

Performance Evaluation of Active Propagation Control in a Three-Dimensional Indoor Environment

Kenichiro KAMOHARA*, Hisato IWAI* and Hideichi SASAOKA*

(Received October 20, 2015)

By changing propagation environment actively and appropriately, we can improve transmission performance of wireless communications. We call such method “Active Propagation Control” (APC). We have shown in the previous studies the fundamental effectiveness of APC by two-dimensional FDTD analysis, assuming an empty room where a metal plate is rotated as a device changing the propagation characteristics. In this paper, we analyze indoor propagation characteristics in a three-dimensional space by using the three-dimensional FDTD method so as to discuss more accurate amount of the improvement of APC. In addition, we change the position of the metal plate besides its size in order to evaluate the effect of the variations on the improvement of APC. In the evaluation, we assume a SISO wireless communication and show the reduction of path loss by APC quantitatively. We also consider a simple implementation method of APC and show the performance of the method.

Key words : radio propagation, active propagation control, path loss, FDTD

キーワード : 電波伝搬, アクティブ伝搬制御, 伝搬損失, FDTD

3次元室内環境におけるアクティブ伝搬制御の特性評価

蒲原 健一郎, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

1. はじめに

近年, 携帯電話やタブレット型 PC に代表される多機能端末の普及により, 無線通信の利用が年々増加傾向にある. これに伴い, ユーザの利用する情報量も増加し続けており, 無線通信システムのさらなる高速化, 大容量化, 高効率化が必要とされている.

無線通信ではマルチパスフェージングに代表される要因により, 受信信号特性が劣化する点が局所的に存在する^{1, 2)}. このような場所では, 適切な送受信方式を選択した場合でも, 高速, 大容量な通信の実現は困難となる. また, 受信アンテナ位置に送

信された電波がほとんど到来しない環境でも同様のことが言える. このような状況に対して, 受信機の受信特性が改善されるように伝搬特性そのものを変化させることで, 伝送特性を改善するアクティブ伝搬制御 (APC: Active Propagation Control) を著者らはこれまでに提案した³⁾. また, APC の基本的な有効性を示すために, 室内環境において金属板が回転した場合の伝搬特性を 2 次元 FDTD (Finite Difference Time Domain) を用いて計算した. その結果, APC により SISO (Single-Input Single-Output) チャネルの伝搬損失および, 2×2MIMO (Multiple-Input

* Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6309, E-mail: duo0325@mail4.doshisha.ac.jp

Multiple-Output) チャンネル容量の改善が得られることを示した⁴⁶⁾。しかしながら、これらは2次元空間での評価結果である。そのため、3次元空間でのAPCによる改善量の絶対量の評価としては十分であるとは言えなかった。

本稿では、3次元環境におけるAPCの基本的な改善効果を示すために、室内環境で金属板を回転させた場合の伝搬特性の変化を3次元FDTDにより定量的に評価する。この評価では、金属板の大きさだけでなく位置も変化させ、これらがAPCの改善量に与える影響を示す。また、比較的容易で現実的なAPCの実現方法を検討し、その方法を適用した場合のAPCの改善量を定量的に評価する。本稿では、SISO伝送における伝搬損失をAPCの評価指標として用いる。

2. アクティブ伝搬制御

APCの基本構成をFig. 1に模式的に示す。同図のようにAPCでは伝搬環境を変化可能な何らかの装置(伝搬環境変化装置)を環境内に設置し、受信機の受信特性が改善されるように伝搬特性を最適化する。このように、基本構成は単純であるが実際の無線通信環境に適用するためには、複数の課題が存在する。APCの制御の実現方法もその一つである。本稿では最後に、その実現方法についても検討し、その場合のAPCの特性について評価する。

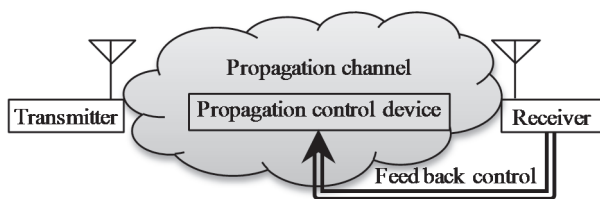


Fig. 1. Basic configuration of APC.

