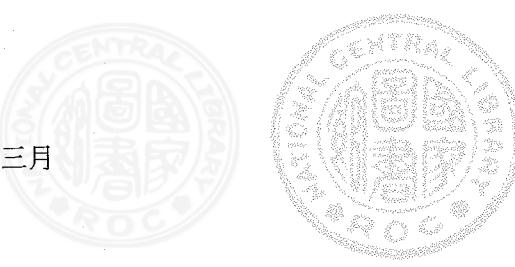


圖6 YK3C



參考文獻

1. H. B. Bakoglu, "Circuits, Interconnections and Packaging for VLSI," Addison-Wesley, 1990.
2. M. Burstein and R. Pelavin, "Hierarchical channel router," *Integreation VLSI J.*, vol. 1, pp. 21-38, 1983.
3. K. Chaudhary, A. Onozawa and E.S. Kuh, "A spacing algorithm for performance enhancement and crosstalk reduction," *Proc. IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design*, pp. 697-702, 1993.
4. H. H. Chen and C. K. Wong, "Wiring and Crosstalk Avoidance in Multi-Chip Module Design," *Proc. Custom Integrated Circuits Conference*, pp.28.6.1-28.6.4,1992.
5. W. M. Dai, R. Kong, J. Jue, and M. Sato, "Rubber band routing and dynamic data representation," *Proc. Int. Conf. Computer Aided Design*, pp. 52-55, 1990.
6. T. Gao and C. L. Liu, "Minimum Crosstalk Channel Routing," *IEEE Trans. Computer Aided Design*, vol. 15, no. 5, pp. 465-474, May 1996.
7. T. Gao and C. L. Liu, "Minimum Crosstalk Switch-box Routing," *IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design*, 1994, pp. 610-615.
8. Kuo-Chih Hsu, Yu-Chung Lin, Po-Xun Chiu and Tsai-Ming Hsieh, "Minimum Crosstalk Channel Routing with Dogleg," to appear *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2000.
9. K. S. Jhang, S. Ha and C. S. Jhon, "COP: A Crosstalk Optimizer for Gridded Channel Routing," *IEEE Trans. Computer Aided Design*, vol. 15, no. 4, pp. 424-429, April 1996.
10. D. Kirkpatrick, A. L. Sangiovanni-Vicentelli, "Techniques for Crosstalk Avoidance in the Physical Design of High-Performance Digital Systems," *International Conference on Computer Aided Design*, pp. 616-619,1994.
11. A. Onozawa, K. Chaudhary and E.S. Kuh, "Performance Driven Spacing Algorithm Using Attractive and Repulsive Constraints for Submicron LSI's," *IEEE Trans. Computer Aided Design*, Jun. 1995, vol. 14, no. 6, pp. 707-719.
12. T. Sakurai and K. Tamaru, "Simple formulas for two and three dimensional capacitance," *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 70:183-185, 1983.
13. S. Thakur, K. Y. Chao and D. F. Wong, "An Optimal Layer Assignment Algorithm for Minimizing Crosstalk for Three Layer VHV Channel Routing," *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1995, pp. 207-210.
14. T Yoshimura and E. S. Kuh, "Efficient algorithms for channel routing," *IEEE Trans. Computer Aided Design Ics System 1* (1982) 25-35.

Channel Routing Crosstalk Minimization

CHIH-HUNG LEE

*Department of Electronic Engineering
Chung Yuan Christian University
Chung-Li, 32023, Taiwan, R.O.C.*

CHIH-MIN CHUNG, WEN-YU FU
AND TSAI-MING HSIEH

*Department of Information & Computer Engineering
Chung Yuan Christian University
Chung-Li, 32023, Taiwan, R.O.C.*

ABSTRACT

In this paper, a simulated annealing based algorithm is proposed to minimize the crosstalk for gridded channel routing. In this approach, we use segment reassignment and track permutation multi-dogleg introducing techniques to optimize the crosstalk without changing the height of the given channel. Experimental result shows that our method can get better solutions, both in minimum slack and total crosstalk, than that obtained by other methods such as track permutation method[6], segment reassignment method[9] and linear programming approach[8].

Key words : crosstalk, Simulated-Annealing, segment reassignment, track permutation, multi-dogleg, linear programming。