

プリント基板におけるノイズ低減設計

Noise Reduction Design in Printed Circuit Boards

南 保 貴 志*

Takashi NAMBO

要 旨

車載電子機器から発生する高周波ノイズの低減を目的に、高周波信号の振舞いの原理、原則に基づいた基板設計手法を、基板設計ガイドラインとしてまとめた。

電子回路の動作により発生した高周波ノイズをプリント基板の広範囲に伝搬させない、ノイズの周波数と共振しアンテナとなるノイズ放射源をつくらない、という基本的な考えを基に構築したものである。

基板設計ガイドラインのノイズ低減効果を確認するために、FM 帯に対するノイズ対策部品が多く実装されている情報処理 Electronic Control Unit に、基板設計ガイドラインに沿ってプリント基板を再設計したものを試作し、プリント基板の差異によるノイズの低減効果の確認をおこなった。

その結果、設計ガイドラインに沿って設計したプリント基板を使用した情報処理 Electronic Control Unit には、FM 帯以上の高周波帯域に最大約 10 dB μ V/m のノイズ低減効果があることが確認された。

ABSTRACT

To reduce the amount of high-frequency noise generated in automotive electronics, we have compiled circuit board design techniques that are based on the physical properties of high-frequency signals into a set of circuit board design guidelines.

These guidelines were created according to a fundamental approach toward noise reduction, which dictates that high-frequency noise generated as a result of electronic circuit operation must not be allowed to propagate widely through the printed circuit board, and noise radiation sources that resonate with the noise frequency and act as antennas must not be created.

To check the noise reduction effect of the circuit board design guidelines, we used them to redesign the printed circuit board of an information-processing electronic control unit that normally has a large number of FM bandwidth noise suppression parts mounted therein. Using this test ECU, we examined the noise reduction effect resulting from using the redesigned printed circuit board.

As a result, we were able to confirm that an information-processing electronic control unit using the printed circuit board that was designed in accordance with the design guidelines exhibited a noise reduction effect of up to approximately 10 dB μ V/m in the high-frequency bandwidths at and above the FM bandwidth.

1. ま え が き

現在、自動車には多くの電子機器が搭載され、さまざまな機能を実現するのに役立っている。一方、車載電子機器の高性能化への要求に伴いデジタル回路動作の高速化が進んでいる。このため、車載電子機器から発生する高周波ノイズ対策も重要となっており、開発の後工程でノイズ課題が顕在化し対策に苦慮することも散見される。課題発生後の対策には、多くの時間と労力を費やすこととなるため、設計初期段階で対策を講じておくことが求められている。この対策として、プリント基板をノイズ低減効果が確認された設計ガイドラインに沿って設計する手法⁽¹⁾がある。

プリント基板上での高周波信号の振舞いに着目し、高周

波ノイズを低減するための設計指針を基板設計ガイドラインにまとめた。

車載電子機器からの漏えい電磁ノイズが車載 FM ラジオに干渉した場合、可聴域の雑音となって現れ、車の商品性を損なうこととなる。このため、車載電子機器から漏洩する FM 帯 (76 MHz - 108 MHz) の電磁ノイズを、商品性の観点から抑制する必要がある。したがって、車載電子機器設計者にとって基板設計ガイドラインが FM 帯のノイズ低減に有効で有るか否かは、強い関心のあるところである。

そこで、基板設計ガイドラインが FM 帯のノイズ低減に対して有効であるかについての検証をおこなった。

FM 帯用のノイズ対策部品が多く実装されている情報処理 Electronic Control Unit (ECU) に対し、基板設計ガイド

*四輪 R&D センター

ラインに沿ってプリント基板を再設計したものを試作し、プリント基板の差異によるノイズの低減効果の確認をした。

以下にその内容について報告する。

2. プリント基板における高周波信号の振舞い

すべての導体はインダクタンスを持っており、低周波信号ではその影響を無視できるが、高周波信号では無視することができない。したがって、高周波ノイズの低減を考えるにあたって、プリント基板上で回路形成している導体の回路パターンはすべてインダクタンスをもっていることを考慮する必要がある。Fig. 1はプリント基板に形成されているグランドプレーンとその上に実装されているIntegrated circuit(IC1, IC2), およびIC1からIC2に向かう信号の伝送路に相当する回路パターンを示す。ただし、グランドプレーンとIC1, IC2の正電源および信号端子、回路パターンは絶縁されているものとする。

