

تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت در روش‌های اجتناب از نویز همسنوایی در مدارات VLSI

مهدی سعیدی^۱، مرتضی صاحب‌الزمانی^۲، سعادت پور‌مظفری^۳

چکیده

با ورود به دوره طراحی نانومتری، اجزای مختلف مدار و نیز سیم‌های اتصال دهنده آنها در فواصل بسیار نزدیکی از یکدیگر جایابی می‌شوند و احتمال بروز نویز همسنوایی در سیم‌های مجاور بیشتر و بیشتر شده است. از این‌رو، یک نیاز صریح در استفاده از روش‌های اجتناب از نویز همسنوایی در روند طراحی مدارات VLSI وجود دارد. در دیگر سو کوچک شدن سریع تکنولوژی ساخت، تغییرپذیری زیادی در پارامترهای طراحی و ساخت ایجاد کرده است که این تغییرپذیری می‌تواند به عدم توانایی پیش‌بینی پارامترهای مداری پیش از ساخت آن منجر شود. در این مقاله با استفاده از یک روش آماری، تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش‌های اجتناب از نویز همسنوایی مدل شده است. با استفاده از روش ارائه شده، چندین فرم بسته که نشان دهنده چگونگی این تأثیر است، ارائه و ارزیابی شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از این مدل‌سازی و نتایج حاصل از تحلیل مونت کارلو نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای مدل کردن این تغییرات بسیار کارآمد عمل می‌کند.

کلمات کلیدی

تغییرپذیری فرآیند ساخت، نویز همسنوایی، روش‌های اجتناب از نویز همسنوایی، تحلیل آماری.

The Effects of Process Variation on Noise Avoidance Techniques in VLSI Circuits

Mehdi Saeedi, Morteza Saheb Zamani, Saadat Pourmozafari
Computer Engineering Department, Amirkabir University of Technology

Abstract

As VLSI fabrication enters the deep submicron era, devices and interconnection wires are being placed at an ever increasing proximity and the probability of crosstalk noise in adjacent wires has been increased. Therefore, there is a clear need to use various noise avoidance techniques in the VLSI design flow. On the other hand, the rapid scaling of VLSI technology has introduced drastic variations of process parameters which may lead to severe unpredictability of different chip parameters in the nanometer regime. In this paper, by using a statistical method, the effects of process variation on noise avoidance techniques have been modeled. Based on this method, several closed-form expressions showing these effects have been proposed and evaluated. The comparisons of the proposed expressions with the results of Monte Carlo analysis show that our method for modeling these effects works very efficiently.

Keywords

Process variation, crosstalk, noise avoidance techniques, and statistical analysis.

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پست الکترونیک: saeedi@ce.aut.ac.ir

^۲ دکترا، عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پست الکترونیک: szamani@ce.aut.ac.ir

^۳ دکترا، عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پست الکترونیک: saadat@ce.aut.ac.ir

زمان بروز نویز [17] و نیز تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی مدل نویز [18] اشاره نمود.

در این مقاله به بررسی تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش‌های اجتناب از نویز همشنوایی پرداخته شده است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، این اولین کار در زمینه مدلسازی تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش‌های اجتناب از نویز می‌باشد. ادامه این مقاله به این صورت سازماندهی شده است: در بخش ۲ به بیان مقدمات موردنیاز پرداخته می‌شود. مدل نویز همشنوایی و روش‌های اجتناب از نویز به ترتیب در بخش ۳ و ۴ بررسی خواهد شد. در بخش ۵ به بررسی تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روشن‌های اجتناب از نویز همشنوایی خواهیم پرداخت و سپس در بخش ۶ نتایج آزمایشات بررسی خواهد شد و سرانجام این کار با بررسی کارهای آتی و نتیجه‌گیری در بخش ۷ به پایان خواهد رسید.

۲- مقدمات

نویز همشنوایی به فعل و افعال بین سیگنال‌ها روی دو نت متفاوت گفته می‌شود. در این صورت نتی که نویز تولید می‌کند نت مهاجم^{۱۱} و نتی که تحت تأثیر نویز قرار می‌گیرد نت قربانی^{۱۲} خوانده می‌شود. در اغلب موارد و بسته به نوع همسایگی، یک نت می‌تواند به عنوان نت مهاجم و یا قربانی عمل کند. بطور کلی در یک شبکه اتصالات هر نتی می‌تواند از طرف نتهای دیگر مورد هجوم قرار گیرد ولی معمولاً نتهای مجاور قابلیت تزریق نویز بیشتری را داشته و فرض می‌شود با افزایش فاصله مقدار نویز به شدت افت کند. بر این اساس، یکی از پارامترهای مؤثر در بروز نویز همشنوایی، نزدیکی بیش از حد نتها بوده و برای کاهش آن در مدارات VLSI باید به این نکته توجه شود.

اگرچه دلایل تغییرپذیری در فرآیند ساخت بسیار زیاد و تا حدودی ناشناخته است و از این‌رو توافقی در مدلسازی این تغییرات به صورت متغیرهای تصادفی وجود ندارد ولی تحقیقات وسیعی در سال‌های اخیر به مدلسازی این تغییرات به صورت متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال^{۱۳} پرداخته‌اند [18]-[13] که در این مقاله نیز از این روش استفاده خواهد شد.

