

変調プローブアレーを用いた電磁界の位相の測定法

水上 透[†] 陳 強[†] 澤谷 邦男[†]

[†] 東北大学大学院 工学研究科 電気通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05
E-mail: mizu@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 変調散乱プローブを用いた電磁界の測定では高速に全球面測定をすることが可能であり、また、アジマス方向に於いて同時に電磁界を測定することが可能である。しかし、これまでの測定対象は電磁界の振幅と被測定電磁界放射源の放射効率に限られており、電磁界の位相を測定することはできなかった。本報告では、計測器で受信した IF 信号にデジタル信号処理を施すことにより、電磁界の位相の測定を実現する手法を検討する。

キーワード 位相測定, 変調, アレーアンテナ, プローブ。

A Measurement Method Using Modulated Probe Array for Phase of Electromagnetic Field

Toru MIZUKAMI[†], Qiang CHEN[†], and Kunio SAWAYA[†]

[†] Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
Aramaki Aza Aoba 6-6-05, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, Japan
E-mail: mizu@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract A simultaneous measurement method using a parallel modulated probe array is proposed to measure the electromagnetic radiation rapidly. The performance of the system using this method has been demonstrated by the measurement time and some experimental results such as the radiation pattern and the radiation efficiency of measured antennas by our group. However, the phase measurement is not possible by using this system because of its structure. In this report, a phase measurement method is proposed and some experimental results of verification experiment are demonstrated.

Key words phase measurement, modulation, array antenna, probe.

1. はじめに

近年、無線通信の普及と発展に伴い、携帯電話端末、無線 LAN 端末、RFID リード機などの無線通信端末機の研究開発が盛んに行われており、無線通信端末機に搭載されるアンテナシステムの性能を高速かつ高精度に測定できる有効な測定システムの研究開発が急務となっている [1]。無線通信端末機のアンテナの性能を評価する際には、アンテナの放射指向性、放射効率が重要な評価指標となる。しかしながら、これらのパラメータを測定するためには、アンテナを囲む全立体角においてアンテナの放射電磁界を測定する必要があり、従来の 3 次元スキャン装置を用いた機械式走査法では数分から数十分ほどの測定時間が必要となる。また、次世代高速無線通信を実現するために、無線通信端末機に数本のアンテナを搭載し、通信時の環境に応じてアンテナの指向性を制御するアダプティブアンテナの研究開発が行われているなかで、アダプティブアンテナを実験

的に評価するためには、アンテナからの放射電磁界の振幅だけでなく、位相の測定も必要である。

このようなニーズに応じ、国内外において様々な測定法及び測定システムの研究が行われており、そのうちの一部が実用化されている。国内では、マトリックス型ランダム信号発生機が開発され、携帯電話のアンテナの放射効率を瞬時に測定できる測定システムが研究開発されている [2]。また、電波のマルチパス環境を模擬できる空間フェージングエミュレータが開発され、アダプティブアンテナによる伝送信号の品質を評価している [3]。海外では、マルチプローブを用いた測定システムが開発され、製品化されている。本製品はアンテナの放射電磁界の振幅と位相の測定が可能で、通信システムの位相評価にも使用される。さらに、本製品は米国携帯電話業界団体 CTIA (Cellular Telecommunications and Internet Association) の認定を受けている [4], [5]。

本研究グループは過去に変調散乱技術を用いた電磁界の同時

測定法を提案している [6], [7]. 本測定法では, 変調散乱の技術を利用し, 複数の測定地点に異なる周波数のローカル信号が印加された変調プローブ素子を配置し, 各変調プローブ素子に到達した電磁波の変調波を受信することにより, それぞれの地点における電磁波の強度を同時に測定するものである. 本測定法では, 各変調プローブ素子に周波数の異なるローカル信号を印加することにより, 変調波の周波数から各変調散乱プローブを特定するという点で, 従来法と異なっており, より低コストで多数の地点で同時に電磁界を測定することができる. また, 本測定法をベースとした変調プローブアレーを用いた全球面電磁界測定システムを製品化している. 本製品は, 僅か 16 秒の測定時間でアンテナの全方向の放射指向性 (電磁界の振幅) 及び放射効率を測定することが可能であり, 測定時間が従来の機械式走査法の約 1/10 に大幅に短縮された. すでに我々は, 本測定装置を用い, 放射電力積分法によるアンテナ放射効率の測定を行い, 本システムにより, 高速かつ高精度にアンテナの放射効率の測定が行えることを示した [8].

