

レイトレーシング法による市街地偏波特性の解析

福重 勝 今井 哲朗

株式会社 NTT ドコモ 〒239-8536 神奈川県横須賀市光の丘 3-5

E-mail: fukushige@nttdocomo.co.jp

あらまし

市街地における偏波特性については、これまで特に実測による検討が数多くなされ、XPD の特性として報告されてきた。例えば、市街地における屋外の一般的な XPD は 5~8dB であると言われており、送受信間距離に依存しないこと等が実測結果から明らかになっている。一方、シミュレーションにおいては、簡易な反射と回折のモデルより、交差偏波成分が生じるメカニズム等についての検討がなされてはいるが、十分ではない。

本稿では、レイトレーシング法を用いて、現実的な伝搬環境（地形・建物環境）における XPD 特性を解析したので報告する。

キーワード レイトレーシング法, 市街地, XPD (交差偏波識別度)

1. まえがき

基本的に送受信間が見通し外かつ多重波伝搬が前提となる移動通信システムの伝搬環境では、電波が伝搬する過程において交差偏波成分が生じることが知られている。そこで、基地局アンテナ・ダイバーシチとして偏波ダイバーシチの適用が可能であり、これまでの検討から、その特性は①移動局のアンテナ傾き角と②伝搬路の交差偏波識別度 XPD (Cross polarization discrimination) に依存することが明らかにされている [1]。例えば、ダイバーシチの効果が最大限に得られるのは、XPD の値にかかわらず移動局のアンテナ傾き角が 45° の場合である。また、アンテナ傾き角を垂直もしくは水平に近づけていくとダイバーシチ効果は次第に劣化する。ここで、XPD が大きいほどこの劣化量は大きい。

偏波ダイバーシチのパフォーマンス、特にその最悪値は XPD により決定される。したがって、XPD の特性を明らかにすることは重要であり、これまで実伝搬環境における多くの測定結果が報告されている。これらの報告より、市街地の XPD は一般的に送受信間距離に依らず 5~8dB 程度とされている [1-6]。また、最近、自由空間損失で正規化した付加損失で評価すると、付加損失が大きいほど XPD が小さくなることが報告された [7]。このように XPD の特性は実測の結果より明らかにされてきたが、一方で交差偏波成分が生じるメカニズム等、XPD に関する理論的な検討はほとんど行われていない。なお、文献 [8] では、簡易な反射と回折のモデルより交差偏波生成メカニズムについて検討しているが十分ではない。偏波ダイバーシチの効果を詳細に把握するためには、XPD の理論的な検討も重要で

あると考える。

ところで、様々な伝搬環境における電波伝搬の諸特性を一元的に推定できる方法にレイトレーシング法があり、現在我々は本方法を用いた市街地対応の伝搬推定システム UMAP (Urban Macrocell Area Prediction system) を開発している [9,10]。本システムでは、偏波面を考慮したシミュレーションが可能である。具体的には、基地局アンテナ (送信アンテナ) と移動局アンテナ (受信アンテナ) の励振方向 (ノ偏波方向) を設定し、反射および回折による偏波方向の回転を考慮してレイトレーシングを行う。したがって、UMAP では受信電力、伝搬遅延等に加えて、XPD も推定することが可能である。本報告では、UMAP を用いて現実的な伝搬環境 (地形・建物環境) における XPD 特性を解析したので報告する。

2. レイトレーシング法による解析

2.1. UMAP

本稿で用いた伝搬推定システム UMAP は、演算処理の高速化を実現するために、次のような手法を導入している。まず、基地局 (BS) 及び移動局 (MS) からの見通し建物の探索を行い、次にこれら見通し建物を対象にイメージング法に基づくレイのトレースを行う。ただし、BS 側見通し建物 (及び BS) から MS 側見通し建物 (及び MS) の間では建物屋上の水平エッジによる多重回折も簡易的に考慮する。本方法を用いることにより、各伝搬特性に大きく寄与するパス、例えば①Walfish-池上モデル上のパス (受信電力)、②BS 見通し建物による反射・回折パス (遅延スプレッド)、③MS 周辺建物による反射・回折パス (BS 側角度スプレ