送受信方式を改善するのではなく、APCのように伝搬特性そのものを変化させることで伝送特性を改善する手法が幾つか提案されている。例えば、室内のLOS (Line-of-Sight) 環境下のMIMO伝送システムにおいて、室内に設置したリフレクタレー

により伝搬特性をよりマルチパスリッチなものとすることで、MIMO伝送の通信容量を改善できることが示されている⁷⁾。その他にも、複数のパッチアンテナと位相器からなるMIMOパッシブリピータを用いて、最適な位相値の組み合わせで電波を中継することで、MIMOのチャンネル容量を向上できることが示されている⁸⁾。これら2つの研究では、屋内の伝搬環境を対象としている。これに対して、より広範囲な屋外の伝搬環境の制御も検討されている。例えば、基地局アンテナ近傍に反射板を設置しサービスエリアの形成にほとんど寄与しないサイドローブ波を高層階の不感地エリアに反射することで、受信レベルを改善する方法が提案されている⁹⁾。またより狭い範囲の伝搬環境の制御という観点では、エスパ (ESPAR: Electrically-Steerable Parasitic Array Radiator) アンテナ¹⁰⁾が挙げられる。エスパアンテナは寄生素子に付加したリアクタンスを変化させることでアンテナパターンを制御し、1つのアンテナとその構成素子からなる範囲の伝搬特性を制御している。エスパアンテナは、伝搬特性の制御に能動的な放射素子を使わない点其他方式に比べてAPCにさらに近い考えと言えるが、APCでは受信機の移動やその他の物体の移動による伝搬特性の変化に対して追従するようより大規模な伝搬特性制御を行い、送受信間の伝搬特性の最適化を行うことを想定している。

伝搬特性の最適化には受信機の受信状況のフィードバックが必要である。APCの制御範囲の伝搬特性を計算などにより完全に把握することが可能であり、かつ、伝搬環境変化装置及びAPCの対象である受信機の位置を正確に把握することが可能であれば、受信機からの受信状況のフィードバックなしで、伝搬特性の最適化が可能であると考えられる。例えば、その環境内にある物体を小物体までを含めて完全にモデル化し、3次元FDTDなどによりその環境における伝搬特性を正確に解析することなどによって可能となると考えられる。しかしながら、特に環境の完全なモデル化という観点で、このような計算による正確な伝搬特性の把握は現時点では困難である。したがって本稿では、フィードバ

ック制御を用いた最適化を前提とする。また、フィードバック制御は何らかの方法で理想的に行われると仮定する。最適化については、APCの改善量の基本評価では何らかの方法で最適解が得られるものと仮定し、APCの上限となる改善量を示す。ただし、具体的な実現方法を検討する場合には、別の制御方法を示す。

3. APCによる受信特性改善効果の基本評価

3.1 評価環境

Fig. 2は評価環境の全体図を模式的に示している。Table 1に評価に使用する各種パラメータを示す。同図のような3次元環境において、3次元FDTDを用いて伝搬特性を計算する。座標はFig. 2のように室内の1つの角を原点とする。部屋の大きさは横(x 軸方向)10.0m×縦(y 軸方向)8.0m×高さ(z 軸方向)3.0mであり、什器などの物体はないものとする。Fig. 3は $z = 1.5\text{m}$ の平面を示している。FDTDによる伝搬特性の計算では、部屋の外側に厚さ0.2m相当のコンクリート壁を設定し、さらにその外側にMurの1次吸収境界¹⁾を設ける。送信点は(1.0, 1.0, 1.5)に固定し、送信信号は z 軸方向の直線偏波とする。伝搬環境変化装置として用いる金属板は正方形であり、1辺の長さ W は1.0m, 2.0m, 2.9mの3種類とし、厚さは全て0.1mである。金属板の中心位置は、Fig. 3に示す $P_1(3.5, 2.0, 1.5)$, $P_2(5.0, 3.0, 1.5)$, $P_3(7.0, 4.0, 1.5)$ の3点とする。金属板はFig. 2のように x - y 平面に垂直に設置し、 z 軸に平行で金属板の中心点を通る直線を軸として任意の角度に回転可能とする。回転角はFig. 3のように x 軸に平行な場合を 0° 、反時計回りを正方向とし、 $0\sim 180^\circ$ の範囲で変化させる。キャリア周波数は1.0GHzとする。FDTDのセルは1辺0.025mの立方体であり、これは1.0GHzにおける1/12波長に相当する。受信点はこのセルサイズで計算される室内の全ての点である。評価指標はSISOチャネルの伝搬損失とする。FDTD計算における励振信号と各受信点で得られる受信信号の比により各受信点での伝搬損失を計算する。

