

第 515 回 伝送工学研究会

変調プローブアレーを用いた電磁界の位相の測定法

平成 20 年 12 月 16 日

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

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 変調プローブアレーを用いた電磁界の測定では高速な全球面測定が可能であり、また、天頂角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、同一のタイミングで測定した IF 信号と LO 信号の位相差をとることで RF 信号の位相を求める手法を提案し、その有効性を検証した結果について述べる。

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[†], 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 was proposed to measure the electromagnetic radiation rapidly. The performance of the system using this method was demonstrated by the measurement time and some experimental results such as the radiation pattern and the antenna efficiency 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 using modulated probe array is proposed and some results of preliminarily experiments 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。

このような必要に応じ、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 と大幅に短縮された. 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] .

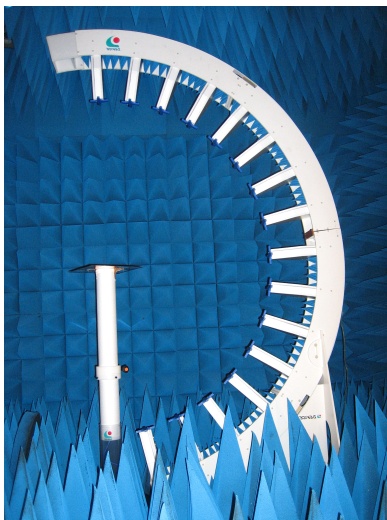


Figure 1 変調プローブアレーを用いた全球面電磁界測定システム .

しかしながら, このシステム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て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, この手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. 変調プローブアレーと方位角方向の回

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 素子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, 受信する偏波を電氣的に切り替えることが可能な構成となっている .

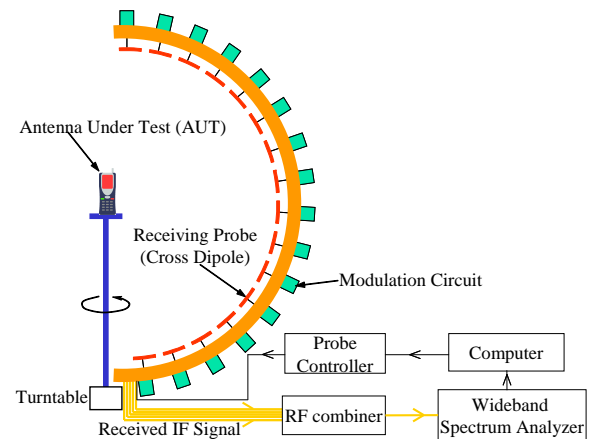


Figure 2 測定システムの構成 .

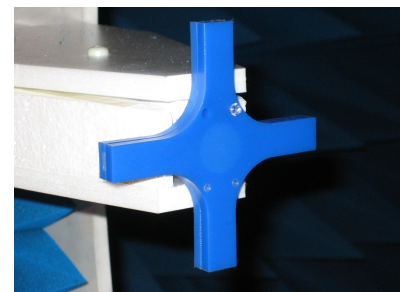


Figure 3 変調プローブ素子 .

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である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・垂直の両偏波の 2 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、変調プローブによって同時測定が実現されている様子が見て取れる。

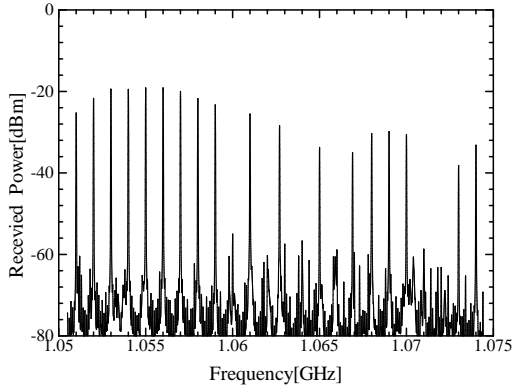


Figure 4 広帯域スペクトラムアナライザで測定される IF 信号。

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。

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

ここで θ_{RF} 、 θ_{LO} はそれぞれ RF 信号と LO 信号の位相を表す。各 LO 信号は異なる周波数の信号であるため、受信信号の IF 周波数における位相の値のみから RF 信号の位相を知ることはできない。そこで、この θ_{IF} から θ_{LO} の成分を除去し、RF 信号の位相の情報を得る手法を検討する。