ッド) を効率よくトレースすることができる。受信電力、遅延スプレッド、BS 側角度スプレッドに関する推定精度の詳細は文献[9,10]参照。

2.2. 解析方法

解析エリアは図 1 に示す神奈川県横須賀市の中心部とした。基地局の位置は NTT 横須賀局とし、図 1 の計算範囲内を対象にレイトレース演算を行った。ただし、XPD の特性解析には市街地と見なせる図 1 の解析範囲内の結果のみを用いることとした。なお、図 1 において青色で塗りつぶした部分は建物を表している。

表 1 に UMAP で設定した計算条件を示す。計算は周波数：2GHz 帯、送信電力：30dBm、BS アンテナ高：66m、MS アンテナ高：1.5m として行った。なお、UMAP では BS 側が送信、MS 側が受信となる。BS および MS のアンテナは共に完全無指向性の理想アンテナを仮定した。ただし、アンテナの偏波面は、BS 側において垂直偏波(V)または水平偏波(H)、MS 側において垂直偏波(V)と設定した。また、レイトレーシング条件は、見通し建物による最大反射回数：1 (BS 側：1 または MS 側：1)、見通し建物による最大回折回数：1 (BS 側：1 または MS 側：1) とした。ただし、建物の屋上による多重回折回数は無限大。なお、表 1 に示す BS 側最低建物高と MS 側最低建物高はそれぞれ BS 側もしくは MS 側で見通し建物として演算で考慮する最低の建物高を意味する。また、建物の材質は全てコンクリートとし、具体的には電気的特性として比誘電率：6.76、比透磁率：1、導電率：0.0023S/m を与えた。

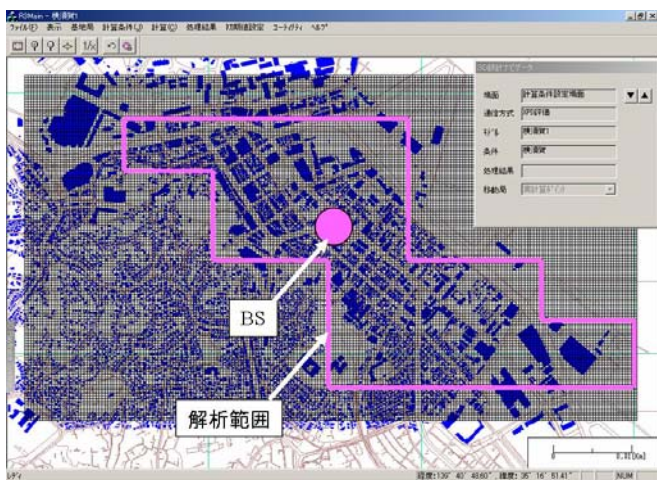


図 1 解析エリア

表 1 計算条件

| 項目 | 設定値 |
|------------|--------------------------|
| 周波数 | 2GHz 帯 |
| 送信電力 | 30dBm |
| BS アンテナ高 | 66m |
| MS アンテナ高 | 1.5m |
| BS・MS アンテナ | 理想アンテナ (無指向性、利得 0dBi) |
| 偏波 | BS:V/H、MS:V |
| 最大反射回数 | 1(BS 側1回または MS 側1回) |
| 最大回折回数 | 1(BS 側1回または MS 側1回) |
| 屋上多重回折回数 | ∞ |
| BS 側最低建物高 | 66m(BS アンテナ高と同等) |
| MS 側最低建物高 | 0m(地表面) |
| 建物の材質 | 全てコンクリート |

3. 解析結果

3.1. 受信レベルと XPD

本稿では、市街地における偏波特性を、交差偏波識別度 XPD を基に評価する。

まず、図 2 と図 3 にそれぞれ V 偏波送信時の受信電力 $P_{r,v}$ と H 偏波送信時の受信電力 $P_{r,h}$ の場所的分布をカラーマップで示す。ただし、図において、横軸と縦軸はそれぞれ経度 (秒) と緯度 (秒) を表している。また、+印は BS 位置、白抜きの部分は建物を示す。これらの図より、H 偏波受信電力 $P_{r,h}$ よりも V 偏波受信電力 $P_{r,v}$ の方が全般的に大きな値となることが分かる。そこで、各の計算ポイント(移動局ポイント)における XPD を $P_{r,v}$ と $P_{r,h}$ の dB 差分より求めた結果を図 4 に示す。この結果より、XPD はほとんどの場所で正の値となることが分かる。また、開けた空間や幅の広い道路上では比較的大きな値となっている。これは、図 2 と図 3 の比較から分かるように、開けた空間や幅の広い道路上において、H 偏波受信電力 $P_{r,h}$ は V 偏波受信電力 $P_{r,v}$ ほど値が大きくなるためである。

