

Polarization Characteristics of Received Radio Waves in a Cellular Communication Environment

Yuki KAWAI*, Hisato IWAI* and Shinsuke IBI*

(Received March 22, 2022)

In this paper, we discuss polarization characteristics in a cellular communication environment. The polarization characteristics are quantified by the cross-polarization discrimination (XPD) and the polarization direction. These characteristics in an actual environment are clarified by receiving radio waves of a commercial cellular system. Furthermore, the physical mechanism of the polarization characteristics is discussed by comparing the measured results with those obtained through ray-tracing based analysis.

Key words : radio wave propagation, polarization characteristics, cellular communication environment, ray-tracing

キーワード : 電波伝搬, 偏波特性, セルラ移動通信環境, レイトレーシング

セルラ移動通信環境における偏波特性の解析

川合 優樹, 岩井 誠人, 衣斐 信介

1. はじめに

近年の情報通信技術の進歩により, 移動体に対する無線通信システムが広く普及している. セルラ移動通信システムはその代表例である. セルラ方式では垂直偏波の利用が一般的であるが, 見通し外かつ多重波伝搬環境が前提となる同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である水平偏波成分が発生する. 一方, 本来の垂直偏波成分だけでなく水平偏波成分を活用することができれば通信の品質および伝送性能の改善が可能である. これを実現する代表的な技術として偏波ダイバーシティや偏波 MIMO(Multi-Input Multi-Output)などがあり, これらの技術の性能は偏波特性に大きく依存する. このことから偏波特性の把握は重要である.

セルラ移動通信環境における偏波特性, 特に交差偏波識別度(XPD: Cross Polarization Discrimination)に

ついてはこれまでに測定結果が複数報告されている. 市街地における XPD の値は比較的小さく, 送受信点間距離に対する依存性は小さいこと等が明らかになっている¹⁻⁵⁾.

このように偏波特性, 特に XPD の特性は測定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, 偏波特性に関する理論的検討はほとんどなされていない. 本論文では, 実際のセルラ移動通信環境において偏波特性の測定を行い, XPD や偏波方向といった指標によって, その特性を明らかにする. また, レイトレーシング法を用いて偏波特性の物理的メカニズムを確認した.

2. 偏波特性

2.1 移動通信環境における偏波特性

従来の商用セルラ通信基地局からは, 主に垂直偏

* Faculty of Science and Engineering, Department of Electronics, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6267, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: iwai@mail.doshisha.ac.jp

波が送信されており、受信アンテナも垂直偏波を使用していた。一方、5G(第5世代移動通信システム)などでは使用する周波数の上昇に伴って Massive MIMO などが使用されるようになり、異なる複数の伝搬路を実現するために偏波を用いることもある。このように新しいセルラ方式では垂直偏波のみを使用しているわけではないが、マクロセルのシステムでは現在も垂直偏波が多く用いられている。また、偏波を用いた伝送品質・性能の改善技術の性能評価には偏波特性を正確に把握することが重要である。

2.2 交差偏波識別度 (XPD)

交差偏波識別度(XPD)は、偏波特性を定量化する最も一般的な指標であり、正偏波と逆偏波の電力比で定義される。セルラ移動通信の場合には垂直偏波が正偏波、水平偏波が逆偏波となるため XPD を Γ_{XPD} と表すと、式(1)に示すように垂直偏波と水平偏波の受信電力比で定義される。 P_V は垂直偏波受信電力、 P_H は水平偏波受信電力である。

$$\Gamma_{\text{XPD}} = \frac{P_V}{P_H} \quad (1)$$

従来研究の測定結果から、市街地における XPD は比較的小さく、その値は 5~8dB 程度であると言われている¹⁻⁵⁾。また、受信電力と XPD の関係についても検討されており、受信電力が高いほど XPD が高くなる傾向があることが知られている⁶⁾。

2.3 偏波方向

偏波特性を表す XPD 以外の指標として偏波方向がある。偏波方向も XPD 同様に垂直偏波と水平偏波の電力を用いて次式で定義される。

$$\xi = \tan^{-1} \frac{P_H}{P_V} \quad (0^\circ \leq \xi \leq 90^\circ) \quad (2)$$

