電子機器のイミュニティシミュレーション

市川 浩司*

Immunity Simulation for Electronics Equipment

Kouji ICHIKAWA*

* 株式会社デンソー研究開発3部EMC開発室（〒448-8661 愛知県刈谷市昭和町1-1）

* EMC Engineering R&D Department, Corporate R&D Division 3, DENSO CORPORATION (1-1 Showa-cho, Kariya-shi, Aichi 448-8661)

1. まえがき

電子機器の信頼性を担保する性能のひとつとして、EMC性能の重要性が高まっている。特に車載電子機器では市場環境において、想定外の動作（誤動作）に至らぬよう、厳しい試験環境下でEMC（イミュニティ）性能を確認している。ただし、このEMC試験に対し、十分な性能を有する機器を設計することは容易なことではなく、試行錯誤を繰り返しているのが実情である。このような状況では、製品開発期間の長期化や開発工数が増加し、QCDの観点において、競争力ある製品の開発は難しい。さらに昨今の電子機器は、熱設計や低コスト化、小型化への対応など、EMC性能と同時に解決すべき設計課題が山積している。これらの課題に対応できる設計技術の構築は、競争力ある製品開発に必須の要件であり、特にEMC性能に対する設計技術の構築は期待が大きい。

2. 車載電子機器のイミュニティ性能

電子機器、特に車載電子機器のイミュニティ性能の課題について述べる。車両にはハーネスと呼ばれる配線の束が配索されている。このハーネスが車両ボデーとともに高周波電流の経路になり、電子機器を誤動作させる要因になる。このため、車載電子機器は、車載環境を想定した図1(a)に示したBCI試験（ISO 11452-4¹⁾など）や図1(b)に示したアンテナ照射（ALSE）試験（ISO11452-2²⁾など）を実施し、イミュニティ性能の確認をしている。もちろん、他の伝播経路、例えば、車内外からの電磁波がハーネスを介さずに直接電子機器に影響を与える経路も考えられるが、本論文では車載電子機器の特徴であるハーネス、ボデーによる高周波電流伝播の影響について検討する。

電子機器において、十分なイミュニティ性能を設計するには、ハーネスからの電流伝播がプリント配線板にどの程度、どの部位に伝播するかを把握することが必要である。そしてその伝播量がイミュニティ性能の低い部位（例えば

(a) 束線電流注入 (BCI: Bulk Current Injection) 試験法

(b) アンテナ照射 (ALSE: Absorber-lined shielded enclosure) 試験法

図1. 車載電子機器 イミュニティ試験法 (ISO 11452)

IC 部品) の耐量を超えないように、シミュレーションなどを活用して設計することが必要である。しかし、このようなシミュレーションの実現は容易ではない。イミュニティ性能の設計検討を進めるには、対象となる電子回路部やICのイミュニティ性能を把握しモデリングする必要がある、さらに短時間で解析する手法を開発する必要がある。

ICのエミッション性能については、LECCS (Linear Equivalent Circuit and Current Source^{3),4)} や ICEM (Integrated Circuit Electromagnetic Model^{5),6)} などのモデルで表現することが提案されている⁷⁾。これらは、IC内の大規模で複雑な回路動作によって生じる高周波電流特性を、ICの内部等価回路と内部電流源で表現したEMIシミュレーション用のモデルである。このシミュレーションモデルを線形回路で表現することにより、プリント配線板上に伝播する高周波電流を高速に計算することが可能になる。車載電子機器におけるエミッション性能解析の一例を図2に示す。このようなシミュレーションを可能にするエミッションモデルの有効性は、多くの論文^{8)~10)}で示されているが、一方でイミュニティシミュレーションを目的としたモデルの提案は少ない¹¹⁾。

