回転電磁界を用いた RF 放射イミュニティ試験法とその基本特性

非会員 村 野 公 俊 (電気通信大学)

正 員 上 芳 夫 (電気通信大学)

An RF Radiated Immunity Test Method Using an EM Field of Low Speed Rotation and Its Basic Characteristics

Kimitoshi Murano, Non-member, Yoshio Kami, Member (The University of Electro-Communications)

An RF radiated immunity test method using an electromagnetic (EM) field of low speed rotation (rotating field) and its basic characteristics have been studied. In this method, the EM field to illuminate equipment under test (EUT) rotates two-dimensionally at an arbitrary and extremely low speed. By applying the rotating field to the EUT, the radiated immunity characteristics of EUT can be made clear two-dimensionally and continuously. A generation method of wide-band rotating field using double balanced mixers is studied and the basic characteristics of the generated field are measured to check the performance of our trial setup. The immunity test of a rectangular cavity with a slit is conducted as an example. The results show that the immunity characteristics of the EUT is measured in detail and automatically, and besides, this method is time-saving.

キーワード：RF 放射イミュニティ試験，回転電磁界，平衡変調波

1. ま え が き

近年の電子機器の高度化・多様化は、電子機器を取り巻く電磁環境の複雑化を招いている。放射妨害波による電子機器の誤動作は社会的問題となっており、外来妨害波に対する電子機器の耐性（放射イミュニティ特性）の正確な把握と向上が要求されている。

試料（EUT）となる電子機器の放射イミュニティ特性の測定は、実際に EUT に電磁界を印加することにより行われている。また最近では、リバレーション・チャンバを用いる方法⁽¹⁾⁽²⁾が提案されている。これは反射箱内部に設置した金属製の攪拌器を用いることにより同内部に発生する電磁界のモードを変化させ、広帯域の放射イミュニティ試験を実現するものである。しかし、この方法においては反射箱内に発生させる電磁界を用いるため、特定の方向の電磁界に対する EUT の放射イミュニティ特性の測定を行うことは難しい。従来用いられている 80MHz ~ 1GHz の周波数帯域における無線周波（RF）放射イミュニティ試験としては、電波暗室内に固定したバイコンカルアンテナや対数周期アンテナから水平もしくは垂直偏波の電磁波を放射し、これを同室内に配置した EUT に印加する方法⁽³⁾⁽⁴⁾や、TEM セル、GTEM セルを用いる方法⁽⁵⁾などがある。これらの方法は、主に水平及び垂直方向の電磁界に対する EUT

の放射イミュニティ特性測定に用いられており、任意の方向を有する電磁界に対して特性測定を行うには、EUT あるいはアンテナの配置方向を機械的に変えなければならない。しかし、大型の EUT などは配置方向を任意に回転させることが困難な場合があり、また、アンテナについても連続的に変化させるのは難しいと考えられる。もし、電磁界の方向を任意に制御することができれば、EUT に対してさまざまな方向の電磁界を連続的に印加することができるため、従来よりも容易かつ詳細なイミュニティ試験を行うことができると考えられる。

これまで、2 次元的に配置された直交ヘルムホルツコイルを用いて、任意の低速で回転する磁界を発生させ、これを任意方向の磁界に対する放射イミュニティ試験に適用する方法が提案されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

本論文では、EUT を機械的に回転させるのではなく、回転電磁界を用いることにより、任意の方向の RF 電磁界に対する電子機器の放射イミュニティ特性測定を自動的かつ詳細に行う方法について提案し、それに必要な装置構成について検討している。回転電磁界は、直交に配置された 2 本のダイポールアンテナを、それぞれ異なる 2 波の平衡変調波で励振することにより発生させている。また、広帯域でかつ高精度に回転電磁界を発生させるための方式に必要

図1 回転電磁界の原理

Fig. 1. Principle of rotating field.

図2 基本的な回転電磁界発生法ブロック図

Fig. 2. Block diagram of the basic generation system for rotating field.

