

クロストーク遅延予防のための詳細配線制約生成手法

依田 友幸[†] 中野 幹雄[†] 南 文裕[†] 山田 正昭[‡]

[†] 東芝セミコンダクター社 〒212-8520 川崎市幸区堀川町 580-1

[‡] 東芝マイクロエレクトロニクス 〒210-8538 川崎市川崎区駅前本町 25-1

あらまし プロセスの微細化に伴い、配線間のカップリング容量に起因するクロストーク遅延が問題となってきた。本報告では、詳細配線時に配線が概略格子を交差する座標に制約を加えることにより、クロストーク遅延を削減する詳細配線手法を提案する。本提案手法では、同時にスイッチングする可能性のある配線同士が隣接しないように交差座標を制限することにより、クロストーク遅延を削減する。実験では、配線可能性を損なうことなく、クロストーク遅延が発生するネット数を約70%削減することができた。

キーワード クロストーク遅延、詳細配線、概略格子

Detail Routing Restriction for Crosstalk Delay Prevention

Tomoyuki YODA[†] Mikio NAKANO[†] Fumihiko MINAMI[†] and Masaaki YAMADA[‡]

[†] TOSHIBA Corporation Semiconductor Company 580-1 Horikawa-cho, Saiwai-ku, Kawasaki, 212-8520 Japan

[‡] TOSHIBA Microelectronics Corporation 25-1 Ekimae-Hon-Cho, Kawasaki-ku, Kawasaki, 210-8538 Japan

Abstract For deep submicron process, the crosstalk delay caused by coupling capacitance is one of the major issues. In this paper, we propose the detailed routing method for crosstalk delay prevention with crosspoint constraints to global routing grid. In this method, crosspoint constraints are generated to avoid adjacent wires such that each timing window overlaps. In the experimental results, we can reduce the number of nets with crosstalk delay by 70%.

Keyword Crosstalk Delay, Detail Routing, Global Routing Grid

1. はじめに

プロセスの微細化が進むにつれ、配線間容量に起因するクロストークが問題となってきた。クロストークの問題は、クロストークノイズとクロストーク遅延に大別され、特にクロストーク遅延の増加はタイミング設計を困難にしている[1]。このため、クロストーク遅延を小さく抑える予防手法は、設計期間の短縮のために必要不可欠である。

クロストーク遅延はレイアウト設計の各段階(配置、概略配線、詳細配線)で考慮、予防する必要があるが、中でも詳細配線段階での予防が最も効果が大きい。なぜなら、クロストークは攻撃配線と被害配線とが隣接して初めて顕在化する現象だからである。

クロストークを回避する従来手法としては、詳細配線前に概略格子の交差座標を決定する処理を加えて、タイミングやクロストーク等の考慮を、交差座標決定処理の中のみで行う手法が文献[3]に示されている。この手法は、時間のかかる詳細配線処理中にクロストークを考慮することを避け、クロストークの考慮は交差座標決定処理中でのみ行うことによって、詳細配線処

理時間の増加を防ぎつつクロストーク発生を予防している。しかし、この手法は交差座標を一意に決定するため、詳細配線プログラムに対する制約が厳しく、配線時間の増加や配線の質的低下を招く可能性がある。

以上の問題を解決するため、本報告では詳細配線プログラムに対して緩い制約を与えてクロストーク遅延を削減する交差座標制約生成手法を提案する。実験の結果、提案手法を用いて、クロストーク遅延が発生するネット数を70%程度削減することに成功した。

2. クロストーク遅延予防の方針

2.1. クロストーク遅延とタイミングウィンドウ

クロストークは、2つのネットが長距離に渡って隣接した場合に発生する問題である。その中でも、クロストーク遅延は、Victimとなるネットと Aggressorとなるネットの信号が同時に遷移した場合に初めて発生する現象である[2]。そのため、同時に遷移する可能性の無いネット同士が隣接してもクロストーク遅延による問題は発生しない。このことを利用して、同時に遷移する可能性があるネット同士を隣接しないように配

線することができれば、クロストーク遅延を大きく削減することが可能となる。

2つの信号が同時に遷移する可能性があるかどうかは、タイミングウィンドウの重なりの有無で判定可能である。タイミングウィンドウとは、各ネットにおける信号到着時刻の最小値と最大値の間の区間のことである(図 1)。図 1で、 T_{min} は最小遅延パスの信号到着時刻であり、 T_{max} は最大遅延パスの信号到着時刻である。この場合、区間 $[T_{min}, T_{max}]$ がタイミングウィンドウとなる。