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

IF 信号の位相には LO 信号の位相成分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 LO 信号の位相を知ることが必要となる。一方、受信信号の低周波領域には LO 信号の周波数成分が混在している。よって、受信信号をダウンコンバートすることで、LO 信号のスペクトラムと IF 信号のスペクトラムを同一の受信帯域内に収め、同じタイミングで測定することが可能となる。ダウンコンバートされた IF 信号と同じタイミングで測定された LO 信号の位相は、IF 信号の位相に含まれる LO 信号の位相成分と一致する。よって、ダウンコンバートされた IF 信号と LO 信号の位相の差をとることで、RF 信号の位相を求めることができる。

3.1 位相測定手法の有効性の検討

本報告で提案する位相測定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、半波長ダイポールアンテナから送信する。これを自作した 2 素子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 LO 信号とミキシングされ、IF 信号が生成される。2 つの IF 信号は RF コンバイナによって合成された後、高域通過フィルタを通り、低周波領域の雑音を低減される。次に 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、IF 信号は LO 信号の周波数に近い低周波領域にダウンコンバートされる。前述の高域通過フィルタにより、低周波領域に含まれる LO 信号成分も一定量の低減を受けるが、測定に十分な強度を保ったまま広帯域スペクトラムアナライザで測定される。

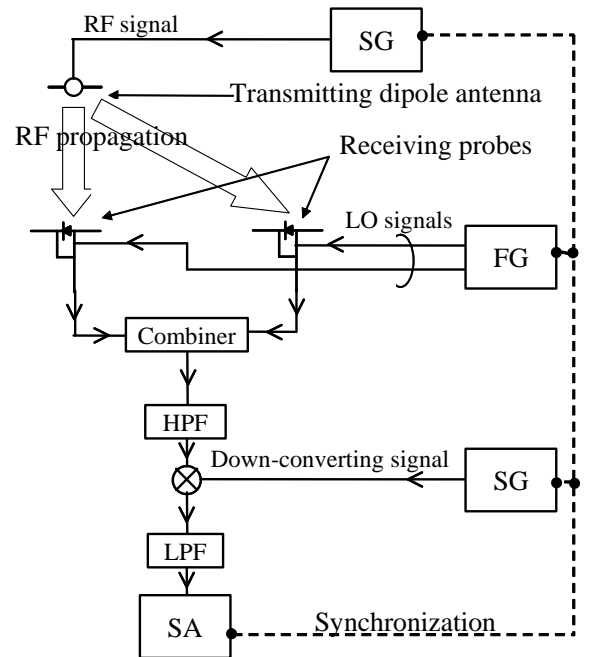


Figure 5 位相測定回路構成。

測定には Figure 6 に示すような自作の変調プローブ素子を用いる。半波長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単純な構造を有し、被膜導線によって LO

信号が供給される．中心周波数は 2.5 GHz に設計されている．

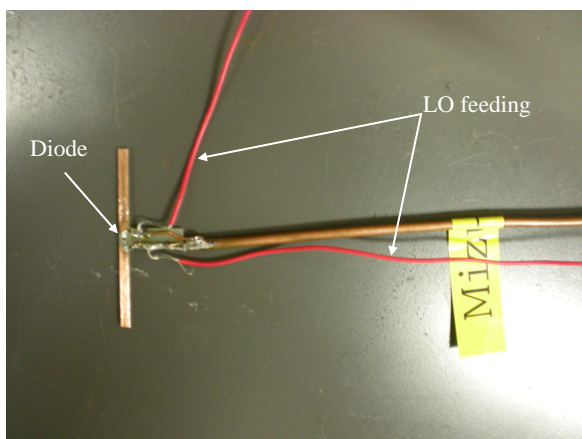


Figure 6 位相測定の検証実験用変調プローブ素子．

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 2 素子の変調プローブ素子は水平に設置され、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、もう一方の変調プローブ素子 (MP2) の位置を変えることにより、送信アンテナから各々の変調プローブ素子へ電磁波が伝搬する距離の差を変え、その伝搬距離の差と測定される位相差との比例関係を確認することによって、本手法の有効性を検証する．