一般的に移動伝搬環境における XPD の評価は送受信間が見通し外であることを前提とする。解析範囲内における見通しの有無を図 5 に示す。赤色部分が見通し内、青色部分が見通し外のポイントである。それぞれのポイント数は、全ポイント数:6596 に対して、1360 ポイント(見通し内)と 5236 ポイント(見通し外)である。以下、特に見通し外ポイントを対象とした XPD の特性について得られた結果を示す。

図 6 と図 7 に受信電力と XPD の累積分布を示す。受信電力については V 偏波受信電力 $P_{r,v}$ の方が大きく、H 偏波受信電力 $P_{r,h}$ との差分は 50% 累積値で約 13dB である。次に、XPD と送受信間距離、受信電力、付加損失

との関係に着目してみる。これらのパラメータは、過去にも XPD の特性を評価する指標として用いられてきた。まず図 8 に、XPD と送受信間距離の関係を示す。図より XPD は送受信間距離にほとんど依存しないことが分かる。次に XPD と V 偏波受信電力 P_{r_v} の関係を図 9 に示す。図より受信電力が大きいほど XPD も大きくなる傾向が見て取れる。最後に XPD と付加損失 (V 偏波送信) の関係を図 10 に示す。図より付加損失が大きいほど XPD は小さくなるという傾向が見て取れる。

以上が UMAP によるレイトレーシング演算により得られた結果である。図 7 で示された XPD は実測で得られている一般的な値よりも大きい。図 8~10 の結果は実測より報告されている結果と同様の特性を示している。

