

Measurement of Received Polarization Characteristics by a Vehicle-Mounted Antenna in Cellular Communication Environments

Seiryu OKAMOTO*, Yuki KAWAI*, Kei HIJIRIKAWA**, Hisato IWAI*, Shinsuke IBI*

(Received July 20, 2021)

In this paper, we show a measured result of the polarization characteristics for vehicle-mounted antenna by receiving radio signals of an existing cellular system. We carried out measurements of the received power at three different antenna positions. By the measurement, we clarified the dependency of the cross-polarization discrimination (XPD) characteristics on the installation situation of a receiving antenna in a vehicle. We also evaluate the gain where the dual polarizations are ideally received and utilized. It is equivalent to the diversity gain of the maximal ratio combining. Therefore, using the measured data, we evaluated the gain of the space diversity and the polarization diversity. Based on these considerations, we discuss the effectiveness of the horizontal polarization focusing on the antenna installation situation.

Key words : radio wave propagation, polarization, XPD, cellular communication environment, polarization diversity

キーワード : 電波伝搬, 偏波, XPD, セルラ通信環境, 偏波ダイバーシティ

セルラ通信環境における車載アンテナの受信偏波特性の測定

岡本 清立, 川合 優樹, 聖川 桂, 岩井 誠人, 衣斐 信介

1. はじめに

近年, 車両を無線通信で接続する“コネクティッドカー”のコンセプトが提案されている¹⁾. 車両において無線通信を実現する簡易な方法としてはセルラ方式移動通信が挙げられる. 車両におけるセルラ通信環境では, ルーフ上に設置されたアンテナに到来する電波は垂直偏波が支配的であることから, 垂直偏波用車載アンテナが用いられることが多い. 一方でデザイン性などの観点から, ルーフ上でなく車室内にアンテナを設置することが可能であれば, アンテナを含めた車両設計の自由度が向上する. ただし, 車室内のような環境では車体や車室内の物体による反

射の影響が大きく, 垂直偏波のみならず水平偏波成分も大きな強度で到来するものと予想される. この影響を把握するためには, 車載状況を考慮した交差偏波識別度(XPD: Cross-Polarization Discrimination)の把握が必要となる.

セルラ通信環境における XPD の特性についてはこれまでも実測結果が複数報告されている. 市街地における移動通信環境においては XPD が比較的小さく, その値は 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示されている²⁻⁷⁾. しかし, 車両への設置状況を考慮した偏波特性の影響を測定した結果は多くない. そこで, 本論文ではア

* 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

** Kojima Industries Corporation, Miyoshi, Aichi, 470-0201, Japan
Telephone: +81-561-35-5500, E-mail: hijirikawa@kojima-tns.co.jp

ンテナ車載状況に焦点をあて、偏波ごとの受信電力を測定し、その結果からアンテナの設置位置毎の XPD 特性を示す。また、理想的に両偏波受信電力を合成できると仮定した場合の利得について評価する。この利得は、偏波ダイバーシチの最大比合成利得と等価である。そこで、空間ダイバーシチおよび偏波ダイバーシチを用いた場合のダイバーシチ利得についても、アンテナ設置位置への依存性などについて評価する。

2. 両偏波受信電力の測定

商用の第 4 世代セルラ移動通信システムである FDD-LTE (Frequency Division Duplex - Long Term Evolution) 基地局から送信された信号を対象として測定を行った。車両に設置する受信アンテナの位置を変更し、垂直・水平それぞれの受信偏波特性を測定した。

2.1 測定諸元

測定環境の航空写真を Fig. 1 に示す。測定は、郊外の比較的開放的な環境(工場周辺エリア)で、2 台の測定装置を使用し、それぞれで LTE 基地局から送信される信号から得られる RSRP (Reference Signal Received Power) の垂直・水平偏波成分を測定した。RSRP は基地局から常時送信されている基準信号の受信電力であり、それを測定することで強度変動の測定が可能である。

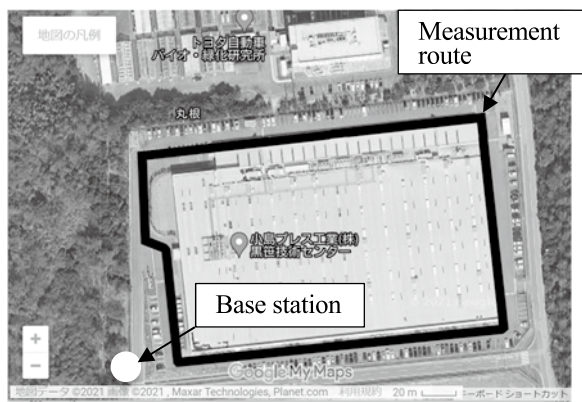


Fig. 1. Measurement environment.