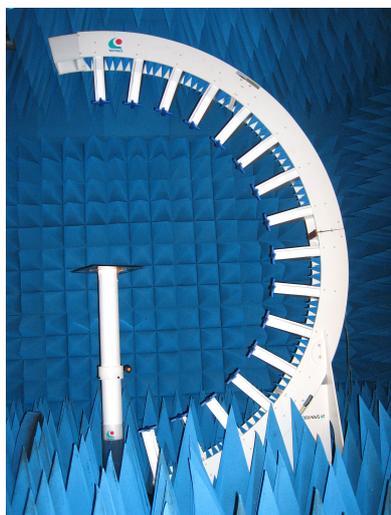


Figure 1 変調プローブアレーを用いた全球面電磁界測定システム

しかしながら, 本手法では各プローブに異なる周波数のローカル信号を印加する方式を取っているため, 受信した変調波から各プローブで受信した電磁界の位相情報を取り出すことができない. そのため, 現時点では本測定法を用いたのアダプティブアレーアンテナの性能測定や, 通信品質の評価などは困難である.

本報告では, まず, 変調プローブアレーを用いた電磁界測定の原理を説明し, これを用いた測定システムの有用性を高速測定や精度の面から述べる. 次に, 本研究で提案する電磁界の位相の測定手法の原理について説明し, 最後に, この方法の有効性を検討するための実験の結果を報告する.

2. 変調プローブアレーを用いた全球面電磁界測定システム

Figure 2 に, 変調プローブアレーを用いた全球面電磁界測定システムの構成を示す. 変調プローブとアジマス方向の回転テーブルを併用することにより, 被測定アンテナを囲む球面上の放射電磁界を測定することができる.

本測定システムの半弧形のアーチ上には天頂角 $0^\circ \sim 168.75^\circ$ までの角度範囲に等間隔 (11.25° 間隔) で 16 のクロスダイポール変調プローブ素子が設置されている.

変調プローブ素子は Figure 3 で示すようなクロスダイポールアンテナに変調回路が付加された構成になっており, 回路に内蔵されたミキサには水晶発信器によって, 各々の素子ごとに 20 MHz から 40 MHz までの範囲で割り当てられた異なる周波数の LO 信号が印加されている. また, 受信する偏波を電的に切り替えることが可能な構成となっている.

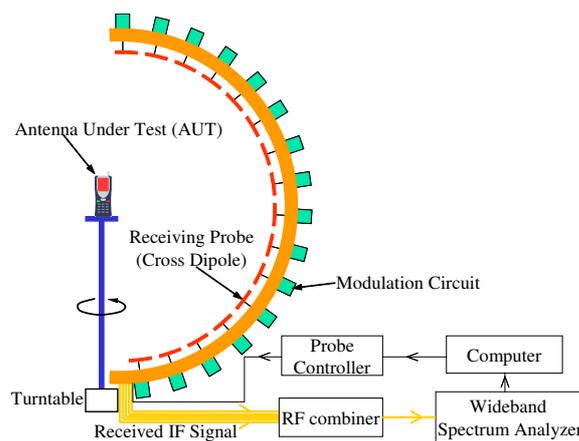


Figure 2 測定システムの構成

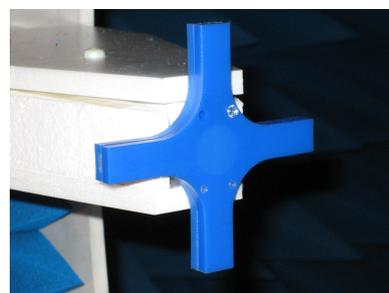


Figure 3 変調プローブ素子

測定の際, アーチ上の各変調プローブ素子に被測定アンテナから RF 信号が照射されると, 受信された RF 信号は変調プローブ素子上のショットキーバリアダイオードにおいて LO 信号とミキシングされ, IF 信号 (変調波) が発生する.

