

Neuartige Entwurfsmethodik zur Berücksichtigung des IR-Drop bei der Power-Verdrahtung analoger Schaltungen

Andreas Krinke, Jens Lienig
{krinke, lienig}@ifte.de

Technische Universität Dresden, Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design

Kurzfassung

Bei der Verdrahtung der Versorgungsnetze (Power-Verdrahtung) analoger integrierter Schaltkreise ist unter anderem der maximal zulässige Spannungsabfall (IR-Drop) bis hin zu einzelnen Modulen zu berücksichtigen. Dieser ist vom Stromverbrauch der Module und vom Widerstand des Netzes abhängig. Der Beitrag beschreibt, wie Veränderungen der Stromaufnahme aufgrund von Schwankungen im Herstellungsprozess und Veränderungen der Umgebungsbedingungen geeignet bei der Power-Verdrahtung berücksichtigt werden können.

Einleitung

Die Realisierung der Versorgungsnetze, also der Verdrahtung zur Verbindung von VDD- und GND-Pads mit den entsprechenden Anschlüssen einzelner Module, muss unter der Berücksichtigung vielfältiger Randbedingungen erfolgen. In analogen integrierten Schaltungen sind hier die Beschränkung des Spannungsabfalls (IR-Drop) sowie die Berücksichtigung von Elektromigration (EM) und elektrischer Überlastung (engl. *electrical overstress*, EOS) zur Erhöhung der Zuverlässigkeit besonders hervorzuheben.

Ein IR-Drop auf den Versorgungsnetzen führt durch Absenkung des VDD- bzw. Anhebung des GND-Potentials zur Verringerung der Spannungen an einzelnen Modulen und Bauelementen. Dies reduziert den Rauschabstand der Versorgungsspannung und sämtlicher Signale, womit sich die Anfälligkeit für Rauschen erhöht. Um diesen Effekt zu reduzieren, wird für den Entwurf der Versorgungsnetze ein maximal zulässiger IR-Drop vorgegeben.

Ein weiteres Problem stellen hohe Stromdichten dar, die aufgrund von Elektromigration zu Materialtransport und langfristig zu Leitbahnunterbrechungen oder Kurzschlüssen führen können. Bei noch größeren Stromdichten ereignen sich Unterbrechungen bereits nach kurzer Zeit, da es zu einem plötzlichen Schmelzen oder Verdampfen des Metalls kommt. Sowohl Elektromigration als auch elektrische Überlastung werden im Entwurf durch Begrenzungen der zulässigen Stromdichten berücksichtigt [9].

IR-Drop und Stromdichten sind von den Stromaufnahmen der angeschlossenen Module sowie von Topologie und Widerstand der Versorgungsnetze abhängig. Die Festlegung der Topologie und die Dimensionierung der Leitbahnbreiten müssen deshalb unter Berücksichtigung dieser Stromaufnahmen erfolgen. Gegenläufige Ziele sind dabei die Minimierung der Fläche der Versorgungsnetze und die damit verbundene Verkleinerung der Leitbahnbreiten, um wertvolle Verdrahtungsressourcen einzusparen.

Während für die Bestimmung des maximalen IR-Drop zwischen dem Versorgungspad und den angeschlossenen Modulen die Ströme durch alle Netzsegmente bekannt sein müssen, erfordert die Zuverlässigkeitsprüfung in Hinblick auf Elektromigration und Überlastung üblicherweise die Kenntnis der Durchschnitts-, Effektiv- und Spitzenwerte der zeitabhängigen Segmentströme. Diese charakteristischen Größen variieren gemeinsam mit der Stromaufnahme aller Module aufgrund von (1) Schwankungen im Herstellungsprozess, z. B. durch unterschiedliche Schwellspannungen von Transistoren infolge abweichender Oxiddicken und (2) Veränderungen der Umgebungsbedingungen, wie z. B. der Temperatur, im Betrieb. Dieser Beitrag untersucht erstmals, wie diese Variationen bei der Verdrahtung der VDD- und GND-Netze, geeignet berücksichtigt werden können.