(a) 車載電子機器 (b) コネクタ部のノイズ伝播量
図2. 車載電子機器 エミッションシミュレーション例

(a) ICのイミュニティ性能試験 IEC 62132-4: DPI (Direct RF Power Injection)法

(b) IC内部の電位評価

図3. ICの誤動作メカニズム評価システム

本報告では、まず、イミュニティ性能を表現したICのシミュレーションモデルを提案する。さらに、このモデルを用いてプリント配線板への高周波電流伝播経路をシミュレーションで解析した結果を報告し、電子機器のイミュニティ性能を予測するシミュレーションの実現性について述べる。

3. ICのイミュニティモデルの検討

電子機器のイミュニティ、つまり誤動作を解析するために必要なICモデルについて検討する。電子機器（特に車載電子機器）におけるICの誤動作は、機器外部からの電流伝播、あるいは電位変動による影響が大きい。この影響を解析するために、DPI (Direct RF Power Injection) 法 (IEC 62132-4)¹²⁾を参考とした電力印加するシステム (図3(a))と電力印加時にIC内部の電位変動をモニタするシステム (図3(b))^{13),14)}を構築した。これはチップ内部にデジタル回路とその回路の電源変動を解析するオンチップ雑音検出部となる評価用ICを試作した。

100 MHzで動作するデジタル回路に対して100 MHz, 800 MHzの外乱を印加し、電源電位を変動させた際のIC内部の電源系配線、クロック信号を観測した結果を図4に示した。外乱によりIC内部の電源が変動し、その影響による波形の乱れが観測された。IC内部の回路動作を考慮すると、この電源および信号の乱れが誤動作の要因の1つであると

図4. 外乱印加時のIC内部電位変動評価結果

考えている。特に電源変動によるアナログ回路の特性変化、クロック信号／デジタル信号におけるジッターの発生が原因で誤動作に至ることは推定できる。この仮定に基づき、ICが誤動作するパラメータとして、許容電源変動量を定義することとした¹⁵⁾。ただし、ICの誤動作の定義によって、許容電位変動量は一意な値ではなく、また、許容電位変動量で定義すること自体が適さない現象も存在することに留意しなければならない。しかし、許容電位変動量をICのイミュニティ性能を表すパラメータとすることで、システム設計者はICの詳細な回路動作に言及することなく、プリント配線板のイミュニティ性能を簡易にシミュレーションで確認することが可能になる。電子機器を設計する情報として、大変有効なパラメータである。IC内部の電源配線における許容電位変動量をパラメータとする場合、ICベンダーからこの情報を入手しなければならないが、そのような情報が流通される環境にはまだない。このため、ICを図3(a)で示したDPI法で許容入力電力を評価し、結果とICの内部インピーダンスから、IC端子における許容電位変動量を算出した。

4. プリント配線板解析への適用

ICのイミュニティ性能をLSI内部の線形等価回路とともに許容電位変動量で表現することを前章で提案した。この線形等価回路についてはエミッション性能、イミュニティ性能に共通するモデル要件である。マイコンのエミッション性能をモデル化した線形等価回路の例を図5に示す。このモデルは各電源-接地端子間のインピーダンス等価回路とともに、高周波電流源をJ1, J2, J3として示している。また、C_{ci}, C_{ip}で示した容量成分は、それぞれLSIのチップとダイサポート部間の寄生容量とLSI (ダイサポート部)とプリント配線板間の寄生容量である。この容量成分を考慮しないと高周波数帯域でエミッション性能のシミュレーション精度が低下することを確認している¹⁶⁾。この線形等価回路を用いてイミュニティ性能をシミュレーションした結果を図6(a)に示す。これは、評価用電子機器のコネクタ部に外部から電力が印加された際のプリント配線板の電流伝播経路をシミュレーションで求めた結果である。また、図6(a)には同条件で実測した結果も合わせて示した。実測結果は微小磁界プローブによる基板上、約1 mm上の近傍磁界の評価結果である¹⁷⁾。直接高周波電流を評価した結果