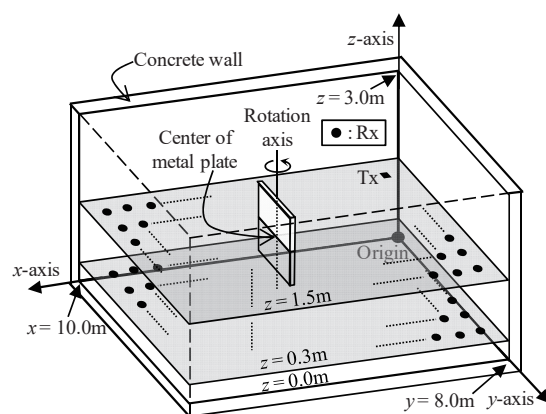


Fig. 2. Overview of assumed environment.

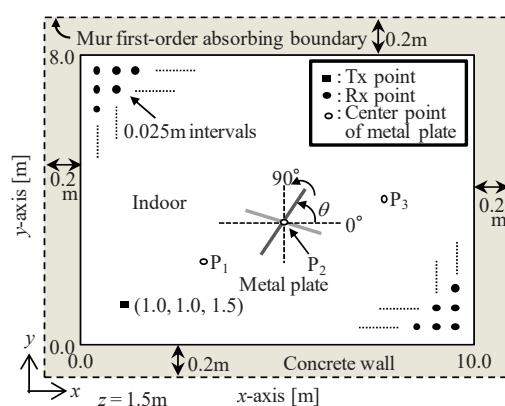


Fig. 3. A view of plane ($z = 1.5\text{m}$) in assumed indoor environment.

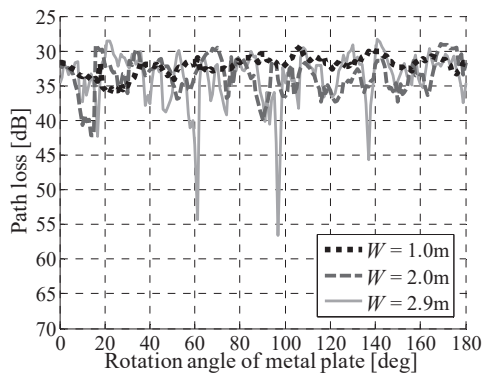
Table 1. Parameters and assumptions in evaluation.

Carrier frequency	1.0GHz
Environment	10m×8m×3m, No objects
FDTD	Cell size : 0.025m (1/12 wavelength) Absorbing boundary condition : Mur 1st-order absorption boundary
Metal plate	Shape : Square Thickness : 0.1m Side-length : 1.0m, 2.0m, 2.9m Center position : $P_1(3.5, 2.0, 1.5)$, $P_2(5.0, 3.0, 1.5)$, $P_3(7.0, 4.0, 1.5)$
Wall	Thickness : 0.2m Material : Concrete Material constants of concrete Relative permittivity : 6.76 Conductivity : 0.0023(S/m)

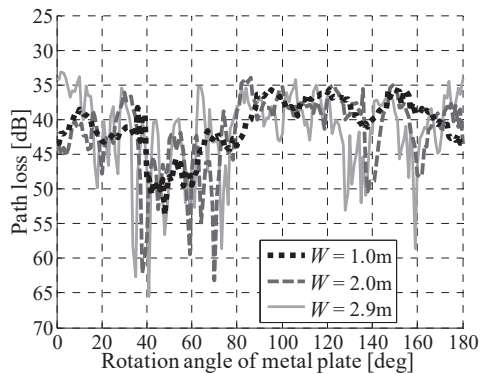
3.2 金属板の回転による伝搬損失の変化

Fig. 4は想定する室内環境内の二つの受信点、 $A(1.0, 2.0, 1.5)$ および $B(8.0, 2.0, 0.3)$ における金属板の回転による伝搬損失の変化をそれぞれ示している。同図では金属板の中心は点 P_2 であり、金属板

の1辺の長さ W を変化させている。金属板の回転は 1° 刻みである。なお、Fig. 4 以降の結果も 1° 刻みの評価を基本とする。同図よりどちらの受信点でも金属板が大きいほど伝搬損失の変化幅が大きくなることわかる。その変化幅は $W = 2.0\text{m}$ の場合で、送信点から比較的近い受信点 A において約 10dB、遠い点 B において約 30dB である。



(a) Receiving point A(1.0, 2.0, 1.5).