測定諸元を Table 1 にまとめる。周波数は FDD の下りリンクである 865MHz と 2.12GHz を測定対象と

した。Fig. 1 の中央の建物は、高さ約 6m であり、その周囲を 1 周する形で測定した。測定対象とした商用のセルラ通信基地局のアンテナはこの工場近くに設置されており、そのアンテナ高は地上約 15m であった。

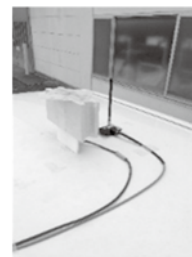
XPD 測定のために、受信アンテナとして、垂直偏波用にスリーブアンテナ、水平偏波用にターンスタイルアンテナを使用した。アンテナの設置位置は(i) 台車, (ii) 車両ルーフ上, (iii) 車室内, の 3 通りとした。Fig. 2 にアンテナ設置状況を示す。台車設置は反射の影響が小さいと考えられる結果を得るため、車両ルーフ上は一般的に車載アンテナが設置される場所であるため、車室内は車体や車室内物体による反射の影響から偏波特性の劣化が予想されるため、という理由でそれぞれのアンテナ設置位置を選択した。

Table 1. Experimental specifications.

Frequency		865 MHz, 2.12 GHz		
Height of transmitting antenna		15m		
Receiving antenna	Position	(i) Measuring cart	(ii) Vehicle roof	(iii) Vehicle cabin
	Type	Sleeve antenna (Vertical polarization) Turnstile antenna (Horizontal polarization)		
	Ground height	0.9m	1.4m	0.9m



(i) Measuring cart



(ii) Vehicle roof



(iii) Vehicle cabin

Fig. 2. Antenna installation.

2.2 受信アンテナの特性

周囲から複数の電波が到来するマルチパス環境となる移動通信環境において XPD 特性を測定するためには、垂直偏波(V 偏波)・水平偏波(H 偏波)ともに水平面内無指向性の受信特性を実現する必要がある。垂直偏波受信用アンテナとしては一般的なスリーブアンテナなどが使用できるが、水平面内無指向性の水平偏波アンテナは一般的でない。これに対して、今回の測定では、水平面内無指向性を比較的簡易に実現できる水平偏波アンテナとして、ターンスタイルアンテナを製作した。両アンテナの V/H 両偏波の指向性パターン(アンテナ単体のパターン)を Fig. 3 に示す。測定は電波暗室内にて実施した。

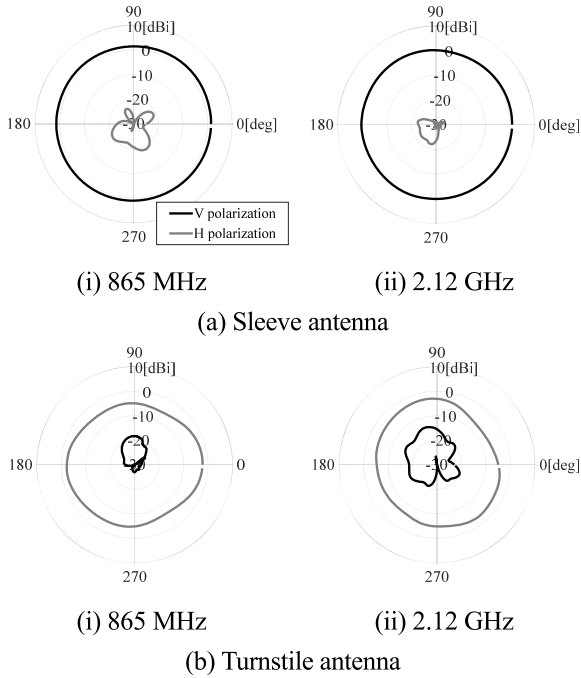


Fig. 3. Directional pattern of receiving antenna.