IF 信号の振幅は, 各々の変調プローブ素子における RF 信号の受信強度を表す. また, IF 信号の周波数は,

$$f_{IF} = f_{RF} \pm f_{LO} \quad (1)$$

であることから, その値からどの変調プローブ素子によって変調された信号かを特定することが可能である. ここで f_{RF} , f_{LO} はそれぞれ RF 信号と LO 信号の周波数を表す. これら 16 の IF 信号は RF コンバイナによって単一の信号に合成され, 広帯域スペクトラムアナライザによって測定される. 水平・垂直の 2 偏波の全球面における測定に所要する時間はおよそ 16 秒程度である.

実際に広帯域スペクトラムアナライザにて受信された IF 信

号の一例を Figure 4 に示す．周波数軸上に変調素子数分のスペクトラムが並んでおり，変調プローブによる同時測定の様子が見て取れる．

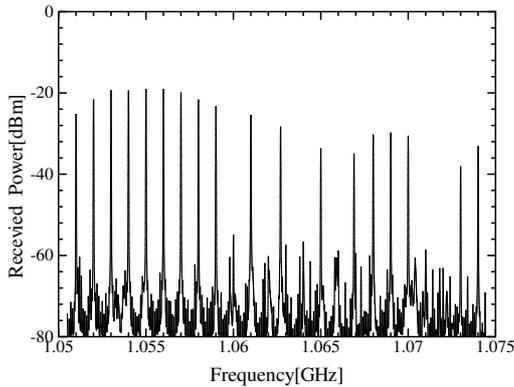


Figure 4 Spectrum Analyzer で計測される IF 信号

また，全放射角における電磁界を測定することにより，次式に示す放射電力積分法に基づき，放射効率を高速に測定することも可能である．

$$P_r = \frac{r^2}{A_e} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (P_\theta + P_\phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (2)$$

ここで， P_r はアンテナからの全放射電力， P_θ ， P_ϕ はそれぞれ受信電力の水平偏波成分及び垂直偏波成分である． A_e は受信アンテナの実効開口面積である．また， r は走査面の半径である．

周波数 1 GHz での放射効率の測定において，FDTD 法による数値解析の結果との差が 0.3 dB 以内という高い測定精度が実現されている．

一方，IF 信号の位相は次式で示されるが，

$$\phi_{IF} = \phi_{RF} \pm \phi_{LO} \quad (3)$$

各 LO 信号は異なる周波数の信号であるため，この受信された IF 信号そのものから RF 信号の位相を知ることはできない．ここで ϕ_{RF} ， ϕ_{LO} はそれぞれ RF 信号と LO 信号の位相を表す．この RF 信号の位相の情報を得るために，受信された IF 信号にデジタル信号処理を施す手法を検討する．

Table 1 全球面電磁界測定システムの諸元

item	performance
Radius of semicircular arch	1.03 m
Frequency range	0.8 ~ 2.5 GHz
Frequency step of local frequency	> 2 MHz
Measurement time for spherical scan	16 sec.
Repeatability of measurement	< 0.3 dB
$ S_{21} $ between horizontal antenna and vertical antenna	< 30 dB

3. 位相測定の手法

受信した IF 信号から各変調プローブ素子が受信した RF 信号の位相情報を抽出するためには，デジタル信号処理を施す必要がある．周波数 $f_{RF} + f_{LO}$ を持つ IF 信号の高周波側の成分を BPF によって切り出し，対応する LO 信号の周波数を持つ信号をミキシングすると，RF 信号と同じ周波数を持つ復調信号が得られる．ここで用いる LO 信号は，IF 信号を BPF に通すことにより IF 信号に混入している LO 信号を切り出すことで得る．この復調された信号は RF 信号と同じ位相を持つので，この復調信号に FFT 処理を施すことで，各変調プローブで受信された RF 信号の振幅と位相を得ることができる．