な、広帯域位相差分波器についても述べている。この方式によって発生させた回転電磁界について、回転の様子を確認するとともに、発生させた電磁界の均一性を明らかにしている。さらに、スリット付の空洞共振器をEUTとして、この放射イミュニティ特性測定を行い、回転電磁界を用いたRF放射イミュニティ試験の有効性を明らかにしている。

2. 放射イミュニティ試験用回転電磁界

〈2・1〉 回転電磁界発生原理 偏波面が回転する電磁波として、一般に円偏波の電磁波がよく知られている。円偏波の電磁波は、その偏波面がその周波数で回転する⁽⁸⁾ものを指すのに対し、本論文で取り扱う回転電磁界は、その偏波面が電磁界の周波数よりも非常に低い周波数で回転する電磁界であり、一般にはあまり用いられていない。

図1に示すように、角周波数 ω で振動しながら角周波数 θ ($\ll \omega$ とする) で回転するベクトル A ($|A| = 1$ とする) を考える。これを x, y の各々の成分 A_x, A_y に分解すると、各成分は次式で与えられる。

$$A_x = \sin \omega t \cos \theta t \dots\dots\dots (1)$$

$$A_y = \sin \omega t \sin \theta t \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、直交配置したアンテナを式(1),(2)で表される信号で励振することにより、角周波数 θ で低速回転する電

図3 2台のSGを用いた回転電磁界用DSB-SC波発生装置のブロック図

Fig. 3. Block diagram for the DSB-SC wave generation method using two SGs.

磁界を発生させることができる。式(1),(2)は、角周波数 ω を有する搬送波を、 90° の位相差を有する2波の信号波(角周波数 θ)で平衡変調した2つの平衡変調波(DSB-SC波)と同一であり、図2に示すような原理で発生させることができる。

〈2・2〉 DSB-SC波発生装置 放射イミュニティ試験

を行うにあたっては、一過性のイミュニティ特性を見落とすことがあってはならない。このため、回転電磁界を用いて放射イミュニティ特性測定を行う場合は、電磁界の回転を極めて遅くする(回転周波数1Hz以下)必要がある。図2により回転電磁界を発生させた場合、ミキサの特性上、RF入力の漏洩成分がIF端子に現れる。これを除去するため、ミキサの次段に帯域通過フィルタ(BPF)を挿入しなければならない。しかし、1Hz以下の周波数で回転する電磁界を発生させる場合、平衡変調波を構成する角周波数成分 $(\omega + \theta)$ と $(\omega - \theta)$ をそれぞれ有する2波の信号が2Hz以下に近接して存在し、両者の中心に現れる漏洩成分である角周波数 ω の成分をBPF等で除去することが困難である。ここでは、ミキサを用いるのではなく、同期した2台の信号発生器(SG)を用いて目的の2波のDSB-SC波を発生させる方法を採用している。さらに、広帯域で回転電磁界を発生可能にするため、ミキサを利用した広帯域位相差分波器を開発し、広帯域回転電磁界用DSB-SC波発生装置を試作している。

式(1),(2)で示される2波のDSB-SC波は、それぞれ次式のように表現できる。

$$A_x = \sin \omega t \cos \theta t \\ = \frac{1}{2} [\sin \{(\omega + \theta) t\} + \sin \{(\omega - \theta) t\}] \dots (3)$$

$$A_y = \sin \omega t \sin \theta t \\ = \frac{1}{2} \left[\sin \left\{ (\omega + \theta) t - \frac{\pi}{2} \right\} + \sin \left\{ (\omega - \theta) t + \frac{\pi}{2} \right\} \right] \dots\dots\dots (4)$$

図4 実現した回転電磁界用 DSB-SC 波発生装置のブロック図

Fig. 4. Block diagram of the practical system for DSB-SC wave generation.