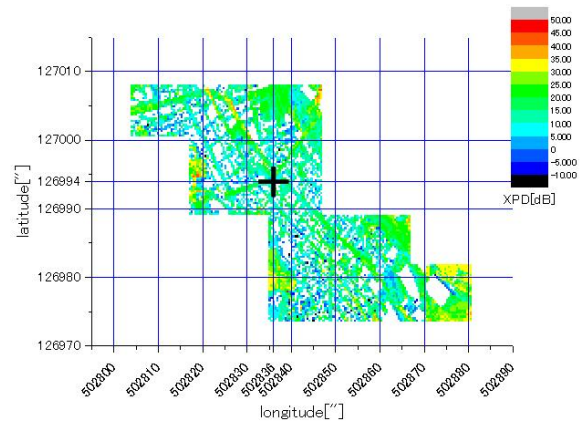


図 4 XPD

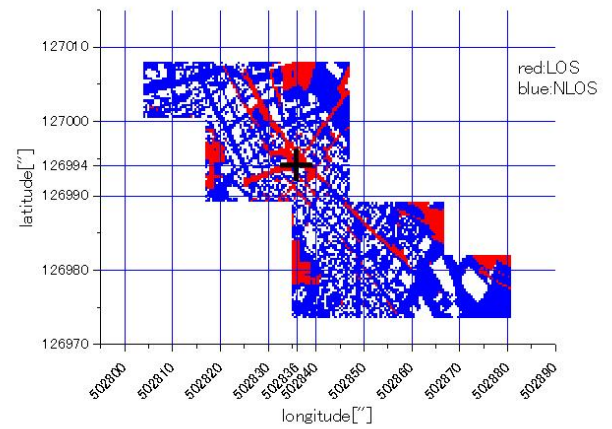


図 5 解析範囲内における見通し有無

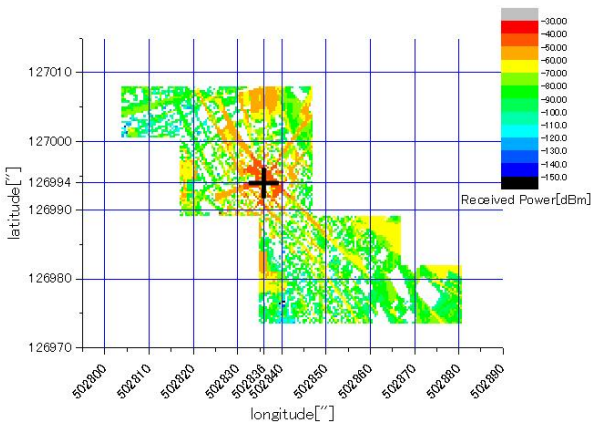


図 2 V 偏波受信電力 P_{r_v}

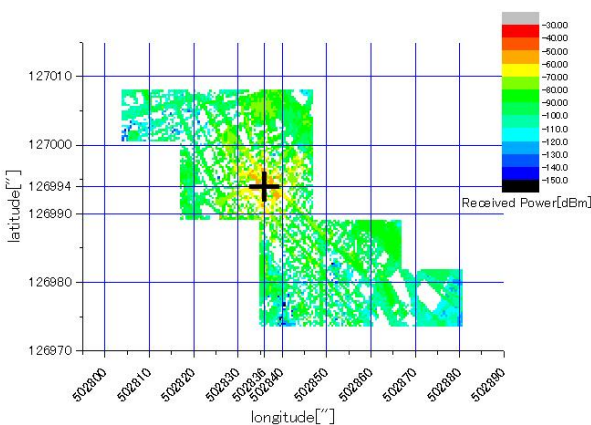


図 3 H 偏波受信電力 P_{r_h}

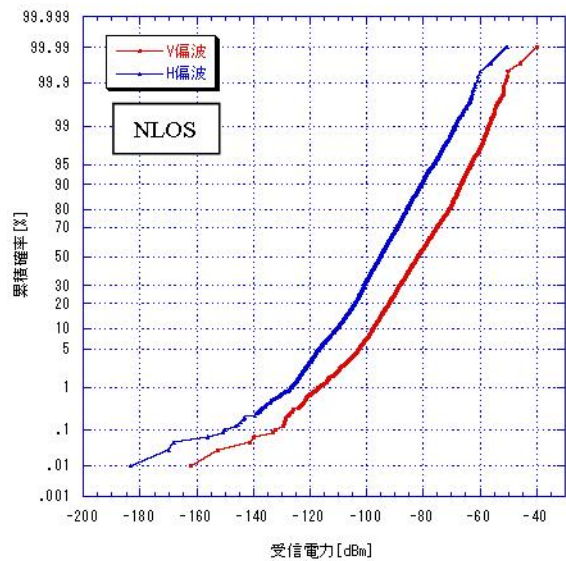


図 6 受信電力の累積分布

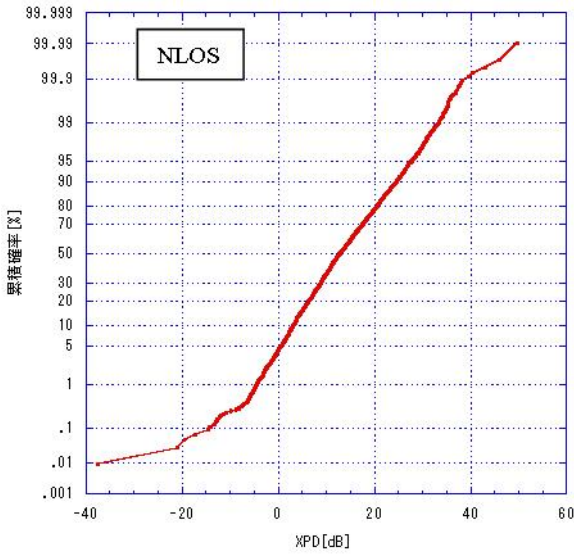


図 7 XPD 累積分布

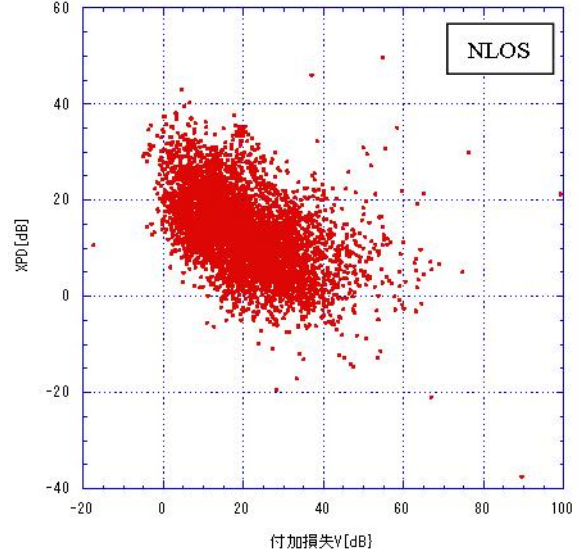


図 10 XPD と付加損失の関係

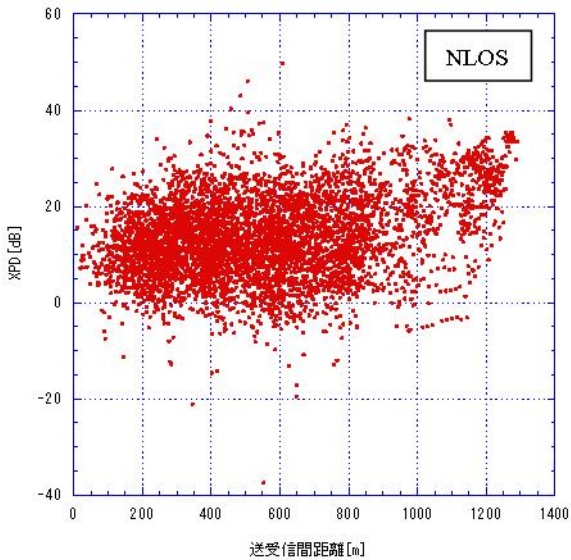


図 8 XPD と送受信間距離の関係

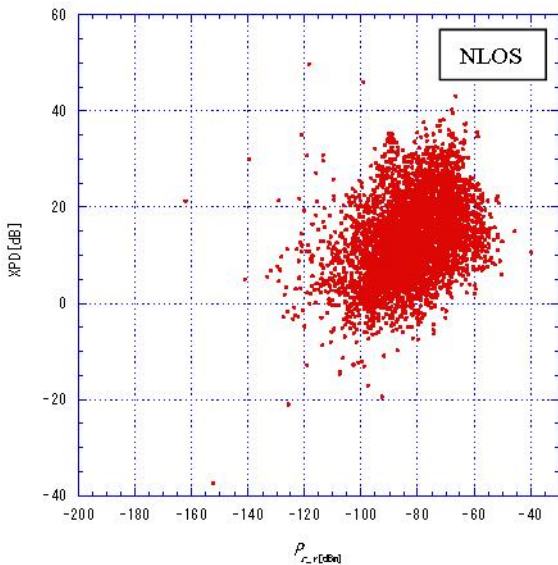


図 9 XPD と受信電力の関係

3.2. XPD と各種伝搬特性との関係

本節では、前節で評価した XPD と、

- ・垂直面内到来角度 (平均値, スプレッド値)
- ・垂直面内出射角度 (平均値, スプレッド値)