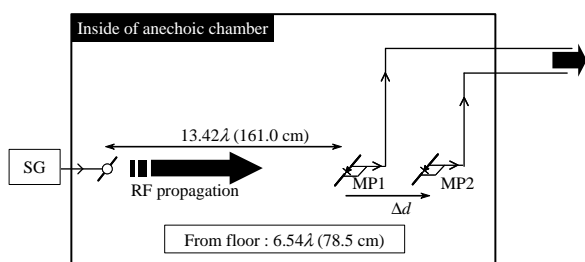


Figure 7 実験系の配置．

Table 2 実験の諸元．

ITEM	PERFORMANCE
Frequency of RF signal	2.5 GHz
Frequency of LO signal	9.99, 10.005 MHz
Frequency of down converting signal	2.499975 GHz
Amplitude of RF signal	0 dBm
Input voltage of LO signal	$V_{p-p} = 3 \text{ V}$
Amplitude of down converting signal	0 dBm
Center frequency of receiving span	10.01 MHz
Receiving span	40 kHz
Num. of sampling points	1024
Aquisition time	12.7875 msec.

広帯域スペクトラムアナライザで受信された信号の周波数スペクトルを Figure 8 に示す．各々の LO 信号と IF 信号のピークが雑音と比べて 30 dB 程大きく、同一受信帯域で測定されている．

伝搬距離の差に対する RF 信号の位相差の測定結果を Figure

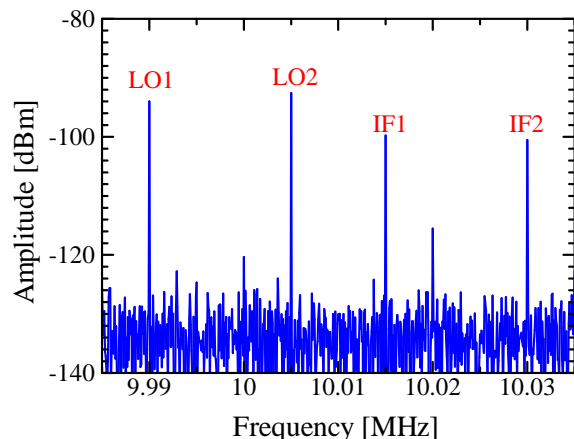


Figure 8 受信信号の周波数スペクトル．

9 に示す．伝搬距離の差から算出される位相差の理論値と同等の値が測定されており、本手法によって、変調プローブを用いた電磁界の測定に於ける位相の測定が実現されていることが見て取れる． $\Delta d = 155 \text{ mm}$ において 90° 程度の誤差が観測されているが、これは変調プローブ素子間の Mutual coupling の影響と考えられる．

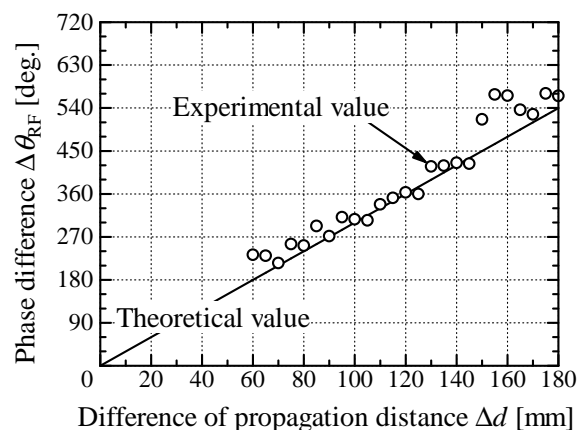


Figure 9 伝搬距離の差に対する位相差の測定結果．

3.2 位相パターンの測定

Figure 10 に示す測定系を構築し、本手法を用いた位相パターンの測定を試みた．この測定系に於いて一方の変調プローブ素子 (MP1) は円弧形の低損失素材上の一点に固定し、もう一方の変調プローブ素子 (MP2) の設置位置を方位角 10° 刻みで変えて順次位相を測定した．このとき、被測定アンテナから見た MP1 の方向は一定であるため、この MP1 で受信された RF 信号の位相は、もう一方の変調プローブ素子 (MP2) が受信する被測定アンテナの位相パターンの位相基準となる．ここで、被測定アンテナから見た MP1 の方向を $\phi = -90^\circ$ とする．変調プローブ素子間の Mutual coupling の影響が大きくない $\phi = 0^\circ$ から 180° の範囲で測定を行った．垂直に設置した半波長ダイポールアンテナを被測定アンテナとして用いた．

Figure 11 に測定した位相パターンを示す． 180° の測定範囲内に於いて $\pm 20^\circ$ 以内の誤差に収まっており、高い精度の測定結果が得られたと言うことができる．また、垂直に設置された