アンテナ利得は、アンテナ毎に、また周波数毎に差異があったため、水平面内指向性の全周平均利得により、測定された両偏波受信電力を補正して用いた。また、アンテナ自体の XPD を Table 2 に示す。スリーブアンテナおよびターンスタイルアンテナの XPD, Γ_{Sleeve} および $\Gamma_{\text{Turnstile}}$ は以下のように定義する。

$$\Gamma_{\text{Sleeve}} = \frac{\overline{G_{VV}}}{\overline{G_{HV}}} \quad (1)$$

$$\Gamma_{\text{Turnstile}} = \frac{\overline{G_{HH}}}{\overline{G_{VH}}} \quad (2)$$

上式において $\overline{G_{XY}}$ は、X 偏波送信/Y 偏波受信の全周平均利得である。(X, Y は V または H)

Table 2. Measured XPD of antennas [dB].

	865 MHz	2.12 GHz
Γ_{Sleeve}	23.1	25.1
$\Gamma_{\text{Turnstile}}$	18.6	13.5

3. 受信偏波特性

3.1 測定された受信電力

測定された 865MHz の受信電力の空間分布を Fig. 4 に示す。同図の結果から、測定した位置および受信偏波に関わらず、垂直偏波電力が水平偏波よりも大きいことがわかる。この結果から、基地局から主偏波として垂直偏波が送信されていることを確認した。2.12GHz も同様の測定結果であり、垂直偏波であった。

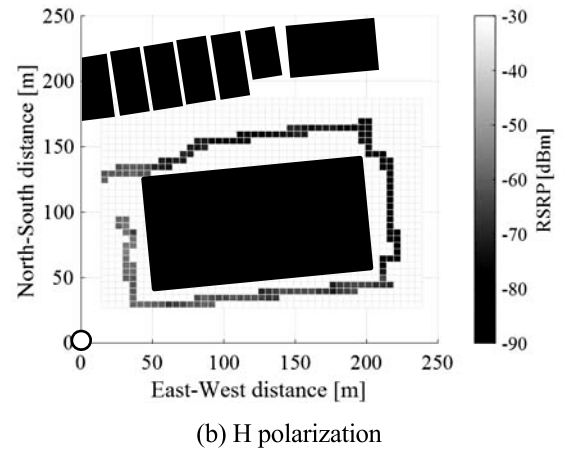
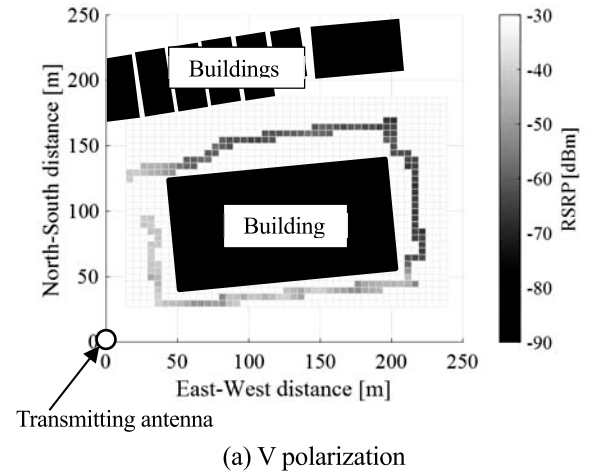


Fig. 4. Spatial distribution of received power.

Fig. 5 に両周波数における VH 両偏波成分受信電力の累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution Function)を示す. 同図の CDF において段差状の特性の変化が存在する. これは, Fig. 4 において建物による見通しの有無により受信強度が大きく変化しているが, この影響が表れていると考えられる.