- ・水平面内出射角度 (スプレッド値)
- ・伝搬遅延 (スプレッド値)
- ・反射・回折回数 (平均値)

の関係について評価する。なお、評価の対象は解析範囲内の見通し外受信ポイントとする。

まず、図 11 に、XPD と V 偏波送信時の垂直面内到来角度との関係を示す。ただし、図 11(a) と (b) はそれぞれ次式で定義される平均到来角度 M_A および到来角度スプレッド S_A との関係を示す。

$$M_A = \frac{\sum_{i=1}^N p_r^{(i)} \cdot \varphi_r^{(i)}}{\sum_{i=1}^N p_r^{(i)}} \quad \dots (1)$$

$$S_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N p_r^{(i)} (\varphi_r^{(i)} - M_A)^2}{\sum_{i=1}^N p_r^{(i)}}} \quad \dots (2)$$

ここで、 $p_r^{(i)}$ と $\varphi_r^{(i)}$ はそれぞれ V 偏波送信時における i 番目レイの受信電力と垂直面内到来角度であり、 N はトレースされたレイの総数である。なお、到来角度は、+ を俯角方向 (大地方向)、- を仰角方向 (天空方向) とした。図 11 より、平均到来角度が仰角方向に大きくまた到来角度スプレッドが大きいほど XPD は小さくなる事が分かる。