Frühere Arbeiten

Bereits in den 1980er Jahren untersuchten Chowdhury und Breuer [4–7] die flächenoptimale Power-Verdrahtung bei bekannter Baum- oder Graph-Topologie unter Berücksichtigung von IR-Drop und EM. Sie setzten die Kenntnis der Netztopologie und der maximalen Stromaufnahmen aller Module voraus und stellten fest, dass sich der maximale Strom eines Netzsegments nicht zwangsläufig aus den Maximalströmen der Module ergibt, da diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten können. Spätere Arbeiten [8, 10–12] nutzten ebenfalls maximale (worst-case) oder durchschnittliche Stromaufnahmen, um die Verdrahtungsfläche mit verschiedenen Verfahren zu minimieren. In [1] werden zu jedem Pin der Module die Ströme zu all den Zeitpunkten gespeichert, zu denen mindestens ein beliebiger Pin des Netzes seinen Minimal- oder Maximalstrom erreicht. Darauf aufbauend erfolgt eine stromgeführte Verdrahtung, ohne jedoch den maximal zulässigen IR-Drop zu berücksichtigen. Boyd et al. [3] modellierten die Stromaufnahme der Module als Zufallsvariable, deren Erwartungswert, Standardabweichung und Korrelation bekannt sind. Sie stellten ein heuristisches Verfahren vor, das eine robuste Verdrahtung in Graph-Topologie erzeugt. Neuere Arbeiten führen zwar eine stromgeführte Verdrahtung durch, berücksichtigen dabei jedoch nicht den maximalen IR-Drop. Im industriellen Umfeld wird der IR-Drop deswegen erst nach der Verdrahtung durch Simulation verifiziert.

Die genannten Beiträge nutzen verschiedene Modellierungen der relevanten Ströme zur Realisierung einer Verdrahtung mit geringer Fläche. Keine dieser Arbeiten betrachtet Variationen dieser Ströme durch Schwankungen im Herstellungsprozess und Veränderungen der Umgebungsbedingungen, wie z. B. der Temperatur.

Modellierung der Ströme

Die Power-Verdrahtung verbindet die VDD- und GND-Pins der Module mit den Spannungsversorgungspads des Schaltkreises. Ein Modul ist eine Teilschaltung, die sich in derselben Hierarchieebene wie das Versorgungsnetz befindet. Die Stromaufnahme einzelner Module ist zeitabhängig und wird von vielen Faktoren beeinflusst, z. B. Betriebszustand, Temperatur und Parameter der hergestellten Bauelemente. Diese Faktoren werden in Parametersätzen zusammengefasst. Je nach betrachtetem Effekt, sind unterschiedliche Kenngrößen des Stromverbrauchs interessant.

Die Einhaltung des maximal zulässigen IR-Drop U_{\max} erfordert die Betrachtung des Spannungsabfalls auf allen Pfaden zwischen den Versorgungs pads und den angeschlossenen Modulen (siehe Bild 1).

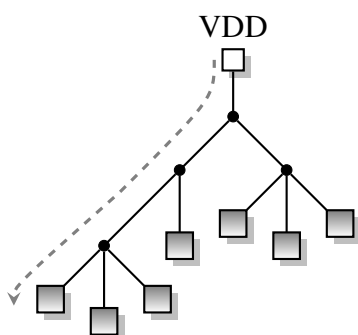


Bild 1: Beispiel für eine Netz-Topologie mit markierten Segmentgrenzen (Punkte) und einem Pfad zwischen Versorgungspad und einem Modul

Dieser Spannungsabfall ist von der Stromaufnahme aller durch einen Pfad versorgten Module abhängig. Es ist jedoch nicht sinnvoll, für diese Ströme das jeweilige Maximum der Werte aller Parametersätze zu wählen. Sie wären zu pessimistisch gewählt, da die entsprechenden Parametersätze Verhältnisse beschreiben, die in der Realität nicht gemeinsam bei einem hergestellten IC eintreten können. Beispiele sind das Auftreten der ermittelten Maximalströme zweier Module bei

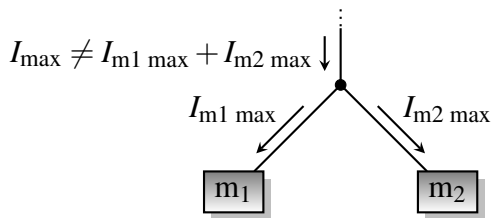


Bild 2: Der Knotensatz verliert für die Betrachtung von Maximalströmen seine Gültigkeit, wenn die maximalen Stromaufnahmen der Module bei unterschiedlichen Parametersätzen auftreten.

unterschiedlichen Betriebszuständen oder weit auseinanderliegenden Umgebungstemperaturen. Demnach ergeben sich die Maximalströme der Netzsegmente unter Umständen bei unterschiedlichen Parametersätzen (siehe Bild 2).

