



HAL
open science

Etude du canal de propagation d'un réseau sans fils sur puce de type WiNoC (Wireless Network-on-Chip) à 60 GHz

Bryan Treguer, Thierry Le Gouguec, Pierre-Marie Martin, Rozenn Allanic, Cédric Quendo

► To cite this version:

Bryan Treguer, Thierry Le Gouguec, Pierre-Marie Martin, Rozenn Allanic, Cédric Quendo. Etude du canal de propagation d'un réseau sans fils sur puce de type WiNoC (Wireless Network-on-Chip) à 60 GHz. XXII èmes Journées Nationales Microondes 8-10 juin 2022, Jun 2022, Limoges, France. hal-04292507

HAL Id: hal-04292507

<https://hal.science/hal-04292507>

Submitted on 17 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude du canal de propagation d'un réseau sans fils sur puce de type WiNoC (Wireless Network-on-Chip) à 60 GHz

Bryan Treguer, Thierry Le Gouguec, Pierre-Marie Martin, Rozenn Allanic, Cédric Quendo

Lab-STICC/UBO UMR CNRS 6285 : 6 Avenue Victor Le Gorgeu CS 93837, 29238 BREST CEDEX 3

bryan.treguer@univ-brest.fr

Résumé - Dans ce papier, une caractérisation du canal de propagation sur silicium est réalisée autour de 60 GHz. Dans un premier temps, des antennes TSV (Through Silicon Via) ont été simulées dans la bande V [50-70 GHz]. Les paramètres de transmission et d'adaptation sont présentés pour une distance inter-élément de 6 mm. Par la suite, les performances d'antennes dipôles, en bande V, directement intégrées sur silicium (Si) sont évaluées et comparées à la littérature existante. Enfin un réseau de quatre antennes dipôles est présenté dans le but de réaliser des communications de type Broadcast (1 vers N) à une distance inter-élément de 14 mm.

1. Introduction

De nos jours, de nouvelles applications comme l'intelligence artificielle, le Big Data ou encore l'internet des objets sont en pleine expansion. Il y a une nécessité de miniaturiser tout en augmentant les débits de données des circuits. Cet accroissement du débit de données, lié à une augmentation des fréquences de travail des circuits, entraîne plusieurs effets néfastes sur les signaux propagés tels que des désadaptations, de la diaphonie, des délais supplémentaires ou encore des désynchronisations [1].

Dans le contexte des circuits multicouches, la mise en œuvre d'interconnexions sans fils semble être une solution prometteuse [2].

La transmission sans fil pour des applications de type WiNoC est étudiée en considérant un substrat silicium que l'on peut retrouver dans les interposeurs des puces actuelles.

afin de diminuer les trajets multiples et ainsi d'obtenir de larges bandes passantes [4],[8]. Dans ces études, une solution minimisant ces interférences est simulée et mesurée, le silicium haute résistivité (Si-HR) est associé à une couche absorbante silicium basse résistivité (Si-BR). Les antennes TSV (Through Silicon Via) permettent de réaliser des liaisons sans fils multi-cœurs au sein d'un substrat silicium bordé d'un absorbant. Compte tenu des dimensions des puces, la propagation intra-puce doit pouvoir être réalisable pour une distance inter-élément allant de 1 à 2 cm. L'importance du niveau de transmission est secondaire comparé à la bande passante à - 3 dB. En effet, le niveau de transmission doit être le plus constant possible (limitation des effets parasites) sur une bande de fréquence la plus large possible. Pour cette étude, la fréquence de travail des antennes a été fixée à 60 GHz pour des distances inter-élément de 6 et 14 mm.

Dans une première partie, un réseau de 2 antennes TSV [3] placées dans un substrat circulaire est simulé dans la bande V (50-75 GHz) à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique HFSSTM. Cette approche est reprise ici mais en considérant une interface Si-HR/Si-BR de forme circulaire. Dans une seconde partie, deux dipôles gravés dans le plan métallique supérieur d'un substrat silicium sont simulés en bande V.

Les résultats obtenus en termes de transmission et de bande passante sont comparés à différents travaux sur les WiNoC présents dans la littérature. Enfin, un réseau de quatre antennes dipôles est simulé dans la bande de fréquence [40-80 GHz].