次に、XPD と V 偏波送信時における垂直面内出射角

度との関係を図 12 に示す. なお, 図 12(a)と(b)はそれぞれ平均出射角度および出射角度スプレッドとの関係であり, これらは式(1)と式(2)において, 垂直面内到来角度 $\varphi_r^{(i)}$ を垂直面内出射角度 $\varphi_r^{(i)}$ に置換えることで定義される. 図 12 において, XPD は垂直面内の平均出射角度および出射角度スプレッドに対して, これらの値が大きくなるとバラツキは小さくなるものの平均値はほとんど変化していない. これは, XPD が垂直面内出射角度に依存しないことを意味する.

続いて, XPD と水平面内出射角度スプレッドとの関係および XPD と伝搬遅延スプレッドとの関係をそれぞれ図 13 と図 14 に示す. なお, 水平面内角度スプレッドは式(2)において垂直面内到来角度 $\varphi_r^{(i)}$ を水平面内出射角度 $\theta_r^{(i)}$ に置換えることで定義され, 伝搬遅延スプレッドは同様に伝搬遅延 $t^{(i)}$ に置換えることにより定義される. 図 13 と図 14 において, XPD は水平面内角度スプレッドおよび伝搬遅延スプレッドに対して, これらの値が大きくなるとバラツキは小さくなるものの平均値はほとんど変化しない. したがって, 水平面内角度スプレッドと伝搬遅延スプレッドは XPD とほとんど関係が無いと言える.

レイの偏波面は構造物に斜め入射して反射・回折することにより回転する. したがって, 反射・回折の回数が多いほど偏波面の回転量が大きくなると考えられる. そこで, 最後に XPD と反射・回折回数との関係を示す. ただし, この回数には屋上多重回折回数は含まないこととした. また, 送信点から受信点に至るまでに伴う反射・回折の回数はレイ毎に異なる. そこで, 本稿では次式で定義する反射・回折回数の平均値 N_{ave} を各の受信ポイントにおける反射・回折回数の評価指標とした.

$$N_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^N p_r^{(i)} \cdot n^{(i)}}{\sum_{i=1}^N p_r^{(i)}} \quad \dots (3)$$

ここで, $p_r^{(i)}$ と $n^{(i)}$ はそれぞれ V 偏波送信時における i 番目レイの受信電力と反射・回折回数であり, N はトレースされたレイの総数である. 平均反射・回折回数 N_{ave} と XPD との関係を図 15 に示す. 図には, 明確では無いが, 平均反射・回折回数 N_{ave} が多くなるほど XPD が小さくなる傾向が現れている.

以上が XPD と各種伝搬特性との関係である. ここで, 既に述べたように UMAP では基地局側送信, 移動局側受信と定義している. したがって, レイの出射角度は基地局から送信した直後の反射/回折点の位置より決定され, 一方, レイの到来角度は受信点に到達する直前の反射/回折点の位置により決定される. 換言すれ

ば, レイの出射角度は基地局周辺の建物環境に関する特徴量であり, レイの到来角度は移動局周辺の建物環境に関する特徴量である. 図 11~15 の結果より, XPD は基地局よりも移動局周辺の建物環境に大きく依存すると言える.