これは、 90° 位相の異なる 2 波の上側波 (USB) 成分 (角周波数 $(\omega + \theta)$) 及び同様に位相の異なる 2 波の下側波 (LSB) 成分 (角周波数 $(\omega - \theta)$) の計 4 波の異なる信号成分を用意することにより、回転電磁界発生に必要な 2 波の異なる平衡変調波を発生できることを示している。図 3 は式 (3)、(4) に基いた DSB-SC 波発生原理のブロック図である。実際には、物理的に移相器の位相を 90° 進ませるのは困難であるので、USB 成分の位相 0° の信号と LSB 成分の位相 -90° の信号とを、また USB 成分の位相 -90° の信号と LSB 成分の位相 0° の信号とを、それぞれ合成することにより、目的の 2 波の DSB-SC 波の発生を実現している。

また本装置の広帯域化は、挿入される移相器を広帯域化することが不可欠である。ここでは、ダブル・バランスド・ミキサ (DBM) を用いた広帯域 90° 位相差分波器を用いることにより、回転電磁界用 DSB-SC 波発生装置の広帯域化を図っている。

実現した本装置は、複数の DBM、フィルタ及び緩衝増幅器から構成され (図 4 参照)、これに 3 台の信号発生器 (SG) を USB、LSB 及び局発 (LO) 用の信号源とすることにより目的の 2 波の DSB-SC 波を得ている。

図 4 の左上半分を取り上げて、実現装置の動作を説明する。LSB-SG の角周波数 $(\omega - \theta)$ の信号は、DBM #1 の IF 端子に入力される。DBM #1 において、IF 端子からの入力信号と LO 端子から入力された角周波数 ϕ を有する LO 信号とを混合することにより、点 B (RF 端子) には角周波数 $\{\phi - (\omega - \theta)\}$ (下側波成分)、 $\{\phi + (\omega - \theta)\}$ (上側波成分) なる 2 つの周波数成分の信号が現れる。このうち上側波成分を帯域通過フィルタ (BPF) により除去し、下側波成分だけになった信号を DBM #2 において、LO 端子から入力された角周波数 ϕ の局発信号と混合することにより、点 D には角周波数 $(\omega - \theta)$ 、 $\{2\phi - (\omega - \theta)\}$

図5 DSB-SC 波発生装置の各部のスペクトル

Fig. 5. Spectra at some points of the DSB-SC wave generator.

なる周波数成分の 2 波の信号が現れる。このうち上側波成分を低域通過フィルタ (LPF) により除去することにより、LSB-SG の出力と同じ周波数の信号が復元される。図 5 は、LSB-SG の信号の周波数帯域を 300MHz ~ 1GHz、LO 信号の周波数を 2.2GHz としたときの A ~ E の各点

図 6 90° 位相差分波部の帯域

Fig. 6. Bandwidth of the 90° phase splitter used in the DSB-SC wave generation system.

図 7 DSB-SC 波発生装置の包絡線波形

Fig. 7. Envelopes of output signals of the DSB-SC wave generation system.

におけるスペクトルを示している。DBM #1 と DBM #3 の各々の LO 端子に、90° 位相の異なる 2 波の LO 信号をそれぞれ入力することにより、点 E、F には、周波数が等しく位相が 90° 異なる 2 波の信号が得られる。

同様に点 G、H に角周波数 ($\omega + \theta$) を有する位相 -90°, 0° の信号をそれぞれ発生させ、点 E と点 G の信号及び点 F と点 H の信号をそれぞれ合成することにより、目的の 2 波の DSB-SC 波が発生する。

図 6 は、本装置の 90° 位相差分波部から得られた 2 波の出力信号の位相差を、ネットワークアナライザを用いて測定した結果である。この結果から、分波器は 300MHz ~ 900MHz の周波数帯域において、2 波の位相差が $90 \pm 2.5^\circ$ の範囲内に収まっている。図 7 は、本装置により発生させた 2 波の DSB-SC 波を、デジタル化・オシロスコープの包絡線モードで観測した結果の一例である。これらは周波数 1Hz で回転する電磁界（この例は周波数 400MHz を使用）を発生させるための DSB-SC 波である。

3. RF 回転電磁界の基本特性

〈3・1〉 回転電磁界の観測結果 回転電磁界発生の確認は、観測点に配置した 2 本のダイポールアンテナの出力を

図 8 回転電磁界実験システム。

Fig. 8. Experimental system of rotating field.