2. Antennes TSV-Bande V [50-70 GHz]

Nous présentons sur la Figure 2 (a), le schéma permettant la simulation de deux antennes TSV, alimentées via un accès coplanaire 50 Ω et placées sur un substrat silicium circulaire à haute résistivité (HR) de 2.5 k Ω .cm. Ce substrat est entouré d'une couche de Si-BR utilisé ici comme couche absorbante. La distance inter-élément est dans ce cas de figure égale à 6 mm.

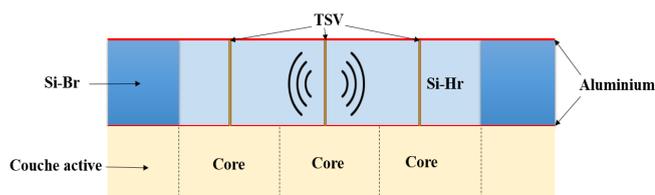


Figure 1 : Vue en coupe de l'architecture WiNoC

La Figure 1 montre une vue en coupe d'une architecture WiNoC utilisant un substrat silicium comme support de propagation. Des travaux antérieurs ont montré l'intérêt de maîtriser les frontières air-silicium ($\epsilon_{\text{Air}}=1$ vs. $\epsilon_{\text{Si}}=11.9$)

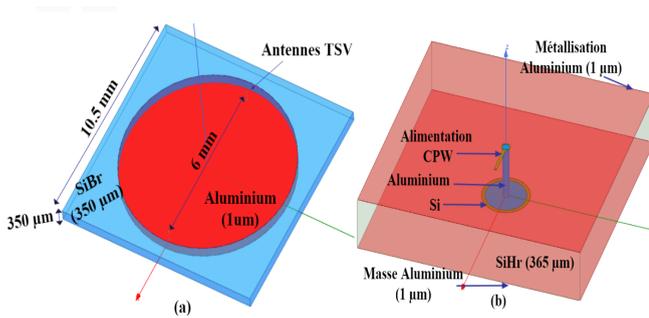


Figure 2 : (a) vue de la structure simulée ; (b) vue 3D d'une antenne TSV

La Figure 2 (b) montre plus en détail le design d'une antenne TSV. Les métallisations supérieures et le plan de masse en aluminium vont permettre de limiter le rayonnement dans le plan z et ainsi augmenter les niveaux de transmissions. La hauteur (350 μm) et le rayon (20 μm) du TSV définissent la fréquence de résonance. Au niveau de la masse, les diamètres des disques ont un impact sur l'adaptation de l'antenne [3].

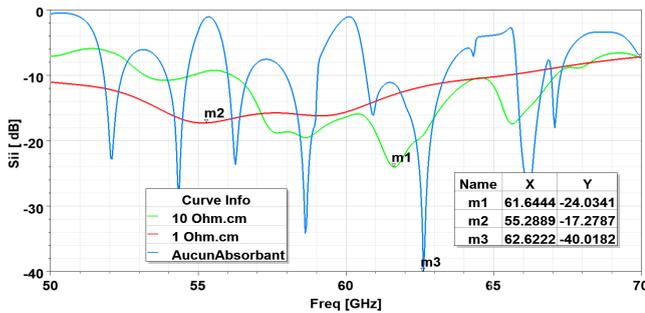


Figure 3. Comparaison de l'adaptation simulée entre 2 antennes TSV pour différents absorbants.

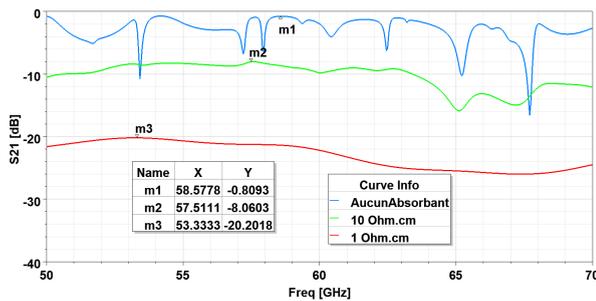


Figure 4. Comparaison de la transmission simulée entre 2 antennes TSV pour différents absorbants.