IC1からIC2への回路パターンを信号が伝導する場合、その帰還電流はグランドプレーンを通してIC2からIC1へ向かって流れる。信号が低周波の場合、多くの電流は図中の紫線で示されている最短距離を流れる。これは、低周波信号におけるインピーダンスの支配的要素がグランドプレーンの直流抵抗成分となるためである。

これに対し、IC1が高速で動作するデジタル回路であり、その動作によって発生する高周波ノイズが回路パターンを伝導する場合、その帰還電流は図中の青線で示されたように回路パターンに沿った経路に多くの帰還電流が流れる。これは、高周波におけるインピーダンスの支配的要素がグランドプレーンのインダクタンス成分となるためである。

Fig. 2に示したように2線からなる信号伝送線路を考え、それぞれのインダクタンスを L_o , L_r とした場合、両者の距離が近いほど相互インダクタンス M が大きくなる。このため、帰還線路のインダクタンスは $L_r - M$ と小さくなるので、高周波信号に対するインピーダンスは小さくなる。

これと同様に、グランドプレーンにおいても信号線の直近は高周波インピーダンスが小さくなるため、高周波ノイ

ズの帰還電流は信号線に沿ったグランドプレーンに多く流れる振舞いをする。

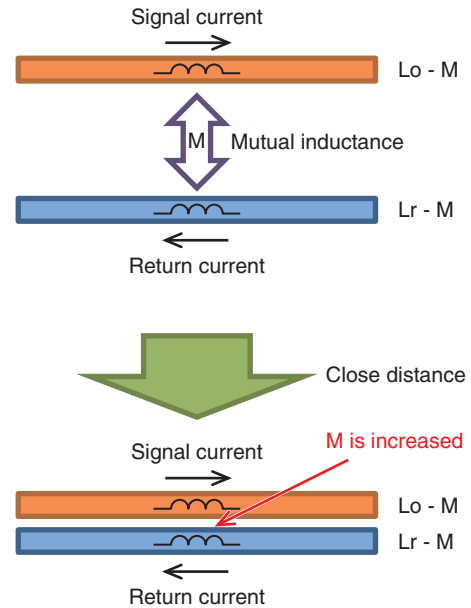


Fig. 2 Inductance of printed circuit with high frequency signal

3. 基板設計ガイドライン

高周波信号の振舞いをもとに、高周波ノイズの帰路のインピーダンスを低減し、コモンモード電流の発生を抑制する。プリント基板パターン形状に起因するアンテナ形成を防ぐ。以上のことを基本として基板設計ガイドラインを構築した。

3.1. 伝導モードと放射ノイズの強度

信号の伝わり方(伝導モード)には、ディファレンシャルモードとコモンモードがある。導体から放射されるノイズの大きさは、導体を伝わる高周波ノイズの伝導モードの違いによって、大きさが異なる。

3.1.1. ディファレンシャルモード放射

ディファレンシャルモードは、信号パターンを往路、グランドパターンを帰路とし、往路と帰路で流れる電流の向きが逆となる伝導モードである(Fig. 3)。

ディファレンシャルモード電流 I_d による放射電界強度 E_d [V/m]は式(1)で近似できる。

$$E_d = 1.316 \times 10^{-14} \times \frac{I_d \times f^2 \times S}{d} \quad (1)$$

I_d : ディファレンシャルモード電流 [A]

f : 信号周波数 [Hz]

S : 往路-帰路のループ面積 [m^2]

d : ノイズ測定点までの距離 [m]