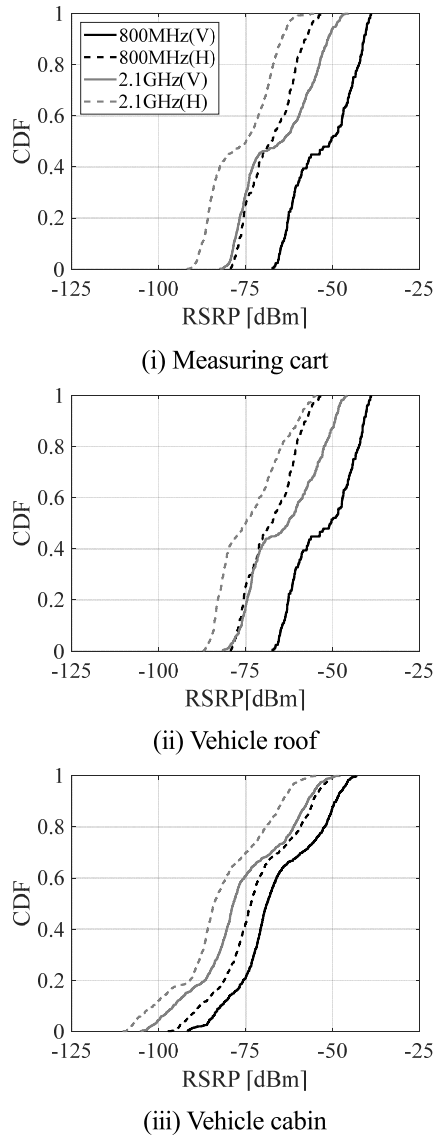


Fig. 5. CDF of received power.

3.2 XPD 特性

既に述べたように, 対象とするセルラ移動通信システムでは垂直偏波が主偏波である. これを踏まえ, 本論文では, 以下の式で $XPD(\Gamma)$ を定義する.

$$\Gamma = \frac{P_V}{P_H} \quad (3)$$

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.

両偏波の受信電力から求めた XPD の CDF を Fig. 6 に示す. 同図から, 台車とルーフ上の測定結果は近い値であることがわかる. それに対して車室内は XPD が比較的小さい. XPD の CDF 50%値を Table 3 に示す. 台車とルーフ上の XPD の CDF 50%値は両周波数ともに 1.0dB の差であったのに対し, 台車と車室内の差は 9.2dB および 4.1dB であった. この結果から, 台車およびルーフ上では偏波特性の劣化が小さいが, 車室内では反射波の影響が大きく, XPD も低下していることがわかる. なお, 同図において, 車室内と他との XPD の差が 2.12GHz よりも 865MHz の方が大きい. この理由については, 現時点では明らかになっておらず, 今後の解析が必要である.

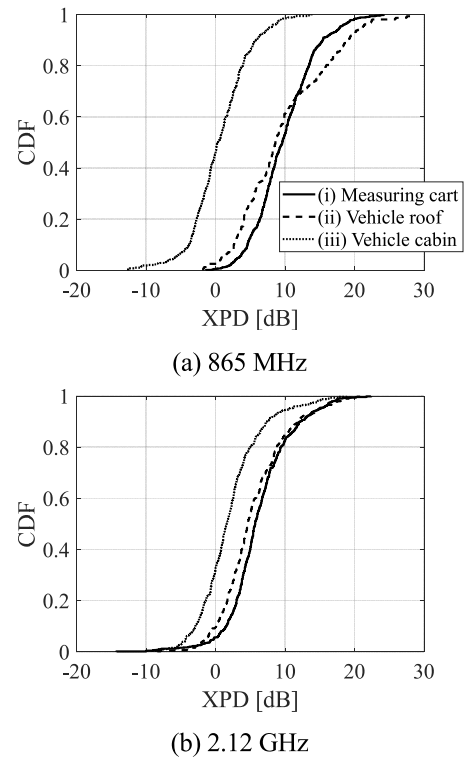


Fig. 6. CDF of XPD.

Table 3. CDF 50% value of XPD [dB].

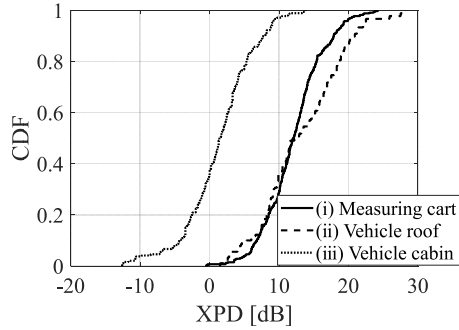
865 MHz			2.12 GHz		
(i)	(ii)	(iii)	(i)	(ii)	(iii)
9.6	8.6	0.4	5.7	4.7	1.6