Les résultats de simulations présentés Figure 3 et 4, montrent l'effet important de l'absorbant sur l'adaptation S_{11} ($S_{11} = S_{22}$) et la propagation S_{21} . Une couche de silicium est polarisée afin de réaliser un absorbant Si-BR. La résistivité de l'absorbant va directement agir sur les coefficients de réflexion et de transmission des antennes. Sans absorbant, de nombreux zéros de transmissions liés à un effet de cavité sont présents dans la bande [50-70] GHz ce qui limite la bande passante à -3 dB.

L'interaction air-silicium est limitée par l'application d'un substrat basse résistivité (BR) dans lequel les ondes

sont atténuées. Les résonances sont ainsi diminuées car l'amplitude des ondes réfléchies y est réduite. On remarque une diminution des résonances pour des résistivités de 10 Ω.cm puis 1 Ω.cm. Cette diminution de l'amplitude et du nombre de résonances s'accompagne d'une diminution du niveau maximum de transmission, ce maximum passant de -0.81 dB sans frontières absorbantes à -20 dB si l'on considère une résistivité de 1 Ω.cm de la couche absorbante. Le meilleur compromis entre niveau de transmission et bande passante est atteint pour une résistivité Si-BR de 10 Ω.cm. Pour cette résistivité, la bande passante à -3 dB est de 14 GHz pour un niveau de transmission S_{21} , compris entre -8 dB et -11 dB. En comparaison dans [3] le niveau de transmission présenté dans la bande de fréquence [60-63 GHz] est de -2.2 dB pour une distance inter-élément de 6 mm mais une bande passante inférieure à 3 GHz.

La fabrication des antennes TSV étant complexe, des antennes dipôles ont été développées par la suite afin d'envisager à terme des réalisations et des validations par mesures.

3. Antennes Dipôles - Bande V [50-80 GHz]

Des dipôles incrustés sur le plan métallique supérieur placé sur le substrat silicium sont simulés à 60 GHz. L'avantage d'un dipôle par rapport à un TSV est sa facilité de fabrication car seule une opération de photolithographie est nécessaire pour le réaliser.

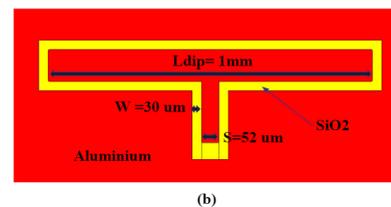
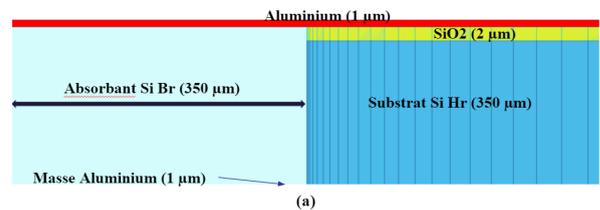


Figure 5 : (a) vue de la structure simulée en coupe ; (b) vue de face d'une antenne dipôle

La Figure 5 (a) montre une vue de coupe de la structure simulée sous HFSSTM pour une distance inter-élément de 14 mm. La face supérieure du substrat et la masse sont en aluminium et d'une épaisseur de 1 μm. Une couche de dioxyde de silicium SiO₂ ($\epsilon_r = 4$) d'une hauteur de 1 μm sert d'isolation. La configuration de la structure de propagation pour les antennes dipôles est similaire à celle de la Figure 2 (a). En effet, les antennes dipôles remplacent les TSV. Elles sont gravées dans le plan métallique supérieur du substrat silicium et bordées d'un absorbant BR. La Figure 5 (b) présente les dimensions des dipôles, conçus pour résonner à 60 GHz, et de leur alimentation coplanaire 50 Ω.

Sur les Figures 6 et 7, sont présentés les coefficients de réflexion et de transmission entre les deux dipôles obtenus

par simulation électromagnétique. Le niveau minimal de réflexion se situe à proximité de 70 GHz. Le substrat Si-BR permet de diminuer fortement les effets parasites aux frontières, ce qui se traduit ici par une diminution du nombre de résonance. Il est clair que l'absorbant joue un rôle fondamental dans la propagation du signal avec une atténuation des zéros de transmissions ainsi qu'une augmentation de la bande passante à -3 dB. Pour une résistivité de 1 Ω .cm, la bande passante est supérieure à 16 GHz avec un niveau maximum S_{21} égal à -15.5 dB. On peut souligner le faible niveau de transmission et un simple amplificateur permettrait d'augmenter cette valeur du fait de la planéité de la transmission. Le système ne nécessite pas d'égaliseur ou tout autre dispositif de correction des signaux [9].