Die unterschiedlichen Parametersätze sind demnach unabhängig voneinander zu betrachten, um denjenigen zu finden, für den der IR-Drop sein Maximum erreicht. Für einen Pfad P aus mehreren Netzsegmenten s ergibt sich die Randbedingung zu

$$\max \left(\sum_{s \in P} I_s R_s \right) \leq U_{\max} \quad (1)$$

mit R_s und I_s als Widerstand bzw. Stromvektor eines Segments. I_s enthält für jeden Parametersatz den Maximalstrom durch das Segment. Für die direkt in einem Modul endenden Segmente lassen sich diese Ströme z. B. durch Corner-Case- oder Monte-Carlo-Simulationen bestimmen. Dabei ist es möglich, die während der Verifikation eines Moduls erhaltenen Simulationsergebnisse erneut zu verwenden. Die Ströme der anderen Segmente ergeben sich in einer Baum-Topologie durch Anwendung des Knotensatzes und in Graph-Topologien durch Lösung des kirchhoffschen Gleichungssystems.

Um die Zuverlässigkeit der Versorgungsnetze sicherstellen zu können, ist die Betrachtung von Elektromigration (EM) und elektrischer Überlastung (engl. *electrical overstress*, EOS) notwendig. Die daraus abgeleiteten maximal zulässigen Stromdichten sind von jedem einzelnen Netzsegment bei allen möglichen Parametersätzen einzuhalten. Im Gegensatz zum IR-Drop erfordern demnach nicht Pfade, sondern einzelne Segmente genauere Betrachtung. Zur Verifikation der entsprechenden Stromdichtegrenzen, sind für jedes Netzsegment *die* Parametersätze zu finden, für die der Durchschnitts-, Effektiv- und Spitzenwert des Stromes (I_{Avg} , I_{RMS} , I_{Peak}) jeweils sein Maximum erreicht [9] (siehe Bild 3).

Genau wie beim IR-Drop werden diese Werte für die einzelnen Module und alle Parametersätze als bekannt vorausgesetzt. Sie ergeben sich aus den Zeitsignalen der Ströme, die für alle Module durch Simulationen ermittelt wurden. In einer Baum-Topologie sind die Segmentströme als Funktion der Stromaufnahme aller Module wiederum mit dem Knotensatz analytisch herleitbar, während in Graph-Topologien erneut die Lösung des Systems der kirchhoffschen Gleichungen notwendig ist.

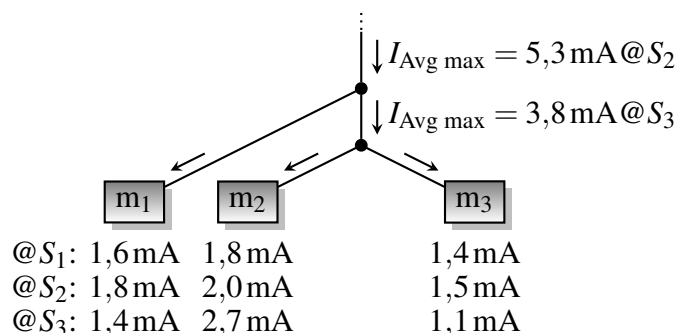


Bild 3: Ausgehend von der durchschnittlichen Stromaufnahme der drei Module bei den Parametersätzen S_1 , S_2 und S_3 ergeben sich die maximalen Ströme der Segmente bei unterschiedlichen Parametersätzen.

Anhand der analytischen Zusammenhänge lassen sich $I_s \{ \text{Avg, RMS, Peak} \} \max$ für jedes Segment s bestimmen. Sie müssen die Gleichungen

$$\frac{I_s \text{ Avg max}}{w_s \cdot d_s} \leq J_{\text{Avg max}} \quad \frac{I_s \text{ RMS max}}{w_s \cdot d_s} \leq J_{\text{RMS max}} \quad \frac{I_s \text{ Peak max}}{w_s \cdot d_s} \leq J_{\text{Peak max}} \quad (2)$$

mit den gegebenen Grenzwerten für die Stromdichte $J_{\{ \text{Avg, RMS, Peak} \} \max}$ und dem Leitbahnquerschnitt $w_s \times d_s$ erfüllen.