図 9 回転電磁界の包絡線観測波形の一例: 0.1Hz の回転周波数を有する周波数 400MHz の電磁界。

Fig. 9. An example of envelopes of the 400MHz frequency carrier field for rotating frequency of 0.1Hz.

観測することにより行っている（図 8 参照）。電波暗室内に設置した直交ダイポールアンテナから回転電磁界を放射し、同室内に設置した 2 本のダイポールアンテナにより受信している。放射アンテナと観測点との距離は 4m である。観測点に設置された 2 本のダイポールアンテナは、各々の給電点付近で互いに直交するように配置している。各々のアンテナ出力を、2 台のプリアンプによりそれぞれ増幅し、デジタル化・オシロスコープを用いて包絡線モードで直接観測することにより、回転電磁界の発生を確認している。

図 9 は、周波数 400MHz の電磁界を周波数 0.1Hz で回転させたときの受信アンテナ出力の観測結果の一例である。2 本のダイポールアンテナの各々の出力が DSB-SC 波の包絡線を示しており、各々の DSB-SC 波の山と節が交互に現れている様子が確認できる。直交に配置された受信アンテナの各々のエレメントを、これらのアンテナを含む平面内で任意に回転させて配置した場合においても同様の波形が

図 10 回転電磁界の均一性を検討する領域
Fig. 10. Observation area of field uniformity.

図 11 回転電磁界の電界の振幅分布の計算結果：
上図 E_x 分布; 下図 E_z 分布。
Fig. 11. Computed field-amplitude contours at the z - x plane: top E_x ; bottom E_z .

観測されることから、観測点において電磁界が回転している様子を確認することができていると言える。

〈3・2〉 回転電磁界の均一性 放射イミューニティ試験を行う際、EUT を配置する位置周辺にできるだけ均一な電磁界を発生させることが望ましい。IEC 規格においては、EUT を配置しようとする領域は、印加する電磁界が $\pm 3\text{dB}$ の範囲内に収まる空間であることを要求している⁽⁴⁾。本方式は IEC 規格を考慮したものではないが、EUT の放射イミューニティ特性をできるだけ正確に測定するためには、できる限り均一な電磁界を発生させる必要がある。本方式は、放射アンテナである直交ダイポールアンテナを含む平面に対して平行な平面上に発生する 2 次元的に回転する電磁界

図 12 回転電磁界の電界の振幅分布の測定結果：
上図 E_x 分布; 下図 E_z 分布。
Fig. 12. Measured field contours at the z - x plane: top E_x ; bottom E_z .

図 13 測定領域における電界の基準方向からの
ずれの計算結果
Fig. 13. Computed deviation contour of field direction.

を利用しようとするものである。そこで、図 10 に示すように、放射アンテナから 4m 離れた位置における垂直平面上の電界分布の均一性について検討している。

図 11 は、直交ダイポールアンテナを構成する 2 本のダイポールアンテナをそれぞれ同位相・同振幅の信号で励振した場合、電界の x 及び z 成分 E_x , E_z をベクトルポテンシャルを用いて計算した結果である。これは回転電磁界の偏波面が x 軸に対して 45° 傾いたときの回転電磁界の電界分布に相当する。これらは、直交ダイポールアンテナの正面を中心とする $2\text{m} \times 1\text{m}$ の領域について計算した結果を中心に対する偏差で表したものである。これらの計算結果から、比較的広い領域において、電界の各成分が数 dB 以下の偏差内に収まると考えられる。

また、電波暗室内に発生させた回転電磁界の強度分布の

図 14 EUT (スリット付空洞共振器) の構造

Fig. 14. Structure of the rectangular cavity with a slit: (a) overview ; (b) dimensions of inner space.

	a	371mm
空洞共振器寸法	b	265mm
	c	265mm
スリット長	L	195mm
スリット幅	w	2mm

表 1 試作したスリット付空洞共振器の寸法

Table 1. Dimensions of the rectangular cavity with a slit.