Enfin, un design présentant un absorbant circulaire auquel pourrait s'ajouter des formes triangulaires (à la manière d'une chambre anéchoïque) serait envisageable afin de lisser le signal et ainsi augmenter la bande passante à -3dB.

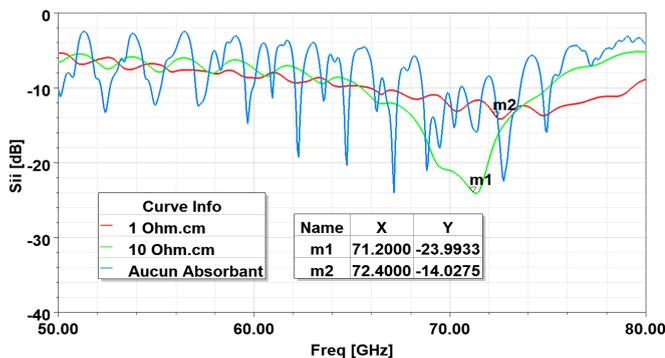


Figure 6. Comparaison de l'adaptation simulée (HFSS™) d'un réseau de 2 antennes dipôles.

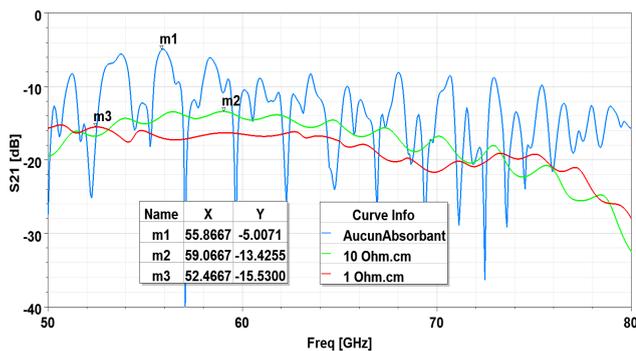


Figure 7. Comparaison de la transmission simulée (HFSS™) d'un réseau de 2 antennes dipôles.

Dans le Tableau 1, un état de l'art des propagations existantes en bande V est présenté et comparé aux performances des antennes TSV et dipôles exposés dans cet article.

La forme de substrat circulaire entouré d'une zone de silicium à pertes faisant office d'absorbant, permet une transmission à des niveaux comparables à ceux trouvés dans la littérature mais avec des bandes passantes à -3 dB nettement plus importantes. Ainsi, des bandes passantes à -3 dB d'environ 15 GHz ont été obtenues pour des niveaux

de transmission de -8 dB (cas des TSV) et -15 dB (cas des dipôles) ce qui représente les bandes de fréquences les plus importantes de l'état de l'art sur les WiNoCs.

Tableau 1. Comparaison transmission Bande V.

Ref	Bande de fréquence (GHz)	Distance Inter-élément (mm)	Transmission Max. (dB)	Bande passante à -3dB (GHz)
[3]	57.5-65	10	-3	< 6
[4]	40-67	10	-5	< 4
[5]	50-70	5	-8 à -18	< 2
[6]	58-62	10	-30	< 4
[7]	50-60	12	-14	<10
TSV (Simulations)	50-70	6	-10.5	>10
Dipôles incrustés (Mesures)	30-67	14	-15.7	14

4. Réseau [2x2] Antennes Dipôles - Bande V [40-80 GHz]

Afin d'analyser les transmissions dans le cas de plusieurs antennes, un réseau de quatre antennes dipôles est simulé sur un substrat silicium. La Figure 8 montre le réseau de 4 antennes simulées. Les distances inter-élément sont de 14 mm. Les antennes dipôles sont placées à une distance correspondant à $\lambda_g/4$ à 60 GHz, du substrat BR. Les antennes sont numérotées de 1 à 4 de manière à bien distinguer les différents paramètres S.