今回の測定は、比較的建物の少ない開放的な伝搬環境において実施したため、見通しが確保しやすい環境であった。見通しの有無は XPD 特性に大きく影

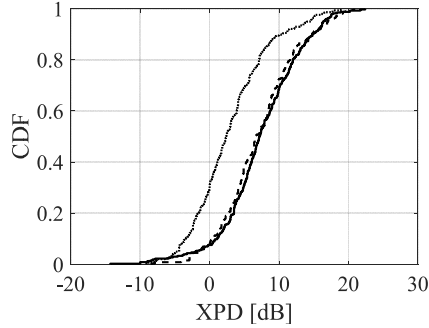
響すると予想される。そこで、Fig. 7 に見通し内(LOS: Line-of-sight)および見通し外(NLOS: Non line-of-sight)を区別して求めた XPD の CDF を示す。また、Table 4 に見通し内外を分けた場合の XPD の CDF 50%値を示す。これらの結果から、見通し内における異なるアンテナ設置方法の XPD の差は、見通し外よりも大きいことがわかる。見通し内では送信された電波は偏波が保持されて受信アンテナに到達するが、見通し外では建物壁面などによる反射波・回折波などが支配的な伝搬経路であり、受信アンテナ周辺の車両などによる反射以外に、XPD を低下させる要因が多くある。その結果として、見通し外では、見通し内に比べて、アンテナ設置方法による XPD に対する影響は小さいと考えられる。

Table 4. CDF 50% value of XPD (LOS and NLOS) [dB].

	865 MHz			2.12 GHz		
	(i)	(ii)	(iii)	(i)	(ii)	(iii)
LOS	12.1	12.3	1.7	7.2	6.6	2.4
NLOS	7.6	5.1	-0.6	5.0	3.6	1.1

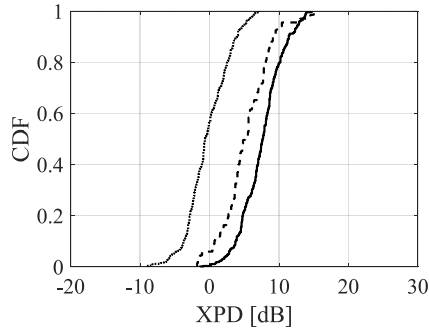


(i) 865 MHz

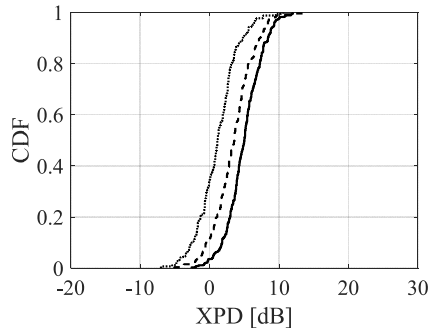


(ii) 2.12 GHz

(a) LOS



(i) 865 MHz



(ii) 2.12 GHz

(b) NLOS

Fig. 7. CDF of XPD (LOS and NLOS).

3.3 両偏波利用利得

本節以降では、水平偏波の活用の有効性を論じる。この効果を定量的に表す指標として、両偏波利用利得 G_{Dual} を考える。両偏波利用利得とは、垂直偏波を送信するシステムにおいて、受信時に水平偏波も理想的に活用できるとした場合に得られる受信電力の向上を示す利得である。すなわち、 G_{Dual} を以下の式で定義する。

$$G_{\text{Dual}} = \frac{P_V + P_H}{P_V} \quad (4)$$

Fig. 8 に両周波数における G_{Dual} の CDF を示す。また Table 5 には G_{Dual} の CDF 50%値を示している。台車やルーフ上にアンテナを設置した場合、偏波特性が維持され、水平偏波利用の効果が低く、 G_{Dual} の CDF 50%値は 0.5~1.3dB 程度であった。それに対して、車室内にアンテナを設置した場合には 2.3~2.9dB 程度であり、水平偏波の利用効果が高いことがわかる。

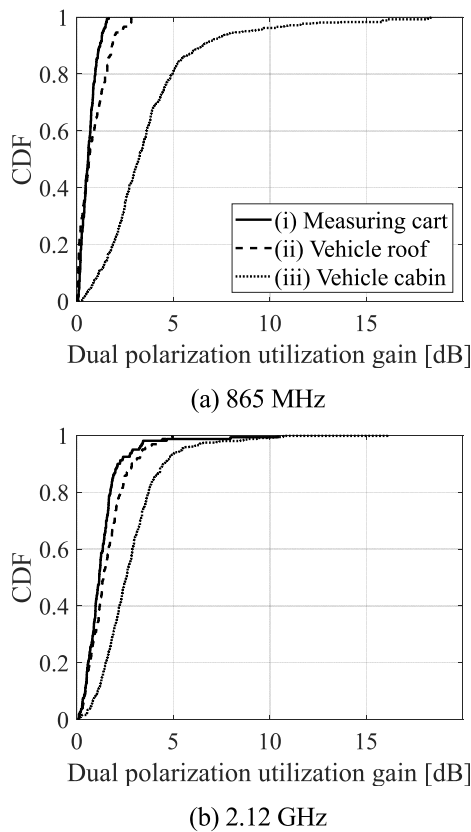


Fig. 8. CDF of dual polarization utilization gain.