۳- مدل نویز همشنوایی

در روش‌های تحلیل نویز همشنوایی، به طور معمول ارتباط بین دو نت مهاجم و قربانی با استفاده از یک شبکه RC نظیر شکل ۱ نشان داده می‌شود [19]. همانطوریکه در این شکل نیز مشخص است نواحی همپوشان بین دو نت مجاور باعث ایجاد خازن کوپلاز شده است که اگر مقدار خازن تشکیل شده به اندازه کافی بزرگ باشد بین دو نت و طول همشنوایی ایجاد خواهد شد که بزرگی آن، به فاصله بین دو نت و طول قسمت زوج‌شده‌گی (پارامترهای z_{12} و z_{21} در شکل ۱) وابسته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای دیگری نیز در مقدار نویز تأثیرگذار می‌باشند [20]. [11] مجموعه پارامترهای مؤثر در نویز

۱- معرفی

کاهش روز افزون اندازه کوچکترین ترانزیستور در مدارات VLSI به همراه پیچیده‌تر شدن فرآیند ساخت در دوره طراحی بسیار زیر میکرون^۱ باعث شده است که هر تغییر از مقدار در نظر گرفته شده در زمان طراحی که در پارامترهای مداری و پس از ساخت تراشه ممکن است رخ دهد به عنوان یکی از مهمترین مسائل در طراحی‌های نانومتری مطرح شود [1]. [2] به نحوی که عدم توجه به این مسئله در زمان طراحی می‌تواند به کاهش شدید باراوری^۲ پس از ساخت تراشه منجر گردد [3]. [4] بر این اساس، از این تغییرات که عمدهاً به دو دلیل تغییرپذیری در فرآیند ساخت^۳ و تغییرپذیری در متغیرهای محیطی صورت می‌گیرند، به عنوان یکی از مهمترین چالش‌ها در طراحی پردازنده‌های فوق العاده سریع یاد می‌شود [5] که در مورد دسته اول می‌توان به تغییر در اندازه طول کانال ترانزیستور ساخته شده و یا نوسان در دوپینگ^۴ ناچالصی در طول پروسه ساخت [6] اشاره نمود و در خصوص دسته دوم نیز می‌توان به تغییر در اندازه منبع تغذیه و یا دما اشاره کرد.

از سوی دیگر، با ورود چرخه ساخت تراشه‌های مدار مجتمع به دوره طراحی بسیار زیر میکرون، تأثیر اثرات الکتریکی نظری نویز همشنوایی^۵ و مهاجرت الکترون^۶ در کارایی سیستم‌های الکترونیکی بسیار زیاد شده است. در این میان، نویز همشنوایی که توسط خازن‌های کوپلاز^۷ بین نتهای^۸ مجاور ایجاد می‌شود به عنوان یکی از مهمترین مسائل در طراحی‌های ۰/۱۸ میکرون و پایین‌تر از آن بشمار رفته و می‌تواند باعث تغییر در تأخیر سیگنال‌ها شود [7]. بعلاوه نویز همشنوایی ممکن است باعث تغییر در مقدار منطقی یک سیگنال شده و به سوء عملکرد مدار منجر گردد [8]. از این رو است که در سال‌های اخیر نویز همشنوایی به عنوان یکی از مهمترین معیارهای طراحی مطرح شده [9]. [10] و تحقیقات گسترده‌ای برای مدلسازی نویز همشنوایی و نیز برای ایجاد روش‌های اجتناب از نویز در طول دوره طراحی مطرح شده است [11]. [12].

به دلیل تأثیر بسیار زیاد تغییرپذیری فرآیند ساخت در کارایی تراشه‌های مدار مجتمع، در سال‌های اخیر فعالیتهایی در جهت مدل کردن این پارامتر در الگوریتم‌های تحلیل زمانی ایستا^۹ (STA) که برای ارزیابی رعایت محدودیت‌های زمانی در طول دوره طراحی بکار می‌روند انجام شده است [16]-[13]. حاصل این تلاش‌ها، الگوریتم‌های STA به صورت آماری^{۱۰} (SSTA) می‌باشد. به دلیل تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی نویز همشنوایی و نیز تأثیر نویز همشنوایی در کارایی و قابلیت اطمینان تراشه‌های مدار مجتمع، اخیراً کارهایی در جهت بررسی تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی نویز همشنوایی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به در نظر گرفتن تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی زمان سوئیچ کردن سیگنال‌ها در

۵ بیان می‌شوند که به ترتیب روابط ۱-۳ بیانگر مقدار نویز در لحظه t رابطه ۴ بیانگر مقدار بیشینه نویز و رابطه ۵ نیز بیانگر طول مدت زمان بروز نویز می‌باشد.

$$t_x = (R_h + R_{v1})C_c \quad (1)$$

$$t_v = (R_h + R_{v1})(C_c + C_{v2} + C_{v3}) + \quad (2)$$

$$(R_{v2}C_{v3} + R_hC_{v1}) +$$

$$C_{a1}R_{th} + C_{a2}(2R_{a1} + R_{th}) +$$

$$C_{a3}(2R_{a1} + 2R_{a2} + R_{th})$$

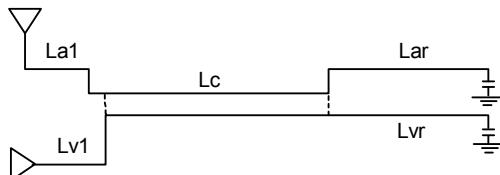
$$v_{out}(t) = \begin{cases} \frac{t_x}{t_r}(1 - e^{-\frac{t}{t_r}}) & t \leq t_r \\ \frac{t_x}{t_r}(e^{-\frac{(t-t_r)}{t_v}} - e^{-\frac{t}{t_v}}) & t > t_r \end{cases} \quad (3)$$

$$v_{peak} = \frac{t_x}{t_r}(1 - e^{-\frac{t_r}{t_v}}) \quad (4)$$

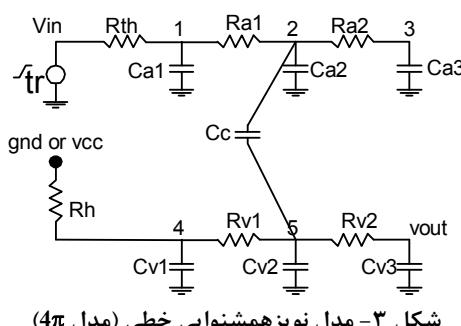
$$t_{width} = t_r + t_v \ln\left(\frac{1 - e^{-\frac{t_r}{t_v}}}{1 - e^{-\frac{t}{t_v}}}\right) \quad (5)$$

۴- روش‌های اجتناب از نویز همشنوایی

در این بخش به معرفی و تحلیل چندین روش اجتناب از نویز همشنوایی با استفاده از مدل نویز 4π پرداخته خواهد شد [11]. در بخش ۵ تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت را بر روی هر یک از این روش‌ها بررسی خواهیم کرد.



