

# 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<sup>†</sup> 陳 強<sup>†</sup> 澤谷 邦男<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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、変調信号とローカル信号を同時に測定し、それぞれの位相から RF 信号の位相を求める方法を考え、位相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 a Modulated Probe Array for Phase of Electromagnetic Field

Toru MIZUKAMI<sup>†</sup>, Qiang CHEN<sup>†</sup>, and Kunio SAWAYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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].

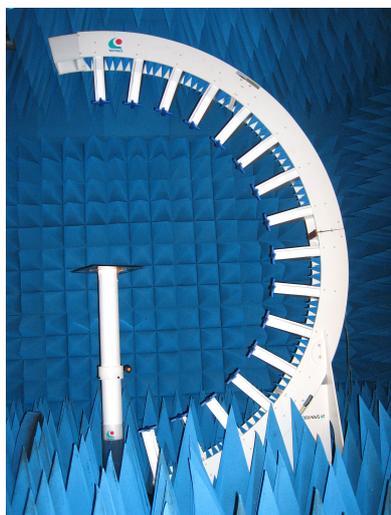


Figure 1 変調プローブアレーを用いた全球面電磁界測定システム

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 ( $11.25^\circ$  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.

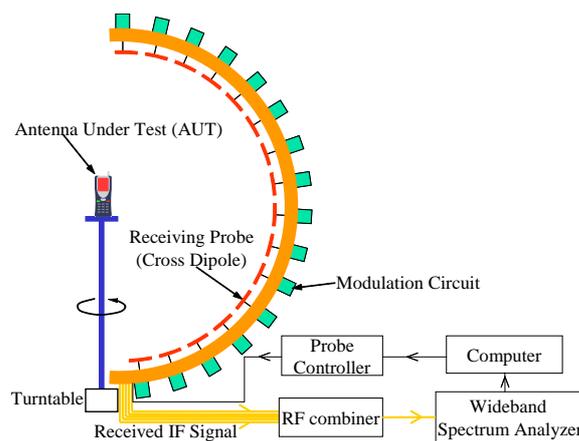


Figure 2 測定システムの構成

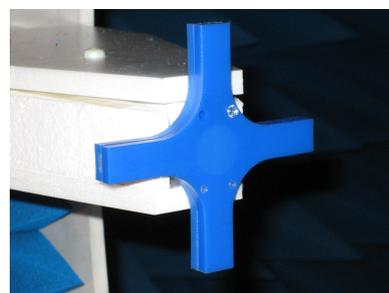


Figure 3 変調プローブ素子

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．

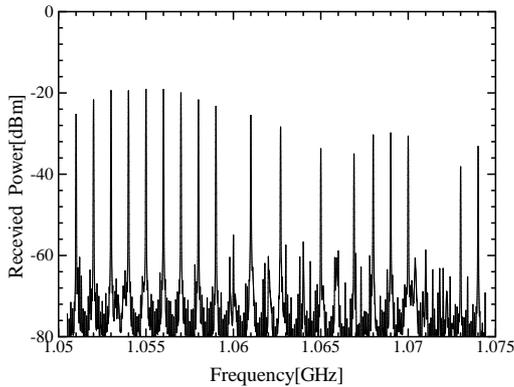


Figure 4 Spectrum Analyzer で計測される IF 信号

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， $P_\theta$ ， $P_\phi$  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  $\phi_{RF}$ ， $\phi_{LO}$  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 信号のスペクトラムにはローカル信号の位相が含まれてしまうため，RF 信号の位相を測定するためにはローカル信号の位相を知ることが必要となる．変調信号の低周波領域にはもともとローカル信号の成分が含まれているため，変調信号をダウンコンバートすることで，ローカル信号と変調信号のスペクトラムを同時に測定することが可能となる．

### 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 5 のような回路構成にて実験を行った．信号発生器から 2.5 GHz の RF 信号を出力させ，ダイポールアンテナから送信する．これを自作した 2 個の変調プローブ素子で受信すると，これらの素子に付加されているショットキーバリアダイオード上でローカル信号とミキシングされ，変調信号が生成される．2 つの変調信号はコンバイナによって合成された後，RF 信号の周波数より僅かに小さい周波数の信号とミキシングされることで，低周波領域に移される．この際に，低周波領域の雑音を低減するために高域通過フィルタが用いられており，この低周波領域に含まれるローカル信号も一定量の低減を受けるが，測定に十分な強度は保ったままりアルタイムスペクトラムアナライザまで伝搬する．

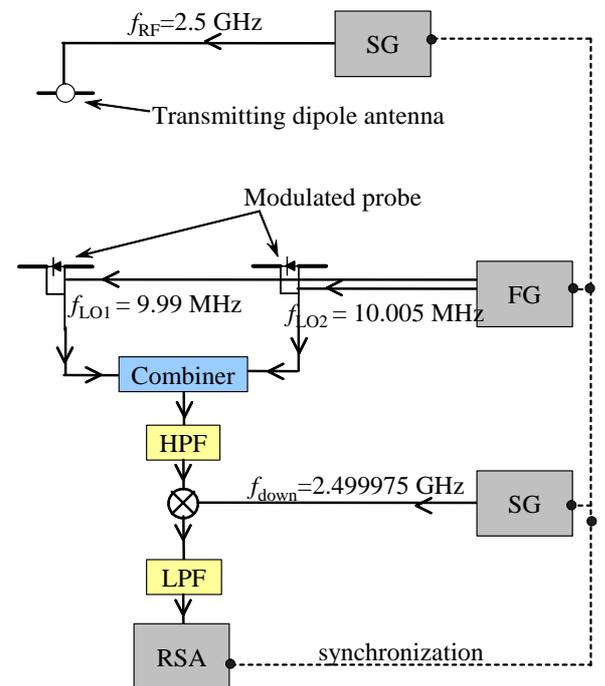


Figure 5 位相測定の実験系

測定には Figure 5 に示すような自作の変調プローブ素子を用いる．ダイポールアンテナにショットキーバリアダイオードが装荷された構造をしており，被膜導線によってローカル信号が給電される．