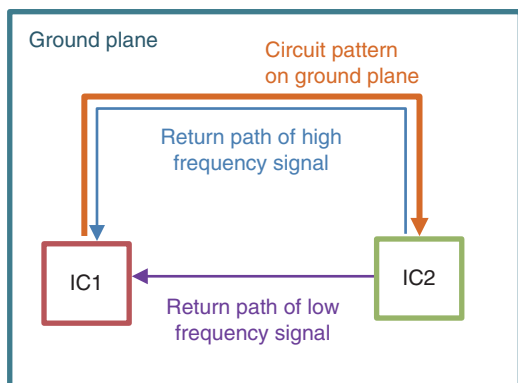


Fig. 1 Return path of signal on printed circuit board

ここで、以下の条件のときのディファレンシャルモード電流による放射電界強度を求めると、

$$I_d = 1 \text{ mA}$$

$$f = 100 \text{ MHz}$$

$$S = 0.3 \text{ cm}^2$$

$$d = 10 \text{ m}$$

$$E_d = 0.3948 \text{ } \mu\text{V/m}$$

となる。

3.1.2. コモンモード放射

コモンモードは、往路、帰路に対し流れる電流の向きが同一となる伝導モードである (Fig. 4)。

コモンモード電流 I_c による放射電界強度 E_c [V/m] は式 (2) で近似できる。

$$E_c = 1.257 \times 10^{-6} \times \frac{I_c \times f \times l}{d} \quad (2)$$

I_c : コモンモード電流 [A]

f : 信号周波数 [Hz]

l : 配線の長さ [m]

d : ノイズ測定点までの距離 [m]

ここで、以下の条件のときのコモンモード電流による放射電界強度を求めると、

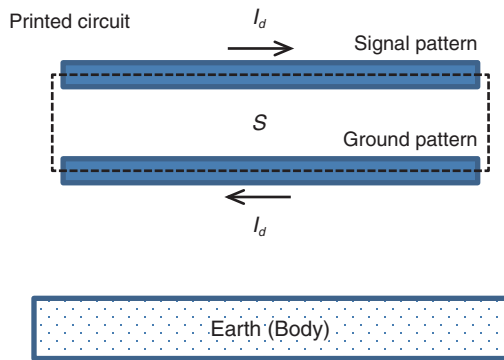


Fig. 3 Simple model of differential mode current

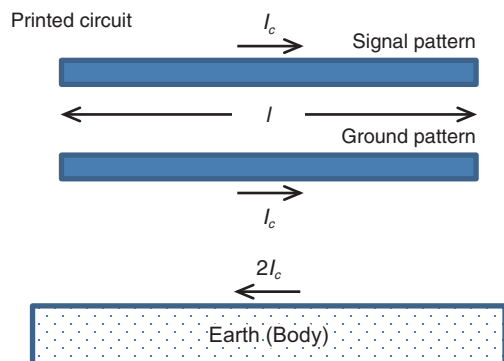


Fig. 4 Simple model of common mode current

Table 1 Conductive pattern length for each frequency

Signal frequency [MHz]	Conductive pattern length [cm]					
	$\lambda/4$	$3\lambda/4$	$5\lambda/4$	$\lambda/2$	$3\lambda/2$	$5\lambda/2$
25	136.8	410.5	684.2	273.7	821.0	1368.4
50	68.4	205.3	342.1	136.8	410.5	684.2
100	34.2	102.6	171.0	68.4	205.3	342.1
200	17.1	51.3	85.5	34.2	102.6	171.0
500	6.8	20.5	34.2	13.7	41.1	68.4
1000	3.4	10.3	17.1	6.8	20.5	34.2

$$I_c = 1 \text{ mA}$$

$$f = 100 \text{ MHz}$$

$$l = 10 \text{ cm}$$

$$d = 10 \text{ m}$$

$$E_c = 1257 \text{ } \mu\text{V/m}$$

この例の場合、同じ大きさのノイズ電流においてコモンモード電流による放射ノイズは、ディファレンシャルモード電流による放射ノイズに対し放射電界強度が約 3000 倍大きいことがわかる。

したがって、コモンモード電流の発生を抑制することがノイズ低減において重要な要素のひとつとなる。

3.2. プリント基板パターンにより形成されるアンテナ

プリント基板上に、ある周波数 (波長) で共振する長さのパターンを形成してしまうと、そのパターンが効率的なアンテナとして機能し、強いノイズを放射する可能性がある。周波数に対する基板上の波長を式 (3) に示す。

$$\lambda = \frac{C}{f \times \sqrt{\mu \times \epsilon_r}} \quad (3)$$

λ : 波長 [m]

C : 光速 [m/s]

f : 信号周波数 [Hz]

μ : 比透磁率 [-]

ϵ_r : 比誘電率 [-]

ここで、比誘電率 $\epsilon_r = 4.8$ のガラスエポキシ基板において、ノイズの周波数に対して効率的なアンテナとなるパターン長の例を Table 1 に示す。

