

論文

電波反射箱型 MIMO-OTA 測定環境

—その実力と可能性—

大島 一郎* 唐沢 好男**

MIMO 通信端末を実利用環境で評価したい場合には、OTA (Over-the-Air) 状態での測定評価環境が必要になる。具体的な構築法のひとつ電波反射箱型 MIMO-OTA 測定システムに着目し、筆者らが構築してきた種々の電波反射箱の構成と特徴を示し、その現状、および、可能性について以下にまとめる。

なお、本稿は、“大島一郎、唐沢好男、電波反射箱型 MIMO-OTA 測定環境 —その実力と可能性—、信学技報、A・P2011-108, pp.109-114, Nov. 2011”の一部を改変して転載したものである (copyright©2011 IEICE)。

1. はじめに

MIMO 通信端末を実利用環境で評価したい場合には、その評価環境が必要になる。測定端末周辺にフェージング環境を形成する測定法は、OTA 測定系と呼ばれている。具体的な構築法には、周囲に仮想散乱体アンテナを配置してフェージング環境を作り出すフェージングエミュレータ (FE) 方式と、金属壁面の反射特性を利用する電波反射箱 (Reverberation Chamber: RC) 方式がある。MIMO の実伝搬環境の統計的性質を実現する機能を OTA 測定系に具備することが理想であるが、そのようなオールマイティなものではなく、評価目的によって使い分けることになる⁽¹⁾。

RC 測定系は、一般に簡易に構築でき、マルチパスリッチな遅延波環境を容易に作り出せるメリットがあるが、伝搬パラメータの制御や高速な時間的変動を作り出すことが得意ではない。RC 方式については、文献(2)で紹介されている先駆的なシステム開発があるものの、まだ、その可能性が十分に引き出されていないと筆者らは考えている。そのため、筆者らは、独自の反射箱を試作し、その弱点を克服する手法の提案を行ってきている^{(3)~(7)}。

2. MIMO-OTA が具備すべき機能

MIMO-OTA 測定では、フェージング環境下での通信路容量 (あるいはスループット) や BER などが性能評価に用いられる。このような移動体通信への応用も含めると、OTA 測定系には、端末の測定環境 (マルチパス環境) としては、以下のような機能が求められる。

- 1) 振幅変動が目的とする確率分布になる
- 2) 時間変動が指定のパワースペクトルになる
- 3) 基地局側の空間相関特性が実現できる
- 4) 移動局側の空間相関特性が実現できる
- 5) 伝搬の交差偏波特性 (XPR) が制御できる
- 6) 指定の遅延プロファイルが実現できる

1) の振幅分布については、レイリー分布、仲上・ライス分布が基本であるが、まずは、レイリー分布でよいであろう。

2) は、端末評価の場合には、移動局側の代表的環境である Jakes 型のパワースペクトル (= 到来角分布が水平面の周囲一様とする環境で発生する時間変動スペクトル) が規範モデルになる。

3), 4) は、測定がダウンリンク (端末側での受信) で行われれば、送信側空間相関・受信側空間相関と読み替えられ、パスの角度特性 (AOD (TX 側), AOA (RX 側)) によって決まる。一般的には、3) はアンテナ配置に端末側ほどの厳しいスペース制約はないので、無相関としても問題は少ないであろう。

*技術開発統括部 電気通信開発部

**電気通信大学 先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター

5) は、屋内・屋外を問わず 10dB ~ 0dB 程度の測定値が多いので、XPR はこの程度の値が実現できればよいであろう。

6) については、代表的な遅延プロファイルの形は指数関数型のものであり、遅延広がり程度を表すパラメータである遅延スプレッドが 10ns ~ 10 μ s 程度に設定できれば十分であろう (100ns ~ 1 μ s 程度でも大部分のケースではよいであろう)。

上記 1) ~ 6) の評価については、実環境 (実現したい伝搬モデル) と OTA 環境での諸特性は、チャネル相関行列の固有値特性など、特性評価に本質的な諸量に着目して比較するのがよいであろう⁽⁵⁾。

図 1 は、対象とするマルチパス環境の一例 (マルチクラスター環境) を、図 2 は、それを統計的に表現するためのチャネルモデルを 4 つの機能に分けて表現している。図 1 に示されるマルチクラスター環境では、その特性は、3), 4) に反映される。上記 1) ~ 6)

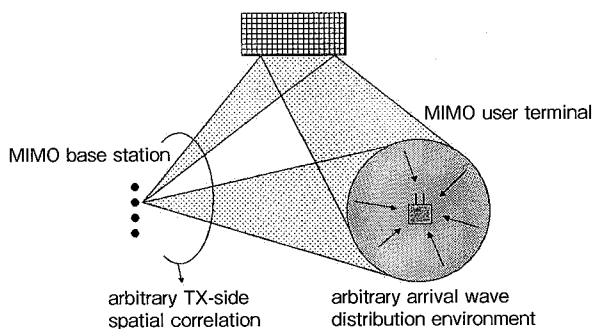


図 1 MIMO 伝搬環境

の統計的性質を図 2 の構成に反映することができれば、それは機能面で理想の MIMO-OTA システムとなる。

3. RC 方式の種々の構成とその特徴

3.1 基本構成

電波反射箱の基本構成を図 3 に示す。我々の製作した電波反射箱は、6 面がアルミニウムのパネルで囲まれた、幅 4m × 奥行き 2m × 高さ 2m の直方体である。MIMO の送受信装置を反射箱内に置いて、この中で送受信を行う。

ここで、この反射箱の基本性能の一例を示す⁽³⁾。性能評価の測定方法は、まず、送受信アンテナとして、垂直偏波ダイポールを幅方向に対向して設置する。次に、送受信アンテナにネットワークアナライザを接続して、受信レベルを測定する。受信アンテナは、

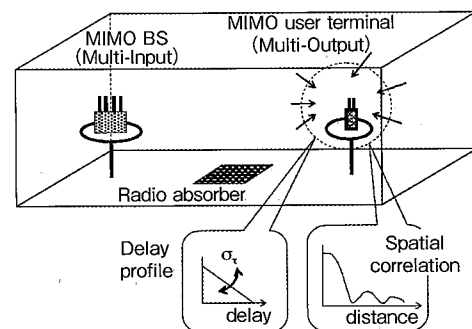


図 3 電波反射箱基本構成

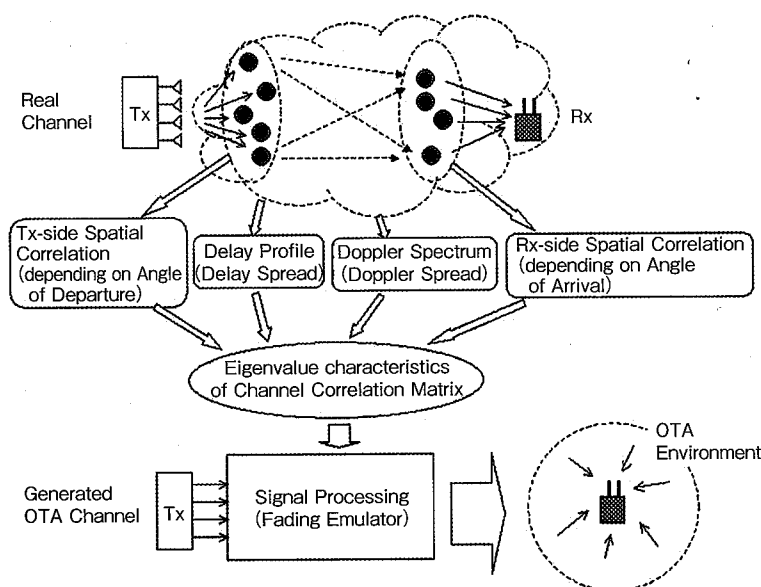


図 2 OTA システムに組み入れるための MIMO 伝搬チャネルの機能別表現

スライドレールに取り付けられており、奥行き方向に0～200mm(101ポイント)の範囲で移動しながら測定する。周波数範囲は、5.0～5.2GHz(1,601ポイント)である。

測定した周波数・空間特性データ(周波数領域1,601ポイント×空間領域101ポイントの合計161,701ポイント)から算出した受信レベルの累積確率分布(CDF)を図4に示す。受信電力分布の中央値は-29.7dBであった。破線は、算出したCDFと同じ中央値を持つレイリー分布理論値のCDFであり、両者は良く一致している。このような反射波が卓越する環境では、見通し内配置であったとしても、多数回の反射を繰り返すマルチパス波の電力に比べて直接波の電力が無視できるほどに小さいものとなり、レイリーフェージング環境となる。

基準位置(移動距離0)での受信電力を基準として、各測定ポイントの受信電力変動の相関係数を算出すると、図5が得られる。破線は、レイリーフェージング環境においてマルチパス波が水平面一様に到

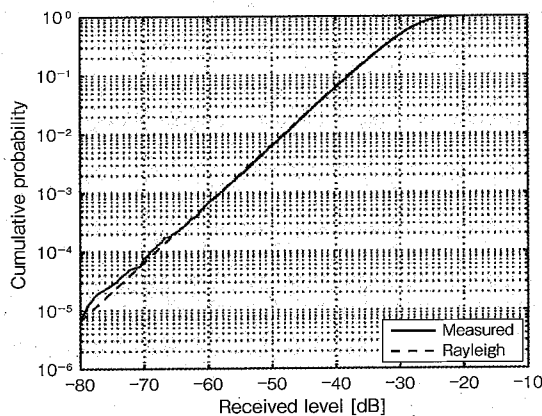


図4 基本構成における受信レベルの累積確率分布

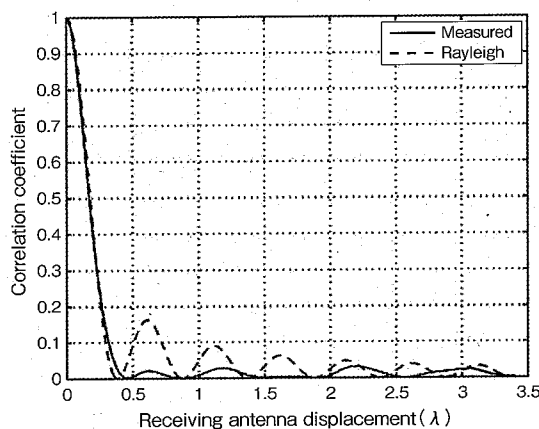


図5 基本構成における空間相関特性

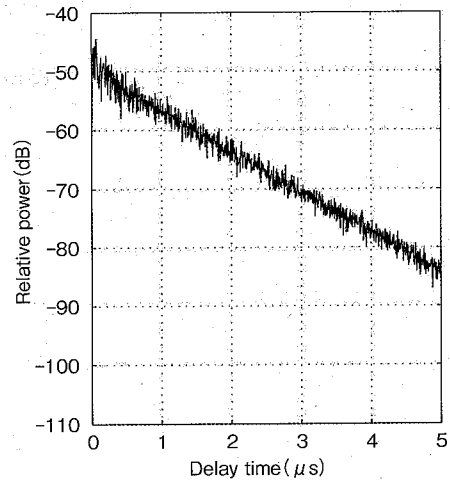


図6 基本構成における遅延プロファイル

来する場合の空間相関特性の理論値である。理論値と測定値は類似しており、本反射箱内の到来角度分布は、統計的に、周囲一様分布であることが推定できる。

測定データからインパルス応答を算出すると、図6に示す遅延プロファイルを得ることができる。対数グラフではほぼ直線とみなすことができ、指数関数型の遅延プロファイルが実現できていることがわかる。また、このときの遅延スプレッドは、 $0.6\mu\text{s}$ が得られている。この遅延スプレッドの大きさは、床面に適当な大きさの電波吸収シートを置くことにより、 $0.6\mu\text{s} \sim 0.1\mu\text{s}$ の範囲で、水平面の到来角度特性(この場合は、水平面内一様分布)を同じに保ったまま変えることができる⁽³⁾⁽⁴⁾。以上の結果より、基本構成の電波反射箱の特性をまとめると、次の機能が実現できている。

- 1) 振幅分布はレイリー分布
 - 4) 空間相関特性は周囲一様分布
 - 6) 遅延プロファイル特性は指数関数型であり、遅延スプレッドの大きさが変更可能
- また、5)のXPRは約1dBであり、値は固定である。

3.2 高速フェージング環境を実現するRC-FEハイブリッド方式

RC方式の環境構築の最大の弱点は、高速な時間的変動を作りにくい点である。低速変動であれば、機械的に動くメカニズムで対処可能であるが⁽²⁾、高速フェージングによるキャリア間干渉(ICI)の問題を評価したいような場合には無理である。

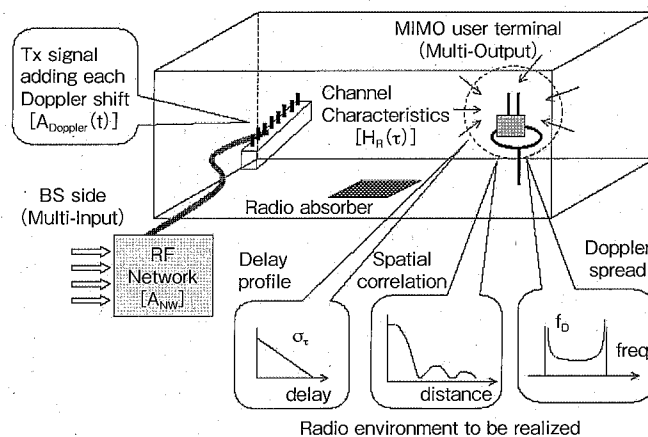


図7 高速フェージング環境を実現する FE-RC ハイブリッド方式

そこで、筆者らは、フェージングエミュレータ (FE) 方式で簡易構成として提案しているコネクションマトリクス回路を電波反射箱 (RC) 方式に組み入れたハイブリッド方式を提案している (図7)⁽⁵⁾。ここでいう FE 方式での簡易構成法は、高価なフェージングシミュレータを使用せず、図2に示す FE 型 MIMO-OTA に求められる4つの機能を分担して実現する方法を採っている。4つの具体的な機能を以下に示す。

- (i) MIMO 送信側空間相関を Walsh-Hadamard (WH) 符号系列を用いて無相関チャネルとして実現するコネクションマトリクス: A_{TX}
- (ii) 周波数選択性フェージングを実現するマルチパス遅延生成: A_{delay}
- (iii) 測定端末の移動速度と素波の到来角度によって生じるドップラー周波数付加: $A_{Doppler}$
- (iv) 散乱源・受信端末間での空間合成によって実現するレイリー変動: A_{RX}

文献(5)では狭帯域信号を扱っているため、簡易構成法で構築されるシステムのオーバーオールチャネル応答行列 A は、以下のように3つに分解して表現することができる。

$$A(t) = A_{RX} \times A_{Doppler} \times A_{TX}$$

これを実現するためのネットワーク回路の構成を図8に示す。ここでは、送信アンテナの素子数は $M=2$ 、散乱源の素子数は $L=8$ 、受信アンテナの素子数は $N=2$ である。式の A_{TX} に対応する機能を実現するコネクションマトリクス、 $A_{Doppler}$ に対応するドップラーシフター、 A_{RX} に対応する電波反射箱の3つのユニットから構成されている。

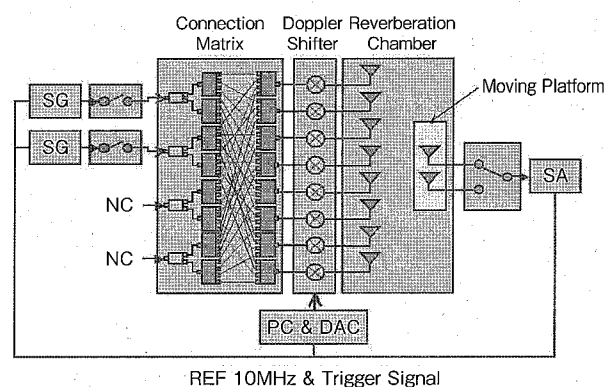


図8 送信系ネットワーク回路の構成図

コネクションマトリクスは、分配ブロック・ネットワークブロック・合成ブロックで構成されている。基準信号と、基準信号に対して位相を π 遅らせた逆相信号を、WH 符号となるように接続している。

ドップラーシフターは、8 個の IQ ミクサと、16ch DAC を搭載した PC で構成している。

電波反射箱の基本特性は前節で示したが、散乱源となるアンテナ素子は、電波反射箱内の片隅に空間相関係数が十分低くなる 0.5 波長間隔で直線的に配置している。

以上より、基本構成の電波反射箱の機能 1)、4)、6) に加えて、2) の時間変動として、指定のドップラー変動を模擬できるようになる。ただし、ドップラースペクトルの到来角度依存性は消失しているため、利用目的によっては注意が必要である。また、コネクションマトリクスの工夫により、3) の基地局側の空間相関特性も実現可能であろう。

3.3 到来角度特性・交差偏波特性の制御

電波反射箱内の到来角度特性は、水平面内におい

て一様分布とみなすことができる(実際には、3次元空間において一様分布に近い)⁽⁵⁾。また、XPR(交差偏波電力比)も、約1dB程度で、偏波特性の劣化が大きい環境を実現している。しかしながら、これらの値を制御することがこのままでは困難である。そこで、筆者らは、反射箱の中にもう一つの反射箱環境を作り、取り囲むボードの透過率や偏波特性を変えることによって、マルチパスリッチ環境を維持したままで、偏波特性や到来角度特性を制御できる二重反射箱型構造を提案している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

ここで、二重電波反射箱の具体的な構成を図9に示す。内部の電波反射箱は、直径1m×高さ1mの正八角柱の形状をしており、アルミニウムでできた上板・下板、および側面板で囲まれた構造となっている。図10に示すように、側面板には周期的な開口が設けられており、所望の周波数帯のみを通過させる、いわゆる周波数選択板としての動作をする。ここでは、実験周波数5.1GHz帯の電波が通過するように、正方形開口の大きさと配列間隔が決定されている。この周期的な開口が設けられた側面板を基本とし、

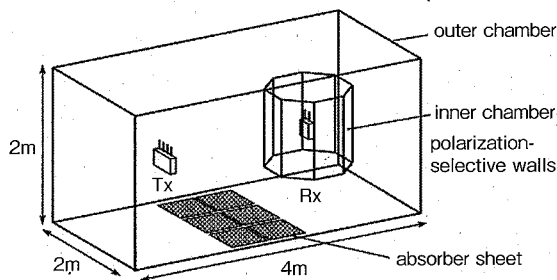


図9 偏波特性・入射角特性を制御する二重反射箱環境

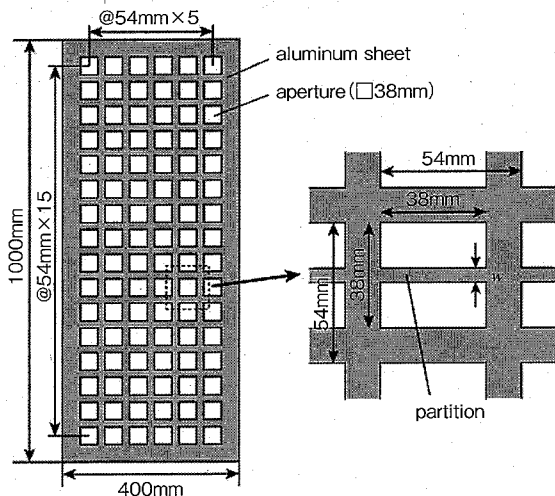
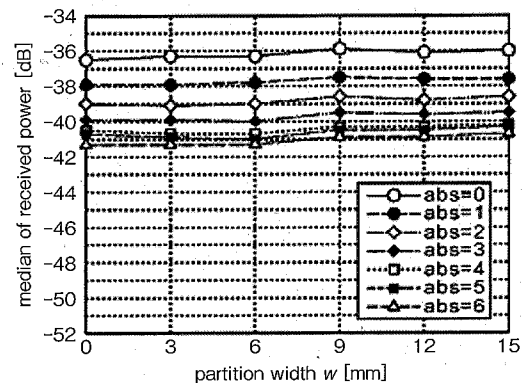


図10 XPRを制御する側面板の構造

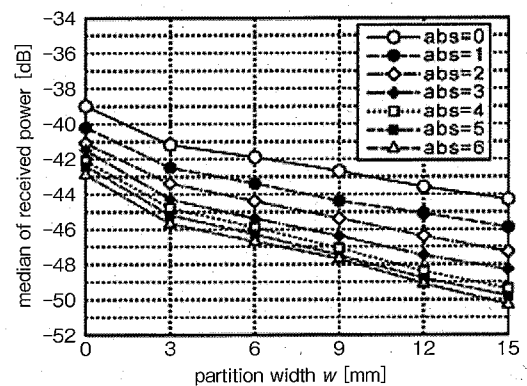
その開口の形状を変えることで、電波の通過量を制御することができる。図10における側面板の開口の中央には、幅 w [mm]の水平成分の仕切りが設けられている。この仕切りは、水平偏波成分のみを遮断するはたらきがあり、幅 w を変えることで、水平偏波成分の通過量を制御できる。結果として、垂直偏波成分と水平偏波成分の通過量に差が生じ、受信アンテナでのXPRの制御が可能になる。

特性確認のための測定条件を次に示す。送信アンテナとして45°偏波のダイポールアンテナを用い、受信アンテナとして垂直偏波または水平偏波のダイポールアンテナを内部の反射箱内の中心に設置する。受信アンテナを電動スライダに取り付け、内部反射箱の中心から水平方向に移動しながら各位置での伝搬特性を測定する。また、外側の反射箱の床面には60cm□の電波吸収シートが配置され、0~6枚まで枚数を変更することで、遅延スプレッドの大きさも同時に制御する。

測定結果について示す。図11に、電波吸収シートの枚数をパラメータとした場合の仕切り幅 w に対する受信電力の中央値の変化を示す。垂直偏波受信



(a) 垂直偏波



(b) 水平偏波

図11 仕切り幅 w に対する受信電力の中央値の変化

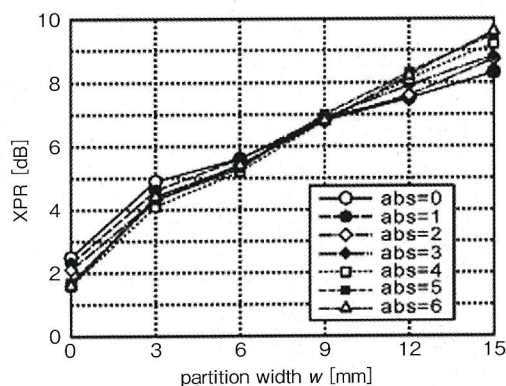
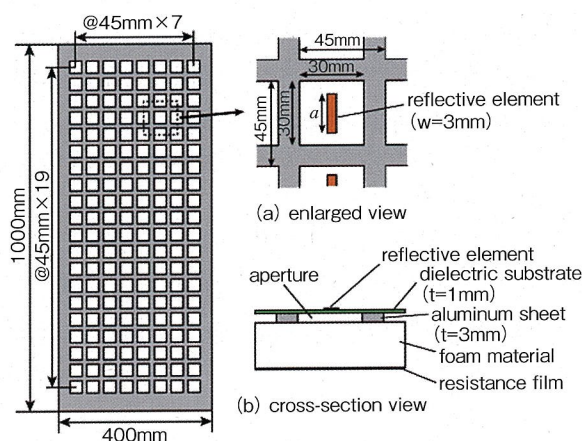
図 12 仕切り幅 w に対する XPR の変化

図 13 到来波分布を制御する側面板の構造

時は、仕切り幅 w に関わらず受信電力中央値はほぼ一定値を保っているが、水平偏波受信時は、仕切り幅 w が大きくなるにつれて受信レベルが減少している。ここで、垂直偏波の受信電力中央値と水平偏波の受信電力中央値の差を XPR とすると、図 12 に示すように、仕切り幅 w を大きくするほど XPR を大きくすることができ、最大の XPR としては $w=15\text{mm}$ のときに 9.6dB が得られている。また、電波吸収シートの枚数に対する XPR の変化は約 1dB と小さく、XPR は、主に仕切り幅 w に依存しているといえる。

開口の形状を変化させる方法は、他にも様々なものが考えられるが、図 13 は、偏波制御に加えて、到来波分布の制御を可能とする例である⁽⁷⁾。開口の中央には、誘電体基板上に幅 3mm × 長さ $a[\text{mm}]$ の銅箔があり、これを反射素子とよぶ。この反射素子の長さ a を変化させることで垂直偏波の通過量を制御することができ、長さ $a=22.5\text{mm}$ のとき垂直偏波の通過量を 20dB 以上減少させる。また、内部反射箱

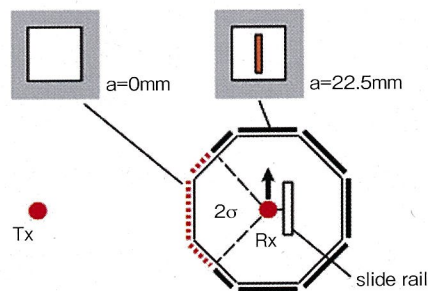


図 14 到来角度分布の制御方法

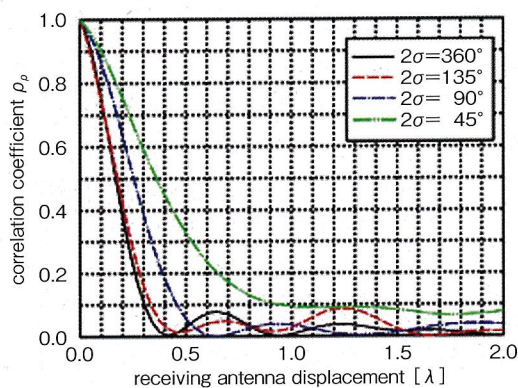


図 15 通過角度範囲に対する空間相関特性

内での反射を抑制するために、側面板の内側には $\lambda/4$ 型電波吸収体が貼り付けられている。これにより、側面板での通過量によって決定された到来波分布で、受信アンテナに受信させることができる。

図 14 に示すように、電波を通過させる範囲の開口を反射素子なし ($a=0\text{mm}$) とし、電波を通過させない範囲の開口を反射素子 ($a=22.5\text{mm}$) で覆い、通過角度範囲 2σ を変えて、受信特性を測定する。

通過角度範囲を 45° 、 90° 、 135° 、および 360° としたときの空間相関特性を図 15 に示す。通過角度範囲を狭くするにしたがって、メインローブは広がっており、その特性は、通過角度範囲と同じ角度広がりをもつラプラス分布の空間相関特性とほぼ同じであった。

以上より、基本構成の電波反射箱の機能 1)、4)、6)に加えて、

- 4) 移動局側の空間相関(ラプラス分布)
- 5) 移動局側の XPR の制御

が実現できる。また、ハイブリッド方式とすることで、2)の時間変動も可能になる。

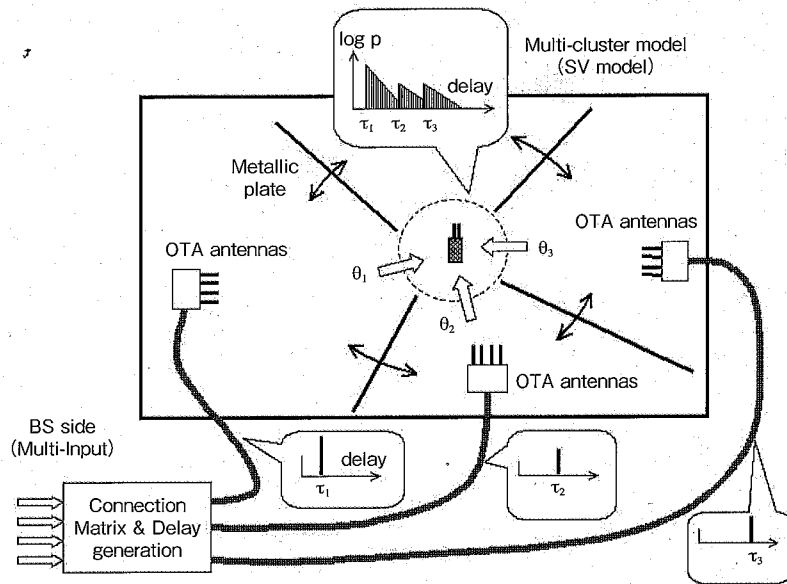


図 16 Saleh-Valenzuela 型遅延プロファイルを有するマルチクラスタ環境の生成

3.4 より多様性のある環境構築へ

筆者らは、文献(8)において、FE方式を対象に、簡易な構成により広帯域フェージング環境、すなわち10波程度の離散的遅延波環境を実現する方法を提案している。この方法をハイブリッド方式に適用すると、個々の離散的遅延波に対して、電波反射箱の遅延特性が相乗されて、マルチクラスタ型遅延プロファイル(Saleh-Valenzuelaモデル⁽⁹⁾)が実現できるであろう。それぞれの遅延波群に異なる到来角度を割り当てるためには、電波反射箱を金属面で仕切ってセクタ化するとよいであろう。このイメージを図16に示す。

これにより、

- 4) 移動局側の空間相関
- 6) 遅延プロファイル

をより一般的なものに拡張していくことができるであろう。

4. ま と め

電波反射箱型MIMO-OTA測定システムに焦点を当て、筆者らが構築してきた種々の電波反射箱の構成と特徴を示した。電波反射箱は、パラメータ値の制御に難点を有すると考えられているが、様々な工夫により、それらの大部分は解決可能であることを示した。

参考文献

- (1) 3GPP TR37.976 v1.1.0, "Measurement of radiated performance for MIMO and multi-antenna reception for HSPA and LTE terminals(Release 10)," 2010.
- (2) P. S. Kildal and K. Rosengren, "Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling radiation efficiency, and diversity gain of their antennas:Simulation and measurements in a reverberation chamber," IEEE Commun. Mag., vol.42, no.12, pp.104-111, Dec. 2004.
- (3) 佐々木克守, 大島一郎, 唐沢好男, "マルチパスリッチ環境を実現する電波反射箱 [II]," 信学技報, A・P2008-77, Sept.2008.
- (4) アリフ リズワン, 篠沢政宏, 大島一郎, 唐沢好男, "マルチパスリッチ環境を実現する電波反射箱 [III]," 信学技報, A・P2010-164, Feb.2011.
- (5) 篠沢政宏, パシシング サハルル, アリフ リズワン, 唐沢好男, "任意ドップラースプレッドのマルチパス環境を実現する MIMO 端末特性評価用電波反射箱," 信学論(C), vol.J93-C, no.12, pp.612-621, Dec. 2010.
- (6) 大島一郎, 唐沢好男, "二重電波反射箱によるマルチパス伝搬環境制御," 信学論(B), vol.J94-B, no.9, pp.1056-1064, Sept. 2011.
- (7) 大島一郎, 唐沢好男, "二重電波反射箱による到来波

分布制御,” 信学ソ大, B-1-179, Sept. 2011.

(8) 唐沢好男, 小佐古昂, 清水正彦, “MIMO フェージングエミュレータ型 OTA システムの簡易構成法,” 信学技報, A・P2010-131, Dec. 2010.

(9) A. A. M. Saleh, R.A. Valenzuela, IEEE JSAC, vol. SAC-5, no.2, pp.128-137, 1987.

☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆



大島 一郎
平成7年入社
技術開発統括部 電気通信開発部
移動通信用アンテナ・電波伝搬の研究開発
電子情報通信学会



唐沢 好男
電気通信大学教授
電波伝送・アンテナ・デジタル伝送方式の研究。工学博士
IEEE フェロー・電子情報通信学会フェロー