

機関番号：3 2 6 4 4

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：2 1 7 6 0 2 1 9

研究課題名（和文）FM 回転電磁界を用いた電子機器の感受性評価法とその応用

研究課題名（英文）Development of Radiated RF Immunity/Susceptibility Test Method Using Rotating FM-EM Field and Its Applications

研究代表者

村野 公俊（MURANO KIMITOSHI）

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：6 0 3 6 6 0 7 8

研究成果の概要（和文）：外来電磁妨害波に対する電子機器の耐性（イミュニティ）・感受性を得るための手法として、周波数変調された回転電磁界（FM 回転電磁界）を印加電磁界として用いる新たな評価方法についての検討を行った。FM 回転電磁界の原理とその発生方法について明らかにするとともに、その基本特性について実験的に検証した。さらに、FM 回転電磁界を用いた電子機器の感受性測定を試行し、その有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：To obtain a detailed radiated RF immunity/susceptibility characteristic of electronic equipment, a new test method using a frequency modulated rotating electromagnetic field (rotating FM-EM field) as an incident EM field was proposed. The principle and the generation method of the rotating FM-EM field were examined, and the basic characteristics were experimentally clarified. Moreover, the susceptibility measurement of electronic equipment was conducted by using the rotating FM-EM field, and the effectiveness of the proposed method was verified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：電磁環境，EMC

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：回転電磁界，周波数変調，放射イミュニティ，感受性，EMC 測定，環境電磁工学

1. 研究開始当初の背景

電子機器の高機能化にともない、機器内部に実装される電子回路のデジタル化及び動作クロックの高速化が進んでいる。デジタル回路から放射される不要な電磁波は、アナログ回路に比べて広帯域な周波数成分を有しており、またクロックの高速化により従来よりも高い周波数成分を含むことが知られている。近年急速に普及が進む携帯情報端末は、他の電子機器に比べて小型であることから、機器内部で高密度に実装された電子回路間の電磁干渉がしばしば問題となるが、携帯情報端末の高機能化による機器内部の電磁環境の劣化は、従来の電磁干渉の問題をより複雑化させており、機器内部で発生する

「自家中毒現象」として注目されている。さらに、近年の携帯情報端末は回路の低電圧駆動により省電力化を実現しているが、これは回路間の自家中毒現象のみならず、外来電磁妨害波に対する電子機器の耐性（イミュニティ）の低下も招いており、誤動作を引き起こす原因となっている。

複雑化の一途を辿る電子機器周辺の電磁環境を改善するためには、電子機器から放出される不要な電磁波の抑制（エミッション問題）と、外来電磁妨害波に対する電子機器の耐性の向上（イミュニティ問題）の両面から検討する必要がある。電子機器に関する環境電磁工学（EMC）の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、電子機器に関する EMC の課題の一つであるイミュニティ問題を解決するため、外来電磁妨害波に対する電子機器のイミュニティ・感受性の新たな測定法について検討している。外来電磁妨害波に対する電子機器のイミュニティは電子機器の物理的構造・材質などに大きく左右されるため、シミュレーションによる予測が事実上困難であることから、被測定機器に対して実際に電磁波を印加することにより評価が行われる。電子機器のイミュニティ試験法については、既に国際規格にて規定されているが、これは定められた基準（イミュニティレベル）に対する電子機器の適合性を評価するための方法であり、得られた結果から機器のイミュニティ劣化の原因・メカニズムを探ることは困難である。外来電磁妨害波に対する電子機器のイミュニティを抜本的に改善するためには、まず電子機器のイミュニティ劣化の原因・メカニズムを知ることが必要であり、これを電子機器の設計に反映させることにより、外来電磁妨害波に対する電子機器の高イミュニティ化の実現が可能となる。このことから本研究では、電子機器の EMC 設計に供することのできる、実際の電磁環境を考慮した電子機器のイミュニティ特性・感受性評価法について検討している。

報告者らはこれまで、電子機器のもつイミュニティ特性・感受性をより詳細に得るために、偏波面が低速で 2 次元的に回転する電磁界（回転電磁界）を電子機器に印加する手法について検討をすすめている。これにより、外来電磁波の偏波面に対する電子機器のイミュニティ特性・感受性（イミュニティマップ）を短時間で容易に得ることができ、本研究ではこの手法をさらに発展させ、より複雑な実際の電子機器の使用環境を模擬できるように、周波数変調された回転電磁界（FM 回転電磁界）を用いる手法について提案している。FM 波は、変調信号に応じてその基本周波数が時間的に変化する信号であるため、デジタル機器に用いられる周波数拡散クロック（SSC）によって発生する電磁妨害波など、周波数が時間的に変動する信号を模擬することができる。つまり、FM 回転電磁界を用いることにより、周波数が時間的に変動する電磁界に対して、電子機器のイミュニティマップを得ることが可能になると考えられる。本研究では、この FM 回転電磁界を印加電磁界とする電子機器のイミュニティ特性・感受性測定法を提案するため、FM 回転電磁界の原理、発生方法及び本測定法の有効性を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