高周波ノイズに対しては比較的小さな基板においてもアンテナとなりうるパターンが形成される可能性が高いことがわかる。

また、Table 1 に示す長さに近いパターンについても、アンテナとしての効率は落ちるものの放射源となり得るため、FM 帯を含めた各帯域について、アンテナとなる意図しないパターンの形成には注意が必要である。

3.3. プリント基板設計ガイドライン

3.1. 節, 3.2. 節で述べた2点を踏まえ, コモンモード電流の抑制と基板パターンのアンテナ化を避けるための設計指針を定めた。

3.3.1. 節にプリント基板上でコモンモード電流を抑制するための原理, 3.3.2. 節にその原理に基づいて定めたガイドラインの一例を示す。

3.3.1. コモンモード電流の抑制

Fig. 5 の IC1, IC2 はプリント基板に実装されている IC を示し, IC1 から IC2 へはプリント基板の配線パターンを通して電気信号が伝達される。Z_o は電気信号の往路の配線インピーダンス, Z_r は帰路の配線インピーダンス, Z_c はアース (車両のボデーなど) のインピーダンス, I_d はディファレンシャルモード電流, I_c はコモンモード電流を示す。Fig. 5 のように往路の電流 (I_d + I_c) と帰路 (I_d - I_c) の電流の大きさが異なる場合, その差分 (2I_c) だけコモンモード電流が発生する。

したがって, Z_r をできる限り小さくすれば I_d が大きくなり, その結果 I_c を小さくすることができる。

基板設計ガイドラインでは, FM 帯以上の高周波信号に対し帰路のインピーダンス Z_r が小さくなるような設計指針を具体的に示している。

3.3.2. ガイドラインの例

Fig. 6 のように信号線直下のグラウンドプレーンにスリットがあるような回路パターンの場合, 高周波の帰還電流は信号線に沿って進もうとするが, スリットの部分で帰還経路が分断され帰還電流の迂回が発生する。このため, 帰路のインピーダンスが大きくなりコモンモード電流の発生要因となる。また, スリット部分では電磁界が不連続となるため電磁界が広がり, ノイズの放射源ともなる。これは, スロットアンテナと同じ現象である。