(b) Receiving point B(8.0, 2.0, 0.3).

Fig. 4. Variation of path loss when metal plate is rotated.

3.3 SISO チャンネルにおける伝搬損失の改善

受信点を点(9.0, 0.0, 1.5)から点(9.0, 8.0, 1.5)へ直線的に移動させた場合の伝搬損失の変化を Fig. 5 に示す。同図では、金属板の回転角の最適化による APC を適用した場合 (w/ APC) と、最適化なしの場合 (w/o APC) の2つの結果を示している。金属板の中心は点 P_2 で1辺の長さ W は 2.0m である。APC の場合は、回転角を $0\sim 180^\circ$ の範囲で変化させ、各受信点で最小の伝搬損失を抽出した。最適化なしの場合では、金属板は存在するが、回転角を 90° に固定している。最適化なしと比較して APC では、全

ての受信点において伝搬損失が改善されており、マルチパスフェージングによる局所的な伝搬特性の劣化が緩和されている。また、APC により全体的な伝搬損失の変動幅が減少していることがわかる。

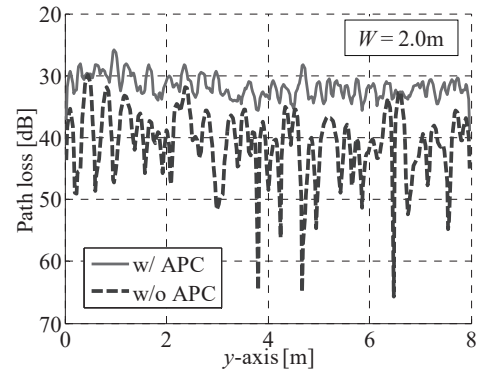


Fig. 5. Variation of path loss with and without APC.

文献^{3,4)}では APC の性能改善量の指標として伝搬損失最大改善量 (Max-IPL: Maximum Improvement of Path Loss) が定義されている。本稿でも、各受信点における APC と最適化なしの伝搬損失の差をその点での伝搬損失最大改善量と定義し、APC による性能改善を定量的に表す指標として用いる。Fig. 6 に $z = 1.5\text{m}$ の平面上の受信点の伝搬損失最大改善量の空間分布を示す。同図では、Fig. 5 と同様に $W = 2.0\text{m}$ の金属板の中心を点 P_2 に設定している。同図では、室内全体にわたって白色の干渉縞のような模様が現れている。また、室内全体で APC による伝搬損失の改善が得られることがわかる。

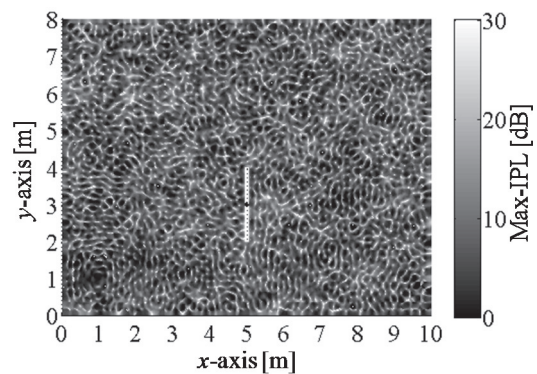


Fig. 6. Spatial distribution of Max-IPL.

Fig. 6 と同様の空間分布を $z = 0.3\sim 2.7\text{m}$ まで 0.3m

間隔の各平面に対して計算し、それらの平面上の全ての受信点を対象として、伝搬損失最大改善量の累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution Function) をとり Fig. 7 を得た. この場合の累積確率は室内の場所率に相当する. また、同図では金属板の長さ W を (a) 1.0m, (b) 2.0m, (c) 2.9m と変化させ、それぞれの場合で金属板の位置を P_1 , P_2 , P_3 に変化させている.