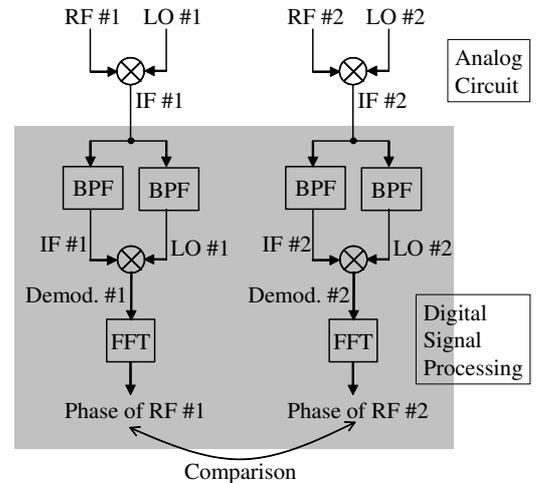


Figure 5 位相測定フローチャート

4. 検証実験

本報告で提案する位相測定の手法の有効性を検証するため，Figure 6 のような回路構成にて実験を行った．同期した 2 台の FG (Function Generator) から RF 信号に見立てた 500.001 kHz の正弦波と LO 信号に見立てた 12.498 kHz，9.999 kHz の正弦波を出力させ，ショットキーバリアダイオードで構成される自作ミキサによってミキシングを行う．図中の RF #2 の位相は RF #1 の位相より 90 度進んでいる．各信号の周波数はディジタルのサンプリングの周波数間隔 3 Hz で割り切れる値に設定されている．各 BPF は位相特性の線形性を重視して 10 次のベッセルフィルタとした．

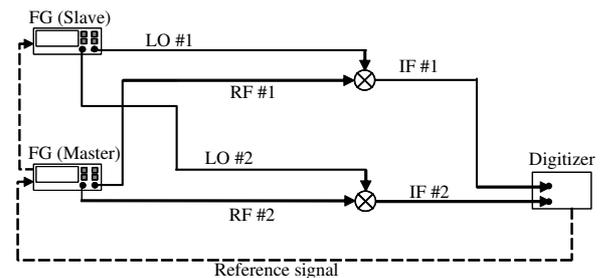


Figure 6 実験系

Table 2 実験の諸元

item	performance
Frequency of RF signal f_{RF}	500.001 kHz
Frequency of LO signal f_{LO}	12.498, 9.999 kHz
Num. of data points N	500 k
Sampling period Δt	0.667 nsec.
Sampling frequency	1.5 MHz
Frequency spacing of spectrum Δf	3 Hz

Table 3 BPF の諸元

Filter	IIR
Topology	Bessel
Order	10
Passband width	100 Hz

5. 実験結果

ディジタイザに取り込まれた IF 信号を Figure 7 に示す。また、信号処理によって得られた復調信号の振幅と位相を Figure 8 と Figure 9 に示す。

図より、FG から信号を出力する際に設けた 2 つの RF 信号間の位相差の 90 度が、復調信号の位相差に現れており、ディジタル信号処理による復調によって RF 信号の位相を得ることができたといえる。測定された位相の誤差はおおむね 1° 以内に収まり、再現性が確認された。尚、サンプリングデータ数や BPF の設定などのパラメータにより測定精度が左右されるため、位相測定の際には測定する周波数に応じてパラメータの最適化が必要である。

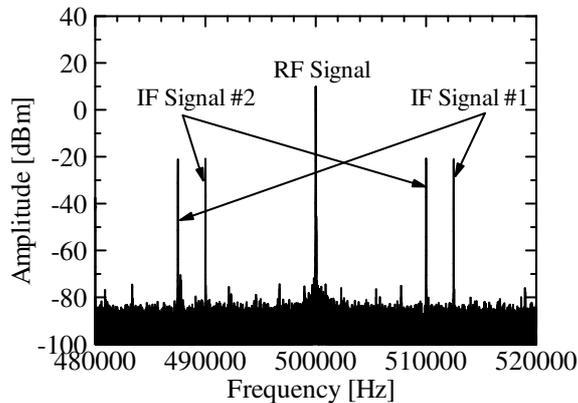


Figure 7 受信された IF 信号

6. まとめ

計測器で受信した IF 信号にディジタル信号処理を施すことにより、変調プローブを用いた電磁界測定における電磁界の位相測定を実現する手法の有効性を検証した。有線での実験により、本手法を用いることで、変調プローブを用いた電磁界測定においても位相を測定することが可能であることを示した。今後は、実際に電波伝搬による実験を行い、より実際の測定装置に近い状況での検証を試みる。