$\xi = 0^\circ$ は垂直偏波、 $\xi = 90^\circ$ は水平偏波を表す。また、従来の検討では、偏波方向 ξ を変数として受信電力を表す関数 $P(\xi)$ が次式で近似されている⁶⁾。

$$P(\xi) = a \exp\left(-\frac{\xi}{b}\right) + c \quad (3)$$

上式中の a および c は受信電力を規格化するための定

数である。そのため、この関数の分布を決定するものは b であり、 b の値が大きいほど分布の広がりが大きく、主偏波が垂直偏波の場合には偏波特性の劣化が大きいことを意味する。

2.4 レイトレーシング法による偏波特性の解析

偏波特性のメカニズムを解析するためにレイトレーシング法⁷⁾を用いる。レイトレーシング法は電波をレイ(光線)とみなす幾何光学(Geometrical Optics, GO)および幾何光学的回折理論(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)に基づく電波伝搬特性の解析手法である。レイトレーシング法では具体的な電波伝搬環境をモデルとして構築し、電波の伝搬を光線で近似することにより伝搬経路(レイ)を決定する。そしてそのレイが経る反射・回折などを積み重ねることによりその伝搬経路の受信信号を求め、さらに全ての経路の受信信号を合成することにより最終的な受信信号を求める。このような計算のための環境モデルはデータ化の複雑性や現実的な計算量の範囲を考慮して、建物一つを平面から構成される直方体で近似するなど、簡易化されたものが一般に用いられる。

ただし、実際の環境では簡易なモデルにおける反射波、回折波、などに加えて、地面や建物の凹凸、さらにはモデル化において考慮されていない小物体(たとえば樹木や電柱や看板など)からの反射・回折波なども存在する。しかしながら、上記の通り、環境のモデル化や計算量のため、これらを全てモデル化し、レイトレーシング計算において考慮することは難しい。上記のようなレイトレーシング計算の制約の結果として、レイトレーシング法での XPD は実際の環境での XPD に比べて高くなることが考えられる。そこで、これに対処するために本論文ではレイトレーシング法において各パスの垂直偏波成分の一部を水平偏波成分に付与することで実際の環境に近づくように補正する。詳しい補正方法は4節で述べる。

3. セルラ通信環境における偏波特性の測定

3.1 測定方法

本論文では、商用のセルラ通信基地局から送信される電波をサービスエリア確認用の受信強度測定器

を用いることにより測定した。具体的には、第4世代セルラシステムであるLTEシステムのRSRP(Reference Signal Received Power)の信号強度を測定した。偏波特性の測定は、垂直・水平それぞれの偏波の受信信号強度を測定する2台の測定装置を台車に搭載して行った。Fig. 1に本実験で使用した測定システムを示す。用いた測定装置はGPS信号に時間同期しており、測定時には2台を同期せずに測定を行い、測定後にオフライン処理で同期をとった。その同期精度は誤差0.04 s以下である。



Fig. 1. Measurement system.

測定対象としたエリアは比較的建物の少ない環境(工場周辺エリア: 測定環境I), 比較的建物の多い環境(大学キャンパス全域: 測定環境II)の2つのエリアとした。Fig. 2, Fig. 3にこれらの環境の写真を示す。また、測定諸元をTable 1に示す。周波数は865MHzにて測定を行った。

Fig. 2中の測定ルートには、見通し内、見通し外の両環境が含まれている。同図の中央に位置する建物は高さ約10mであり、測定対象とした商用のセルラ通信基地局(Base station (BS) A)のアンテナは地上高約17mであった。

Fig. 3に示す測定環境IIにおいても、測定環境Iと同様の測定を行った。受信エリアはキャンパス全域であり、測定対象とした基地局は図に示す4局ある。セクタはBS Bに2個、BS Cに1個、BS Dに2個、BS Eに1個、の計6個ある。