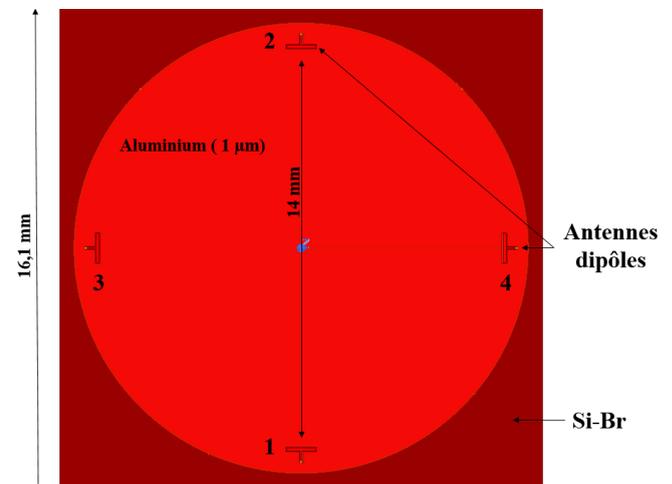


Figure 8. Vue du dessus d'un réseau de 4 antennes dipôles

La Figure 9 présente les différents niveaux d'adaptation pour un réseau de 4 antennes dipôles. Le nombre de résonances est réduit suite à l'ajout d'un substrat BR. La fréquence de résonance obtenue se situe toujours à proximité de 70 GHz correspondant à une hauteur de substrat de 350 μ m. Pour une résistivité d'absorbant de 10 ohm.cm, le niveau d'adaptation S_{11} minimal obtenu est égal à -24 dB pour une fréquence de 70 GHz.

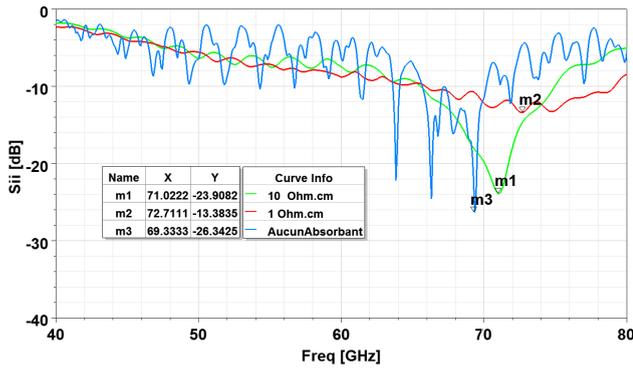


Figure 9. Comparaison des adaptations simulées (HFSS™) d'un réseau de 4 antennes dipôles.

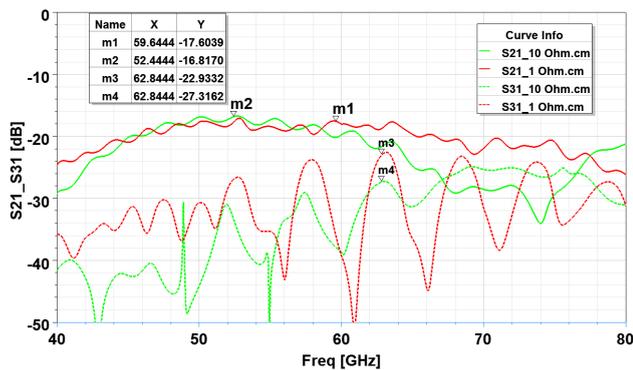


Figure 10. Comparaison des transmissions simulées (HFSS™) d'un réseau de 4 antennes dipôles.

Sur la Figure 10, par souci de clarté, les adaptations S_{ii} ($S_{11}=S_{22}=S_{33}=S_{44}$) et les transmissions sans absorbant S_{21} et S_{31} sont omises. Pour une résistivité d'1 ohm.cm la bande passante est de 17 GHz pour un niveau de transmission de -17.6 dB. Une transmission sans interférence permettrait de fournir de forts débits de données par l'utilisation d'un égaliseur numérique [10]. Les antennes dipôles permettent une bonne propagation directe S_{21} et S_{34} . Les antennes dipôles propagent un signal omnidirectionnel mais l'angle choisi a une grande influence sur le coefficient de transmission. Pour une communication entre 4 antennes cela se traduit par un niveau de propagation plus élevé (-17 dB) pour les antennes en vis à vis. En revanche pour deux antennes présentant un angle de 90 degrés l'une par rapport à l'autre, de faibles bandes passantes et des coefficients de transmission S_{31} , S_{32} inférieurs à -23 dB sont observés. L'utilisation d'antennes TSV omnidirectionnelles doit permettre de limiter ces fluctuations de la transmission.