FM 回転電磁界を被測定機器への印加電磁

界とするイミュニティ特性・感受性測定方法を提案するにあたり、まず FM 回転電磁界の原理、発生方法及び基本特性について明らかにする。その後、原理に基づいて発生させた FM 回転電磁界を用いて被測定機器の感受性測定を試行し、提案手法の有効性について検討する。

4. 研究成果

(1) FM 回転電磁界の原理・発生方法

回転電磁界とは、その搬送波周波数よりも低い周波数で偏波面が 2 次元的に回転する電磁界のことであり、直交に配置された 2 つのアンテナの各々に、以下のような異なる 2 波の DSB-SC 波を給電することによって発生させることができる。

$$E_x = \sin\omega t \sin\Omega t \quad (1)$$

$$E_y = \sin\omega t \cos\Omega t \quad (2)$$

ここで、 ω は搬送波角周波数、 Ω は偏波面の回転角周波数である。一方、FM 回転電磁界は、以下に示す周波数変調された DSB-SC 波

（FM-DSB-SC 波）を用いることにより発生させることができると考えられる。

$$A_x = \sin(\omega t + m_f \sin\omega_s t) \sin\Omega t \quad (3)$$

$$A_y = \sin(\omega t + m_f \sin\omega_s t) \cos\Omega t \quad (4)$$

ここで m_f 及び ω_s は、それぞれ周波数変調における変調指数、変調信号の角周波数であり、最大周波数偏移を Δf とすると、 $m_f = \Delta f / f_s$ （ただし $f_s = \omega_s / 2\pi$ ）なる関係がある。

一般に DSB-SC 波はミキサを用いて容易に発生させることができるが、イミュニティ特性測定用の回転電磁界は、その回転周波数（ $\Omega / 2\pi$ ）が極めて低い周波数（例えば 1Hz 以下）に設定されるため、ミキサを用いた場合に発生する不要な周波数成分をフィルタ等で除去することが事実上困難である。そこで本研究では、アップコンバータなどを用いる新たな FM-DSB-SC 波の発生方法について検討した。式(3),(4)に示す FM-DSB-SC 波は、次式のように展開できる。

$$A_x = (1/2)[\sin\{(\omega + \Omega)t + m_f \sin\omega_s t\} + \sin\{(\omega - \Omega)t + m_f \sin\omega_s t\}] \quad (5)$$

$$A_y = (1/2)[\sin\{(\omega + \Omega)t + m_f \sin\omega_s t - (\pi/2)\} + \sin\{(\omega - \Omega)t + m_f \sin\omega_s t + (\pi/2)\}] \quad (6)$$

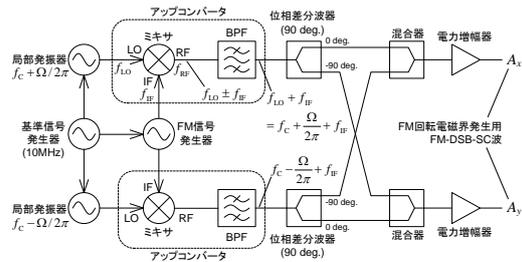


図1 FM 回転電磁界発生用 FM-DSB-SC 波発生装置のブロック図

式(5),(6)は、2波のFM-DSB-SC波が搬送波周波数や位相の異なる4波のFM波により構成されていることを示している。式(5),(6)に基づいて設計したFM-DSB-SC波発生装置のブロック図を図1に示す。この発生手法においては、2つのアップコンバータに入力する2波のLO信号にそれぞれ周波数差を持たせることにより搬送波周波数の異なる2波のFM波を発生させた後、位相差分波器を用いて位相差の異なる2波のFM波を発生させ、目的の4波のFM-DSB-SC波を得ている。本方式において利用されているミキサはDSB-SC波を直接得るためのものではないことから、フィルタによる除去が困難な不要信号成分を発生させないFM-DSB-SC波発生装置の構成となっている。

図2は、アップコンバータの出力をスペクトラムアナライザにより観測した結果の一例である。これは、搬送波周波数 $\omega/2\pi$ 及び回転角周波数 $\Omega/2\pi$ をそれぞれ1020 MHz, 1 Hzとし、またFM波の変調周波数 f_s 及び最大周波数偏移 Δf をそれぞれ1 kHz, 75 kHzに設定した場合の観測結果の一例である。アップコンバータの出力信号が $(f_s + \Delta f) \times 2$ に相当する帯域を有していることから、FM-DSB-SC波を構成するFM波が得られている様子を確認できる。

