

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14603

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14719

研究課題名（和文）Development of an Ultra-Fast Statistical Signal/Power Integrity Analysis Simulator for the High-speed Digital System Design

研究課題名（英文）Development of an Ultra-Fast Statistical Signal/Power Integrity Analysis Simulator for the High-speed Digital System Design

研究代表者

Kim Youngwoo (Kim, Youngwoo)

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教

研究者番号：30862403

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：この3年間のプロジェクトを通じて、PIは数学的モデリングと統計に基づいて非線形ノイズを考慮した新しいSI/PIシミュレーターを開発しました。その結果、PIは複数の査読済み国際ジャーナル（IEEEトランザクション）および会議を出版しました。また、主任研究者はIEEE TCPMTの副編集長に任命されました（世界最年少、日本唯一）。

研究成果の学術的意義や社会的意義

PIがこのプロジェクトを通じて開発したシミュレーターは、非線形電源/グラウンドノイズ下でのSI/PI特性を解析するための計算リソースの問題を解決しました。これは、1000を超える並列回路を備えたHBMなどの3D-ICの開発に特に役立ちます。

研究成果の概要（英文）：Throughout this three-year project, the PI developed a novel SI/PI simulator considering non-linear noise based on mathematic modeling and statistics. As a result, the PI published multiple reviewed international journals (IEEE Transactions) and conferences. Also, the PI has been appointed as an associate editor in IEEE TCPMT (the youngest in the world, the only one from Japan).

研究分野：半導体パッケージング

キーワード：半導体パッケージング 信号と電力の完全性 回路シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

高速デジタルシステム設計時に信号や電力伝送を阻害するノイズの種類が増えている (図 1)。特に非線形的な電力/グラウンドノイズが深刻化している。このようなノイズの特性を予測するには、時間領域でアイダイアグラムシミュレーションを行う必要があるが、過剰な計算リソースが必要である。近年、電力供給網を共有する回路の数が 1000 個以上で (3 次元半導体 HBM など)、従来の回路シミュレーションで正確なノイズを正確に予測することができなくなっている (ex: 特定ノイズの発生確率が  $10^{-30}$  以下)。したがって、効率的な SI/PI シミュレータの開発が不可欠である。

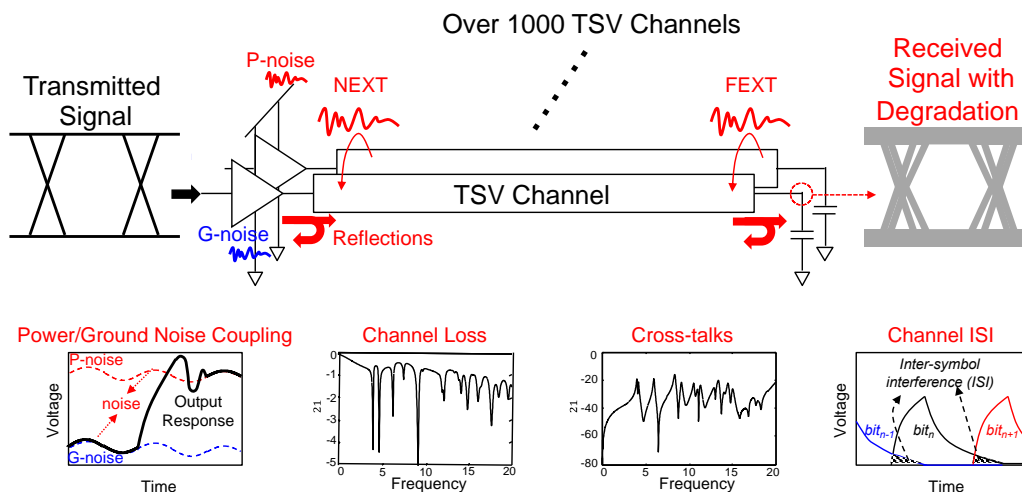


図 1. 高速デジタルシステムの相互接続で発生するさまざまなノイズ。

### 2. 研究の目的

この研究では、最近問題となっている非線形的な電力/グラウンドノイズなど、様々なノイズを考慮した SI/PI シミュレータを開発する。既存の時間領域回路シミュレーションと電磁波解析ツールを置き換えるための高速で正確なシミュレータを開発する。既存のシミュレータがアイダイアグラムを予測できない低 BER 領域 ( $\text{sub } 10^{-16}$ ) でも予測ができるシミュレータを開発する。

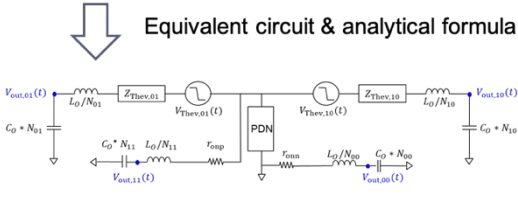
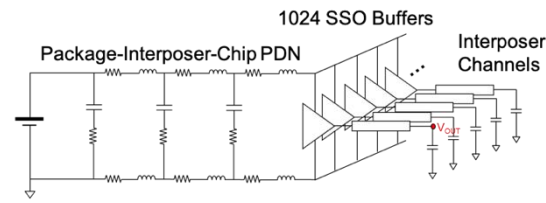
### 3. 研究の方法