垂直及び水平の各成分の測定は、それぞれの方向に配置した半波長ダイポールアンテナを用いて行っている。超低速 (1Hz 以下) で電磁界を回転させた場合、スペクトラムアナライザによる安定した測定ができないため、回転周波数を 1kHz としている。図 12 は、1kHz で回転する 400MHz の電磁界について、電界の水平成分 E_x 及び垂直成分 E_z の分布を測定した結果である。これらの結果から、直交ダイポールアンテナの正面の測定領域において、 $\pm 2.5\text{dB}$ 以下の偏差内に収まる領域を実現している様子が確認できる。

一方、本方式は低速で回転する電磁界を用いて任意の方向に対する EUT の放射イミュニティ試験を行おうとするものであるから、電磁界が回転する 2 次元の平面内において電磁界の強度だけでなく、その方向についても均一性を有している必要がある。ここでは、強度分布の計算と同様の領域における電界の方向の均一性を計算結果により明らかにしている。図 13 は、直交ダイポールアンテナの各々のエレメントをそれぞれ同位相・同振幅の信号で励振した場合の場所による電界の基準方向からのずれの分布を計算した結果である。これは強度分布計算の際と同様に、回転電磁界が x 軸に対して 45° 傾いた時の分布に相当する。この結果から、 $2\text{m} \times 1\text{m}$ の領域においては、電界の方向が $45 \pm 2^\circ$ の偏差内で分布していることがわかる。計算領域内における電界の各成分には、伝搬距離差による位相差が存在するため、合成によって現れる電磁界の偏波面は僅かながら楕円性を有していると考えられる。しかし、これらの位相差は $\pm 0.4^\circ$ 以下であることが計算により明らかであるため、平面波として近似的に計算している。

図 15 放射イミュニティ試験の際の EUT の配置位置

Fig. 15. Setup of the radiated immunity test.

 図 16 EUT の放射イミュニティ特性：実線は回転電磁界を印加した場合、◇はダイポールアンテナを 10° 毎に手動で回転させて電磁界を印加した場合。

Fig. 16. Radiated immunity characteristics of EUT; solid line is for the results using a rotating field method and $\diamond$ for those using field of which direction changed manually and discretely.

4. 回転電磁界を用いた EUT の放射イミュニティ試験

回転電磁界を用いた放射イミュニティ試験の有効性は、例としてスリット付空洞共振器 (図 14 参照) を EUT とし、これに回転電磁界を印加することにより確認している。スリット付空洞共振器は、外来電磁波がスリットによって内部と結合する際、スリット及び空洞共振器の寸法から、その共振周波数を予測できること、スリットの位置により共振モードに制約を受けることなどが知られている⁽⁹⁾。ここでは、EUT として用いるスリット付空洞共振器を、基本モードである TM_{011} で用いるものとした。モードセパレーションを考慮して表 1 に示す寸法で試作し、共振器壁面中央部に電界プローブを配置し (図 14 参照)、ネットワークアナライザを用いてその共振周波数を測定した結果、 TM_{011} 共振モードが周波数 809MHz で現れることが確認された。

そこで、809MHz の電磁界を本 EUT に印加した場合に TM_{011} モードで共振する電磁界の電界成分を電界プロー

ブの出力として取り出し、これを電界に対する EUT の放射イミュニティ特性として評価を行っている。EUT は図 15 に示すように、スリットが z 軸方向となるように直交ダイポールアンテナの正面に配置し、 z - x 平面上で 2 次的に回転する回転電磁界を発生させ印加して測定を行っている。さらに比較のために 1 本のダイポールアンテナの配置方向を z - x 平面上で 10° 毎に変化させて傾いた偏波の電磁界を印加した場合についても測定を行っている。