Methodik zur Power-Verdrahtung

Die im Folgenden beschriebene Methodik ist sowohl für VDD- als auch für GND-Netze anwendbar. Die Realisierung der Power-Verdrahtung beginnt mit der manuellen Erstellung einer ersten Version der Verdrahtung. Diese definiert die Topologie des betrachteten Netzes. Es sind dabei beliebige Leitbahnbreiten nutzbar, da diese später automatisch optimiert werden. Im Gegensatz dazu bleiben die Längen der einzelnen Segmente und die verwendeten Verdrahtungsebenen unverändert, da sie die Grundlage für die Optimierung bilden.

Nach der Fertigstellung der ersten Version schließt sich die analytische Herleitung der Ströme aller Netzsegmente als Funktionen der Versorgungsströme sämtlicher angeschlossener Module an. Wie im letzten Abschnitt beschrieben, lassen sich anschließend die maximalen Durchschnitts-, Effektiv- und Spitzenwerte der Segmentströme bestimmen.

Im nächsten Schritt erfolgt die Anpassung der Segmentbreiten mit dem Ziel, die Gesamtfläche des Versorgungsnetzes unter Einhaltung aller Randbedingungen zu minimieren. Diese Fläche ergibt sich nach Gleichung (3) aus den Längen l und den Breiten w aller Segmente des Netzes N .

$$A = \sum_{s \in N} l_s w_s \quad (3)$$

Die Segmentbreiten w_s dürfen dabei nicht kleiner als durch die Technologie vorgegebenen Minimalbreiten sein. Die Begrenzung des IR-Drop führt ausgehend von Gleichung (1) mit dem Flächenwiderstand $R_s \square$ zu den Nebenbedingungen aus Gleichung (4).

$$\max \left(\sum_{s \in P} I_s \frac{l_s}{w_s} R_s \square \right) \leq U_{\max} \quad \text{für alle Pfade } P \quad (4)$$

Zur Berücksichtigung von EM und EOS kommen die Randbedingungen aus Gleichung (2) hinzu.

Formulierung als Optimierungsproblem

Die genannten Gleichungen bilden ein Optimierungsproblem zur Bestimmung der Segmentbreiten, mit einer linearen Zielfunktion und sowohl linearen als auch nichtlinearen Nebenbedingungen:

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{s \in N} l_s w_s \quad (5)$$

$$\text{unter den Nebenbedingungen} \quad w_s \leq w_{\min}(s) \quad (6)$$

$$\sum_{s \in P} I_s \frac{l_s}{w_s} R_s \square \leq U_{\max} \quad \text{für alle } P \quad (7)$$

$$\frac{I_s \text{ Avg max}}{w_s \cdot d_s} \leq J_{\text{Avg max}} \quad (8)$$

$$\frac{I_s \text{ RMS max}}{w_s \cdot d_s} \leq J_{\text{RMS max}} \quad (9)$$

$$\frac{I_s \text{ Peak max}}{w_s \cdot d_s} \leq J_{\text{Peak max}} \quad (10)$$

Dabei ist $w_{\min}(s)$ die kleinstmögliche Breite des Segments s . Bei Gleichung (7) handelt es sich um einen elementweisen Vergleich zwischen dem resultierenden Vektor auf der linken Seite und dem maximal zulässigen IR-Drop U_{\max} .

Für alle Segmente gilt $l_s \geq 0$, $w_s \geq 0$, $d_s \geq 0$ und $R_{s \square} \geq 0$. Weiterhin wird für die Grenzwerte der Stromdichte $J_{\{\text{Avg, RMS, Peak}\} \max} \geq 0$ angenommen. Durch die Verwendung des betragsmäßigen Maximums der Stromparameter I_{Avg} , I_{RMS} und I_{Peak} in den Gleichungen (8)–(10) werden diese Funktionen der Leitbahnbreiten w_s konvex, d. h. es gilt

$$f(\alpha x + \beta y) \leq \alpha f(x) + \beta f(y) \quad (11)$$

für alle $x, y \in \mathbb{R}$ und alle $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ mit $\alpha + \beta = 1$, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$ [2].

Die verbliebene nichtlineare Nebenbedingung aus Gleichung (7) wird konvex, falls alle Elemente der Stromvektoren I_s positiv sind. Dies lässt sich durch (1) die Vorgabe einer Baum-Topologie als erste Version der Verdrahtung und (2) die Annahme, dass die von den Modulen aufgenommenen Ströme zu jedem Zeitpunkt positiv sind, erreichen. Beide Forderungen stellen besonders in integrierten analogen Schaltungen keine bedeutenden Einschränkungen dar. Sie führen dazu, dass die über den Netzsegmenten abfallenden Spannungen auf allen Pfaden vom Pad bis zu den Modulen immer positiv sind.