図5. IC（マイコン）のエミッション性能モデル

図6. DPI評価時のIC内部の電位変動評価結果

とは異なるが、伝播経路の比較としては有効であると考えられる。シミュレーションの結果と比較すると、よく一致している結果を得ることができた。また、この経路を考慮してコンデンサを実装し、イミュニティ性能が改善した例を図6(b)に示した。このような結果からICのイミュニティモデルを用いて、伝播経路をシミュレーションすることが有効であるといえる。

5. イミュニティ試験予測

前章では、ICのイミュニティ性能モデルを用いてプリント配線板の伝播経路特性をシミュレーションで確認できることを示した。車載電子機器は、このプリント配線板を樹脂あるいは金属の筐体におさめ、2章で示したBCI法などで試験している。この試験時の合否判定が予測できるシミュレーション方法について検討を行った。製品の設計段階でEMC試験の結果を予測することが可能になれば、車載電子機器の開発において、EMCに関するQCDを向上させることができる。ただし、製品設計時にシミュレーションを活用するには、計算負荷が低く短時間で結果が得られ

図7. 電子機器のEMC試験結果の予測（BCI試験法の例）

ることが必要である。

イミュニティ試験に限らず、EMC試験では試験環境（ハーネス線種や長さ、設置方法、BCIプローブやアンテナの種類や位置、LISNなど）は、電子機器ごとに一定に保たなければ試験の再現性は確保できない。各電子機器において試験環境に変わらないという前提であれば、試験系の電気的特性も変化しない。この考え方に基づき、試験環境をマクロなモデルで表現し、計算リソースを削減するシミュレーション方法を図7¹⁸⁾に示した。この方法により、車載電子機器がイミュニティ試験時に電子機器が受ける影響を3次元電磁界解析ではなく、回路解析でも可能にし、計算時間の短縮が可能となる。また、プリント配線板に加えて金属筐体を含めて解析しなければならない場合においても、電子機器のみを3次元で表現し、試験系のマクロモデルと組み合わせることで、電磁界シミュレーションの計算リソースを電子機器に集中させることができる。

図8にシミュレーション解析でBCI試験時の結果を予測した例を示した。供試品のアナログ出力信号をモニタし、その出力値を試験結果として図示した。シミュレーションでは、仕様条件でBCI試験をした際のICの電源端子の電位変動量を計算し、ICの許容値より変動量が大きく計算された場合に誤動作が生じるとして、その帯域を図示した（ただし、この機器は、本シミュレーション方法の有効性の確認のために対策素子などは削除した状態で試験とシミュレーションを実施した）。図9には、アンテナ照射試験法によるイミュニティ試験性能を予測した例を示した。これらの結果では周波数がややシフトしている帯域や高周波帯で計算できていない周波数が存在するが、誤動作の傾向は予測できている。試験結果とシミュレーション結果の相関性をさらに高くするには、ICのモデルの改良やハーネスの設置などの試験環境の整備と維持が重要であり、そしてこの環境をマクロモデルとして管理することが必要である。

6. まとめ

本論文ではICのイミュニティモデルをIC内部の線形なインピーダンス等価回路モデルと許容電位変動量で表現することで、電子機器に伝播する高周波電流経路がシミュレ

図8. BCI (Bulk Current Injection) 試験結果予測

図9. アンテナ照射試験結果予測

ション可能であることを示した。さらにこのモデルを用いて、イミュニティ試験結果が予測でき、電子機器設計での活用可能性を示した。ただし、本手法を設計に活用する際には、シミュレーションモデルの精度と有効な周波数範囲、およびシミュレーションの対象となる誤動作現象を考慮する必要がある。

競争力ある電子機器を開発するために、今回提案したICのイミュニティ性能モデルを用いて、IC設計とプリント配線板設計、さらにシステム（車両）設計者間の溝を埋めて開発を進めることが必要である。厳しいコスト制約、設計制約のなかで、IC、電子機器、車両設計者が互いにEMCに関する情報を共有し製品設計することが、今後ますます求められる。その設計情報のひとつとして、今回提案しているICのEMC性能モデルはシステム設計には有効であり、このようなモデルの流通が一般的となることを期待する。