受信アンテナは垂直偏波受信用にスリーブアンテナ、水平偏波受信用にターンスタイルアンテナを使用した。両受信アンテナの利得には差があったため、水平面内指向性の全周平均利得により、両偏波受信電力を補正した。補正に使用した全周平均利得の数

値は、垂直偏波受信用アンテナは1.3dB、水平偏波受信用アンテナは-3.9dBであった。両アンテナの水平面内指向性パターンをFig. 4に示す。

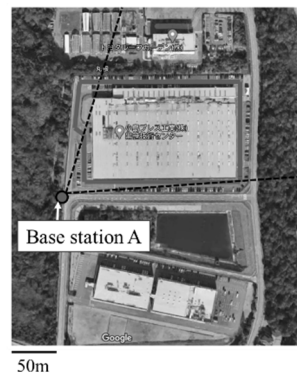


Fig. 2. Measurement environment I (Factory area).

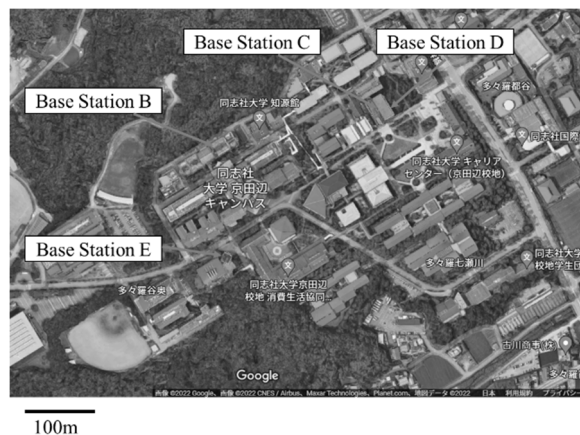
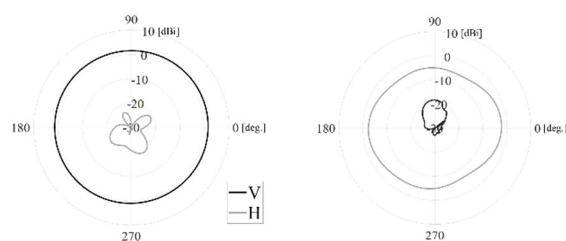


Fig. 3. Measurement environment II (University campus area).

Table 1. Measurement specifications.

		I	II
Frequency [MHz]		865	
Transmitting antenna	Ground height	17m	20~25m
	Type	Sleeve antenna (V) Turnstile antenna (H)	
Receiving antenna	Ground height	0.9m	
	Type	Sleeve antenna (V) Turnstile antenna (H)	



(a) Sleeve antenna (b) Turnstile antenna

Fig. 4. Directional patterns of antennas.

3.2 測定結果

3.2.1 XPD の CDF

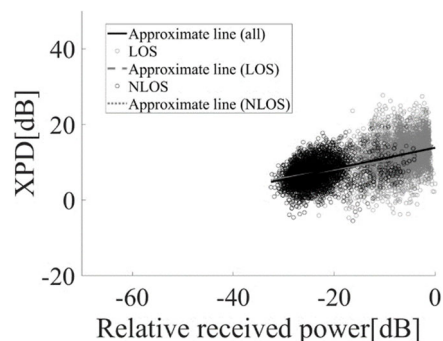
測定環境I, IIにおいて両偏波の受信電力から求めた XPD の累積分布(CDF: Cumulative Distribution Function)の 50%値(以下 XPD50%値と呼ぶ)を Table 2 に示す. 比較的建物の少ない環境である測定環境Iでは XPD50%値は 9.1dB(全環境: All)であった. さらに見通し内(LOS: Line-of-sight)では 12.3dB, 見通し外(NLOS: Non line-of-sight)では 7.2dB となり, 見通し内の XPD が相対的に大きい. また, 比較的建物が多い環境である測定環境IIでは XPD50%値は 4~6dB 程度であり, 測定環境Iに比べて XPD が小さい.

Table 2. XPD50% value.