開発したシミュレータは合計 4 つの研究ステップで行われた。

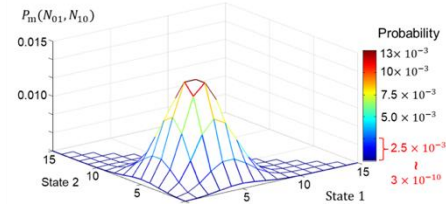
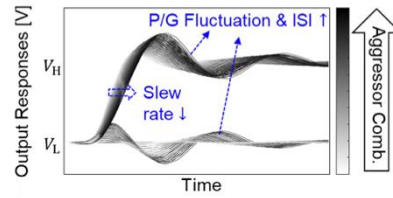
- (1) 電力供給網 (interconnection: chip-package-PCB) と同時動作バッファ (SSO-Buffer) を数学的にモデル化する。
- (2) 同時動作バッファ回路の出力応答 (OR) を計算し、各 OR の発生確率を計算する (Occurrence Probability)。この 2 つを活用して 4 つの最終 OR PDF を導出する。
- (3) 反復畳み込み計算により、main-cursor PDF とすべてのノイズを含む ISI-PDF を導出する。
- (4) Main-cursor PDF と ISI-PDF 間の Recursive Convolution を介して最終アイダイアグラムを導き出し、精度を証明する。

検証後、シミュレータを GUI に変換して最終的に user-friendly tool 化する。

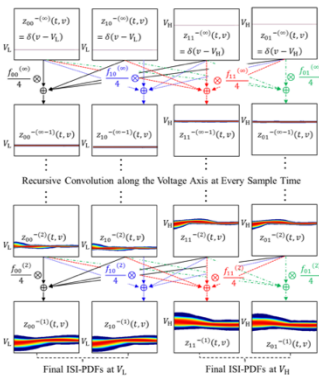
図 2 にはこのプロセスをまとめている。



< Step 1: Analytical modeling >

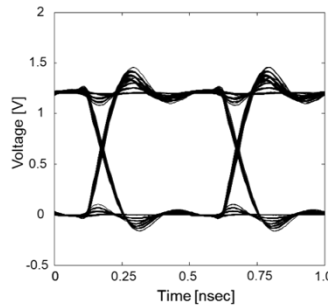


< Step 2: Statistical analysis >

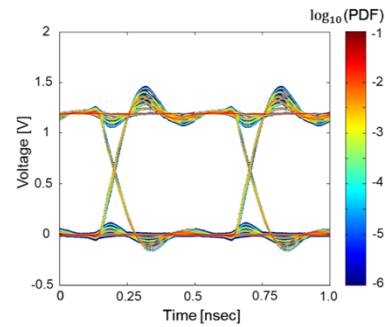


<Recursive Convolution>

< Step 3: Main & ISI PDF Convolution >



<Conventional EM + SPICE Sim.>



<Proposed Method>

< Step 4: Derivation of the Eye-diagram >

図 2. 提案した授業のフロー。迅速かつ正確なアイダグラムの予測が可能

#### 4. 研究成果

様々な国際ジャーナルおよび会議論文の発表。(All Reviewed)

##### International Journals

- (1) **Youngwoo Kim**\*, “Design of Power/Ground Noise Suppression Structures Based on a Dispersion Analysis for Packages and Interposers with Low-Loss Substrates”, *Micromachines*, 13(9), 1433, pp.1-19, August 2022. (1<sup>st</sup> Author & Corresponding Author)
- (2) Shinpei Wada, Yuichi Hayashi, Daisuke Fujimoto, Naofumi Homma, and **Youngwoo Kim**\*, “Measurement and Analysis of Electromagnetic Information Leakage from Printed Circuit Board Power Delivery Network of Cryptographic Devices”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 63, No. 5, pp.1322-1332, October 2021. (Corresponding Author)
- (3) **Youngwoo Kim**\*, Junyong Park, Joungho Kim, and Yuichi Hayashi, “Statistical Eye-diagram Estimation Method Considering Power/Ground Noise Induced by Simultaneous Switching Output (SSO) Buffers”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 62, No.2, pp.2547-2557, December 2020. 1<sup>st</sup> Author & Corresponding Author)
- (4) **Youngwoo Kim**\*, Gapyeol Park, Kyungjun Cho, Pulugurtha Markondeya Raj, Rao R. Tummala, and Joungho Kim, “Wideband Power/Ground Noise Suppression in Low-Loss Glass Interposers Using a Double-Sided Electromagnetic Bandgap Structure”, *IEEE Transactions on*

Microwave Theory and Techniques, Vol. 68, No.12, pp.5055-5064, December 2020. 1<sup>st</sup> Author & Corresponding Author)

- (5) **Youngwoo Kim**<sup>\*</sup>, Daisuke Fujimoto, Shugo Kaji, Shinpei Wada, Hyunwook Park, Daehwan Lho, Joungho Kim, and Yu-ichi Hayashi, “Segmentation Method based Modeling and Analysis of a Glass Package Power Distribution Network (PDN)”, IEICE Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA), Vol.E11, No.2, 170-188, April 2020. 1<sup>st</sup> Author & Corresponding Author)