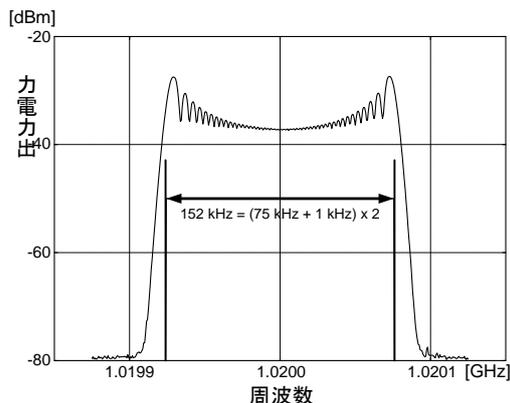


図2 スペクトラムアナライザによるアップコンバータの出力信号の観測結果

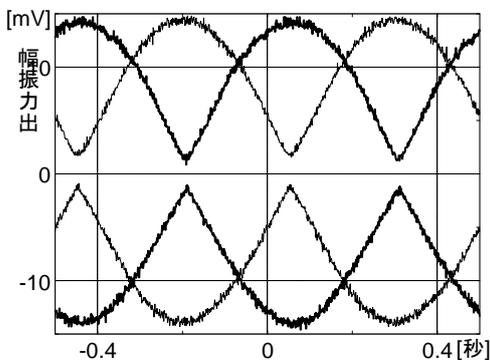


図3 オシロスコープによるFM-DSB-SC波の包絡線の観測結果

また図3は、本装置を用いて発生させた2波のFM-DSB-SC波の包絡線をディジタル化オシロスコープにより観測した結果である。2波の振幅が0.5秒の周期で交互に変動を繰り返していることがわかる。以上の結果から、本装置により目的のFM-DSB-SC波が得られることを確認できる。

さらに、本装置を用いて発生させた2波のFM-DSB-SC波を直交対数周期アレーアンテナの垂直・水平素子にそれぞれ給電し、6面電波暗室内にFM回転電磁界を発生させた結果、受信点においてこれらと同様の観測結果が得られたことから、検討した手法ならびに開発した装置によって、イミュニティ特性・感受性測定用のFM回転電磁界を発生できることが確認された。

(2) FM受信機の感受性測定による提案手法の有効性の検証

本研究で提案する手法の有効性は、FM受信機を被測定機器として、本手法を用いてその感受性測定を実際に行うことにより検証している。FM回転電磁界の放射源である直交対数周期アレーアンテナと、被測定機器を6面電波暗室内に配置し、被測定機器にFM回転電磁界を印加する。なお、被測定機器は6面電波暗室内のターンテーブル上に配置し、被測定機器の配置方向を回転させることによって、任意の偏波面のみならず、あらゆる到来方向の外来電磁妨害波も同時に模擬している(図4参照)。

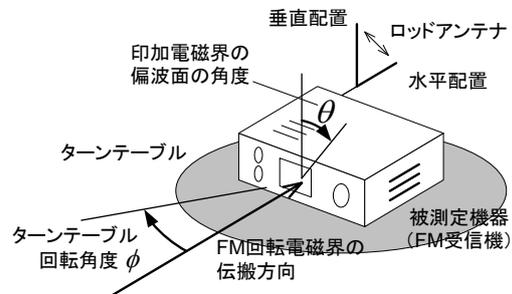


図4 電波暗室内の被測定機器(FM受信機)の配置方向と印加電磁界の到来方向

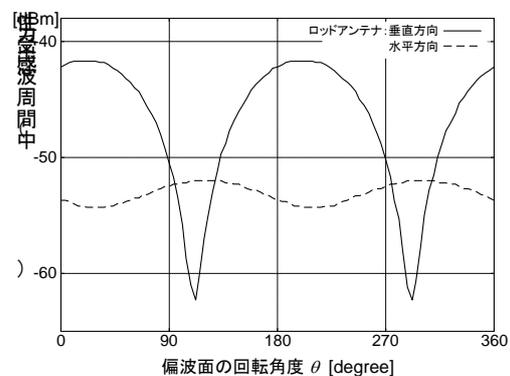


図5 FM回転電磁界に対するFM受信機の感受性(中間周波出力)測定例($\phi = 0^\circ$)