プリント基板上でこのようなスリットが生じる配線設計の具体的な例としては, Fig. 7 のように多数のビアが隣接

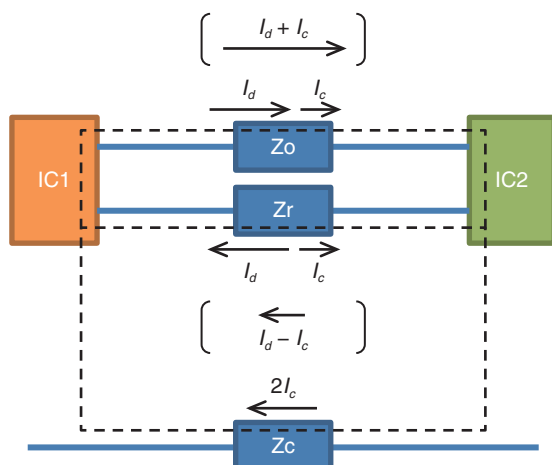


Fig. 5 Common mode current on printed circuit board

していると, 大きなスリットが発生する場合がある。

このため, 設計ガイドラインでは多数のビアを隣接する場合, Fig. 8 のようにビアに間隔を設け帰還電流の帰路を確保するように指示をしている。

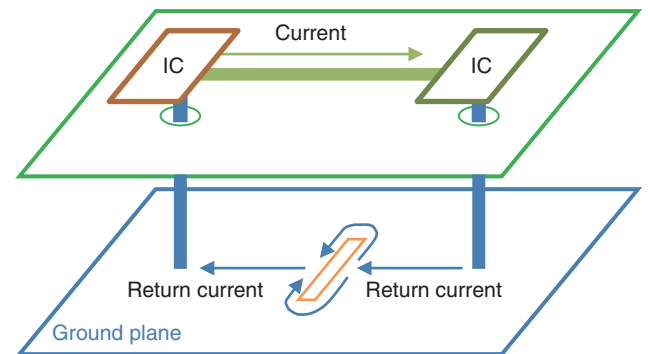


Fig. 6 Effect of slit in ground plane

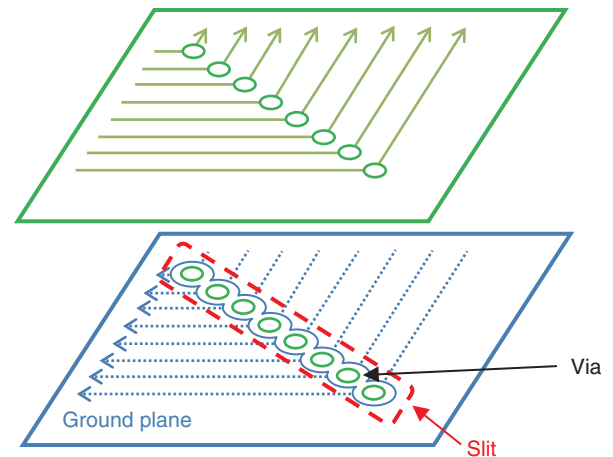


Fig. 7 Plurality of adjoining vias

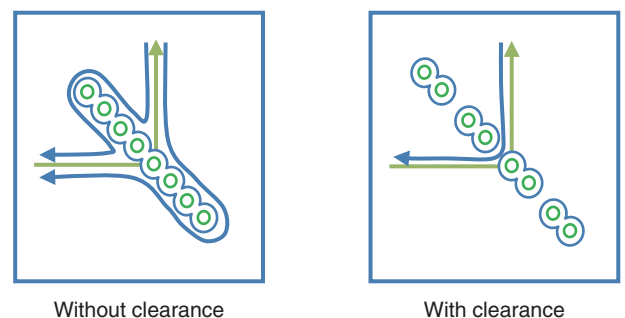


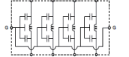
Fig. 8 Secure return path

4. プリント基板の試作

4.1. ノイズ比較試験に使用した基板の回路構成

基板設計ガイドラインがノイズ低減に有効であるかを検証するために, 以下のような ECU を試作した。

Table 2 Removed noise suppression parts

Type	Equivalent circuit	Quantity
Three-terminal filter		4
Capacitor		4
CR		2
Ferrite bead		6
Ferrite bead array		13
Three-terminal filter array		5

FM 帯ノイズを低減するために多くのノイズ対策部品を使用している従来の ECU に対し、基板設計ガイドラインに沿って基板を再設計した ECU を試作した。オリジナルの ECU および基板を再設計した ECU の双方とも、ノイズ対策部品は実装していない。これは、基板設計違いのみによる両者の単体ノイズを比較するためである。

次に ECU の回路構成を Fig. 9 に示す。回路は、Micro Processing Unit(MPU)、ゲートアレイ、Random Access Memory (RAM)、電源から構成され、コネクタを介しワイヤハーネスと接続されている。プリント基板はノイズ伝搬経路となりやすい信号バスなど、多くの高速信号配線を有しており、また、アルミニウム製のきょう体に収められている。

4.2. ノイズ対策部品

プリント基板設計の差異のみによるノイズ低減効果を確認するために外したノイズ対策部品を、Table 2 に示す。

オリジナルの ECU (ECU1) と基板設計ガイドラインに沿ってプリント基板を再設計し試作した ECU (ECU2) を用いて、ノイズ低減効果の有無について確認試験をおこなった。

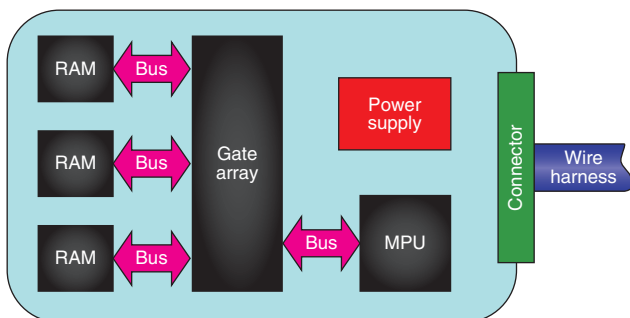


Fig. 9 ECU circuit configuration

5. ノイズ低減効果の確認結果

ECU1 と ECU2 のノイズ測定は、3 m 法電波暗室にて CISPR25 ALSE 規格⁽²⁾準拠で測定を実施した。

それぞれのノイズ測定結果を、Fig. 10, Fig. 11 に示す。両者を比較すると、ECU2 のノイズ測定結果は、ECU1 に対し約 70 MHz からノイズの低減効果が見られており、Fig. 10 に対し Fig. 11 では FM 帯のノイズが最大約 10 dB μ V/m 低減しているのが確認された。また、FM 帯以上の帯域においてもノイズ低減効果が得られていることがわかる。