各々のタイミングウィンドウが時間的に重ならないネットの信号同士で同時に遷移する可能性がないことは明らかである。そのため、タイミングウィンドウに重ならないネット同士は、隣接してもクロストーク遅延は発生しないことが分かる。

提案手法では、このタイミングウィンドウを利用して、同時遷移の有無を判別し、クロストーク遅延の予防に利用する。すなわち、タイミングウィンドウに重ならないネット同士を隣接させ、タイミングウィンドウに重なりのあるネットを隣接させないように配線することにより、クロストーク遅延を削減する。

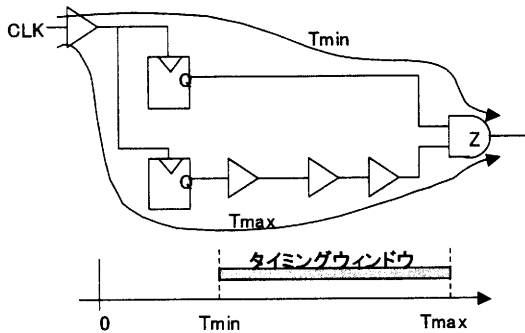


図 1 タイミングウィンドウ

2.2. スイッチボックスの交差座標制約

詳細配線プログラムは、概略格子、あるいは概略格子を複数集めた領域を最小単位として配線を行う。この単位をスイッチボックスと言う。スイッチボックスからその外に出て行く配線が、スイッチボックスの境界を通過する座標(交差座標、図 2)は、通常は詳細配線の結果として詳細配線プログラムが決定する。

これに対して、文献[3]の手法は、詳細配線前に、タイミング、クロストークを考慮して交差座標を決定し、詳細配線プログラムは、決定された交差座標を守るように配線を行う。本手法では、詳細配線プログラム自体はクロストークを考慮しないため、交差座標が隣接していない配線同士でも、スイッチボックス内では隣

接する可能性がある。しかし、詳細配線プログラムは、十分な配線リソースがある場合には、スイッチボックス内を、配線が可能な限り直線になるよう配線するため、スイッチボックス内の配線は交差座標を反映した配線となる可能性が高い。

このように、文献[3]の手法を用いると、詳細配線プログラム自身ではクロストークを考慮しなくても、クロストークを予防する配線が可能となる。しかし、このように交差座標を一意に決定してしまった場合には、詳細配線プログラムに対する制約が厳しくなり、Violation配線の増加する可能性がある。また、十分な配線リソースがある、という前提が崩れ、スイッチボックス内の配線に対して交差座標制約があまり反映されず、十分なクロストーク予防効果が得られなくなる可能性もある。

こうしたことから、提案手法では、隣接ネットのタイミングウィンドウが重ならないために必要な、最小限の交差座標制約を与え、詳細配線の自由度をあまり低下させないようにする方式をとることとする。

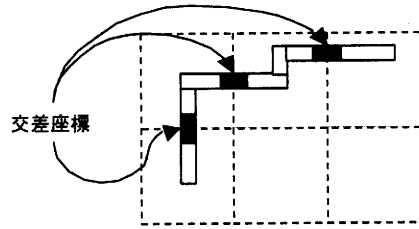


図 2 交差座標

3. 提案手法

3.1. 交差座標制約の与え方

詳細配線の自由度を確保するために、提案手法では、スイッチボックスを交差する各ネットに、交差座標通過の可否を交差座標毎に与える。図 3に交差座標制約の例を示す。図 3は、A,B,C の3ネットの交差座標制約の例である。○はネットがその交差座標での通過を許可することを示し、×はネットがその交差座標での通過を禁止することを示す。

各ネットが通過可能な交差座標の候補として複数の候補を持つことにより、詳細配線プログラムへの制約が緩くなり、制約によって配線に失敗する可能性を最小限にすることができる。

3.2. 奇数/偶数トラックへの分割

提案手法では、スイッチボックス境界を交差するネットを二つのグループに分割し、それぞれを奇数トラック、偶数トラックへと割り当てる。こうすることにより、奇数トラックに割り当てられたネット同士、偶

数トラックに割り当てられたネット同士は、お互いに隣接することが無くなる。図 3 の例では、ネット A,C が奇数トラック、ネット B が偶数トラックに割り当てられているため、ネット A,C は隣接して配線されることがない。

このように、隣接した場合にクロストーク遅延が発生する可能性のあるネット同士を同じグループに集めることにより、クロストーク遅延の予防が可能となる。これはすなわち、タイミングウィンドウが重なるネット同士を同じグループにして、タイミングウィンドウが重ならないネット同士は別々のグループに入れることである。