شکل ۲- یک حالت عمومی برای دو نت جفت شده در مدل 4π

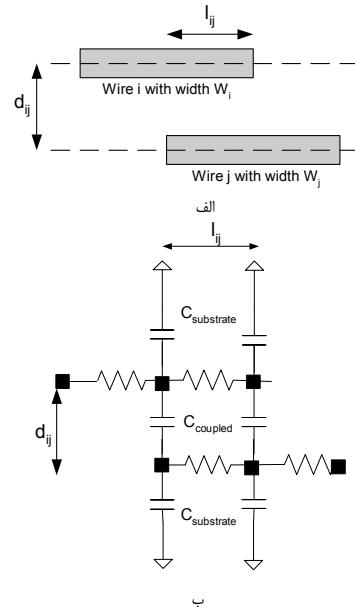


شکل ۳- مدل نویز همشنوایی خطی (مدل 4π)

۴-۱- تغییر در اندازه درایور نت‌ها

در این بخش روش‌های اجتناب از نویز همشنوایی با استفاده از تغییر در اندازه درایور نت قربانی و نت مهاجم بررسی می‌شود. به دلیل مدلسازی درایور نت قربانی و مهاجم با مقادیر R_h و R_{th} در مدل نویز استفاده شده، می‌توان با استفاده از مشتق‌گیری مقدار بیشینه نویز (رابطه ۴) نسبت به هریک از این دو پارامتر، تأثیر هر یک از آنها را

همشنوایی در مدلی تحت عنوان مدل نویز 4π تعریف می‌گردد. به طور کلی می‌توان گفت که اندازه نویز همشنوایی بین دو نت به پارامترهایی نظیر زمان تغییر وضعیت دادن نت مهاجم و نت قربانی، فاصله دو نت از یکدیگر، قدرت درایو کردن نت مهاجم، قدرت نگهداشت نت قربانی، طول زوج شدگی دو نت، زمان خیز t_r نت مهاجم و ضخامت سیم‌ها یا مقاومت آنها وابسته است. با توجه به اینکه تمامی موارد مؤثر در نویز با وزن یکسان در اندازه نویز تأثیرگذار نیستند سعی می‌شود که بسته به اهمیت و با در نظر گرفتن مصالحة بین دقت و پیچیدگی، یک مدل نویز تعريف گردد. بر این اساس در سال‌های اخیر مدل‌های نویز متفاوتی برای محاسبه نویز ارائه شده است که در این میان می‌توان به مدل نویز 2π [12] و مدل نویز 4π [11] اشاره نمود.



شکل ۱- الف- مسیریابی دو نت در کنار یکدیگر- ب- مدل شبکه [19] RC

در مقاله [11]، مدل نویز همشنوایی کاملی تحت عنوان مدل نویز 4π ارائه شده است که در مقایسه با مدل‌های نویز دیگر، نظیر آنچه در مقاله [12] استفاده شده است بصورت کامل‌تری عمل می‌نماید و بر این اساس در مقاله حاضر برای بررسی تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش‌های اجتناب از نویز از مدل نویز 4π استفاده شده است. در شکل ۲، یک حالت عمومی برای دو نت جفت شده در کنار یکدیگر در مدل نویز 4π نشان داده شده است. در این شکل، نت مهاجم و قربانی به ۳ قسمت تحت عنوانین اتصال پیش از جفت‌شدنگی، در طول جفت شدنگی و بعد از جفت شدنگی تقسیم شده‌اند. شکل ۳ مدل نویز همشنوایی 4π را بر اساس شکل ۲ نشان می‌دهد. در این شکل، مقاومت R_h برای مدل کردن درایور نت قربانی استفاده شده است و درایور نت مهاجم نیز با استفاده از یک مدل تونن t_r با یک منبع ولتاژ، مقاومت R_{th} و مشخص کردن زمان خیز به صورت t_r مشخص گردیده است. بر اساس مدل نویز 4π می‌توان مقدار بیشینه و مدت زمان رخداد نویز بر روی نت قربانی را محاسبه نمود. این مقادیر با روابط ۱ تا

$$dv_{peak}^{R_{v1}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial R_{v1}} = \frac{C_c}{t_r} (1 - e^{-t_r/t_v}) - (R_h + R_{v1}) \frac{C_c(C_c + C_{v2} + C_{v3})}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (15)$$

$$dv_{peak}^{R_{v2}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial R_{v2}} = \frac{-(R_h + R_{v1})C_c C_{v3}}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (16)$$

$$dv_{peak}^{R_{a1}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial R_{a1}} = \frac{-2(R_h + R_{v1})C_c(C_{a2} + C_{a3})}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (17)$$

$$dv_{peak}^{R_{a2}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial R_{a2}} = \frac{-2(R_h + R_{v1})C_c C_{a3}}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (18)$$

بررسی نمود که این تأثیر با روابط ۶ و ۷ نشان داده می‌شود. در این مقاله برای نشان دادن تغییر در ولتاژ بیشینه نسبت به یک پارامتر مشخص نظیر x از نماد dv_{peak}^x استفاده شده است.