Table 5. CDF 50% value of dual polarization utilization gain [dB].

865 MHz			2.12 GHz		
(i)	(ii)	(iii)	(i)	(ii)	(iii)
0.5	0.6	2.9	1.1	1.3	2.3

3.4 ダイバーシチ効果

前節で述べた両偏波利用利得はダイバーシチ技術の最大比合成と等価である。ここでは、空間ダイバーシチと偏波ダイバーシチのダイバーシチ効果とを比較する。以下、865MHzの測定結果を用いて示す。

ダイバーシチの合成法としては、選択合成法(SC: selection combining)および最大比合成法(MRC: maximal ratio combining)を想定する。また空間ダイバーシチは、測定周波数の半波長分の距離が離れた2地点で測定した垂直偏波成分受信電力を2つのブランチから得られた受信信号とみなし、ダイバーシチ合成を行う。

評価対象とするダイバーシチ利得を以下のように定義する。まず、ある区間内(今回は5m四方エリア内の移動区間)の垂直偏波の受信電力の平均値で受

信電力の各測定値を正規化したものを相対受信電力とし、垂直偏波受信(ダイバーシチ無し)時の相対受信電力のCDF1%値を基準受信電力とする。次に、同じ区間におけるダイバーシチ適用時の相対受信電力CDF1%値と基準受信電力との差を求め、ダイバーシチ利得とする。これは、1%の時間率でフェージングにより低下した信号レベルの、ダイバーシチによる改善度合いを示すものである。

台車と車室内アンテナ設置の場合のダイバーシチ適用時の相対受信電力のCDFをFig. 9に示す。台車とルーフ上は近い結果であったため、台車と車室内の結果のみ示している。また、ダイバーシチ利得をTable 6にまとめて示す。同図に示す理論値は、次式でそのCDFが与えられる、両ブランチの変動が独立なレイリー変動するダイバーシチを想定した場合の特性である⁸⁾。

$$F_{SC}(P) = \left\{1 - \exp\left(-\frac{P}{P_0}\right)\right\}^2 \quad (5)$$

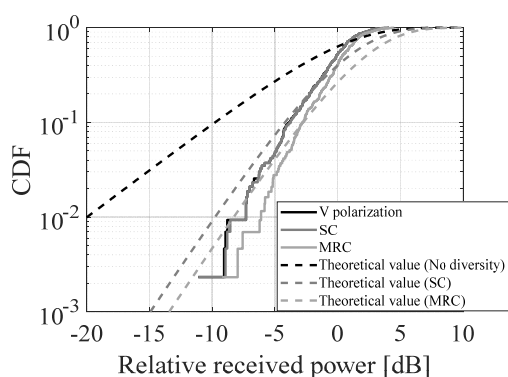
$$F_{MRC}(P) = 1 - \exp\left(-\frac{P}{P_0}\right) \sum_{m=1}^2 \frac{\left(\frac{P}{P_0}\right)^{m-1}}{(m-1)!} \quad (6)$$