5. Conclusion

Dans le but de développer des réseaux sans fils sur puces de type WiNoC, nous avons étudié la propagation entre deux antennes TSV, entre deux antennes dipôles puis entre quatre antennes dipôles. Pour augmenter la bande passante et limiter les effets aux frontières, les études ont été réalisées sur des substrats circulaires entourés d'un absorbant. Les résultats de simulation sont très prometteurs pour les deux types d'antennes avec des bandes passantes à -3 dB respectives de 14 GHz et supérieure à 16 GHz pour

des distances inter-élément de 6 et 14 mm. Un système de quatre antennes dipôles est également présenté. Les bandes passantes pour la transmission d'antennes face à face restent également intéressantes. Des solutions sont à étudier pour améliorer les coefficients de transmission et élargir la bande passante à -3 dB lorsque les antennes présentent un angle à 90 degrés l'une par rapport à l'autre.

Références

- [1] Deutsch, A., Kopcsay, G. V., Restle, P. J., Smith, H. H., Katopis, G., Becker, W. D., ... & Knebel, D. R. (1997). When are transmission-line effects important for on-chip interconnections?. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 45(10), 1836-1846.
- [2] Y. Liu, V. Pano, D. Patron, K. Dandekar, et B. Taskin, « Innovative propagation mechanism for inter-chip and intra-chip communication », in 2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Cocoa Beach, FL, USA, avr. 2015, p. 1-6.
- [3] V. Pano, I. Tekin, I. Yilmaz, Y. Liu, K. R. Dandekar, et B. Taskin, « TSV Antennas for Multi-Band Wireless Communication », *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.*, vol. 10, no 1, mars 2020
- [4] El Masri, I., Martin, P. M., Le Gouguec, T., Allanic, R., & Quendo, C., « Caractérisation électromagnétique du canal de propagation dans la bande millimétrique pour des réseaux sans fils sur puce », in XXIèmes Journées Nationales Microondes, May 2019.
- [5] D. N P et K. L. Sudha, « Analysis of single and multiple on-chip antenna for intra-chip wireless communication with four antenna transceiver model », *IJATEE*, vol. 8, no 80, p. 874-886, juill. 2021.
- [6] R. S. Narde, J. Venkataraman, A. Ganguly, et I. Puchades, « Intra- and Inter-Chip Transmission of Millimeter-Wave Interconnects in NoC-Based Multi-Chip Systems », *IEEE Access*, vol. 7, p. 112200-112215, 2019.
- [7] AL-ALEM, Yazan, KISHK, Ahmed A., et SHUBAIR, Raed M., « One-to-two wireless interchip communication link. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* », 2019, vol. 18, no 11, p. 2375-2378..
- [8] El Masri, Ihsan, et al., « A CMOS-Compatible Solution for Propagation Channels on Silicon in the mm-Wave Band. », 2020 50th European Microwave Conference (EuMC). IEEE, 2021.
- [9] T. Shinde, S. Subramaniam, P. Deshmukh, M. M. Ahmed, M. Indovina, and A. Ganguly, « A 0.24pJ/bit, 16Gbps OOK Transmitter Circuit in 45-nm CMOS for Inter and Intra-Chip Wireless Interconnects, » in *GLSVLSI'18*, Chicago, IL, USA, 2018, pp. 69-74.
- [10] El Masri, I., Martin, P. M., Mondal, H. K., Allanic, R., Le Gouguec, T., Quendo, C., ... & Diguët, J. P. (2018, October). Accurate channel models for realistic design space exploration of future wireless NoCs. In *2018 Twelfth IEEE/ACM International Symposium on Networks-on-Chip (NOCS)* (pp. 1-8). IEEE.