### International Conferences

- (1) **Youngwoo Kim** et al., "How to Design Secured Power Delivery Network of Cryptographic Devices: Challenges, Evaluation Methods, and Solutions", DesignCon 2023, Santa Clara, CA, USA, February 1, 2023. ([Best Paper Awards](#))
- (2) **Youngwoo Kim**, “Interposer Channel Design based on Statistical Signal/Power Integrity Co-analysis,” 2022 Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Hybrid (Beijing, China & On-line), September 2, 2022.
- (3) **Youngwoo Kim**, Shinpei Wada, Daisuke Fujimoto, and Yuichi Hayashi, "Analysis of Filtering Window Impacts on Estimation Accuracy of Information Leakage from Exposed Power Delivery Network of Cryptographic Devices”, The 13th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), On-line, March 11th, 2022.
- (4) **Youngwoo Kim**, Shinpei Wada, Daisuke Fujimoto, and Yuichi Hayashi, "Analysis of Electromagnetic Information Leakage from Overdesigned Power Delivery Network of Cryptographic Devices", in Proceedings of 2021 Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Hybrid (Bali & On-line), September 28, 2021.
- (5) **Youngwoo Kim**, Daisuke Fujimoto, and Yu-ichi Hayashi, “Analysis of HDMI 2.1 Mated Connector Contact Boundary Impedance Impacts on a High-speed Digital System Performance”, in Proceedings of 30<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts, ~~St. Gallen Rorschach, Switzerland~~ On-line, ~~June, 2020~~ – Delayed 1 year due to COVID19, June 11, 2021.
- (6) **Youngwoo Kim**, “Feasibility Analysis of Over 20 Gb/s HDMI Signaling using Passive Connector and Cable Assembly”, in Proceedings of IEEE The 13<sup>th</sup> Global Symposium on Millimeter-Waves & THz (GSMM), Hybrid (On-line & On-site: Nanjing, China), May 25, 2021. ([Invited Paper](#))
- (7) **Youngwoo Kim**, “Statistical Analysis and Modeling of a High Bandwidth Memory (HBM) Interposer Channel”, in Proceedings of IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization, Hangzhou, China (& On-line), December 8, 2020. ([Invited Paper](#))

また、研究代表者は IEEE TCPMT の副編集長に任命された（世界最年少、日本唯一）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shinpei Wada, Yuichi Hayashi, Daisuke Fujimoto, Naofumi Homma, and Youngwoo Kim	4. 巻 63
2. 論文標題 Measurement and Analysis of Electromagnetic Information Leakage from Printed Circuit Board Power Delivery Network of Cryptographic Devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY	6. 最初と最後の頁 1322-1332
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TEMC.2021.3062417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Youngwoo Kim, Gapyeol Park, Kyungjun Cho, Pulugurtha Markondeya Raj, Rao R. Tummala, and Joungho Kim	4. 巻 68
2. 論文標題 Wideband Power/Ground Noise Suppression in Low-Loss Glass Interposers Using a Double-Sided Electromagnetic Bandgap Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES	6. 最初と最後の頁 5055-5064
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMTT.2020.3022009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Youngwoo Kim	4. 巻 62
2. 論文標題 Statistical Analysis and Modeling of a High Bandwidth Memory (HBM) Interposer Channel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)	6. 最初と最後の頁 2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/NEMO49486.2020.9343617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Youngwoo Kim, Junyong Park, Joungho Kim, and Yu-Ichi Hayashi	4. 巻 62
2. 論文標題 Statistical Eye-Diagram Estimation Method Considering Power/Ground Noise Induced by Simultaneous Switching Output (SSO) Buffers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY	6. 最初と最後の頁 2547-2557
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TEMC.2020.2975202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Youngwoo Kim
2. 発表標題 Feasibility Analysis of Over 20 Gb/s HDMI Signaling using Passive Connector and Cable Assembly
3. 学会等名 IEEE The 13th Global Symposium on Millimeter-Waves & THz (GSMM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Youngwoo Kim, Daisuke Fujimoto, and Yu-ichi Hayashi
2. 発表標題 Analysis of HDMI 2.1 Mated Connector Contact Boundary Impedance Impacts on a High-speed Digital System Performance
3. 学会等名 30th International Conference on Electrical Contacts (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Youngwoo Kim, Shinpei Wada, Daisuke Fujimoto, and Yuichi Hayashi
2. 発表標題 Analysis of Electromagnetic Information Leakage from Overdesigned Power Delivery Network of Cryptographic Devices
3. 学会等名 2021 Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Youngwoo Kim
2. 発表標題 Statistical Analysis and Modeling of a High Bandwidth Memory (HBM) Interposer Channel
3. 学会等名 2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Youngwoo Kim
2. 発表標題 Analysis of HDMI Mated Connector Electrical Performance Impacts on a Signal Integrity of the High-speed Digital System
3. 学会等名 電子情報通信学会 2020-EMD-0010
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------