F_{SC} および F_{MRC} はそれぞれのブランチ合成法におけるCDF、 P_0 は平均受信電力、 P は瞬時の受信電力を示している。

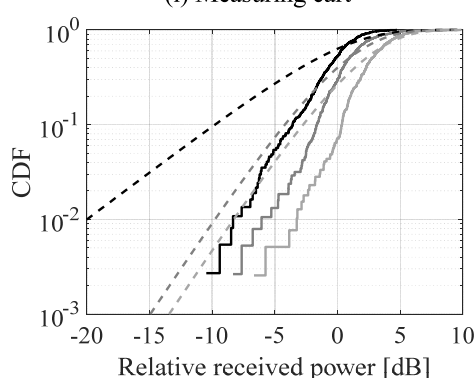
Fig. 9からは、空間ダイバーシチ利得は偏波特性に依存しないため、アンテナの車載状況に依存せず、ダイバーシチ利得も高いことがわかる。一方、偏波ダイバーシチではアンテナ設置位置によってダイバーシチ利得は大きく異なる。偏波特性が維持されている台車設置の場合、偏波ダイバーシチによる効果は小さく、ダイバーシチ利得は選択合成で0.2dB、最大比合成でも2.6dBであった。それに対して、偏波特性が劣化している車室内にアンテナを設置した場合は、偏波ダイバーシチの効果が比較的大きい。ダイバーシチ利得は選択合成で2.2dB、最大比合成では5.0dBである。

理論値と比較すると、全ての合成法において、CDF1%値における相対受信電力は理論値よりも大きい。これは今回の測定環境が直接波が受信可能な状況を含む環境であることが原因と考えられる。理論値を

与える式(5)および(6)は直接波が受信されないレイ

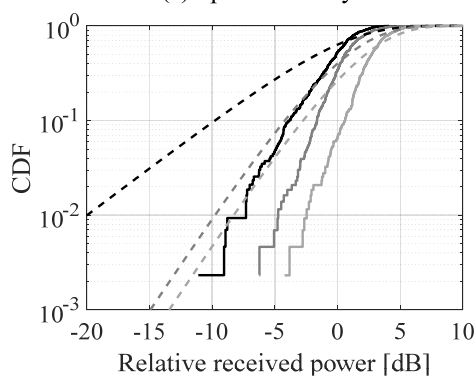


(i) Measuring cart

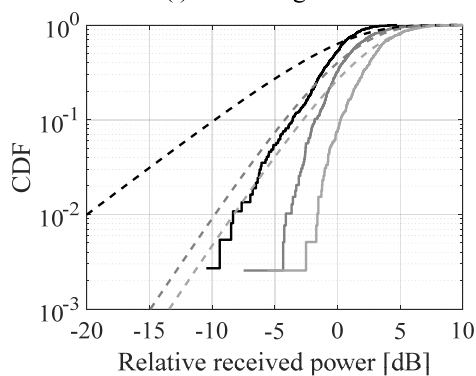


(ii) Vehicle cabin

(a) Space diversity



(i) Measuring cart



(iii) Vehicle cabin

(b) Polarization diversity

Fig. 9. CDF of relative received power.

リーフェージングを前提としたものであるが、Fig. 9のダイバーシチ無しの結果に示されているようにフェージングによる強度低下はレイリーフェージングよりも小さく、結果としてダイバーシチも利得も理論値より小さくなったと考えられる。

Table 6. Diversity gain [dB].

Space	Theoretical	(i)	(iii)
SC	10.2	4.0	4.2
MRC	11.7	6.1	6.7
Polarization	Theoretical	(i)	(iii)
SC	10.2	0.2	2.2
MRC	11.7	2.6	5.0

4. まとめ

車両向けセルラ移動通信環境において、3通りのアンテナ設置位置を想定した場合の偏波特性を評価した。台車およびルーフ上にアンテナを設置した場合、偏波特性に対する大きな影響は無く、車両室内設置時にはXPDが大きく劣化した。

車室内にアンテナを設置した場合、両偏波を理想的に利用した利得は2.3~2.9dBであった。また、ダイバーシチ技術を適用した場合、現行のルーフ上にアンテナを設置する場合よりも、偏波ダイバーシチの効果が得られることを示した。

これらの検討から、アンテナを設置する位置に着目した両偏波の活用の有効性を論じた。

参考文献

- 1) J. Pillmann, B. Sliwa, J. Schmutzler, C. Ide and C. Wietfeld, "Car-to-Cloud Communication Traffic Analysis Based on the Common Vehicle Information Model", *Proc. 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference*, 1-5 (2017).
- 2) 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).
- 3) 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).
- 4) S. Kozono, T. Tsuruhara and M. Sakamoto, "Base Station Polarization Diversity Reception for Mobile Radio", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, **33**, 301-306 (1984).
- 5) 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”, 信学総大, B-1-31 (2005).

- 6) 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, AP83-79 (1983).
- 7) 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).
- 8) 唐沢好男, デジタル移動通信の電波伝搬基礎, (コロナ社, 東京, 2016), pp. 161-172.