Fig. 7(a)~(c)を比較すると、今回評価した金属板の位置と大きさの組み合わせの中では、点 P_2 に $W = 2.9\text{m}$ の金属板を用いて APC を行う場合に、最良の最大改善量の分布が得られることがわかる. この場合には、場所率 50% 値で 8.5dB の伝搬損失の改善が得られる. また、最小の改善量分布は点 P_3 に $W = 1.0\text{m}$ の金属板を用いる場合である. しかし、この場合でも場所率 50% 値で 4.5dB の伝搬損失の改善が得られている. さらに、点 P_1 と点 P_2 の CDF を同図(b) および(c) の場合のそれぞれで比較すると、点 P_2 の改善量の CDF がわずかに大きい分布となっており、金属板の設置位置が送信点に近いほど最大改善量が大きくなるとは限らないことがわかる.

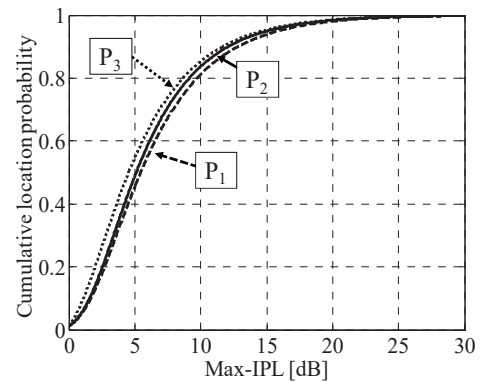
4. APC の現実的な実現方法の検討

本稿ではこれまでに、伝搬特性が最良となる最適解が理想的に得られるものとして、APC による改善量の上限值を定量的に示した. しかしながら、実環境において最適解を得ることは容易ではない. そこで比較的容易な制御方法でかつ、ある程度の改善が得られる具体的な実現方法の一例を示し、本稿の環境モデルに適用した場合の改善量を定量的に示す.

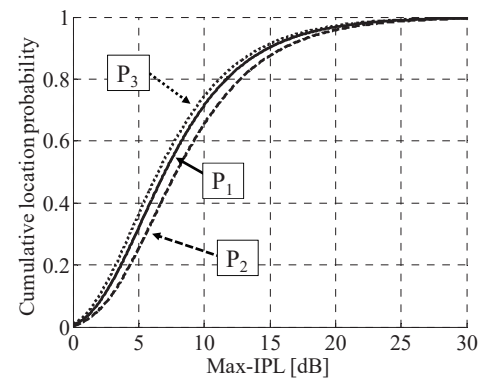
4.1 現実的な APC の実現方法の例

現実的な APC の初歩的な検討のために、その制御方法について述べる. Fig. 8 にその制御の構成を模式的に示す. 同図のように、伝搬環境変化装置と受信機を接続する. そして、以下の手順を繰り返す.

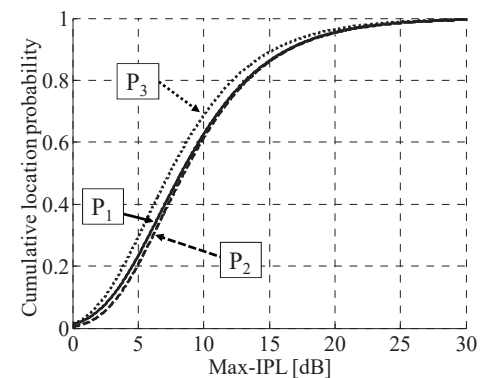
- step1. 受信機の受信状況の観測. 受信状況が設定閾値より悪い場合に step2 へ移行.



(a) $W = 1.0\text{m}$.



(b) $W = 2.0\text{m}$.



(c) $W = 2.9\text{m}$.

Fig. 7. CDF of Max-IPL.