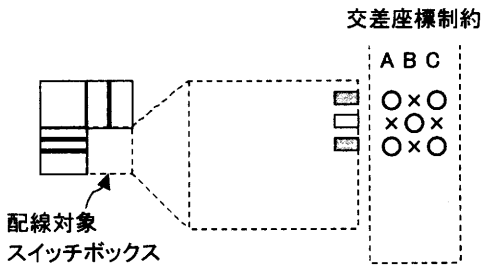


図 3 提案手法の交差座標制約

この2つのグループに分割する処理は、グラフのパーティショニング問題として定式化できる。グラフは、各ネットを点とし、ネット同士のタイミングウィンドウが重なる場合には対応する点間に枝を張る。

図 4 にグラフの例を示す。図 4 において、A、B、C、D、E、F はスイッチボックスの境界を通過するネットであり、図 4(a) にはそれぞれのネットのタイミングウィンドウが示されている。図 4(b) は、図 4 のタイミングウィンドウをグラフ化したものである。図 4 において、例えば A と B のタイミングウィンドウが重なるので、点 A と B の間には枝を張り、タイミングウィンドウが重ならない点 A と点 D の間には枝を張らない。なお、スイッチボックス境界を通過するネット数が通過可能トラック数よりも少ない場合には、空きトラック数分の点をさらに追加し、これらの点には枝は接続しない。

こうして作成したグラフ上で、枝数最小化のパーティショニング問題を解き、分割されたグループのそれぞれに対応するネットを奇数トラックと偶数トラックに割り当てる。今回の実験では、分割アルゴリズムには FM 法[4]を使用した。

図 4(b) のグラフに対するグラフ分割結果とその結果に対する端子割り当てを図 5 に示す。端子割り当て後、詳細配線プログラムは図 5 の制約を守るように詳細配線を行う。

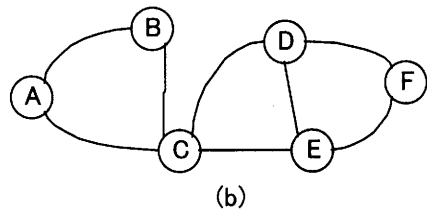
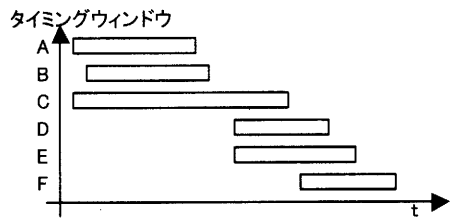


図 4 タイミングウィンドウグラフ

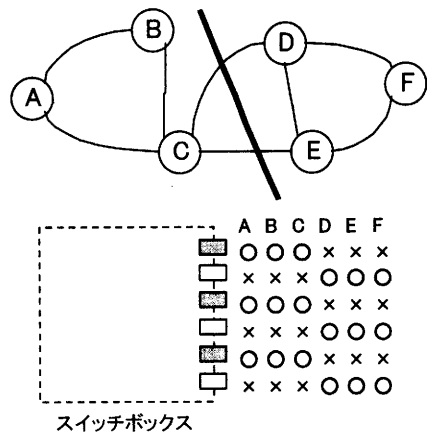


図 5 グラフ分割と端子割り当て結果

以上の交差座標制約生成処理を含んだ詳細配線のフローを図 6 に示す。本フローは交差座標制約生成処理以外は従来の詳細配線処理と変わらないため、短期間で配線システムを作成することができる。本手法は、タイミングウィンドウを利用して、配線間に余分な配線間スペースを必要としないため、特に配線密度が高い部分におけるクロストーク遅延予防効果が期待できる。