$$dv_{peak}^{R_h} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial R_h} = \frac{C_c}{t_r} (1 - e^{-t_r/t_v}) - (R_h + R_{v1}) \frac{C_c(C_c + C_{v1} + C_{v2} + C_{v3})}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (6)$$

$$dv_{peak}^{R_{th}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial R_{th}} = \frac{-(R_h + R_{v1})C_c(C_{a1} + C_{a2} + C_{a3})}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (7)$$

۵- تغییرپذیری فرآیند ساخت و اجتناب از نویز

در این بخش به بررسی اثر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش‌های اجتناب از نویز که در بخش پیشین به آنها اشاره شد می‌پردازیم. بر اساس بررسی‌های انجام شده در بخش قبل، می‌توان مقدار تغییر در بیشینه ولتاژ نویز را بر اساس چندین پارامتر (نظیر C_c , R_{a1} و ...) مشخص کرد که به صورت تصادفی باتابع چگالی احتمال^{۱۷} مشخصی تغییر می‌کنند. چنانچه ذکر شد می‌توان فرض کرد که تابع چگالی احتمال برای هر پارامتر دارای توزیع نرمال می‌باشد.^{۱۸}

اگرچه تغییر همزمان چندین پارامتر در روابط ۶-۱۸ به دلیل تغییرپذیری فرآیند ساخت می‌توانند با یکدیگر همبستگی داشته باشند ولی به دلیل پیچیده شدن تحلیل آماری عموماً فرض می‌شود که تغییر در پارامترها از یکدیگر مستقل بوده و بین متغیرهای تصادفی استقلال آماری وجود دارد [۱۶] که در این مقاله نیز از این روش استفاده می‌شود. در بخش ۷ لزوم یافتن راهکاری برای برداشتن فرض استقلال آماری بررسی شده است.

در حالت کلی، مقدار تغییر در بیشینه ولتاژ نویز را می‌توان بر اساس k متغیر تصادفی n_1, n_2, \dots, n_k مشخص کرد (روابط ۶-۱۸) که بر اساس مقادیر پیش‌فرض، این تابع دارای یک مقدار مشخص بوده ولی به دلیل تغییرپذیری در فرآیند ساخت و تفاوت در مقادیر پیش‌فرض متغیرهای مؤثر، اندازه نهایی آن تا اندازه‌ای از مقدار ایده‌آل خود متفاوت است. در حالت کلی مقدار یک تابع تحلیلی را می‌توان با استفاده از یک سری تیلور^{۱۹} مطابق رابطه ۱۹ (برای توابع یک متغیره) و ۲۰ (در حالت کلی و برای توابع چند متغیره) مشخص کرد که به صورت عمومی شامل مقدار تابع و تمامی مشتقات آن در نقطه‌ای مفروض می‌باشد. با توجه به نامحدود بودن تعداد جملات سری تیلور، برای بدست آوردن یک رابطه تحلیلی می‌توان از سری تیلور با تعداد جملات محدود استفاده نمود که البته این امر باعث تزییق خطای خواهد شد ولی بسته به نوع کاربرد و تعداد جمله استفاده شده در سری، مقدار خطای وارد شده می‌تواند قابل قبول باشد.

۴-۲- افزایش فاصله بین نت‌ها

افزایش فاصله بین دو نت مجاور به عنوان یکی از مهمترین روش‌های کاهش نویز همسنوازی مطرح می‌شود. بر اساس مدل نویز ارائه شده، افزایش فاصله دو نت در پارامترهای $C_c, C_{v1}, C_{v2}, C_{v3}, C_{a1}, C_{a2}$ و C_{a3} تأثیرگذار می‌باشد که بر اساس رابطه‌های ۱۴-۸ بیان می‌شوند.

$$dv_{peak}^{C_c} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial C_c} = \frac{(R_h + R_{v1})}{t_r} (1 - e^{-t_r/t_v}) - \frac{(R_h + R_{v2})^2 C_c}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (8)$$

$$dv_{peak}^{C_{v1}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial C_{v1}} = \frac{-(R_h + R_{v1})C_c R_h}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (9)$$

$$dv_{peak}^{C_{v2}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial C_{v2}} = \frac{-(R_h + R_{v1})^2 C_c}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (10)$$

$$dv_{peak}^{C_{v3}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial C_{v3}} = \frac{-(R_h + R_{v1})C_c(R_h + R_{v1} + R_{v2})}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (11)$$

$$dv_{peak}^{C_{a1}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial C_{a1}} = \frac{-(R_h + R_{v1})C_c R_{th}}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (12)$$

$$dv_{peak}^{C_{a2}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial C_{a2}} = \frac{-(R_h + R_{v1})C_c(2R_{a1} + R_{th})}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (13)$$

$$dv_{peak}^{C_{a3}} = \frac{\partial v_{peak}}{\partial C_{a3}} = \frac{-(R_h + R_{v1})C_c(2R_{a1} + 2R_{a2} + R_{th})}{t_v^2} e^{-t_r/t_v} \quad (14)$$

۴-۳- تغییر در اندازه سیم‌ها

تغییر در اندازه سیم‌ها به صورت مستقیم بر مقاومت نت‌های قربانی و مهاجم تأثیرگذار است که در مدل نویز ارائه شده، این تغییر در پارامترهای R_{a1}, R_{a2}, R_{v1} و R_{v2} اعمال می‌شود و بر اساس روابط ۱۵-۱۸ بیان می‌شود.