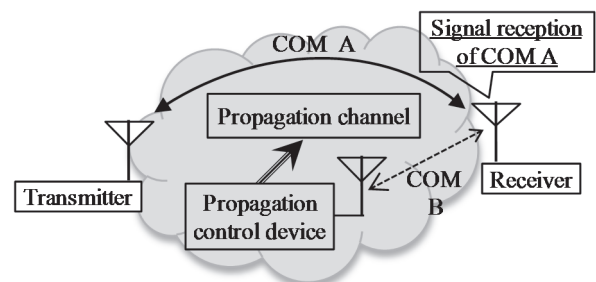


Fig. 8. Configuration of practical APC.

- step2. 伝搬環境変化装置による n 回の伝搬環境の変化と受信状況の観測.
- step3. n 種類の異なる伝搬環境から受信状況が最良となる伝搬環境を選択.

4.2 現実的な実現方法による APC の改善効果

前節で示した制御方法を、金属板を伝搬環境変化装置とし回転角を変更することで伝搬特性を変化させる本稿の APC に適用する. ただし、 n 回の伝搬環境の変化に対して、 $180/n$ [deg] 等間隔で金属板を回転させることで n 種類の異なる伝搬環境を得る. また、前章の評価と同様に 90° の場合を基準とし、 n 種類の伝搬環境と比較して 90° の場合が最良の場合には 90° が選択され、改善量はゼロとする.

Fig. 9 は Fig. 5 と同様に $W=2.0\text{m}$ の金属板の中心を点 P_2 に設定し、 n 回変化の APC を適用した場合の伝搬損失の変化を示している. 同図より、 $n=4$ の場合には最適化なしと同様にマルチパスフェージングにより伝搬損失が大きくなる点が見られる. これに対して $n=36$ では、全ての受信点でマルチパスフェージングによる影響が緩和されており、伝搬損失の変動幅も小さいことがわかる.

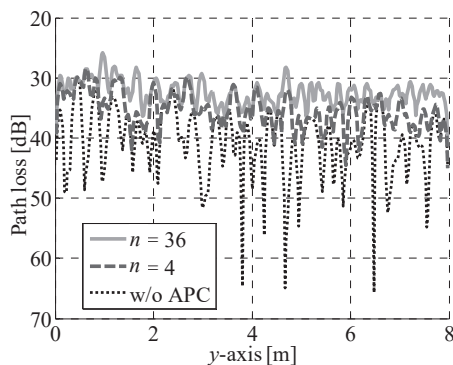
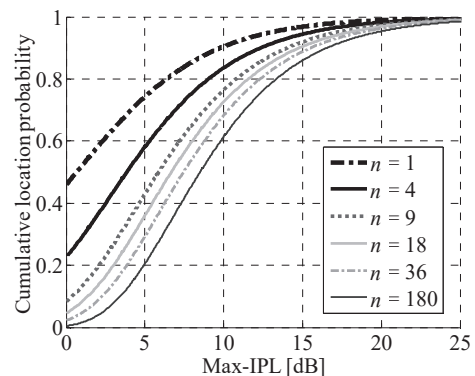


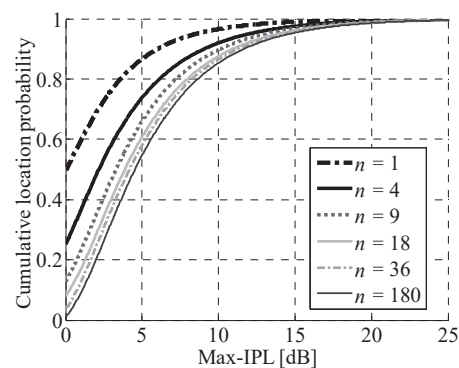
Fig. 9. Variation of path loss with and without n variations-APC.

Fig. 7 と同様の手順で、 n 回変化の APC を適用した場合の伝搬損失最大改善量の CDF を計算し Fig. 10 を得た. 同図(a)では、Fig. 7 で最良の改善分布が得られた点 P_2 に $W=2.9\text{m}$ の金属板を用いる場合を、同図(b)では最小の改善分布であった点 P_3 に $W=$

