

複数のダイポールアンテナを実装した無線 LAN アクセスポイントの送信ビームフォーミングは無指向性パターンになっていることを確認するための実験的検討

- 受信局（子局）に特別な仕組みを不要とする Implicit feedback 相当方式の Cisco ClientLink の場合 -

松戸 孝[†] 宇都宮 光之[‡] 田中 政満[†] 中野 清隆[†]
山下 聖太郎[†] 力石 靖^{††} 丸田 竜一[†]

† ネットワンシステムズ株式会社 経営企画本部 第 1 応用技術部 スイッチワイヤレスチーム
‡ NI ソリューション開発チーム, †† 保守運用サービス本部 サービスオペレーション室 第 2 チーム
†, ‡ 〒100-7024 東京都千代田区丸の内 2-7-2 JP タワー
†† 〒140-8621 東京都品川区東品川 2-2-4 天王洲ファーストタワー

あらまし 複数のダイポールアンテナ（垂直偏波）を実装した無線 LAN アクセスポイントにおいて、Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターンは、一般的な事務所のフロア環境での 5GHz 帯無線 LAN 電波（IEEE802.11a, 20MHz 幅伝送）を使った簡易な測定方法の実験によって、無指向性（床面に対して水平面内）になっていることを確認した。さらに、指向性パターンのシミュレーションを簡易な仮定に基づき実施して、実験結果の妥当性を定性的に理解できた。

キーワード 送信ビームフォーミング, Implicit feedback, 無線 LAN, 指向性パターン, Cisco ClientLink

Experimental Study to confirm that a Transmit Beamforming of Wireless LAN Access Point with Some Dipole Antennas Forms Only an Omni Directional Pattern in an Azimuth Plane

- Example of Cisco ClientLink which is a Kind of Implicit Feedback Transmit Beamforming of Wireless LAN Access Point without Using a Dedicated Software and Hardware in a Client Terminal -

Takashi MATSUDO[†] Mitsuyuki UTSUNOMIYA[‡] Masamitsu TANAKA[†] Kiyotaka NAKANO[†]
Seitaro YAMASHITA[†] Yasushi CHIKARAISHI^{††} and Ryuichi MARUTA[†]

† Switch Wireless Team, Applied Technology Engineering Department 1, Corporate Planning & Strategy Division, NetOneSystems Co., Ltd.

‡ NI Solution Development Team, †† Team #2, Service Operation Office, Maintenance and Operation Service Division,

†, ‡ JP TOWER, 2-7-2 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-7024 Japan

†† Tennoz First Tower, 2-2-4 Higashi Shinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-8621 Japan

Abstract Cisco ClientLink is a kind of implicit feedback transmit beamforming in a wireless LAN access point. By an experiment using an IEEE802.11a system in an indoor office environment, we confirmed that Cisco ClientLink in a wireless LAN access point with some vertical polarization dipole antennas formed only an omni directional pattern in an azimuth plane. By simulating a directional pattern with simple assumptions, we could understand results of the experiment qualitatively.

Keyword Transmit beamforming, Implicit feedback, Wireless LAN, Directional pattern, Cisco ClientLink

1. はじめに

送信ビームフォーミングは、受信点における信号

の品質（例えば、信号電力対雑音電力比など）を最大化するために、送信局が送受信局間の伝送路の状況に

応じて、複数のアンテナから送信する信号に前処理を行う技術である[1],[2]。従って、送信ビームフォーミングは、送信局から受信局への下り回線の通信品質の改善に貢献する。

無線 LAN における送信ビームフォーミングは IEEE802.11n 規約（以下 11n と記載する）のオプションとして規定されたが、確実に利用できる状態の市販製品として登場していない。その主な理由は 2 つあると考えられる。1 つめの理由は、送信局（親局）である無線 LAN アクセスポイント（以下 AP と記載する）に加えて受信局（子局）である無線 LAN クライアント端末（以下 CL と記載する）においても複雑な処理を行う必要があり、各メーカーでの現実的な実装が困難だったからと推測される。2 つめの理由は、推定（Sounding）された送受信局間の伝送路の状況（CSI:Channel State Information）を送信局が知る方法として 2 種類（Implicit feedback(オープン・ループ)、及び、Explicit feedback(クローズド・ループ)）の各方式が規定されているので、市場に対して各メーカーが統一した方向性を出すことが困難だったからと推測される。

2014 年 1 月に 11n よりさらに高速伝送を可能とした IEEE802.11ac 規約（以下 11ac と記載する）の策定が完了した。11ac のオプションでは 11n と同様に送信ビームフォーミングを規定しているが、11n のそれよりも簡素化し、新たな Explicit feedback(クローズド・ループ)の方式だけを規定している[3]。これに伴い、各メーカーは、SU-MIMO(Single User-Multiple Input Multiple Output)における送信ビームフォーミングを 11ac の Wave1（第 1 世代）に実装し販売開始した。