半波長ダイポールアンテナの方位角方向に対する受信強度は、本来一定値となるはずであるが、Figure 12 に示すように測定結果には 3 dB 程度の変動が見られた。今後は、支持装置の安定性や、受信回路面での更なる改善が必要と思われる。

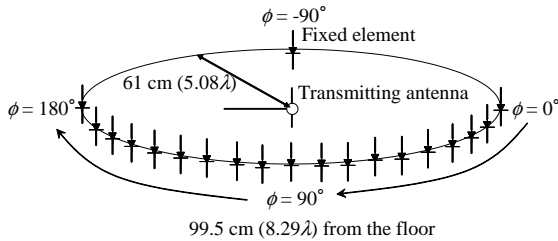


Figure 10 位相パターンの測定に於ける実験系。

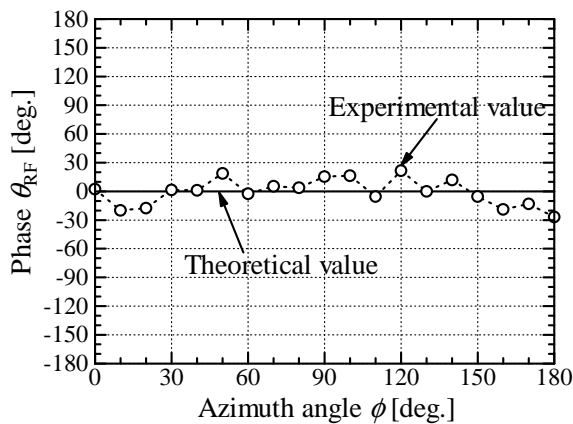


Figure 11 位相パターンの測定結果。

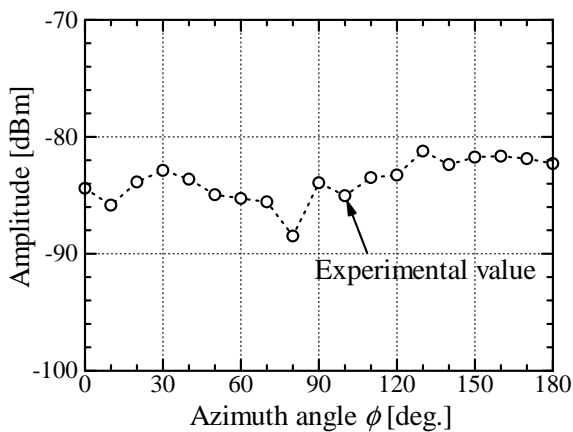


Figure 12 放射パターンの測定結果。

4. ダウンコンバートを行わない位相測定

前節までは、ダウンコンバートを行うことで IF 信号と LO 信号を同一の受信帯域において受信し、RF 信号の位相を求める手法について検討を行ってきたが、ここでは、RF 信号の高周波側に現れる IF 信号と低周波側に現れる IF 信号の両方を受信帯域内に収めて同時に測定することで、ダウンコンバートを行うことなく、RF 信号の位相を測定する手法について検討

する。

RF 信号の高周波側に現れる IF 信号と低周波側に現れる IF 信号は、それぞれ位相 $\theta_{RF} + \theta_{LO}$ 、 $\theta_{RF} - \theta_{LO}$ を持つ。これらの和を求めると $2\theta_{RF}$ となり、LO 信号の位相成分を取り除くことができる。ダウンコンバートを行うことなく、位相測定を実現することが可能であれば、受信回路を Figure 13 の様に簡略化することができ、位相測定の低コスト化、低ノイズ化を図ることができる。特に低ノイズ化は今後、変調散乱素子を用いた電磁界の位相測定の実現を試みる際に有利に働くことが予想される。

ダウンコンバートを行う位相測定と同様に、送信アンテナと 2 素子の変調プローブ素子を直線上に配置し、伝搬距離の差に対する位相差の測定を行った。Figure 15 より、伝搬距離の差に対する位相差は理論値と近い結果が得られており、本手法の有効性を見て取ることができる。