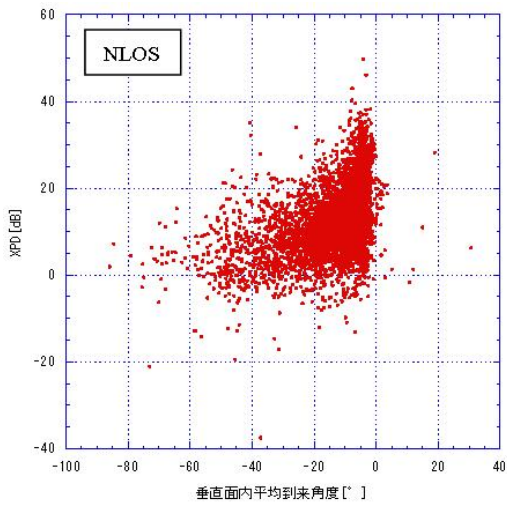
4. まとめ

本稿では, レイトレーシング法により市街地における偏波特性, 特に XPD の特性について解析した. 得られた主な結果は,

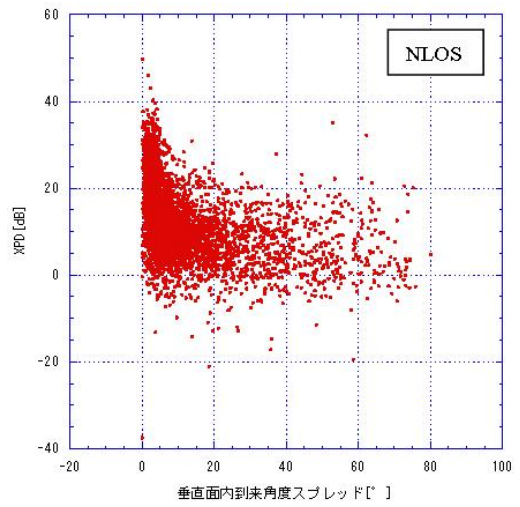
- ① XPD は送受信間距離にほとんど依存しない.
- ② XPD は付加損失が大きいほど小さくなる.
- ③ XPD は移動局への垂直面内の到来角度特性に大きく依存する.
- ④ XPD は基地局からの出射角度特性にはほとんど依存しない.
- ⑤ XPD は受信点に到達するまでの反射・回折回数が多いほど小さくなる.

である. 上記①と②の特性は従来の測定結果からも明らかにされている. また, ③と④の結果より, XPD は基地局周辺よりも移動局周辺の建物環境に大きく依存すると思われる.

今後は更に解析を進め, 交差偏波生成のメカニズムについて詳細に検討する予定である.