$$ae + b\epsilon^2 \leq z \Rightarrow b\epsilon^2 + a\epsilon - z \leq 0 \Rightarrow$$

$$(z_1, z_2 : roots) \begin{cases} \xrightarrow{b > 0} z_1 \leq \epsilon \leq z_2 \\ \xrightarrow{b < 0} \epsilon \leq z_2 \mid z_1 \leq \epsilon \end{cases}$$

$$F_E(z) = \begin{cases} P(z_1 \leq \epsilon \leq z_2) & (b > 0) \\ P(\epsilon \leq z_2) + P(z_1 \leq \epsilon) & (b < 0) \end{cases}$$

$$F_E(z) = \begin{cases} \int_{z_1}^{z_2} f_\epsilon(x) dx & \\ \int_{-\infty}^{z_2} f_\epsilon(x) dx + \int_{z_1}^{+\infty} f_\epsilon(x) dx & \end{cases}$$

$$\begin{aligned} f_E(z) &= \frac{dF_E(z)}{dz} = f_\epsilon(z_2) \frac{dz_2}{dz} - f_\epsilon(z_1) \frac{dz_1}{dz} \\ &= \frac{1}{\sqrt{a^2 + 4bz}} [f_\epsilon\left(\frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bz}}{2b}\right) + \\ &\quad f_\epsilon\left(\frac{-a - \sqrt{a^2 + 4bz}}{2b}\right)] \end{aligned} \quad (29)$$

بنابراین تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی E به صورت رابطه ۲۹ بر اساس تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی ϵ بیان می‌شود و این بدان معنا است که می‌توان تابع توزیع متغیر تصادفی E را مشخص نمود. در نهایت برای بدست آوردن تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی تغییر ولتاژ بیشینه نسبت به x در رابطه ۲۲ می‌توان از دو قضیه در توزیع نرمال استفاده نمود که به صورت زیر بیان می‌شود:

از وردن یک مقدار ثابت به یک متغیر تصادفی (χ در رابطه ۲۲) باعث جابجایی در تابع چگالی احتمال آن متغیر تصادفی خواهد شد به عبارت دیگر اگر داشته باشیم $\Delta = X + E$ که در آن E یک متغیر تصادفی و X یک مقدار ثابت است، در این صورت خواهیم داشت $f_\Delta(z) = f_E(z - X)$.

تابع چگالی احتمال برای جمع دو متغیر تصادفی که مستقل آماری هستند برابر ضرب کانونلوشن^{۱۱} تابع چگالی احتمال آن دو متغیر تصادفی است. به عبارت دیگر اگر داشته باشیم $\Xi = E_1 + E_2$ که در آن E_i یک متغیر تصادفی است در این صورت داریم $f_\Xi(z) = f_{E_1}(z) * f_{E_2}(z)$

۶- نتایج آزمایش‌ها

برای ارزیابی روش ارائه شده برای مدل سازی تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش‌های اجتناب از نویز از مقایسه نتایج بدست آمده با تحلیل Monte Carlo استفاده شده است. برای این منظور تابع چگالی احتمال ناشی از تحلیل Monte Carlo و از سوی دیگر معادله dv_{peak}^x که به عنوان متغیر تصادفی می‌توانند در نظر گرفته شوند، پارامترهای خازنی $C_c, C_{a3}, C_{a2}, C_{a1}, C_{v3}, C_{v2}, C_{v1}$ و مقاومتی $R_{th}, R_h, R_{a2}, R_{a1}, R_{v2}, R_{v1}$ هستند. مقادیر نامی هر یک از این متغیرهای تصادفی از تکنولوژی $0.13\mu m$ و بر اساس مقاله [11] انتخاب شده‌اند که به منظور بررسی تأثیر ساده‌سازی به ازای مقادیر مختلف، این مقادیر در یک بازه انتخاب خواهند شد.

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 \quad (19)$$

$$+ \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + \dots$$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{j!} \left[\sum_{k=1}^n (x_k - a_k) \frac{\partial}{\partial x_k} \right]^j f(x'_1, x'_2, \dots, x'_k) \right\}_{x'_1=a_1, \dots, x'_k=a_k} \quad (20)$$

استفاده از سری تیلور با درجه بیش از ۲، حل کلی و بسته مسئله تغییرپذیری فرآیند ساخت در روش‌های اجتناب از نویز را غیرممکن می‌کند و از این‌رو در این مقاله از سری تیلور با درجه ۲ استفاده شده است. بعلاوه بر همین اساس، از تأثیر حاصل ضرب متغیرهای تصادفی در سری تیلور نیز صرف‌نظر شده است. نتایج آزمایشات ارائه شده در بخش ۶- نشان می‌دهد که فرضیات صورت گرفته باعث تزریق خطای چندانی نمی‌شود. در نهایت برای مدل کردن تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش‌های اجتناب از نویز از یک تقریب درجه ۲ به صورت رابطه ۲۱ برای متغیر تصادفی تغییر ولتاژ بیشینه نسبت به متغیر تصادفی x است که در آن x_i مقدار نامی برای متغیر تصادفی i و a_i مقدار واقعی این متغیر تصادفی است.

$$\begin{aligned} dv_{peak}^x(x_1, x_2, \dots, x_k) &= dv_{peak}^x(x'_1, x'_2, \dots, x'_k) \\ &+ (x_1 - x'_1)f_{x_1}(x'_1, x'_2, \dots, x'_k) + \dots \\ &+ (x_k - x'_k)f_{x_k}(x'_1, x'_2, \dots, x'_k) + \dots \\ &+ \frac{1}{2!}(x_1 - x'_1)^2 f_{x_1 x_1}(x'_1, x'_2, \dots, x'_k) + \dots \\ &+ \frac{1}{2!}(x_k - x'_k)^2 f_{x_k x_k}(x'_1, x'_2, \dots, x'_k) \end{aligned} \quad (21)$$