(2011.4.11-受理)

文 献

- 1) ISO 11452-4: 2001 Road Vehicles—Component Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy—Part 4: Bulk Current Injection (BCI)
- 2) ISO 11452-2: 2004 Road Vehicles—Component Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy—Part 2: Absorber-Lined Shielded Enclosure
- 3) 東 亮太, 五百旗頭健吾, 津田剛宏, 市川浩司, 中村克己, 豊田啓孝, 古賀隆治: “配線パターンを変化させた基板による多電源ピンLECCS-coreモデルの評価,” 電子情報通信学会技術研究報告 EMCJ, 環境電磁工学, Vol. **108**, No. 132, pp. 43–48, 2008
- 4) Y. Fukumoto, Y. Takahata, O. Wada, Y. Toyota, R. Koga, and T. Miyashita: “Power Current Model of LSI/IC Containing Equivalent Internal Impedance for EMI Analysis of Digital Circuits,” IEICE Transactions on Commun., Vol. **E84-B**, No. 11, pp.

3041–3049, 2001

- 5) J. L. Levant: “EMC Assessment at Chip and PCB Level: Use of the ICEM Model for Jitter Analysis in an Integrated PLL,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. **49**, No. 1, pp. 182–191, 2007
- 6) C. Lochot: “ICEM: A New Standard for EMC of IC Definition and Examples,” 2003 IEEE Sympo. on Electromagnetic Compatibility, Boston, USA, August 2003
- 7) IEC 62433-2 EMC IC Modelling—Part 2: Models of Integrated Circuits for EMI Behavioural Simulation—Conducted Emissions Modelling (ICEM-CE)
- 8) 小川雅寿, 和深 裕, 遠矢弘和: “LSI電源モデルを用いた解析方法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 EMCJ, Vol. **100**, No. 279, pp. 7–12, 2000
- 9) K. Ichikawa: “EMI Analysis of a PCB for Automotive Equipment Using an LSI Power Current Model,” 4th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, pp. 38–42, Mar. 2004
- 10) Y. Mabuchi, A. Nakamura, K. Ichikawa, T. Uno, and O. Wada: “LECCS (Linear Equivalent Circuit and Current Source) Modeling Technique for ICs,” Proceedings of EMC Zurich, pp. 781–799, 2005
- 11) K. Ichikawa: “Simulation of Integrated Circuit Immunity with LECCS Model,” 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 677–682, Jan. 2006
- 12) IEC 62132-4 Integrated Circuits—Measurement of Electromagnetic Immunity—150 kHz to 1 GHz—Part 4: Direct RF Power Injection Method
- 13) M. Nagata: “A Built-in Technique for Probing Power Supply and Ground Noise Distribution within Large Scale Digital Integrated Circuits,” IEEE Transactions on Solid-State Circuits, Vol. **40**, pp. 813–819, 2005
- 14) 永田 真, 岩田 穆: “デジタルLSI電源ノイズのオンチップ観測とシミュレーション技術,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **12**, No. 7, pp. 581–586, 2009
- 15) K. Ichikawa, Y. Takahashi, Y. Sakurai, T. Suda, I. Iwase, and M. Nagata: “Measurement-Based Analysis of Electromagnetic Immunity in LSI Circuit Operation,” IEICE Transactions on Electronics, Vol. **E91-C**, No. 6, pp. 936–944, 2008
- 16) K. Ichikawa: “EMI Model Improvement Taking LSI Package Structure into Consideration,” IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 276–279, August 2006
- 17) EMV-200, 日立ディスプレイズ
<http://www.hitachi-displays.com>
- 18) 平山雅人, 前田 登, 市川浩司, 稲垣正史, 櫻井礼彦: “イミュニティ試験装置のSパラメータによるモデル化,” 電子情報通信学会技術研究報告 EMCJ, 環境電磁工学, Vol. **105**, No. 511, pp. 7–10, 2006