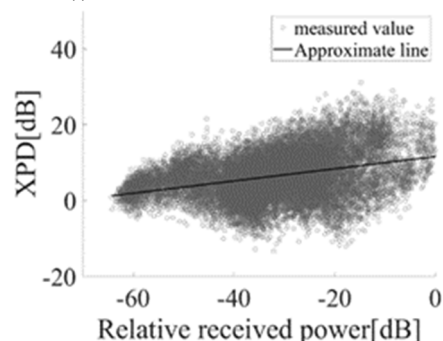
Area	Environment, Sector	XPD [dB]
I	All	9.1
	LOS	12.3
	NLOS	7.2
II	BS B (southwest sector)	5.9
	BS B (southeast sector)	4.4
	BS C (northwest sector)	0.8
	BS D (southeast sector)	4.2
	BS D (southwest sector)	4.2
	BS E (northwest sector)	5.0

3.2.2 受信電力と XPD

XPD 低下の要因は電波の反射・回折によると考えられる. 特に複数回の反射・回折を経ると受信電力が低下し, 逆に反射・回折が少ない場合には受信電力が維持される. このことから, 受信電力が高いほど XPD が高くなることが予想される. この特性について測定結果を用いて確認した. 各環境における最大受信電力で正規化した受信電力を相対受信電力とし, 相対受信電力と XPD の関係を調べた結果の例を Fig. 5 に示す. 全体的な傾向として, 相対受信電力が高くなるほど XPD が高くなる傾向が確認できる. 測定結果を $y = sx + t$ (y : XPD, x : 相対受信電力, s, t : 定数(回帰係数))で直線近似したものが図中の直線である. Table 3 に全ての環境・基地局における回帰係数 s, t の値を示す. 全ての場合において傾き s の値が正であることから相対受信電力と XPD は正の相関があることがわかる.



(i) Measurement environment I



(ii) Measurement environment II
(BS B: southwest sector)

Fig. 5. Relationship between relative received power and XPD.

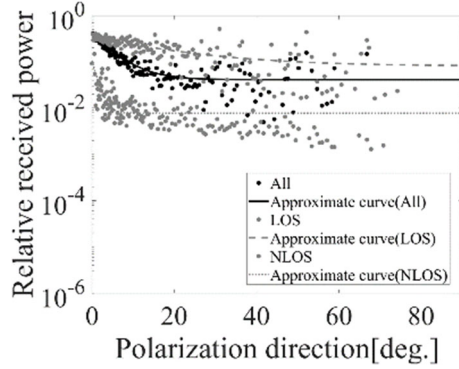
Table 3. Regression coefficients.

		s	t [dB]
I	All	0.28	13.8
	LOS	0.35	14.5
	NLOS	0.23	12.6
II	BS B (southwest sector)	0.16	11.6
	BS B (southeast sector)	0.06	6.1
	BS C (northwest sector)	0.12	5.0
	BS D (southeast sector)	0.06	5.6
	BS D (southwest sector)	0.08	6.9
	BS E (northwest sector)	0.07	6.6

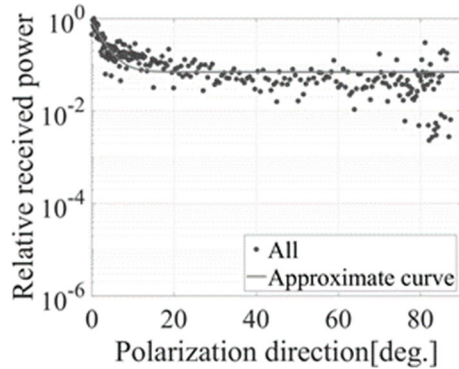
3.2.3 偏波方向と受信電力

両偏波の受信電力から求めた偏波方向と相対受信電力の関係を Fig. 6 に示す. 図中のプロットは測定値を 0.1° ごとの角度幅に含まれる測定データを平均処理した結果である. これを式(3)の関数形で近似した. 回帰係数の値を Table 4 に示す. 測定環境Iの見通し外や主に見通し外環境である測定環境IIにおける b の値は 1.5~5 程度であるのに対し, 測定環境Iの見通し内における b の値は 18.9 と比較的大きいこ

とがわかる. この結果も, 見通し内の交差偏波が小さいことを示している.