برای سادگی، رابطه ۲۲ را به رابطه ۲۱ تبدیل می‌کنیم که در آن χ مقدار پارامتر در زمان طراحی ($dv_{peak}^x(x'_1, x'_2, \dots, x'_k)$) و ϵ مقدار خطای دلیل بروز تغییرپذیری در فرآیند ساخت در متغیر تصادفی i یا $(x_i - x'_i)$ است. ضرایب a_i و b_i نیز به صورت رابطه ۲۳ محاسبه می‌شوند.

$$dv_{peak}^x = \chi + (a_1 \epsilon_1 + b_1 \epsilon_1^2) + (a_2 \epsilon_2 + b_2 \epsilon_2^2) + \dots + (a_k \epsilon_k + b_k \epsilon_k^2) \quad (22)$$

$$a_i = f_{x_i}(x'_1, x'_2, \dots, x'_k), b_i = \frac{f_{x_i x_i}(x'_1, x'_2, \dots, x'_k)}{2} \quad (23)$$

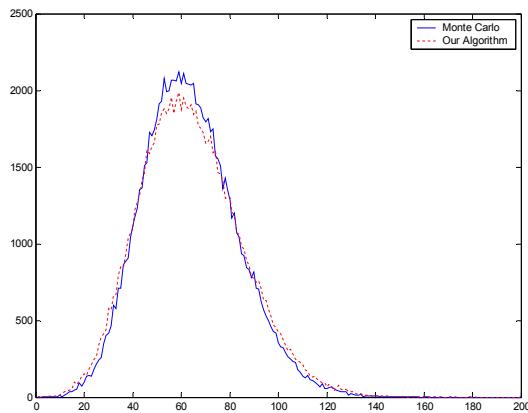
برای بدست آوردن تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی تغییر ولتاژ بیشینه با فرض داشتن تابع چگالی احتمال برای متغیر تصادفی i به صورت زیر عمل می‌کنیم. در روابط زیر، تابع چگالی احتمال برای متغیر تصادفی x با نماد $f_x(z)$ و تابع چگالی تجمعی^{۱۰} برای این متغیر با نماد $F_x(z)$ نشان داده شده است.

$$E = a\epsilon + b\epsilon^2 \quad (24)$$

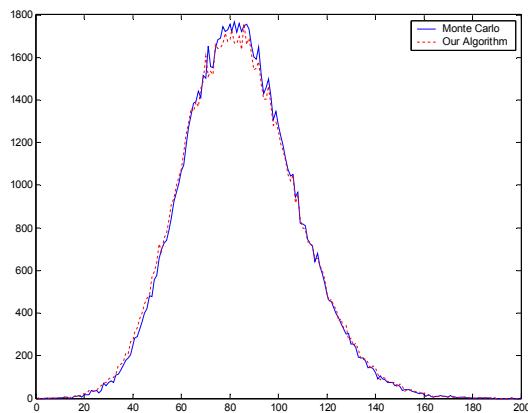
$$F_E(z) = P(E \leq z) = P(a\epsilon + b\epsilon^2 \leq z) \quad (25)$$

جدول ۱- پارامترهای طراحی و مقادیر واریانس و انحراف از معیار برای ارزیابی در آزمون‌های مختلف. مقادیر خازنی بر حسب فرموفاراد، مقادیر مقاومتی بر حسب اهم و زمان خیزش (tr) بر حسب پیکوثانیه می‌باشد.

شماره آزمون						مقادیر پارامترهای طراحی
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۵۰	۱۰۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	خازن‌ها
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	مقاومت‌ها
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰۰	۱۰	۱۰	tr
۱۰۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	میانگین
۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۰	۱۵	انحراف از معیار



شکل ۴- نتایج آزمون ۱، محور افقی داده‌های ۱۰۰۰۰۰ نمونه را در ۲۰۰ دسته نشان می‌دهد. محور عمودی میزان رخداد هر دسته را نشان داده است.



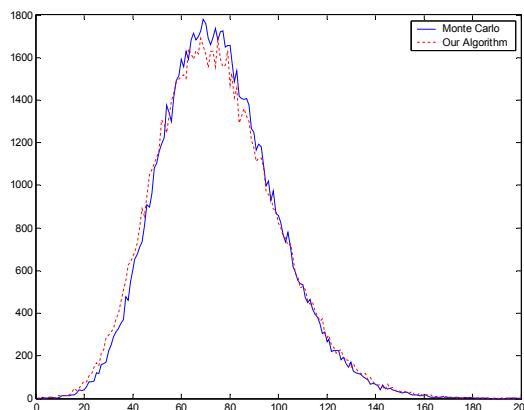
شکل ۵- نتایج آزمون ۲، محور افقی داده‌های ۱۰۰۰۰۰ نمونه را در ۲۰۰ دسته نشان می‌دهد. محور عمودی میزان رخداد هر دسته را نشان داده است.

به منظور جلوگیری از پیچیده شدن مسئله و به منظور روشن تر شدن تأثیر تغییرپذیری بک پارامتر بر روی روش‌های اجتناب از نویز در این قسمت فرض می‌شود که فقط مقدار خازن کوپلاژ (C) یک متغیر تصادفی است که بصورت یک توزیع نرمال با مقادیر مختلف واریانس که در ادامه مشخص خواهد شد تغییر می‌کند. برای سایر مقادیر فرض می‌شود که تغییرپذیری فرآیند ساخت در مورد آنها ناچیز است که البته این فرض خللی به کلیت مسئله وارد نمی‌کند و برای مدلسازی هر یک از آنها به طریق مشابه می‌توان عمل کرد. بنابراین روند ارزیابی تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش‌های اجتناب از نویز را می‌توان با در نظر گرفتن ساده‌سازی‌های صورت گرفته به صورت زیر خلاصه نمود:

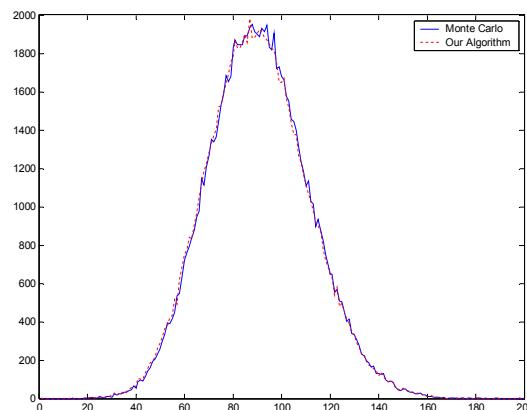
۱. ابتدا یکی از روش‌های اجتناب از نویزه‌شنوایی ارائه شده در بخش ۴ به عنوان روش موردنظر انتخاب می‌شود.
۲. بر اساس متد ارائه شده در بخش ۵ و معادله ۲۹، تأثیرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش انتخاب شده مدل می‌شود.
۳. بر اساس مدلسازی صورت گرفته، مقدار تأثیر بر اساس معادلات ارائه شده در بخش ۵ و قضیه‌های احتمال برای توزیع نرمال محاسبه می‌گردد.
۴. بر اساس روش Monte Carlo و با تغییر پارامترهای مختلف، مقدار تأثیر این پارامتر بر روی روش اجتناب از نویز موردنظر ارزیابی می‌شود.
۵. نتایج بدست آمده از معادله ۲۹ با نتایج بدست آمده از تحلیل Monte Carlo مقایسه و مقدار خطای ناشی از ساده‌سازی برای ایجاد یک معادله بسته محاسبه می‌شود.

در این بخش، تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش اجتناب از نویزه‌شنوایی با افزایش فاصله بین نتها که به عنوان یکی از روش‌های بسیار مؤثر برای کاهش نویز قلمداد می‌شود، بررسی خواهد شد. تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی سایر روش‌ها به صورت مشابه قابل ارزیابی است. در روش افزایش فاصله نتها از تأثیر افزایش فاصله بر روی پارامتر C_{v2} (معادله ۱۰) استفاده خواهد شد. ارزیابی سایر معادلات نیز به سادگی و با روشی مشابه بدست خواهد آمد.

برای استفاده از معادله ۲۹، باید ابتدا مقادیر a و b برای خازن کوپلاژ محاسبه شود که این کار با مشتق‌گیری از معادله ۱۰ بر اساس C_v صورت خواهد گرفت. برای تمامی آزمون‌ها از تعداد نمونه ۱۰۰۰۰۰ استفاده شده است. مقادیر انتخاب شده برای Monte Carlo در تحلیل پارامترهای مختلف طراحی در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل ۴ تا شکل ۹ نیز به ارزیابی بر اساس آزمون‌های مشخص شده در جدول ۱ می‌پردازند. در هر یک از این شکل‌ها، با تقسیم اعداد در محور عمودی بر ۱۰۰۰۰۰، تابع چگالی احتمالی محاسبه خواهد شد.



شکل ۶- نتایج آزمون ۶، محور افقی داده‌های ۱۰۰۰۰۰ نمونه را در ۲۰۰ دسته نشان می‌دهد. محور عمودی میزان رخداد هر دسته را نشان داده است.



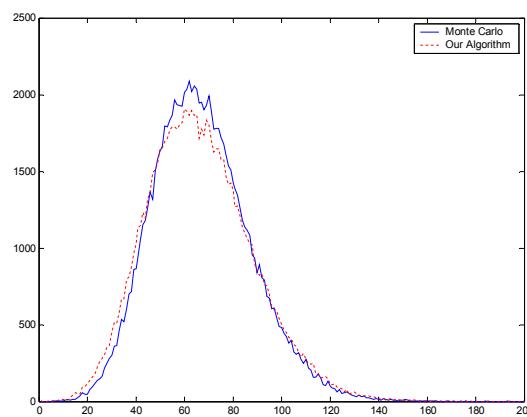
شکل ۶- نتایج آزمون ۳، محور افقی داده‌های ۱۰۰۰۰۰ نمونه را در ۲۰۰ دسته نشان می‌دهد. محور عمودی میزان رخداد هر دسته را نشان داده است.

۷- نتیجه گیری و کارهای آتی

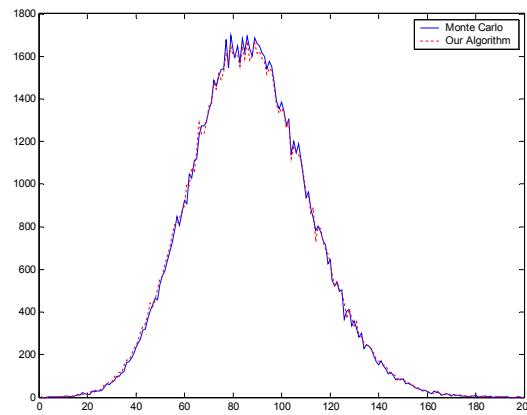
در این مقاله به ارزیابی روش تخمین تأثیر تغییرپذیری فرآیند ساخت بر روی روش‌های اجتناب از نویزهمنشوابی پرداختیم. برای این منظور با استفاده از توزیع نرمال، تأثیر یک متغیر تصادفی نظیر خازن کوپلاژ را بر روی یک روش اجتناب از نویز نظیر افزایش فاصله نتها مدل کردیم. در مدل‌سازی صورت گرفته برای بدست آوردن یک صورت بسطه از نحوه تأثیرگذاری از تقریب درجه ۲ در بسط تیلور استفاده کردیم و همچنین فرض شد که متغیرهای تصادفی به صورت مستقل از هم عمل می‌کنند. برای ارزیابی روش ارائه شده، به ازای مقادیر مختلف خازنی، مقاومتی و در مقادیر مختلفی از میانگین و انحراف از معیار برای متغیر تصادفی، نتایج حاصل از تحلیل Monte Carlo را با روش ارائه شده مقایسه کردیم. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که اگر انحراف از معیار متغیر تصادفی کم باشد روش ارائه شده بسیار کارآمد می‌باشد و چنانچه تغییرپذیری فرآیند ساخت دارای انحراف از معیار زیادی باشد، نیاز به لحاظ کردن جملات از مرتبه بالاتر در بسط تیلور و نیز در نظر گرفتن تأثیر واستگی خطی بین متغیرهای تصادفی وجود دارد.