実験系の配置を Figure 7 に示す．送信アンテナと受信に用いられる変調プローブ素子は直線上に配置される．送信アンテナと変調プローブ素子 (MP1) の位置は固定されており，もう一

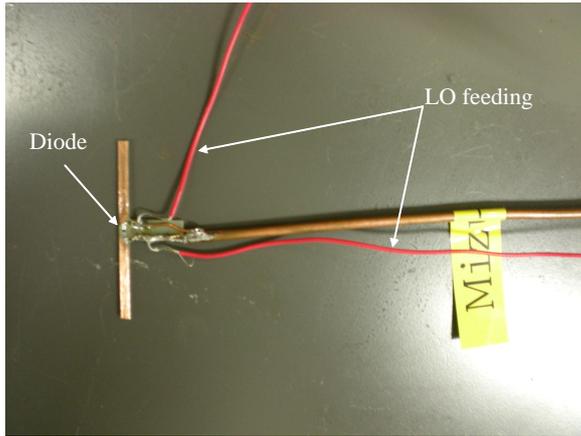


Figure 6 位相測定の検証実験用の変調プローブ素子

方の変調プローブ素子の位置を移動させることで、電磁波が伝搬する距離の差を変え、測定される位相差との関係を検証する。

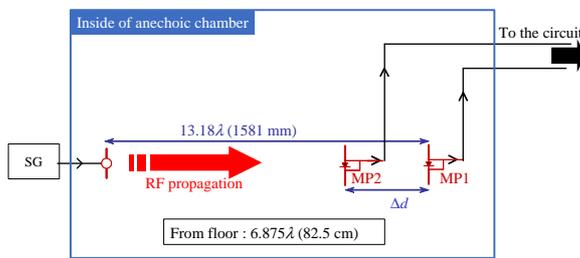


Figure 7 実験系の配置

Table 2 実験の諸元

| item  | performance      |
|---|------------------|
| Frequency of RF signal $f_{RF}$                 | 2.5 GHz          |
| Frequency of LO signal $f_{LO}$                 | 9.99, 10.005 MHz |
| Frequency of down convert signal $f_{down}$     | 2.499975 GHz     |
| Amplitude of RF signal                          | 15 dBm           |
| Input voltage of LO signal                      | $V_{p-p} = 3$ V  |
| Amplitude of down convert signal                | 0 dBm            |
| Center frequency of receiving span $f_{Center}$ | 10.01 MHz        |
| Receiving span $f_{Span}$                       | 50 kHz           |
| Num. of sampling points $N$                     | 1024             |
| Aquisition time                                 | 12.7875 msec.    |

## 5. 実験結果

リアルタイムスペクトラムアナライザで受信された信号を Figure 8 に示す。各々のローカル信号と変調信号のスペクトラムが雑音に比べて 30 dB ほど大きく、所定の周波数で同時に測定されていることがわかる。

測定された RF 信号の位相差を Figure 9 に示す。伝搬距離の差から算出される理論値と同等の値が測定されており、この方法によって位相の測定が実現されていることが見て取れる。

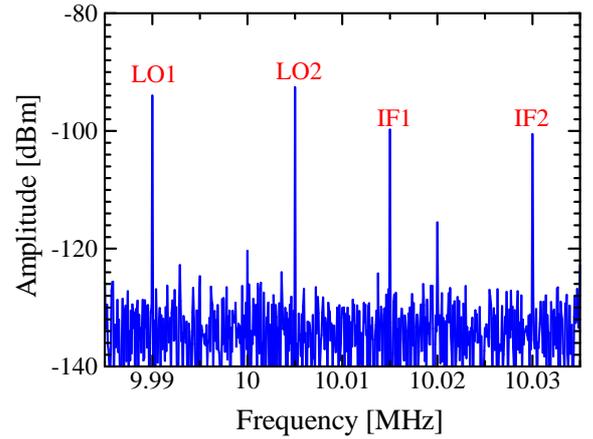


Figure 8 受信された信号

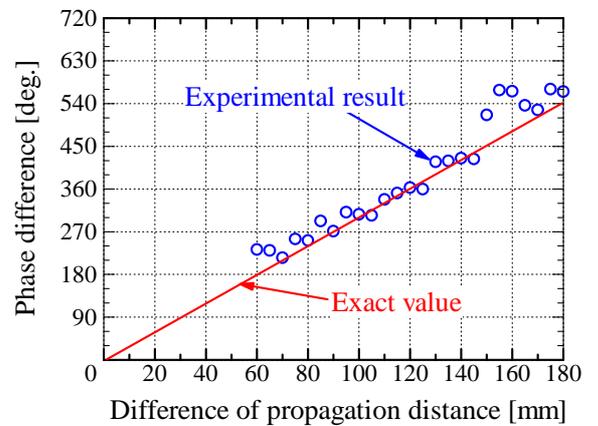


Figure 9 位相の測定結果

## 6. まとめ

周波数 2.5 GHz において変調プローブを用いた電磁界測定における位相測定の検証実験を行った。変調信号とローカル信号を低周波領域において同時に測定し、各々の位相から RF 信号の位相を測定する方法を検証した結果、位相の測定が実現された。今後は、ローカル信号の周波数などを最適化すると共に、ダウンコンバートを行わないで位相を測定する方法を模索する予定である。

## 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. Antenas and Propagat.*, Vol.36, No. 6, pp. 804-814, June 1988.