(i) Measurement environment I



(ii) Measurement environment II
(B: southwest sector)

Fig. 6. Relationship between polarization direction and relative received power.

Table 4. Regression coefficients.

		a	b	c
I	All	0.34	5.1	0.04
	LOS	0.27	18.9	0.08
	NLOS	0.10	1.3	0.01
II	BS B (southwest sector)	0.76	2.6	0.07
	BS B (southeast sector)	0.61	1.6	0.12
	BS C (northwest sector)	0.72	5.4	0.03
	BS D (southeast sector)	0.75	1.5	0.13
	BS D (southwest sector)	0.44	1.7	0.11
	BS E (northwest sector)	0.61	2.4	0.18

4. 偏波特性の解析

4.1 解析方法

本論文では, 比較的建物が少ない環境である測定環境Iの測定結果を分析することを目的として, Fig. 1の環境をモデル化した, Fig. 7に示すように, 計算対

象の環境は, 建物を複数の直方体でモデル化した. この環境を対象とし, レイトレーシング法を用いて偏波特性を解析した. なお図中の太線は測定ルートを表している.

解析諸元を Table 5 にまとめる. レイトレーシング計算における最大反射回数を 3 回, 最大回折回数を 1 回とした. Fig. 7 の中央に位置する建物の高さや対象とした基地局のアンテナ高は実際の測定環境Iにおける値と同じとした. Fig. 7 の測定ルート上を 0.1m の間隔で垂直偏波電力と水平偏波電力をレイトレーシング法によりそれぞれ求め, 受信電力, XPD, 偏波方向を計算する.

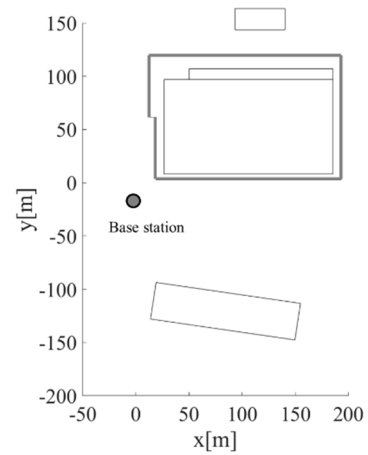


Fig. 7. Analysis model.

Table 5. Analysis specifications.

Frequency	865MHz
Maximum number of reflections	3
Maximum number of diffractions	1
Building material	Concrete
Receiving antenna height	0.9m
Receiving point interval	0.1m
Transmitting antenna position	$(x, y, z) = (-105, 19, 17)$ [m]

しかし, 2.4 節で述べたように, レイトレーシング計算と実際の伝搬では偏波特性に差が生じる. この原因として, まず, 簡易なレイトレーシングモデルの

影響がある。レイトレーシング計算では、壁面を完全な平面としているが、実際の建物壁面は細かな凹凸が多くある。また、実際の環境ではレイトレーシング計算ではモデル化されていない、反射・回折を生じる多くの小物体がある。これらの影響により実際の環境ではレイトレーシング計算よりも多数の反射波が存在し、その結果として大きな交差偏波成分が生じる。また、送信アンテナ自体の交差偏波特性も影響すると考えられる。実際の垂直偏波送信アンテナは理想的に垂直偏波のみを放射しているわけではなく、ある程度の水平偏波、すなわち交差偏波の電波も放射している。それに対して、レイトレーシング計算では送信される偏波は完全な垂直偏波である。これら二つの影響を考慮して、以下の二つの補正を行う。

まず、送信信号に一定の割合の交差偏波成分を加える。さらに、レイトレーシングにおける反射計算において、完全平面による反射よりも交差偏波成分がある一定割合で大きくなると仮定する。この「一定割合」は、最終的に得られた計算結果が測定データと一致するように決定する。このようにして得られた偏波特性が、他の指標による解析において実測結果と一致する特性となることを示すことにより、このような考え方の適用性を確認する。