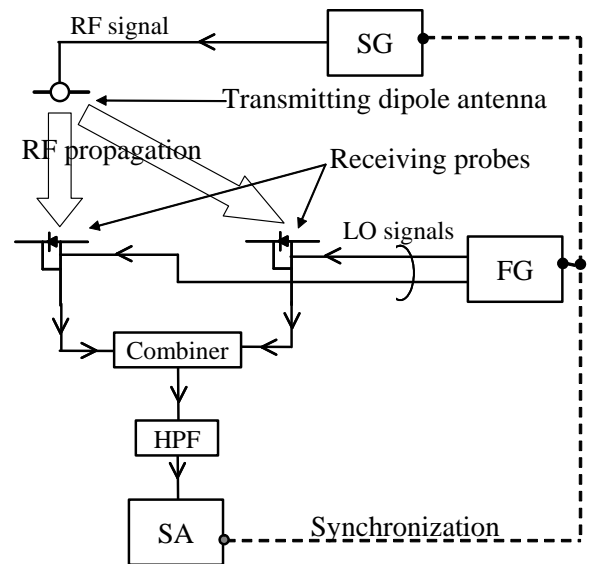


Figure 13 位相測定の回路構成 (ダウンコンバートを行わない位相測定)。

Table 3 実験の諸元 (ダウンコンバートを行わない位相測定)。

item	performance
Frequency of RF signal	2.5 GHz
Frequency of LO signal	6.875, 12.5 kHz
Amplitude of RF signal	0 dBm
Input voltage of LO signal	$V_{p-p} = 4 \text{ V}$
Center frequency of receiving span	2.5 GHz
Receiving span	80 kHz
Num. of sampling points	1024
Aquisition time	6.4 msec.

5. まとめ

RF 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手法を提案し、検証実験を行った。

ダウンコンバートされた IF 信号と LO 信号を同一受信帯域に於いて測定し、各々の位相から RF 信号の位相を求める手法

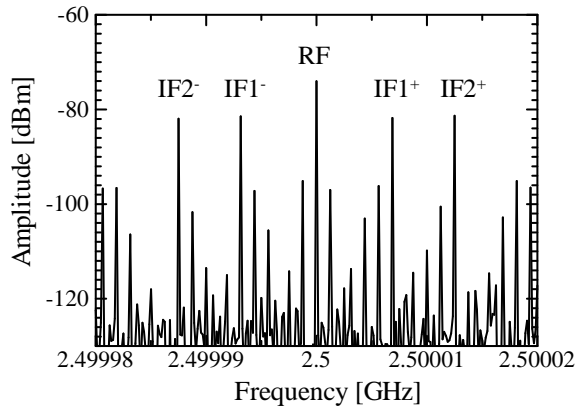


Figure 14 受信信号の周波数スペクトル（ダウンコンバートを行わない位相測定）。

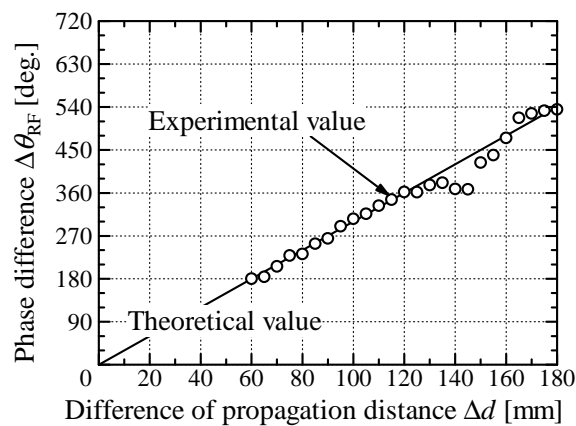


Figure 15 伝搬距離の差に対する位相差の測定結果（ダウンコンバートを行わない位相測定）。

を提案し、その有効性を検証した。RF 信号の伝搬距離の差に対する位相差の測定により、本手法の有効性を示すことができた。

また、本手法を用いて、垂直に設置した半波長ダイポールアンテナの位相パターンの測定を試み、誤差 $\pm 20^\circ$ 以内という高い精度で位相パターンを測定することができた。しかし、放射パターンの測定においては精度の向上が必要である。

ダウンコンバートを行わない位相測定の手法を提案し、その有効性を検証した。RF 信号の伝搬距離の差に対する位相差の測定により、本手法の有効性を示すことができた。ダウンコンバートを用いる方法に比べてコスト面、測定精度に於いて有利であるため、今後はダウンコンバートを行わない手法について重点的に改善を進めていきたい。

本研究は平成 19 年度テレコムエンジニアリングセンター公益的調査研究助成を受けて進められているものである。

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