

## [チュートリアル講演] 変調散乱法による電波の測定とマルチアンテナの構成技術

陳 強†

† 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: chenq@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 東北大学澤谷・陳研究室では、変調散乱技術を用いて、複数の観測点における電波の同時・高速測定法や、近傍電磁界の低侵襲測定法、マルチアンテナシステムの構成法などの研究・開発を行ってきた。本講演では、これらの研究成果をまとめて紹介し、理論、実験と試作システムの多面から、アンテナ研究領域における変調散乱技術の特徴、有効性及び問題点を明らかにする。

キーワード 変調散乱, アンテナ, 測定, アレーアンテナ, 移動通信.

## [Tutorial Talk] Modulated Scattering Technique in EM Measurement and Multi-Antenna Construction

Qiang CHEN†

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

**Abstract** Based on the modulated scattering technique, reseaches on fast and simutanious EM measurement method, non- invasive near-field measurement method, and multi-antenna construction technique have been carried out in Sawaya - Chen Laboratory of Tohoku University. In this talk, outline of these reseaches is presented, and the performance, effectiveness, and problems of this technique applied to the antennas research are shown and discussed from thearetical and experimental studies.

**Key words** Modulated scattering technique, antenna, multi-antenna, mobile communications.

### 1. 変調散乱技術

図1に示すように、非線形素子を装着した散乱体に外部からローカル信号  $f_{LO}$  と入射波 ( $f_{RF}$ ) が入射したとき、中間周波数 ( $f_{IF}$ ) の波が散乱体から散乱され、放射される。ローカル信号の振幅が一定であれば、散乱波の振幅が入射波の振幅と比例する。また、ローカル信号の周波数  $f_{LO}$  を変えれば、散乱された変調波の周波数も変わる。これらの性質を利用した変調散乱技術 (modulated Scattering technique, MST) は、主に電波の測定に応用されてきた [1], [2]。私どもの研究グループは、ローカル周波数の異なる変調散乱素子のアレー化による電磁界測定の高速度化や、変調散乱素子をマルチアンテナの素子とするマル

チアンテナなど、変調散乱技術を用いた電磁界の測定法とマルチアンテナの構成法について検討したので、以下に研究の概要を述べる。

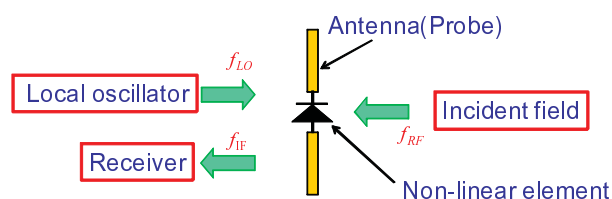


Figure 1 変調散乱の散乱体はアンテナ、プローブとして用いられる。

## 2. 複数の観測点における電磁界の同時測定法

放射電力積分法によるアンテナ放射効率や、アンテナの3次元指向性など測定に、アンテナを囲む半球面において放射界を測定する必要がある[3],[4]。しかし、機械的な半球面走査法は、多くの測定時間を要するという問題点があり、多数の観測点における電磁界の「高速」測定法が求められている。一方、環境電磁の分野では、電子レンジ等の電子機器から漏れた電磁波、特にランダムに発生する瞬間性の電磁波ノイズが周辺の電子機器を誤作動させるという電磁干渉問題に対し、不要電磁波が漏洩する場所を特定するために、複数の地点における電磁界を「同時」測定技術が望まれている。

図2に変調散乱技術を用いた電磁界の同時測定法の原理を説明する。図1に示す非線形素子を負荷とした変調散乱アンテナ(modulated scattering element, MSE)は、入射した電波( $f_{RF}$ )と素子に印加する周波数の極めて低いローカル信号( $f_{LO}$ )との変調を行い、変調波( $f_{IF}$ )を散乱される。MSEをアレー化し、周波数 $f_{RF}$ の電波を放射する波源を囲むように配置される。各MSEの非線形素子に異なる周波数 $f_{LO}$ のローカル信号が印加することにより、各MSEから互いに周波数の少し異なる多数の散乱波 $f_{IF}$ が放射される。これらの散乱波を広帯域のアンテナと受信機で受信すれば、各MSEに入射した電磁界を同時に測定することができる[5],[6]。図3に試作の測定システムを用いて、対数周期アレーアンテナのH面における電界の主偏波指向性を測定する様子を示す。図4に同時測定の結果と従来機械的に走査して測定した結果がほぼ一致していることを示しているが、前者は同時測定であり<sup>(注1)</sup>、後者は10秒オーダーの時間がかかる。エレベーション方向に変調技術による同時測定、アジマス方向に機械的な走査という組み合わせで、アンテナの半球面指向性の測定システムが製品化されている。本システムは、僅か数10秒で3次元、2偏波のアンテナ半球面指向性が測定できる[7]。変調散乱素子に非同期のローカル信号を印加するため、得られたIF信号から元のRF信号の位相情報を復元することが困難であり、関連の研究が続けられている[8]。また、MSEをアレー化した測定法は各素子の電気性能のばらつきがあるため、測定する前に素子のキャリブレーションが必要となる。簡単でかつ高精度のキャリブレーション法を確立することが今後の研究課題である。