上記の考え方に基づき、レイトレーシング計算において、式(4)、式(5)で表されるように、送信時点で垂直偏波成分から水平偏波成分への変換が一定の割合で発生するとともに、伝搬途中で発生する反射・回折ごとに垂直偏波電力の一部が水平偏波に変換されると仮定し、補正を試みた。両式に含まれる変数 r および β はこのような偏波間の変換量の大きさを制御する変数である。

$$P_V = \left| \sum_{i,k} r\beta^k E_{V_i}(m=k) \right|^2 \quad (4)$$

$$P_H = \left| \sum_{i,k} (1-r\beta^k) E_{V_i}(m=k) + E_{H_i}(m=k) \right|^2 \quad (5)$$

r および β の具体的な値は、前章で示した測定環境Iにおける測定ルート全体の XPD50%値の測定値と補正したレイトレーシング結果が一致するように設定する。なお、 i は i 番目のパスであり、 m は反射回数と回折回数の和、 E_{V_i} 、 E_{H_i} はそれぞれ垂直偏波、水平

偏波成分の電界である。また式(6)に示すように垂直偏波電力と水平偏波電力の和を受信電力とする。

$$P = P_V + P_H \quad (6)$$

式(4)、式(5)で計算した垂直偏波電力、水平偏波電力から XPD、偏波方向を計算する。

4.2 解析結果

4.2.1 XPD の CDF

レイトレーシング法を用いて計算した両偏波の受信電力から求めた XPD の CDF を Fig. 8 に示す。なお Fig. 8 は補正無し($r = \beta = 1$)である。XPD50%値は 21.4dB となった。これに対して、測定における XPD50%値は 9.1dB であり、レイトレーシング法を用いて計算した XPD50%値は実際の環境に比べて高い値になっている。そこで前節に示したように各パスの垂直偏波成分の一部を水平偏波成分に変換することで実際の環境の状況に近づける。実際の物理現象における送信アンテナの XPD や建物壁面の偏波の変換がどの程度なのかを推定し、それを偏波特性のモデル化に適用できることを目的とする。

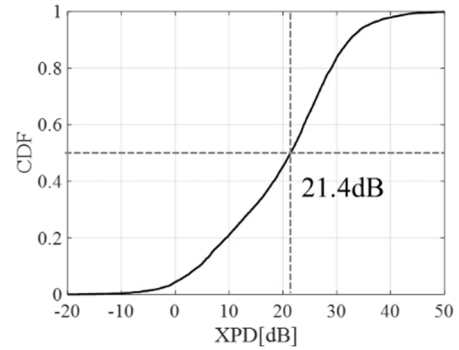


Fig. 8. CDF of XPD (Original).

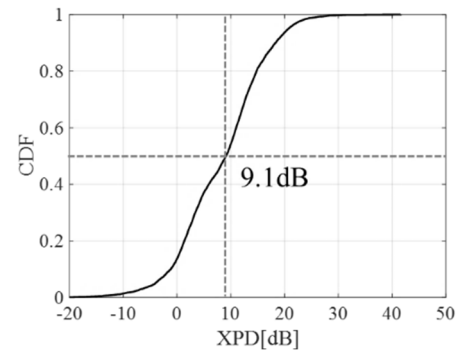


Fig. 9. CDF of XPD (Adjusted).

r および β の値を変えて調べた結果、 $(r, \beta) = (0.92, 0.82)$ とした場合、レイトレーシング結果のXPD50%値が測定結果と同じ9.1dBとなった。Fig. 9にこの場合のXPDのCDFを示す。

以降、 $(r, \beta) = (0.92, 0.82)$ とした結果を示す。 $r = 0.92$ は送信アンテナのXPDが10.6dBであることを意味しており、現実的なアンテナのXPD値として妥当な範囲の値と言える。また、 $\beta = 0.82$ は一度の反射・回折により、垂直偏波電力の18%が水平偏波に変わることを示している。