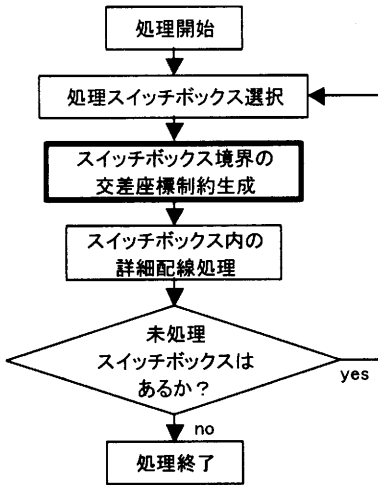


図 6 提案システムのフロー

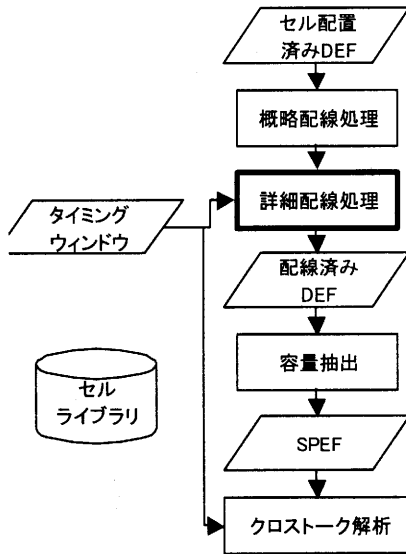


図 7 実験・評価システム

4. 実験結果

4.1. 全体フロー及び評価項目

提案手法の有効性を実証するため、提案手法による配線を行う配線システムを実装し、その配線結果の質を評価するための評価システムを構築した。構築したシステムを図 7 に示す。提案手法により詳細配線処理を行った後、市販ツールにより配線結果の容量抽出及びクロストーク解析を行い、配線結果の質を評価した。評価は 0.18[um] プロセスで設計された 3 つの回路を用いた。評価用回路の概要を表 1 に示す。なお、表 1 において、ゲート数には RAM/ROM は含まれない。

交差座標制約生成部以外は既存の内製レイアウトシステムを使用し、交差座標制約の有り/無しで配線結果を比較した。以下、交差座標制約無しの場合を従来手法、交差座標制約有りの場合を提案手法と記す。実験では、以下の項目を比較した。

- 概略格子を交差する隣接配線の数
- 隣接配線間容量
- クロストーク遅延

以下、各項目の結果について述べる。

	ゲート数	面積
回路 A	20K	1.0x0.7[mm ²]
回路 B	200K	4.0x3.0[mm ²]
回路 C	400K	8.0x8.0[mm ²]

表 1 評価用回路の概要

4.2. 詳細配線実行時間

提案手法による実行時間増加の割合を評価するため、詳細配線にかかった CPU 時間を比較した結果を表 2 に示す。なお、CPU 時間には、配線 Violation を無くするための引き剥がし再配線の時間を含む。実行時間は交差座標制約無しの場合と比較して 1.7 倍～2.6 倍程度であり、十分に許容できるものである。

	従来手法	提案手法
回路 A	239.3[sec]	416.9[sec]
回路 B	1927.3[sec]	4996.4[sec]
回路 C	6196.8[sec]	10539.0[sec]

表 2 詳細配線実行時間

4.3. 概略格子境界での隣接配線の数

提案手法により、クロストーク遅延の原因となるタイミングウインドウに重なりのある隣接配線がどの程度削減されたかを評価するため、概略格子境界を横切る配線が隣接する数を評価した。

評価方法を図 8 を例に説明する。図 8 に示された概略格子の右辺を交差するネットは、A、B、C、D、の 4 ネットである。そのうち、ネット A と B、ネット B と

Cは隣接しているため、それぞれ1とカウントする。ネットCとDは1トラック空いているため、隣接配線とはカウントしない。以上の方法で各概略格子境界の隣接配線をカウントして、その合計を評価した。

隣接配線は、以下に分類して集計した。

- タイミングウィンドウ重なり無し
隣接している配線間にタイミングウィンドウの重なりがないため、クロストーク遅延が発生しない隣接配線。
- タイミングウィンドウ重なり有り
隣接している配線間のタイミングウィンドウの重なりがあるため、クロストーク遅延が発生する隣接配線。

「タイミングウィンドウ重なり有り」の隣接配線を減らすことが、すなわちクロストーク遅延を減らすことになる。

「タイミングウィンドウ重なり有り」の隣接配線の数を評価した結果を表3に示す。クロストーク遅延の原因となる隣接配線を54%~89%程度削減できており、提案手法の有効性が実証できた。

また、全隣接配線に対するタイミングウィンドウ重なりのある隣接配線の割合を評価した結果を表4に示す。提案手法は、従来手法に対して隣接配線のタイミングウィンドウが重なる可能性が低いことが分かる。この結果は、配線密度が高く、配線間スペーシングを広げて確保できないような場合にも、提案手法によりクロストーク遅延の削減が可能であることを示している。

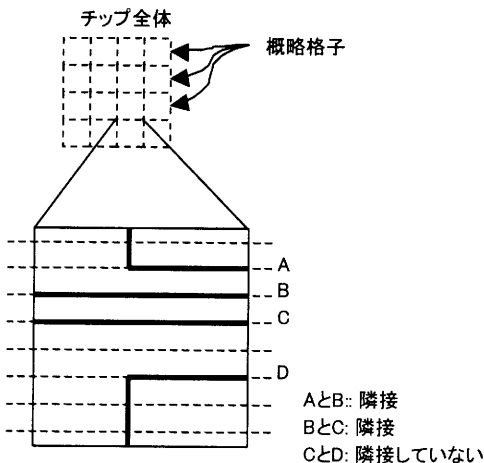


図8 概略格子を交差する隣接配線

	従来手法	提案手法	改善率
回路A	20860	2228	89.3%
回路B	1062864	481498	54.7%
回路C	1224160	220984	81.9%