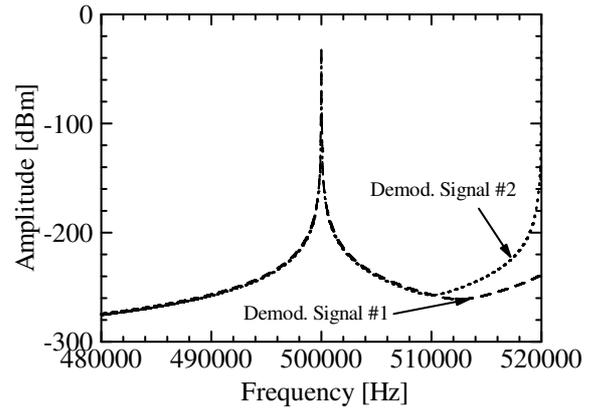


Figure 8 受信された復調信号の振幅

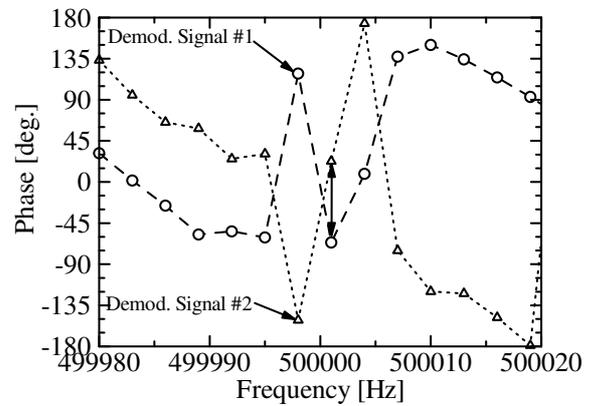


Figure 9 受信された復調信号の位相

References

- [1] Q. Chen, Y. Komukai, and K. Sawaya, "SAR Investigation of Array Antennas for Mobile Handsets," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E90-B, no. 6, pp. 1354-1356, 2007.
- [2] 山口良, 他, "20 面体電波暗箱を用いた放射効率測定装置の実験的検討 マトリックス型ランダム信号発生器の相関特性", 2006 年電子情報通信学会ソサエティ大会, B-1-186.
- [3] 山本温, 他, "RF 制御 MIMO 送受信機によるレイリーフェージング環境における BER 測定", 2006 年電子情報通信学会ソサエティ大会, B-1-212.
- [4] P. O. Iversen, et al, "Real-Time Spherical Near-Field Antenna Test Facility for Personal Communications Applications", *IEEE AP2000 Conference*, April 2001.
- [5] P. O. Iversen, Ph. Garreau, and Dennis Burrell, "Real-Time Spherical Near-Field Handset Antenna Measurements," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 43, no. 3, pp. 90-94, June 2001.
- [6] Q. Chen and K. Sawaya, "Modulated Scattering Technique Based Method For Measuring Electromagnetic Field Simultaneously," *2004 Korea-Japan AP/EMC/EMT Joint Conference Proceedings*, P-EMC-14, pp. 161-164, 2004.
- [7] Q. Chen, K. Sawaya, T. Habu, and R. Hasumi, "Simultaneous Electromagnetic Measurement Using a Parallel Modulated Probe Array," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 2, pp. 263-269, 2007.
- [8] 水上透, 陳強, 澤谷 邦男, "人体頭部近傍に置かれたアレーアンテナの放射効率の測定," 電子情報通信学会総合大会, Mar. 2007.
- [9] Bolomey, et al, "Rapid near-field antenna testing via arrays of modulated scattering probes", *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, Vol.36, No. 6, pp. 804-814, June 1988.