Das Ergebnis dieser Überlegungen ist ein konvexes Optimierungsproblem, da sämtliche nichtlinearen Nebenbedingungen konvex sind. Der Vorteil dieser Art der Formulierung ist, dass jedes lokale Optimum gleichzeitig auch ein globales Optimum ist. Weiterhin existieren sehr effiziente Lösungsmethoden, z. B. Innere-Punkte-Verfahren [2].

Zusammenfassung und Ausblick

Bisher wird im industriellen Umfeld die Einhaltung des maximal zulässigen IR-Drop erst nach der Verdrahtung durch Simulationen überprüft. Dieser Beitrag beschreibt eine neuartige Methodik für die Verdrahtung von Versorgungsnetzen in Baum-Topologie in analogen integrierten Schaltkreisen unter Beachtung des zulässigen Spannungsabfalls. Gleichzeitig werden auch Entwurfsregeln zur Berücksichtigung von Elektromigration und elektrischer Überlastung beachtet. Es wird ein Optimierungsproblem formuliert, dessen Lösung die Segmentbreiten des Netzes repräsentiert. Die Formulierung berücksichtigt dabei die von den versorgten Modulen aufgenommenen Ströme bei unterschiedlichen Parametersätzen. Dadurch findet eine Abbildung der Schwankungen beim Herstellungsprozess und unterschiedlicher Umgebungsbedingungen statt.

Ausgehend von diesen Ergebnissen ist die experimentelle Verifikation des Verfahrens Gegenstand der weiteren Forschung.

Literatur

- [1] Adler, T., H. Brocke, L. Hedrich und E. Barke: *A Current Driven Routing and Verification Methodology for Analog Applications*. In: *Proc. 37th Design Autom. Conf.*, DAC, 2000, S. 385–389.
- [2] Boyd, S. und L. Vandenberghe: *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [3] Boyd, S., L. Vandenberghe, A. El Gamal und S. Yun: *Design of Robust Global Power and Ground Networks*. In: *Proc. Int'l Symp. on Phys. Design*, ISPD, 2001, S. 60–65.
- [4] Chowdhury, S.: *An Automated Design of Minimum-Area IC Power/Ground Nets*. In: *Proc. 24th Design Autom. Conf.*, DAC, 1987, S. 223–229.
- [5] Chowdhury, S. und M. A. Breuer: *The construction of minimal area power and ground nets for VLSI circuits*. In: *Proc. 22nd Design Autom. Conf.*, DAC, 1985, S. 794–797.
- [6] Chowdhury, S. und M. A. Breuer: *Minimal Area Design of Power/Ground Nets Having Graph Topologies*. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 34(12):1441–1451, Dez. 1987.
- [7] Chowdhury, S. und M. A. Breuer: *Optimum Design of IC Power/Ground Nets Subject to Reliability Constraints*. *IEEE Trans. on CAD*, 7(7):787–796, Juli 1988.
- [8] Dutta, R. und M. Marek-Sadowska: *Automatic Sizing of Power/Ground (P/G) Networks in VLSI*. In: *Proc. 26th Design Autom. Conf.*, DAC, 1989, S. 783–786.
- [9] Jerke, G. und J. Lienig: *Early-Stage Determination of Current-Density Criticality in Interconnects*. In: *Proc. 11th Int'l Symp. on Quality Electronic Design*, ISQED, 2010, S. 667–674.
- [10] Kolla, R.: *A Dynamic Programming Approach to the Power Supply Net Sizing Problem*. In: *Proc. European Design Autom. Conf.*, EDAC, 1990, S. 600–604.
- [11] Tan, S.X.D., C.J.R. Shi und J.C. Lee: *Reliability-Constrained Area Optimization of VLSI Power/Ground Networks Via Sequence of Linear Programmings*. *IEEE Trans. on CAD*, 22(12):1678–1684, Dez. 2003.
- [12] Wu, X., X. Hong, Y. Cai, C. K. Cheng, J. Gu und W. Dai: *Area Minimization of Power Distribution Network Using Efficient Nonlinear Programming Techniques*. In: *Proc. Int'l Conf. on CAD, ICCAD*, 2001, S. 153–157.