表3 タイミングウィンドウ重なり隣接配線

	従来手法	提案手法
回路A	64.4%	28.6%
回路B	83.4%	67.7%
回路C	91.2%	78.2%

表4 タイミングウィンドウ重なり隣接配線割合

4.4. クロストーク遅延

提案手法により、実際にどの程度クロストーク遅延が削減されたのかを調べるため、クロストーク解析ツールを使用して、配線結果のクロストーク遅延を評価し、クロストーク遅延が発生したネット数を調べた。0.1[ns]以上のクロストーク遅延が発生したネット数を調べた結果を表5に示す。表5の結果より、クロストーク遅延の発生するネット数を60%以上削減可能であることが分かる。

また、発生したクロストーク遅延の分布を図9に示す。図9を見ると、大きなクロストーク遅延ほど改善の度合いの大きいことが分かる。

以上の結果より、提案手法がクロストーク遅延の予防に有効であることが実証できた。しかし、図9を見ると、0.3[ns]以上の大きなクロストーク遅延が一部に残っている。この大きなクロストーク遅延が残る理由としては、以下のような理由が考えられる。

- タイミングウィンドウがほぼ同じネット(バス等)が箇所集中し、タイミングウィンドウの重なりが無いように配線することが困難となっている。
- 提案手法でケアされない短いネット(配線長がスイッチボックスの1辺の長さ以下のネット)で大きなクロストーク遅延が発生している。

以上のようなネットのクロストーク遅延を改善することが今後の課題である。

	従来手法	提案手法	改善率
回路A	208	51	75.5%
回路B	23270	8780	62.3%
回路C	4789	1700	64.5%

表5 0.1[ns]以上のΔ遅延が発生したネット数

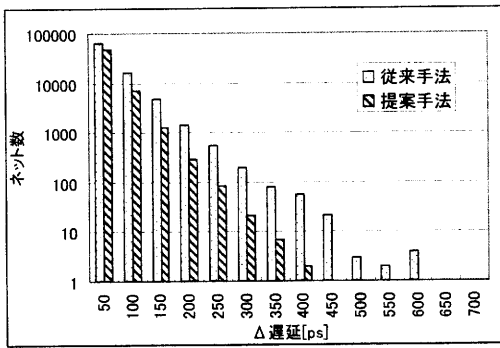


図 9 クロストーク遅延分布(回路 B)

5. まとめと今後の課題

詳細配線に対して交差座標制約を生成することにより、配線の自由度を確保しつつクロストーク遅延を予防する手法を提案した。本提案手法は、隣接配線のタイミングウィンドウが重ならないように配線制約を生成することにより、クロストーク遅延を予防している。また、一つのネットが複数の交差座標を許容されるように制約を生成することにより、詳細配線の自由度を確保している。

実験では、配線処理時間は従来手法の 1.7 倍～2.6 倍程度かかるが、クロストーク遅延が発生するネット数を 60%～75%程度削減でき、大きなクロストーク遅延削減効果が実証できた。

このように、実験では本提案手法の有効性が示されたが、一部に改善しきれないクロストーク遅延が残る問題も見つかった。今後は、この問題を解決するために、タイミングウィンドウが重なるネットが集中しないように概略経路を決定する手法の開発と、短いネットで発生するクロストーク遅延を予防する手法の開発とが必要である。

文 献

- [1] K.L.Shepard, V.Narayanan, P.C.Elmendorf and G.Zheng, "Global Harmony: Coupled Noise Analysis for Full-Chip RC Interconnect Networks", Proc. Intl. Conf. Computer-Aided Design, pp.139-146, 1997
- [2] S.Sirichotiyakul, D.Blaauw, C.Ho, R.Levy, V.Zolotov and J.Zuo, "Driver Modeling and Alignment for Worst-Case Delay Noise", Proc. Design Automation Conference, pp.720-725, 2001
- [3] H.P. Tseng, L. Scheffer, C. Sechen, "Timing and Crosstalk Driven Area Routing", Proc. Design Automation Conference, pp.378-381, 1998
- [4] C.M. Fiduccia, R.M. Mattheyses, A Linear-Time Heuristic for Improving Network Partitions, Proc. Design Automation Conference, pp.175-181, 1982