1.0m の金属板を用いる場合をそれぞれ表している. 同図(a)より 50%値で、 $n=4$ の場合では 3.8dB 、 $n=18$ では 6.7dB の伝搬損失の改善が得られることがわかる. また、90%値ではそれぞれ順に 12.4dB 、 14.8dB の改善が得られる. Fig. 7(c)の理想的な場合の改善量分布の 50%値である 8.5dB と比較すると、その差は $n=4$ の場合で 4.7dB 、 $n=17$ で 1.8dB である. 同図(b)より最小の改善分布であっても 50%値で、 $n=4$ の場合では 2.2dB 、 $n=18$ では 3.9dB の伝搬損失の改善が得られ、90%値では順に 9.1dB 、 11.0dB の改善が得られる. Fig. 7(a)の理想的な場合の改善量分布の 50%値である 4.5dB と比較すると、その差は $n=4$ の場合で 2.3dB 、 $n=17$ で 0.6dB である. この制御方法は最適な方法とは言い難いが、実現可能な範囲の制御により上記の改善が可能であると考えられる.



(a) $W=2.9\text{m}$, P_2 .



(b) $W=1.0\text{m}$, P_3 .

Fig. 10. CDF of Max-IPL with n variations-APC.

5. まとめ

本稿では、3次元室内環境でのアクティブ伝搬制御 (APC) による SISO 伝搬損失の改善量を、3次元

FDTD を用いて定量的に示した。伝搬環境変化装置として回転可能な金属板を用いた。また、金属板の位置や大きさの変化による APC の改善効果への影響を評価した。その結果、最も改善が得られる場合で 50%の受信点で 8dB 以上の伝搬損失の改善が得られることがわかった。

また、APC の現実的な実現方法の一例を示した。この制御では n 回の伝搬環境変化を行い、その中で最良の伝搬環境を選択する。この制御を本稿の金属板の回転を用いる APC に適用した。その結果、最も改善が得られる金属板の組み合わせで、4つの伝搬環境から選択する場合に受信点の 50%で 3.8dB、10%で 12.4dB 以上の改善が得られることがわかった。この方式では必ずしも伝搬特性の最適解が得られるとは限らない。しかしながら、その制御は非常に容易に実装でき、現状でも十分実現可能な方式であると言える。

本稿では、最大で 1 辺が 2.9m の正方形の金属板の回転を仮定した。しかしながら、金属板の回転は人体や物体との物理的な干渉などの不都合が生じ得るので、他のより安全な伝搬特性の制御方法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 岩井誠人, 移動通信における電波伝搬-無線通信シミュレーションのための基礎知識, (コロナ社, 東京, 2012), p. 36-39.
- 2) 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, 2003), p. 5-8.
- 3) 岩井誠人, 蒲原健一郎, 笹岡秀一, “無線通信におけるアクティブ伝搬制御による受信特性の改善,” 信学技報, **113**[384], AP2013-162, 163-168 (2014).
- 4) K. Kamohara, H. Iwai and H. Sasaoka, “Analysis of Indoor Propagation Characteristics for Active Propagation Control,” Proceedings of Asian Workshop on Antennas and Propagation, 135-136 (2014).
- 5) K. Kamohara, H. Iwai and H. Sasaoka, “Evaluation of MIMO Capacity Improvement by Active Propagation Control,” Proceedings of 2014 IEEE International Workshop on Electromagnetics, 28-29 (2014).
- 6) K. Kamohara, H. Iwai and H. Sasaoka, “Study of Channel Capacity Improvement by Open Loop Active Propagation Control,” Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation, 113-114 (2014).
- 7) J. Shen, Y. Oda, T. Furuno, T. Maruyama, T. Ohya, “A Novel Approach for Capacity Improvement of 2×2 MIMO in LOS Channel Using Reflectarray,” Proceeding of 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, 1-5 (2011).
- 8) 高橋雄太, 本間尚樹, “可変パッシブリピータを用いた電波伝搬環境改善に関する検討,” 信学技報, **113**[192], AP2013-62, 1-6 (2013).
- 9) 北尾光司郎, 今井哲朗, 石川一道, “移動通信システムにおける基地局アンテナの近傍に設置した反射板による高層階不感地エリアの成形法,” 信学論, **J96-B**[9], 971-980 (2013).
- 10) H. Kawakami, T. Ohira, “Electrically Steerable Passive Array Radiator (ESPAR) Antennas,” IEEE Antennas and Propagation Magazine, **47**[2], 43-50 (2005).
- 11) 宇野亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, (コロナ社, 東京, 2009), p. 60-68.