図 16 は、電界に対する EUT の放射イミュニティ特性として電界プローブの出力を測定した結果を示している。いずれの測定結果も、スリットの方角に対する印加電界の方角 φ が 90° に近付くにつれて、筐体内部との結合が大きくなる（イミュニティが悪くなる）様子を表している。 10° 毎に偏波面を傾けて電磁波を印加した場合に比べて、回転電磁界を用いた方が連続的にイミュニティ特性を観測することができることは自明である。回転電磁界を用いた場合は、ここでは電磁波の回転周波数は 0.1Hz であり、電磁界が 1 回転するのに要する時間は 10 秒であるので、 z - x 平面内の全方向に対する放射イミュニティ試験を行うのに必要な時間は 5 秒である。このように非常に短時間で測定が可能であり、さらに EUT を機械的に回転させることを組み合わせれば、EUT 全体のイミュニティ特性を短時間で測定できるものと期待できる。

5. ま と め

偏波面が 2 次的に低速で回転する電磁界の発生原理を明らかにし、広帯域で高確度で発生させる方法を示し、電磁界の回転を実験的に確認した。また、放射イミュニティ試験に適用する際の回転電磁界の均一性を明らかにした。さらに、回転電磁界を用いて EUT の放射イミュニティ試験を試行し、この方法の有効性を示すと同時に、短時間で連続的に放射イミュニティ特性測定ができることを示した。

今後、3 次的に回転する電磁界についても明らかにし、EUT の放射イミュニティ・マップを詳細かつ容易に測定する手法について検討していく予定である。

付記

本研究は日本学術振興会未来開拓研究推進事業「電磁波の雑音レベルの低減」プロジェクト (JSPS-RFTF99P01502) によるものである。

(平成 12 年 3 月 24 日受付)

文 献

- (1) T.F. Trost, A.K. Mitra and A.M. Alvarado, "Characterization of a small microwave reverberation chamber," Proc. 11th Int. Zurich Symp. & Tech. Exhb. on EMC, 109Q2, pp.583-586, March.1995.
- (2) D.A. Hill, D.G. Camell, K.H. Cavcey and G.H. Koepke, "Radiated emissions and immunity of microstrip transmission lines: theory and reverberation chamber measurements," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. EMC-38,

no.2, pp.165-172, May 1996.

- (3) 杉浦 行:「電磁界印加法」, 電磁波の吸収と遮蔽, IV-2.2, pp.493-502, 日経技術図書 (1989) .
- (4) "Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test," IEC1000-4-3, International standard, International Electrotechnical Commission (1995).
- (5) F. Attardo, C. Tarantola, M.C. Borlino, M. Giunta and L. Lavezzaro, "GHz TEM cell: radiated immunity test performance," Proc. 10th Int. Zurich Symp. & Tech. Exhb. on EMC, 110P6, pp.589-593, March.1993.
- (6) 村野公俊, 上 芳夫: "回転電磁界を用いた放射性イミュニティ試験法の提案," 信学技報, EMCJ97-75, pp.9-14 (1997) .
- (7) K. Murano and Y. Kami: "New Radiated Immunity Test Method Using Fields of Low Speed Rotation," Proc. IEEE 1998 Intn. Symp. Electromagn. Compat., vol. 2, pp.730-733 (1998).
- (8) 上田 弘之, 河野 哲夫: 電波伝播, pp.92- 93, オーム社 (1952) .
- (9) 小暮 裕明, 中野 英樹, 越地 耕二, 周 英明: 「開口部を有する装置筐体内のサセプティビリティ」, 回路実装学会誌, 12 [5], pp.369-373 (1997) .

村 野 公 俊 (非会員) 平 7 電通大・電気通信・電子情報卒。平 9 同大学院博士前期課程了。同年同大学院博士後期課程入学、現在に至る。電子機器のイミュニティ試験装置に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。

上 芳 夫 (正員) 昭 41 電通大・電波通信卒。昭 45 都立大学院修士課程了。同年電通短大助手。講師、助教授を経て、昭 62 電通大助教授、現在教授。工博。高周波伝送回路、回路基板における EMC/EMI、電磁界解析等の研究に従事。電子情報通信学会、エレクトロニクス実装学会, IEEE 各会員。