## 3. 近傍電磁界の低侵襲測定法

図5に変調散乱法による近傍電磁界の低侵襲測定の原理を示す。この測定システムは変調散乱素子を受信プローブとして用いることにより、プローブにケーブルを接続する必要がなくなる利点がある。また、被測定周波数より格段高い周波数のローカル信号( $f_{LO} \gg f_{RF}$ )を変調散乱素子のプローブに印加すれば、変調散乱素子の小形化ができるため、さらに被測定の近傍電磁界への影響を低減でき、非侵襲性が大変優れている[9],[10]。

(注1)：厳密には、受信機の測定周波数帯域内のサンプリング時間が必要となり、通常マイクロ秒のオーダーである。

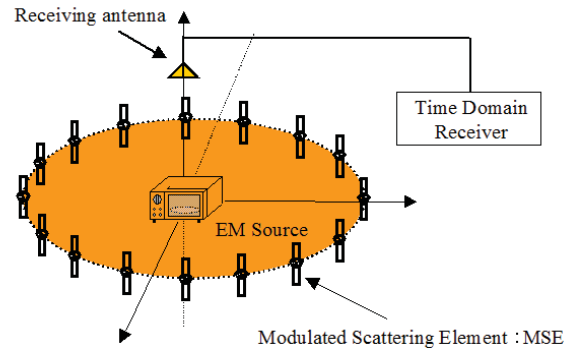


Figure 2 MSEアレーを用いた電磁界の同時測定法

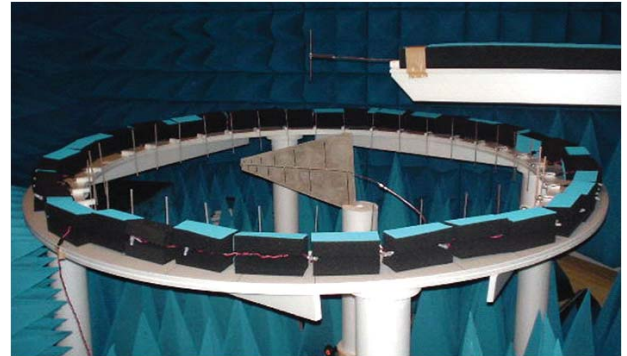


Figure 3 変調散乱法を用いた対数周期アレーアンテナのH面指向性の同時測定

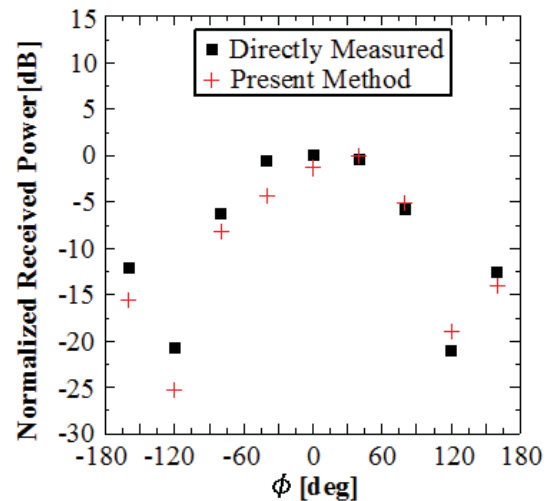


Figure 4 対数周期アレーアンテナのH面指向性

図6に示す2層マイクロストリップ線路の近傍電界を測定した。図7に電界の $E_y$ 成分、図8に電界の $E_x$ 成分の測定結果を示す。LO信号の周波数領域で平均化することにより、LO信号の不安定性を抑えることが可能となり、ムラが小さくなり測定精度が良くなることを確認した。しかしながら、本手法は、ローカル信号の不均一性による誤差が発生しやすいという問題がまだ残っており、測定精度を一層高めるために、プローブに印加するローカル信号をさらに安定させる必要がある。

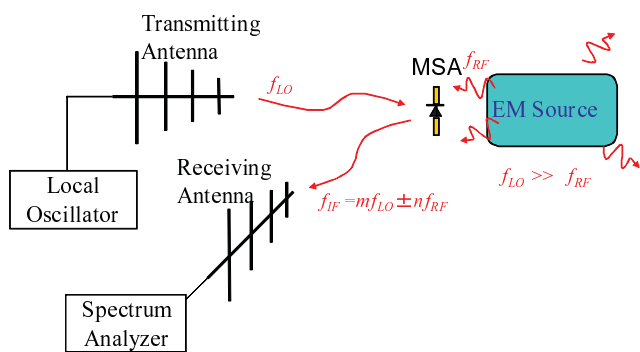


Figure 5 MSA を用いた近傍電磁界の低侵襲測定法

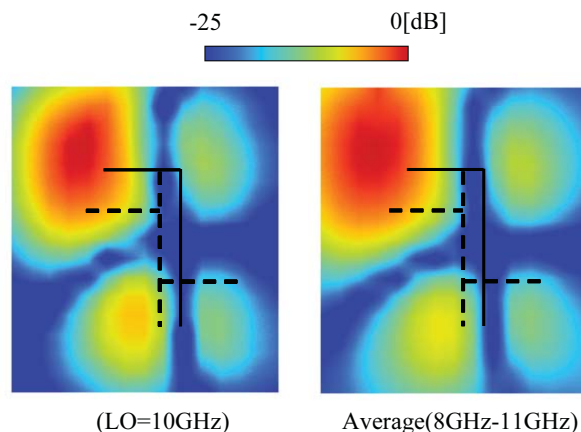


Figure 8 電界  $E_x$  の比較 ( $d_2=2\text{cm}$ ).

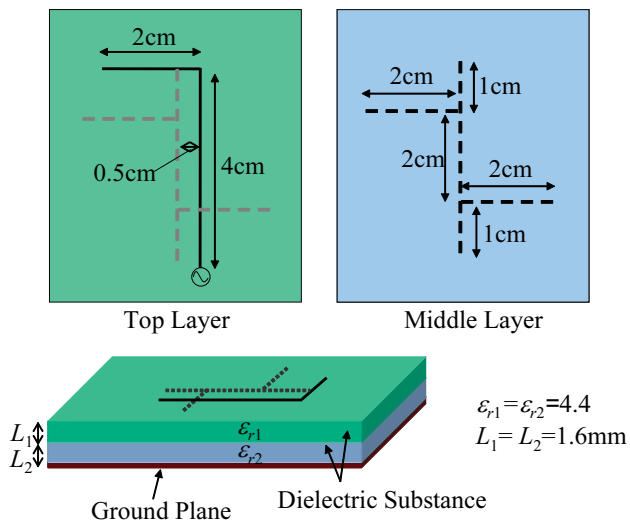


Figure 6 2層マイクロストリップ線路.

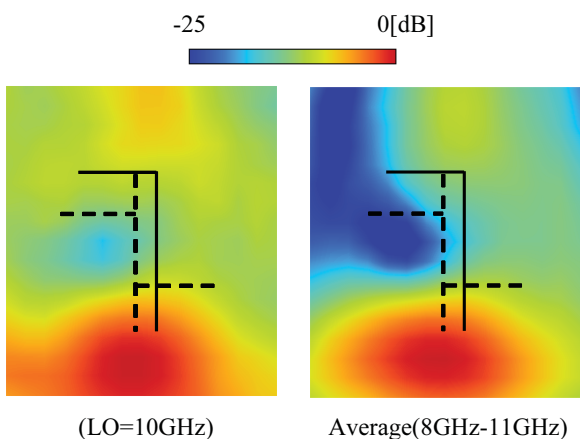


Figure 7 電界  $E_y$  の比較 ( $d_2=2\text{cm}$ ).

#### 4. 変調散乱アンテナアレー

マルチパスフェージングを克服し、高速移動通信を実現するためには、アンテナのダイバーシティや、MIMO 技術などマルチアンテナの使用が必須であるが、無線携帯端末上の限られた場所で数多くのアンテナを搭載する必要があるため、アンテナとアンテナシステムの小型化が望まれている。

私どもの研究グループでは、電磁波の変調散乱技術を用いて

変調散乱アレーアンテナ (Modulated Scattering Array Antenna, MSAA) の構成法を提案している。変調散乱アレーアンテナは、異なるローカル信号の変調により、複数本のアンテナ素子と 1 つの高周波回路と無線で接続できるアレーアンテナであり、ダイバーシティアンテナ [11], [12], MIMO アンテナ [13] として検討されてきた。また、実環境における MSAA による MIMO 通信容量の改善や、MSAA とダイバーシティのハイブリッド法などについても実験的に検討されている [14], [15]。MSAA に非線形素子が含まれているために、MSAA を含むアンテナシステムの数値解析が困難であったが、近年、非線形性を考慮したモーメント法により、MSAA システムを解析し、アンテナシステムの最適化を行う研究も行っている [16], [17]。

変調散乱アンテナアレーは 1 本のアンテナ素子と複数の変調散乱素子から構成される。2 素子変調散乱アンテナアレーの構造を図 4. に示す。変調散乱素子で受信された RF 信号に外部から LO 信号を印加することで非線形素子において IF 信号に変調され再放射される。アンテナ素子では再放射された IF 信号と RF 信号が受信され、図 10 のような周波数領域でアンテナと変調散乱素子で受信された信号を分離することが可能である。

変調散乱アンテナアレーを用いることの利点は、RF フロントエンド回路が通常のアレーアンテナと比較して非常に単純であるということである。3 素子変調散乱アレーアンテナを用いた場合の受信回路のブロック図を図 11 に示す。通常のアレーアンテナではアンテナの素子数だけ RF フロントエンド回路が必要となり、アンプ、フィルタ、ミキサ等の部品が素子数に比例して増える。一方、変調散乱アンテナアレーの場合は受信回路は 1 素子分しか必要としないため非常に単純であり、素子数が増えても回路の規模や複雑さは大きくならない。また、変調散乱素子は、アンテナ素子の間に無線で結ばれているため、アンテナアレーの配置は自由度が大きいと、容易である。

しかし、図 10 からわかる通り、変調散乱アレーアンテナではアンテナ素子で受信される IF 信号のレベルは RF 信号と比較して約 -20dB と非常に低いものになってしまう。そのため変調散乱アレーアンテナを実用可能とするためには IF 信号の受信レベルを改善する必要があり、変調散乱素子とアンテナ素

子の素子間隔の最適化や、ローカル信号の周波数と振幅の最適化などの研究が行われている。また、多チャンネル信号間の信号対雑音比のアンバランスという問題に対し、通信システムの方面から、コーディングと変調方式の多様化を用いた対策法を検討している [18].

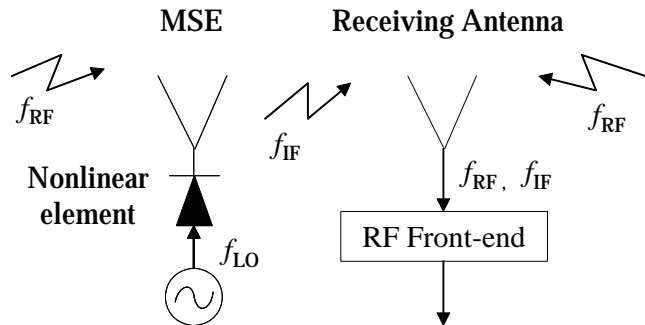


Figure 9 2素子変調散乱アレーアンテナ.

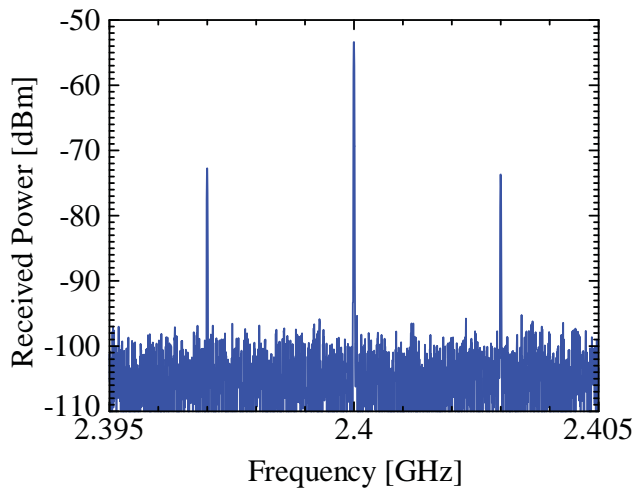


Figure 10 アンテナ素子で受信された RF 信号と散乱された IF 信号.

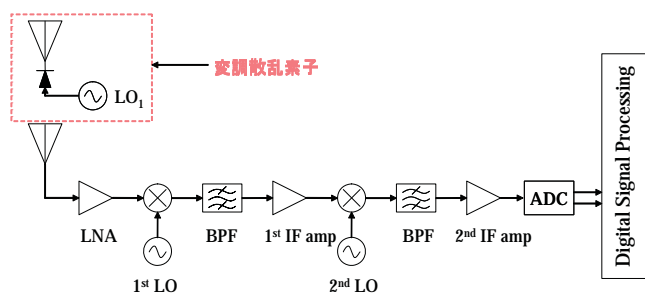


Figure 11 2素子変調散乱アレーアンテナの受信回路ブロック図.

### References

[1] J. H. Richmond, "A modulated scattering technique for measurement of field distributions," *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-3, pp. 13-15, July 1955.

[2] Jean-Charles Bolomey and Fred E. Gardiol, *Engineering Applications of the Modulated Scatterer Technique*, Artech House, 2001.

[3] 石井望, アンテナ基本測定法, コロナ, 2011年.

[4] 佐々木亮, 陳強, 中村精三, 澤谷邦男, "ペ-ジャ用ループアンテナの放射効率の測定とその改善," *電子情報通信学会論文誌*, vol.

J81-B-II, no. 12, pp. 1153-1155, 1998.

[5] 入江泰行, 陳強, 澤谷邦男, "変調散乱法を用いた電磁界測定法," *平成14年度電子情報通信学会総合大会論文集*, B-1-154, 2003.

[6] Q. Chen, K. Sawaya, T. Habu et al., "Simultaneous Electromagnetic Measurement Using a Parallel Modulated Probe Array," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 2, pp. 263-269, 2007.

[7] <http://www.deviceco.co.jp/product/tjreal.htm>

[8] 水上透, 陳強, 澤谷邦男, "A Measurement Method Using a Modulated Probe Array for Phase of Electromagnetic Field," *信学技報*, vol. 108, no. 475, AP2008-230, pp. 95-98, 2009年3月.

[9] チャカロタイジエドヴィスノブ, 陳強, 澤谷邦男, "変調散乱素子を用いた非侵襲的近傍電磁界測定法," *信学技報*, EMCJ2004-16, pp. 13-16, 2004年6月.

[10] 梶山博史, 陳強, 澤谷邦男, "高周波変調ワイヤレスプローブを用いた近傍電磁界の測定," *通学技報*, AP2006-1, pp. 1-4, 2006年4月.

[11] Q. Yuan, M. Ishizu, Q. Chen, and K. Sawaya, "Modulated scattering array antennas for mobile handsets," *IEICE Electron. Express*, vol. 2, no. 20, pp. 519-522, 2005.

[12] Q. Chen, Y. Takeda, Q. Yuan, and K. Sawaya, "Diversity performance of modulated scattering array antenna," *IEICE Electron. Express*, vol. 4, no. 7, pp. 216-220, 2007.

[13] Q. Chen, L. Wang, T. Iwaki, Y. Kakinuma, Q. Yuan, and K. SAWAYA, "Modulated scattering array antenna for MIMO applications," *IEICE Electron. Express*, vol. 4, no. 23, pp. 745-749, 2007.

[14] L. Wang, Q. Chen, Q. Yuan, and K. Sawaya, "Experimental Study on MIMO Performance of Modulated Scattering Antenna Array in Indoor Environment," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E93-B, no. 3, pp. 679-684, March, 2010.

[15] L. Wang, Q. Chen, Q. Yuan, and K. Sawaya, "Diversity performance of Modulated Scattering Antenna Array with switched reflector," *IEICE Electron. Express*, vol. 7, no. 10, pp. 728-731, May, 2010.

[16] M. He, L. Wang, Q. Chen, Q. Yuan, and K. Sawaya, "Theoretical and Experimental Investigation of the Modulated Scattering Antenna Array for Mobile Terminal Applications," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 58, no. 10, pp. 2589-2597, 2010.

[17] L. Wang, Q. Chen, Q. Yuan, and K. Sawaya, "Numerical Analysis on MIMO Performance of the Modulated Scattering Antenna Array in Indoor Environment," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E94-B, no. 6, pp. 1752-1756, June, 2011.

[18] Y.-H. Lee, Y.-G. Jan, H. Huang, Q. Chen, Q. Yuan, and K. Sawaya, "Using LDPC coding and AMC to mitigate received power imbalance in carrier aggregation communication system," *IEICE Electron. Express*, vol. 8, no. 8, pp. 618-622, 2011.