図5は、周波数0.1 Hzで回転する1020 MHzのFM回転電磁界 ($f_s = 1 \text{ kHz}$, $\Delta f = 75 \text{ kHz}$) に対するFM受信機の実感受性測定結果の一例である。これはターンテーブルの回転角度 ϕ を 0° とした場合のFM受信機の実感受性を、中間周波出力により評価した結果であり、FM受信機付属の受信ロッドアンテナを、垂直及び水平方向とした場合の実感受性を比較したものである。垂直に配置した場合、印加電磁界の偏波面の回転角度に対して実感受性が大きく変動し、偏波方向がアンテナの向きに一致したときに強い実感受性を示している様子が確認できる。このことは、電磁界の回転によって印加電磁界の偏波面に対する被測定機器の実感受性が得られることを示している。また図6は、電磁波の印加方向 ϕ (ターンテーブルの回転方向)と偏波面の回転角度 θ に対するFM受信機の実感受性を示した実感受性マップである。FM回転電磁界を用いた場合でも、従来と同様に、被測定機器のEMC・実感受性の弱点を特定するための実感受性マップを比較的短時間で容易に得ることができることを示している。

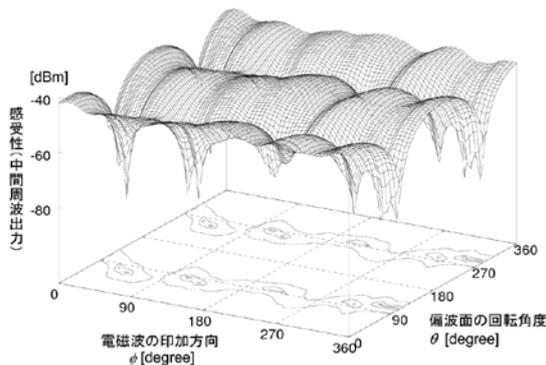


図6 FM受信機の実感受性マップの測定例

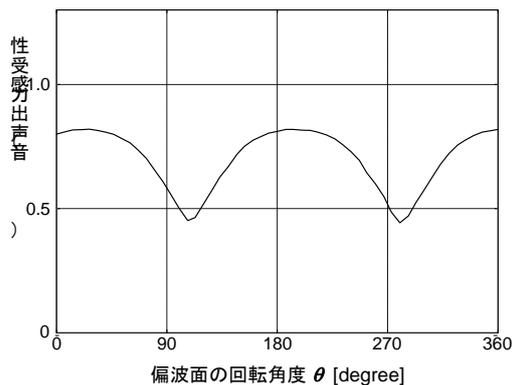


図7 FM回転電磁界 ($\Delta f = 500 \text{ kHz}$) に対するFM受信機の実感受性(音声出力)測定例 ($\phi = 0^\circ$)

図7は周波数0.1 Hzで回転する1020 MHzのFM回転電磁界 ($f_s = 1 \text{ kHz}$, $\Delta f = 500 \text{ kHz}$) に対するFM受信機の実感受性を、音声出力により評価した結果である。印加電磁界の最大周

波数偏移が通常のFM放送よりも大きい場合、FM放送受信時よりも音声出力が低下するが、図5と同様に印加電磁界の偏波面の回転に対する実感受性の変化が得られている様子が確認できる。このことは、SSCによって発生する放射電磁妨害波のように、周波数偏移の大きい電磁波も回転電磁界により模擬することができ、電子機器の放射EMC試験や実感受性測定に適用可能であることを示している。

本研究では、FM回転電磁界を用いることによって、実際の電子機器の使用環境に近い電磁環境を模擬し、それに対する詳細なEMC特性・実感受性の取得が可能であることを明らかにした。本研究で提案する手法は、国際規格として規定されている放射EMC試験法とは異なり、外来電磁妨害波に対する電子機器のEMC劣化のメカニズムを短時間で容易に得ることができるため、電子機器のEMC設計に指針を与えることが期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 村野 公俊, タヤラニ マジド, 肖 鳳超, 上 芳夫, "実感受性・放射EMC特性測定用FM回転電磁界の発生法と基本特性," 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, EMCJ2009-98, vol. 109, no.370, pp. 1-6, Jan. 2010.
- ② K. Murano, M. Tayarani, F. Xiao, and Y. Kami, "New radiated immunity / susceptibility test method using rotating FM-EM Field," Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 査読有, vol. 1, TUE-PM-1, pp. 189-193, July 2010.

[学会発表] (計2件)

- ① 村野 公俊, タヤラニ マジド, 肖 鳳超, 上 芳夫, "実感受性・放射EMC特性測定用FM回転電磁界の発生法と基本特性," 電子情報通信学会 環境電磁工学研究会, 琉球大学, 2010年1月21日.
- ② K. Murano, M. Tayarani, F. Xiao, and Y. Kami, "New radiated immunity / susceptibility test method using rotating FM-EM Field," 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Fort Lauderdale Convention center, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A., July 27 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村野 公俊 (MURANO KIMITOSHI)

東海大学・工学部・准教授
研究者番号：60366078

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし