

EMI 測定用超広帯域アンテナの近距離での 遠方界アンテナ係数測定の実験的検討

黒川 悟 廣瀬 雅信

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

E-mail: { satoru-kurokawa, masa-hirose }@aist.go.jp

あらまし 放射 EMI 測定に用いられる広帯域アンテナとしては、30 MHz～1000 MHz の超広帯域アンテナであるボウタイアンテナとログペリオディックアンテナを複合したバイログアンテナが用いられる。バイログアンテナは、固定アンテナ距離での測定によりアンテナ係数の測定が行われている。本報告では、バイログアンテナの遠方界アンテナ係数測定方法として、周波数毎のアンテナ間距離としてのアンテナ振幅中心を考慮したアンテナ係数算出式を用いて遠方界のアンテナ係数算出を試みた。アンテナ振幅中心を考慮したアンテナ係数算出結果は、2 通りのアンテナ間距離での S_{21} 測定が必要であり、アンテナ間距離およそ 3 m と 4 m での測定結果から求めたアンテナ係数は、4m と 10m での測定結果から求めたアンテナ利得との差は 100 MHz 以上では 0.7 dB 以下である。

キーワード 広帯域アンテナ, 複合アンテナ, アンテナ利得, 時間領域測定, 時間周波数解析

Experimental Study of Far Field Antenna Factor Measurement for EMI Super Broadband Antennas in Near Distance

Satoru KUROKAWA, Masanobu HIROSE

† National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1
Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563 Japan

E-mail: † { satoru-kurokawa, masa-hirose }@aist.go.jp

Abstract We have studied a new estimation method for far-field antenna factor of hybrid broadband antenna for electromagnetic interference measurement at near distance. The new estimation method is using an amplitude center modified Friis transmission formula. In the case of using the new transmission formula, difference between estimated antenna factor using S_{21} of 3m and 4m and using S_{21} of 4 m and 10 m is less than 0.7 dB in the frequency range from 100 MHz to 1000 MHz.

Keyword Broadband antenna, Hybrid antenna, Antenna factor, Time-domain, Amplitude center, Friis transmission formula

1. はじめに

放射 EMI (Electromagnetic Interference) 測定では、被測定機器から放射される電界強度測定に、30 MHz～1000 MHz の超広帯域できょう可能なバイログアンテナ[1]が用いられる。バイログアンテナはボウタイアンテナとログペリオディックアンテナを複合したアンテナである。そこで我々は既に、アンテナ間距離 10 m での自由空間アンテナ係数を連続的な周波数で求めることが可能な時間領域処理とパルス圧縮を用いた 3 アンテナ法[2]-[4]を提案した。しかしバイログアンテナは、ログペリオディックアンテナ同様に、アンテナエレメントが最大放射方向に対数周期で配置される構造であることから、

アンテナ間距離をアンテナ物理長の中心位置として測定周波数範囲のアンテナ利得並びにアンテナ係数を算出しており、不確かさの主要因となっている。

バイログアンテナの遠方界利得算出法として、アンテナ間距離を振幅中心の推定により求める手法を検討し、モーメント法を用いた数値計算結果ではアンテナ先端間距離が 3 m と 10 m の場合を測定結果を用いて算出したアンテナ利得が遠方界利得との差は 0.2 dB 以下であることを示した[5]。

そこで本報告では、バイログアンテナの遠方界アンテナ係数の算出にアンテナ振幅中心を考慮した推定手法を適用した結果を報告する。まず、オープンサイトでのバイログアンテ

ナの自由空間伝播波の推定として既に報告しているパルス圧縮と時間領域処理により自由空間伝播波を推定する手法を述べる。次に推定した自由空間伝播波を用いたアンテナ係数算出結果を示す。

2. 測定の概要

アンテナは、EMI 測定に多く用いられているシュワルツベック社製 VULB9160 を用いた。自由空間伝播波の推定方法として、我々が既に提案しているタイムドメイン処理とパルス圧縮処理を用いた手法を適用した。

測定は、ベクトルネットワークアナライザ (以下 VNA) を用いて行う。まず、アンテナに接続する同軸ケーブル先端でアンノンスルー・フル 2 ポート校正を行った後に、2 本の被測定アンテナをオープンサイトのグラウンドプレーン上高さ $H=8\text{ m}$ 程度にアンテナマストを用いて設置し、周波数領域 $S_{21}(\omega)$ の測定を実施する。測定の概念図を図 1 に示す。VNA は周波数範囲 $0.5\text{ MHz} \sim 3000\text{ MHz}$ 、周波数間隔 0.5 MHz 、IF 周波数 100 Hz 、ポート出力は 0 dBm と設定した。

次に、(1)式に示すハミングウィンドウ $w(\omega)$ を用いた逆フーリエ変換 $F^{-1}(t)$ [6]により、測定結果の時間領域結果 $S_{21}(t)$ を算出する。

$$S_{21}(t) = F^{-1}\{S_{21}(\omega) \cdot w(\omega)\} \quad (1)$$

図 2, 3 に周波数領域測定結果 $S_{21}(\omega)$ 、時間領域算出結果 $S_{21}(t)$ をそれぞれ示す。図中 $[D=3\text{ m}]$, $[D=4\text{ m}]$, $[D=10\text{ m}]$ はそれぞれ、アンテナ間距離 3 m , 4 m , 10 m として、送受信アンテナをグラウンドプレーンに垂直に設置した場合の結果を示している。 $D=3\text{ m}$, 4 m の場合の測定結果は、アンテナ放射パターンがグラウンドプレーン方向レベルを無視できることから、 $D=3\text{ m}$ の場合、図 3 に示す時間領域算出結果の $t=100\text{ ns}$ 程度までの受信信号を自由空間伝播波 (以下直接波) とみなし $0\text{ ns} \sim 100\text{ ns}$ に矩形窓関数 $h_{\text{dir}3\text{m}}(t)$ を乗じ、直接波 $S_{21_{\text{dir}3\text{m}}}(\omega)$ と仮定することとした。以下、 $D=3\text{ m}$ の測定結果を用いて $D=10\text{ m}$ での直接波推定手順を概説する。

$$S_{21_{\text{dir}3\text{m}}}(\omega) = F\{S_{21_{3\text{m}}}(t) \cdot h_{\text{dir}3\text{m}}(t)\} \quad (2)$$

$D=3\text{ m}$ の直接波 $S_{21_{\text{dir}3\text{m}}}(\omega)$ を用いて ウィナーフィルタ $W_{\text{dir}3\text{m}}(\omega)$ を(3)式により算出する。

$$W_{\text{dir}3\text{m}}(\omega) = \frac{S_{21_{\text{dir}3\text{m}}}^*(\omega)}{\eta |S_{21_{\text{dir}3\text{m}}}(\omega)|^2 + (1-\eta)} \quad (3)$$

ただし、 η は定数で、その値を変えることによってフィルタの形状をマッチドフィルタから逆フィルタの間で変化させる役割がある。

(3)式で求めた $W_{\text{dir}3\text{m}}(\omega)$ を用いて、(4)式により距離 $D\text{ m}$ での測定結果 $S_{21_D}(\omega)$ のパルス圧縮 $I_D(\omega)$ を算出する。

$$I_D(\omega) = S_{21_D}(\omega) \cdot W_{\text{dir}3\text{m}}(\omega) \quad (4)$$

さらに、パルス圧縮の時間領域結果 $i_D(t)$ を(5)式によって $I_D(\omega)$ の逆フーリエ変換 F^{-1} により算出する。

$$i_D(t) = F^{-1}\{I_D(\omega)\} \quad (5)$$

図 4 に $\eta=0.9999$ とした場合のパルス圧縮の時間領域包絡線算出結果を示す。横軸はパルス圧縮に用いた $D=3\text{ m}$ の直接波のピーク値を $t=0\text{ s}$ とし、縦軸は $D=3\text{ m}$ の最大値で規格化した値である。図中 $[D=3\text{ m}]$, $[D=4\text{ m}]$, $[D=10\text{ m}]$ はアンテナ距離 $D=3\text{ m}$, 4 m , 10 m それぞれの場合の結果を示している。図 4 に示す $D=10\text{ m}$ の結果において、それぞれ、パルス圧縮された直接波が約 23 ns に到来し、パルス圧縮された反射波が約 53 ns に到来する。このため、矩形窓関数 $h_{\text{comp}_D}(t)$ を用いて直接波のパルス圧縮結果 $i_{\text{dir}_D}(t)$ を(6)式により求める。

$$i_{\text{dir}_D}(t) = i_D(t) \cdot h_{\text{comp}_D}(t) \quad (6)$$

さらに、(7)式を用いてウィナー逆フィルタ $W_{\text{dir}_D}^{-1}(\omega)$ により、 $D\text{ m}$ での直接波 $S_{21_{\text{dir}_D}}(\omega)$ を算出する。

$$S_{21_{\text{dir}_D}}(\omega) = W_{\text{dir}_D}^{-1}(\omega) \cdot F\{i_{\text{dir}_D}(t)\} \quad (7)$$

図 1 に $D=10\text{ m}$ の推定直接波、 $D=3\text{ m}$, 4 m の測定結果から(1)(2)式を用いて推定した直接波を測定結果と合わせて示す。推定した直接波は、不要反射波を取り除いた結果である。

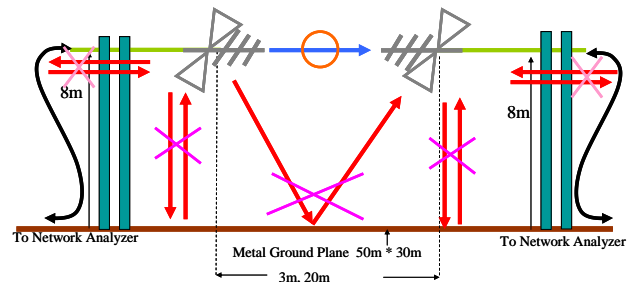


図 1 測定の概念図
Fig. 1 Measurement Setup

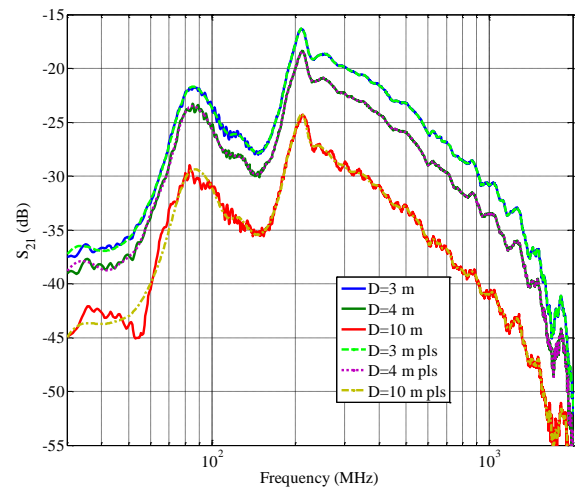


図 2 $S_{21}(\omega)$ 測定結果 ($H=8\text{ m}$)
Fig. 2 $S_{21}(\omega)$ measurement results ($H=8\text{ m}$)

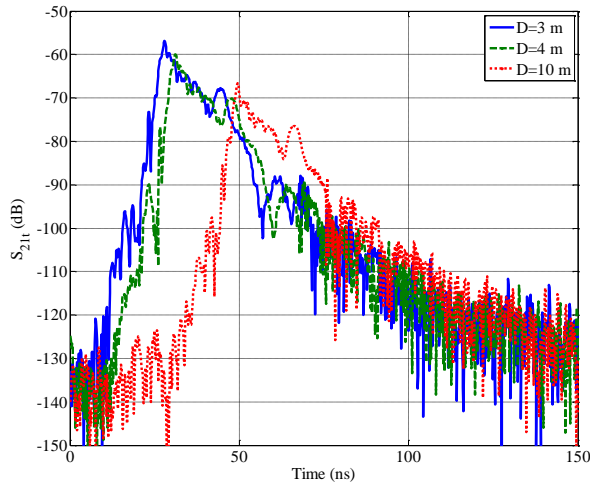


図3 時間領域 S_{21} 算出結果 ($H=8\text{ m}$)
Fig. 3 $S_{21}(t)$ calculation results ($H=8\text{ m}$)

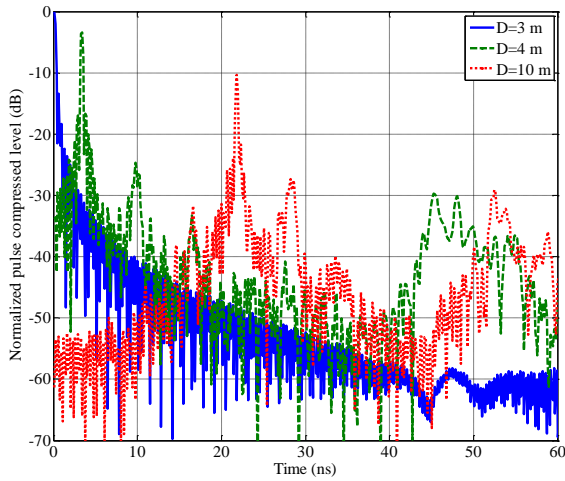


図4 パルス圧縮結果の時間領域波形 ($\eta=0.999$)
Fig. 4 Pulse compression result

3. 振幅中心を考慮した遠方界アンテナ係数算出

アンテナの振幅中心位置を考慮したアンテナ係数算出式は、送受信アンテナのアンテナ先端から振幅中心[7][8]までのそれぞれの長さ d_1 , d_2 を、遠方界アンテナ係数 $af_{i_far}(\omega, z)$, $af_{r_far}(\omega, z)$ を用いて、(8)式と示すことができる[5].

$$s_{21}(\omega, z) = \frac{\eta_0 \cdot k_0}{Z_0} \frac{1}{af_{i_far}(\omega, z)} \frac{1}{af_{r_far}(\omega, z)} \frac{1}{z + d_1 + d_2} \quad (8)$$

アンテナ間距離を変えて $z=z_1$, $z=z_2$ として、各距離で $S_{21}(z_1)$, $S_{21}(z_2)$ を測定し、(6)式から d_1+d_2 を削除し、(9)式を得る.

$$af_{i_far}(\omega, z) \cdot af_{r_far}(\omega, z) = \frac{\eta_0 \cdot k_0}{Z_0} \left(\frac{1}{s_{21}(\omega, z_1)} - \frac{1}{s_{21}(\omega, z_2)} \right) \frac{1}{z_1 - z_2} \quad (9)$$

(9)式は、遠方界アンテナ係数がアンテナ間距離を変えた2回の測定結果から算出可能であることを示している. 図5に、(9)式から算出したアンテナ係数、アンテナの物理中心間距離を用いて算出したアンテナ係数を示し、図6に、 $D=4\text{ m}$, 10 m の直接波推定結果から(9)式により算出したアンテナ係数と他の算出アンテナ係数との差を示す.

図中[[$D=z\text{ m fixed distance}$]]は、 $D=z\text{ m}$ の直接波とアンテナ物理中心間の距離を用いて算出したアンテナ係数を示し、[[$D=z_1\text{ m and }z_2\text{ m amplitude center}$]]はそれぞれ、 $z=z_1\text{ m}$ と $z=z_2\text{ m}$ の直接波を用いて(9)式から算出したアンテナ係数と遠方界アンテナ係数との差を示している.

図5に示す $D=3\text{ m}$, $D=4\text{ m}$ の直接波推定結果を用いて(9)式から算出したアンテナ係数は100 MHz以下で大きな振動を含む結果となり、図6に示す $D=4\text{ m}$, $D=10\text{ m}$ の直接波推定結果を用いて(9)式から算出したアンテナ係数との差も80 MHz以下で最大1.4 dB程度となるものの、80 MHz以上では0.7 dB以下となった。これは、 $D=4\text{ m}$, $D=10\text{ m}$ のそれぞれのパルス圧縮後波形から直接波を求めるために用いた時間窓 $h_{comp_D}(t)$ 内に不要波が含まれているためであると考えられる。(9)式では、 $D=z_1$, $D=z_2$ の各距離での直接波の強度の差 $||S_{21}(z_1)| - |S_{21}(z_2)|| < 1$ で小さいほど、含まれるノイズなどのレベル差が強調される結果となるため、 $D=3\text{ m}$, $D=4\text{ m}$ の測定結果を用いたアンテナ係数算出結果と $D=4\text{ m}$, $D=10\text{ m}$ の測定結果を用いたアンテナ係数算出結果との差が大きくなったと考えられる。80 MHz以下の周波数で差が大きくなっている理由については、ボウタイエレメントの共振が長い時間幅を有しているため、圧縮パルスが十分減衰するまでに不要波が到来する結果となっているためと考えられるが、今後の課題である。測定ノイズレベルの改善については、測定に用いるケーブル長の短縮が考えられる。今回の測定では、測定に用いる同軸ケーブルの総長=60 m程度であった。このため、今後、同軸ケーブルの総長を40m程度にして測定を実施し、受信信号レベルを高めた測定を実施し、ノイズの影響などを検証することとしたい。

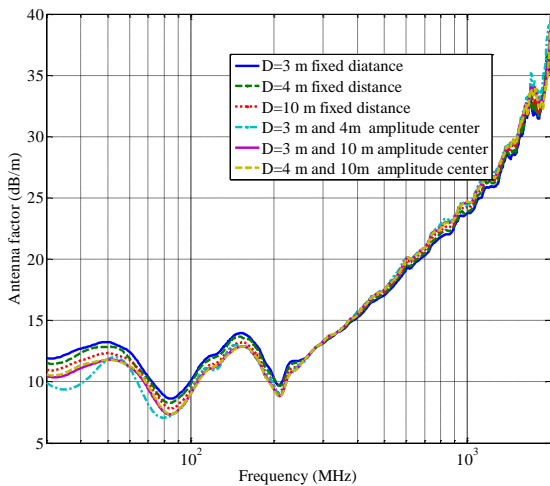


図 5 算出したアンテナ係数
Fig. 5 Estimated antenna factors

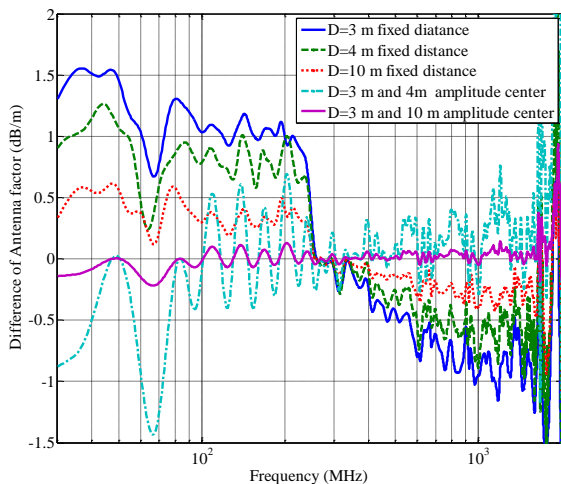


図 6 D=4 m、10 m の直接は推定結果を用いて(9)式により算出したアンテナ係数と他のアンテナ係数の差
Fig. 6 Difference of antenna factors between antenna factor of using amplitude center equation (D=4m, 10m) and other antenna factors

3. まとめ

本報告では、ボウタイアンテナとログペリオディックアンテナの複合アンテナであるバイログアンテナの遠方界アンテナ係数の算出を実験結果を用いて試みた。アンテナの物理的中心間距離を用いて算出したアンテナ係数は、アンテナ間距離が近くなればなるほど、振幅中心を考慮したアンテナ係数算出式を用いて算出した結果との差が大きくなる結果となった。さらに、振幅中心を考慮したアンテナ係数算出結果では、2点のアンテナ間距離での S_{21} 測定結果の差が小さいほどノイズの影響が大きくなり、遠方界アンテナ利得との差が大きくなる結果となった。これは、ネットワークアナライザを用いた測定結果の受信信号レベルをできるだけ向上することでノイズの影響を低減することが可能であることから、測定に用いる同軸ケーブルの総長をできるだけ低減する等の検討を実施することとした。

文 献

- [1] CBL6111C クラシック Bilog antenna 30 MHz – 1 GHz, Teseq Inc.
- [2] S. Kurokawa, M. Hirose, K. Komiyama, “Measurement and uncertainty analysis of free-space antenna factors of a Log-Periodic antenna using time-domain techniques,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 4, pp.1120-1125, 2009.
- [3] S. Kurokawa, M. Ameya, M. Hirose, “Time-domain Three Antenna Method for Biconical Antenna.” in *Proc. CPEM2010*, 2010
- [4] 黒川悟, 廣瀬 雅信, 飴谷充隆, “EMI 測定用超広帯域アンテナの自由空間アンテナ係数測定,” 電気学会技術研究報告, IM-12-001, Jan., 2012.
- [5] S. Kurokawa, M. Ameya, M. Hirose, “Far Field Gain Estimation Method for Japanese Broadband Antenna Standard Using Time-frequency Analysis,” in *Proc. Piers2013*, pp.838-842, Aug., 2014.
- [6] Oppenheim, A.V., and R.W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989, pp.713-718.
- [7] K. Harima, “Accurate gain determination of LPDA by considering the phase center,” *IEICE Electronics Express*, vol.7, no.23, 1760-1765, Oct. 2010.
- [8] 廣瀬 雅信, 飴谷充隆, 黒川悟, “位相中心を用いた近傍界利得と遠方界利得の関係の理論的検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, AMT2012-02, June, 2012.