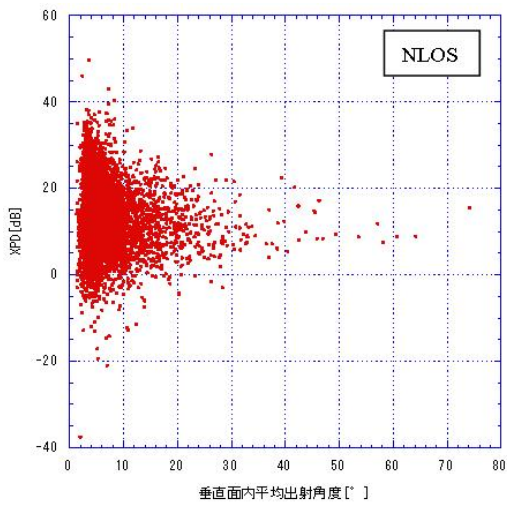


(a) 平均到来角度

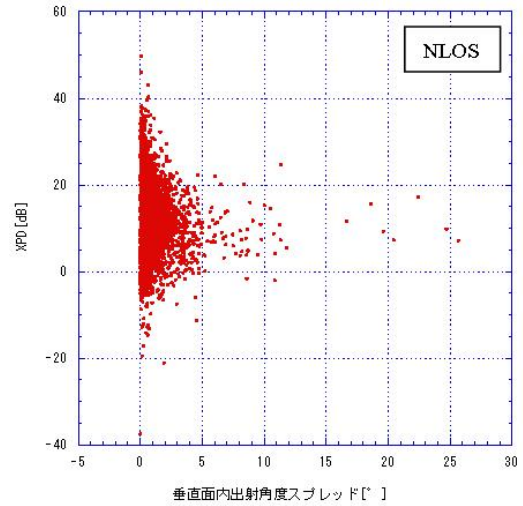


(b) 到来角度スプレッド

図 11 XPD と垂直面内到来角度との関係



(a) 平均出射角度



(b) 出射角度スプレッド

図 12 XPD と垂直面内出射角度との関係

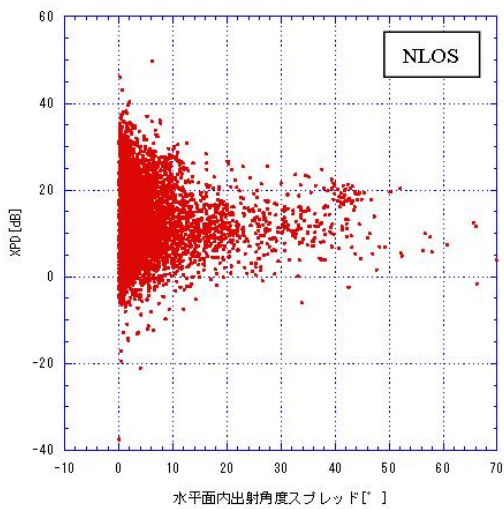


図 13 XPD と水平面内出射角度スプレッドとの関係

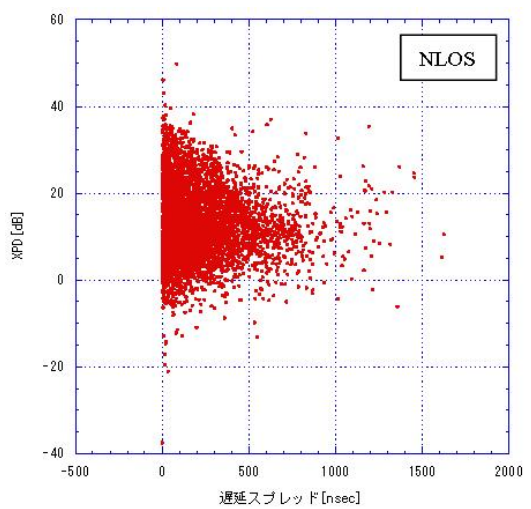


図 14 XPD と遅延スプレッドとの関係

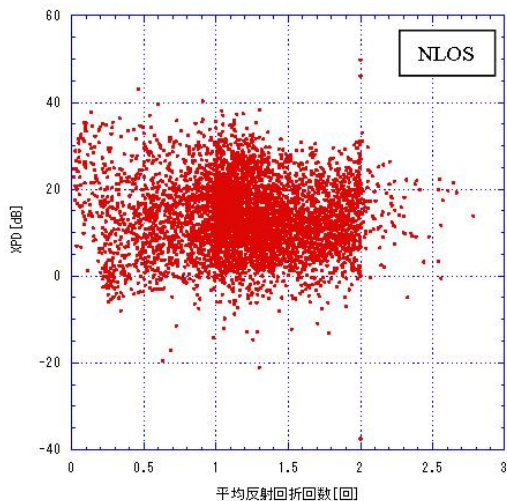


図 15 XPD と平均反射回折回数との関係

文 献

- [1] 坂上修二, 明山哲 “移動通信用基地局偏波ダイバーシチ特性—移動局側の偏波傾き角との関係—”, 信学論, Vol.J70-B, No.3, pp.385-395, March 1987.
- [2] S.KOZONO etc., “Base Station Polarization Diversity Reception for Mobile Radio”, TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL.vt-33, NO.4 NOVEMBER 1984
- [3] 福重勝, 今井哲朗, “移動伝搬における交差偏波識別度に関する一検討”, 2005 年信学会総合大会 B-1-31, 2005
- [4] 竹内勉, 国米基宏, 池上文夫, 吉田進, 金井敏仁, “直交成分同時測定による市街地偏波特性の測定”, 信学技報, AP 83-79, 1983.
- [5] 今井哲朗, 森慎一, “広帯域移動伝搬における基地局偏波ダイバーシチ特性”, 2001 年信学会総合大会 B-1-6, 2001
- [6] 細矢良雄 (監修), 電波伝搬ハンドブック, 第 2 部, 第 15 章, (株)リアライズ社, 1999.
- [7] 北直樹 他, “5GHz 帯 FWA/NWA における交差偏波識別度の加入者局高特性”, 2004 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2004
- [8] 金井敏仁, 平田栄志, 池上文夫, 吉田進, 竹内勉, “市街地における交差偏波の一検討”, 信学技報, AP 83-38, pp.17-22, 1983.
- [9] 今井哲朗, 角誠, 多賀登喜雄, “レイトレーシング法を用いた市街地マクロセル伝搬推定システム”, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, Vol.12, No.1, pp.41-49, Apr.2004.
- [10] 今井哲朗, 多賀登喜雄, 市坪信一, “市街地伝搬推定のための効率的な 3 次元レイトレーシング法の提案”, 2003 年信学会ソサイエティ大会 B-1-35, 2003