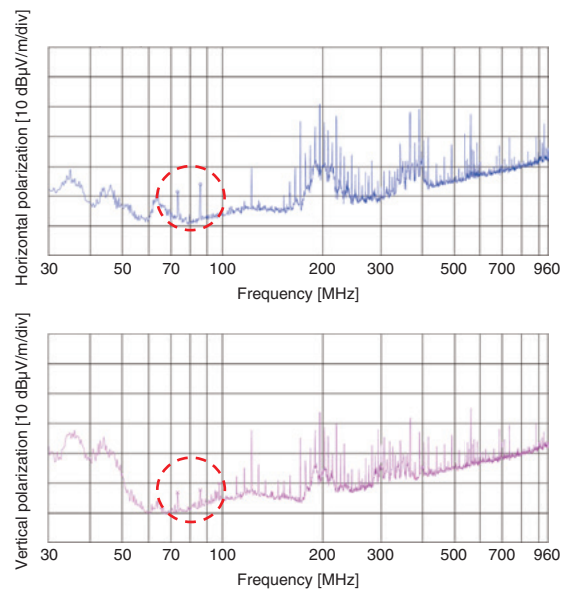


Fig. 10 Noise measurement result (ECU1)

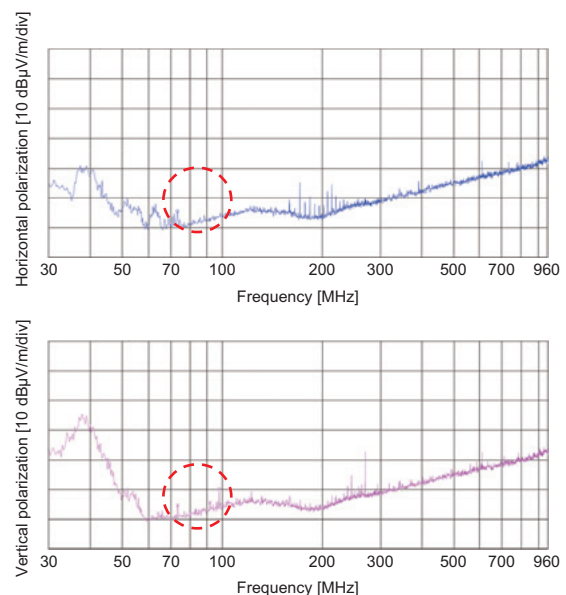


Fig. 11 Noise measurement result (ECU2)

以上の結果より、基板設計ガイドラインに沿った基板設計手法は、FM 帯以上の高周波ノイズの低減に有効であることが確認された。

6. 設計プロセス

基板設計ガイドラインに沿った設計において、適正に設計するにはチェック作業なども含め多くの時間を要する。このため、基板設計ガイドラインを運用した場合の設計時間は、運用しなかった場合に対し約 1.5 倍多く必要であった。しかし、後工程でのトライアンドエラーによるノイズ対策、ノイズ課題による基板改版や試作数などが削減できると考えられ、トータルで考えるとそのメリットは大きい。

7. まとめ

プリント基板の設計において、高周波ノイズ低減効果が期待される設計指針を基板設計ガイドラインとしてまとめた。

基板設計ガイドラインに沿って設計したプリント基板を用いた ECU に、FM 帯で最大約 10 dB μ V/m のノイズ低減効果が確認された。

FM 帯以上の高周波帯にもノイズ低減効果があり、ECU 回路の処理能力の高速化にともなう高周波ノイズの対策として、基板設計ガイドラインに沿った設計が有効であることがわかった。

設計ガイドラインに沿った基板設計は、後工程でのノイズ対策を基板設計時にフロントローディングする開発手法である。設計に時間をかけ、後工程の対策期間と費用を削減することを目的としている。そのため、設計期間が長くなることへの理解と、設計ガイドラインを効果的に運用した設計とするための体制づくりが重要であると考ええる。

参考文献

- (1) <http://www.iri-tokyo.jp/joho/kohoshi/houkoku/h21/documents/n0924.pdf>, 2009
- (2) 山田和謙, 池上利寛, 佐野秀文:放射エミッション測定方法 (ALSE 法), EMC 入門講座, 電波新聞社, p. 222-228(2009)

■ 著 者 ■



南保貴志