4.2.2 受信電力とXPD

レイトレーシング結果を前節の方法で補正することにより得た、相対受信電力とXPDの関係をFig. 10に示す。測定結果と同様、相対受信電力が高くなるほどXPDが高くなる傾向がある。またこれをFig. 5と同様に直線近似したものが図中の直線である。 $(s, t) = (0.32, 16.1)$ で傾きが正であることから相対受信電力とXPDは正の相関があることがわかる。また、 s, t の値は測定結果における $(0.28, 13.8)$ に近い値になっている。このことから、偏波の変換を考慮したレイトレーシング解析が妥当であるといえる。

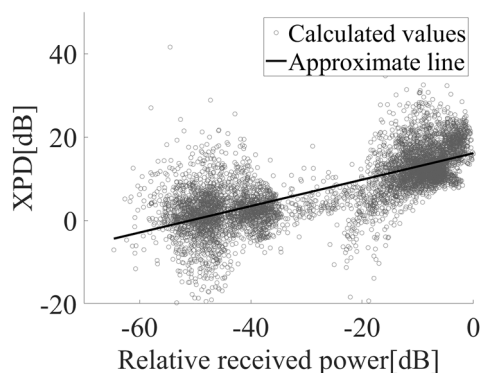


Fig. 10. Relationship between relative received power and cross-polarization discrimination.

4.2.3 偏波方向と受信電力

補正したレイトレーシング計算によって得られた両偏波の受信電力から求めた偏波方向と相対受信電力の関係をFig. 11に示す。図中の近似曲線は測定と同様の処理を行って得たものであり、 $(a, b, c) = (0.31, 5.7, 1.1 \times 10^{-6})$ であった。測定では $(a, b, c) =$

$(0.34, 5.1, 0.04)$ であり、偏波方向の拡がりを表す b の値が近くなっていることから、ここで用いたレイトレーシング解析が、実際の伝搬における偏波特性を適切に模擬できていることがわかる。

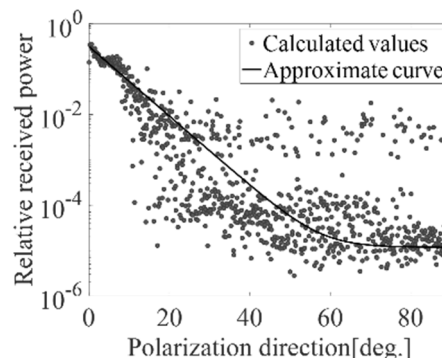


Fig. 11. Relationship between polarization direction and relative received power.

5. まとめ

本論文では、偏波特性を把握するために2つの環境で偏波特性の測定を行った。測定結果から見通し内ではXPDが高くなることを確認した。また、受信電力とXPDは正の相関があることを確認した。

また、レイトレーシング法では偏波電力の補正を導入する方法を用いて解析を行った。本手法において受信電力とXPDの関係、偏波方向と受信電力の関係が測定結果と同じ傾向があることを確認し、本手法の有効性を示した。

参考文献

- 1) 太田喜元, 藤井輝也, 表英毅, 三上学, “広帯域移動伝搬における市街地及び郊外地での交差偏波識別度に関する検討”, 信学論(B), **J87-B**, 1505-1513 (2004).
- 2) 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(B), **J70-B**, 385-395 (1987).
- 3) 福重勝, 今井哲朗, “移動伝搬における建物侵入波の交差偏波識別度に関する一検討”, 信学総大, B-1-31 (2005).
- 4) 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”, 信学総大, B-1-6 (2001).
- 5) 岡本清立, “セルラ通信環境における偏波特性に関する研究”, 同志社大学大学院理工学研究科修士論文, (2020).
- 6) T. Imai, K. Kitao, “Polarization Dispersion Characteristics

of Propagation Paths in Urban Mobile Communication Environment”, *IEICE Trans. Commun.*, E96-B, 2380-2388 (2013).

- 7) 今井哲朗, 電波伝搬解析のためのレイトレーシング法, (コロナ社, 東京, 2016).