مراجع

- [1] J-T. Kong, "CAD for Nanometer Silicon Design Challenges and Success," IEEE Trans. on Very Large Scale Integration Systems, Vol. 12, No. 11, pp. 1132-1147, Nov. 2004.
- [2] S. Borkar, T. Karnik, V. De, "Design and Reliability Challenges in Nanometer Technologies," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 75, 2004.
- [3] J. A. G. Jess, K. Kalafala, S. R. Naidu, R. H. J. M. Otten, C. Visweswariah, "Statistical Timing for Parametric Yield Prediction of Digital Integrated Circuits," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 932-937, 2003.



شکل ۷- نتایج آزمون ۴، محور افقی داده‌های ۱۰۰۰۰۰ نمونه را در ۲۰۰ دسته نشان می‌دهد. محور عمودی میزان رخداد هر دسته را نشان داده است.



شکل ۸- نتایج آزمون ۵، محور افقی داده‌های ۱۰۰۰۰۰ نمونه را در ۲۰۰ دسته نشان می‌دهد. محور عمودی میزان رخداد هر دسته را نشان داده است.

- ² Yield
- ³ Manufacturing Process Variation
- ⁴ Doping
- ⁵ Crosstalk
- ⁶ Electro-migration
- ⁷ Coupling Capacitance
- ⁸ Nets
- ⁹ Static Timing Analysis (STA)
- ¹⁰ Statistical STA (SSTA)
- ¹¹ Aggressor Net
- ¹² Victim Net
- ¹³ Normal (Gaussian) distribution
- ¹⁴ Noise Model
- ¹⁵ Rise Time
- ¹⁶ Thevenin Model
- ¹⁷ Probability Density Function (PDF)

۱۸ تابع چگالی احتمال توزیع نرمال با میانگین μ و واریانس σ^2 برابر است

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

- ¹⁹ Taylor Series
- ²⁰ Cumulative Density Function (CDF)
- ²¹ Convolution Product

- [4] F. N. Najm, N. Menezes, "Statistical Timing Analysis Based on a Timing Yield Model," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 460-465, 2004.
- [5] S. Borkar, T. Karnik, S. Narendra, J. Tschanz, A. Keshavarzi, V. De, "Parameter Variations and Impact on Circuits and Microarchitecture," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 338-342, 2003.
- [6] J. Tschanz, K. Bowman, V. De, "Variation-Tolerant Circuits: Circuit Solutions and Techniques," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 762-763, 2005.
- [7] D. Sylvester, and K. Keutzer, "Getting to the Bottom of Deep Submicron," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 203-211, 1998.
- [8] K. L. Shepard, and V. Narayanan, "Noise in Deep Submicron Digital Design," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 524-531, 1996.
- [9] M. Saeedi, M. Saheb Zamani, "Crosstalk Reduction during Placement Based on Contour Plotting," Computer Society of Iran Computer Conference, 2006.
- [10] M. Aghapour, M. Saeedi, M. Saheb Zamani, "Global Routing with Crosstalk Consideration," Computer Society of Iran Computer Conference, 2006.
- [11] M. Becer, V. Zolotov, D. Blaauw, R. Panda, I. Hajj, "Analysis of Noise Avoidance Techniques in DSM Interconnects Using a Complete Crosstalk Noise Model," in Proc. Design, Automation and Test in Europe Conf. and Exhibition, pp. 456-464, 2002.
- [12] J. Cong, D. Z. Pan, P.V. Srinivas, "Improved Crosstalk Modeling for Noise Constrained Interconnect Optimization," in Proc. Asia and South Pacific Design Automation Conf, pp. 373 - 378, 2001.
- [13] F. N. Najm, "On the Need for Statistical Timing Analysis," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 764-765, 2005.
- [14] Y. Cao, L. T. Clark, "Mapping Statistical Process Variations toward Circuit Performance Variability: An Analytical Modeling Approach," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 658-663, 2005.
- [15] A. Agarwal, K. Chopra, D. Blaauw, V. Zolotov, "Circuit Optimization using Statistical Static Timing Analysis," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 321-324, 2005.
- [16] A. Devgan, C. Kashyap, "Block-based Static Timing Analysis with Uncertainty," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 607-614, 2003.
- [17] D. Sinha, H. Zhou, "A Unified Framework for Statistical Timing Analysis with Coupling and Multiple Input Switching," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 837-843, 2005.
- [18] M. Martina, G. Masera, "A Statistical Model for Estimating the Effect of Process Variations on Crosstalk Noise," in Proc. System Level Interconnect Prediction, pp. 115-120, 2004.
- [19] R. Kastner, E. Bozorgzadeh, and M. Sarrafzadeh, "Pattern routing: Use and theory for increasing predictability and avoiding coupling," IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits, pp. 777-790, 2002.
- [20] P. Chen, and K. Keutzer, "Toward True Crosstalk Noise Analysis," in Proc. Int. Conf. Computer-Aided Design, pp. 132-137, 1999.

زیرنویس‌ها

¹ Very Deep Sub-Micron (VDSM)