但し、この 11ac オプションでの送信ビームフォーミングが有効になるのは、当然であるが、11ac オプション（送信ビームフォーミング）に対応した AP と CL が 11ac として動作する場合だけである。11ac オプションでの送信ビームフォーミングは Explicit feedback(クローズド・ループ)の方式なので、まずは、AP（送信局）が CL（受信局）へ伝送路の状況推定（Sounding）用パケットを送信し、下り回線の送受信局間の伝送路の状況(CSI)を CL（受信局）で把握した後、その把握した CSI を CL が AP へ知らせる（feedback）ことにより、AP は CL へ送信ビームフォーミングする動作となる。

従って、AP と CL 間の特別な連携をする Explicit feedback(クローズド・ループ)の方式を理解できない 11a と 5GHz 帯での 11n として動作する CL には、また、11g と 2.4GHz 帯での 11n として動作する CL には、11ac オプションでの送信ビームフォーミングは機能しない。一方、11ac オプションでの送信ビームフォーミング

を実装すると共に、CL に特別な仕組み(ハードウェアとソフトウェア)を不要としながらも、11a, 11g, 11n, 及び 11ac の CL に対して Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink と呼ばれる技術を実装した AP が既に多くの法人向けの無線 LAN として導入されている[4],[5],[6]。

Cisco ClientLink はシスコシステムズ社の独自技術であり詳細は非公開であるが、公開資料によると[4],[5], CL（送信局）から AP（受信局）への上り回線の通常のデータ通信時（OFDM 変調方式を利用）において AP（受信局）の最大比合成（MRC:Maximal Ratio Combining）ダイバーシチ受信が動作するときに取得できる情報によって送受信局間の伝送路の状況(CSI)を把握した後、同一周波数の通信であることによる通信路の対称性をその CSI へ適用して、下り回線、即ち、AP(送信局)から CL(受信局)方向への送信ビームフォーミングを実現していると概ね理解できる。従って、Cisco ClientLink は、AP と CL 間の 11a, 11g, 11n, 及び 11ac の通常の通信過程の中で、自然な形でオープン・ループの Implicit feedback 相当方式の送信ビームフォーミングを実現していると理解できる。それゆえ、Cisco ClientLink は、CL に特別な仕組み(ハードウェアとソフトウェア)は不要となることも理解できる。

2009 年に Cisco ClientLink を実装した AP 製品が登場した当時、送信ビームフォーミングという呼称からは、直感的には、下り回線で AP が送信する時の送信アンテナの指向性が特定方向に強められるというイメージを持ったが、メーカー（シスコシステムズ社）からは、そのイメージではなく、AP が通信の相手方である特定の CL の場所に対してピンポイントで通信品質を高めると解説がされた[4],[5]。

2014 年に入り、11ac オプションでの送信ビームフォーミングを実装する AP 製品（11ac の Wave1（第 1 世代））が登場し、その解説の一例を見ると[7]、直感的には、やはり、上述のイメージを想起させられるが、11ac 策定に係わった方から正しい理解を促す上述と同様の解説も出てきている[8]。

11n と 11ac の各オプション規約で、そして Cisco ClientLink で使われる送信ビームフォーミングという表現は、他の表現、例えば「送信波合成ダイバーシチ」という表現として理解することのほうが適切であると思える。

それらの解説により理解が深まると、送信ビームフォーミングを、Implicit feedback 相当方式で実現している Cisco ClientLink でも、Explicit feedback 方式で実現している 11ac Wave1 のオプションでも、無指向性（床面に対して水平面内）のアンテナ素子（例えば垂直偏

波のダイポールアンテナ等)を複数実装した AP における送信ビームフォーミングでは、下り回線の AP から送信時のアンテナの指向性パターン(床面に対して水平面内)は、無指向性になっていると理解できる。

そこで、複数のダイポールアンテナ(垂直偏波)を実装した AP において、Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターンは無指向性(床面に対して水平面内)になっていることを確認するために、一般的な事務所のフロア環境で、5GHz 帯無線 LAN 電波(IEEE802.11a, 20MHz 幅伝送)を使った簡易な測定方法の実験を実施し、その確認結果を本稿では述べた。

第 2 章では、一般的な事務所のフロア環境で、5GHz 帯無線 LAN 電波(IEEE802.11a, 20MHz 幅伝送)を使った簡易な測定方法によってアンテナの指向性パターンを測定する試みである本実験システムの性能を把握する。第 3 章では、複数のダイポールアンテナ(垂直偏波)を実装した AP において、Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターン(床面に対して水平面内)は無指向性になっていることを確認する実験について述べ、考察する。

2. 簡易な測定方法の性能を把握するための実験

本稿での実験は、一般的な事務所のフロア環境での 5GHz 帯無線 LAN 電波(IEEE802.11a, 20MHz 幅伝送)を使った簡易な測定方法によってアンテナの指向性パターンを測定する試みである。そこで、送信ビームフォーミングの指向性パターンを確認するための実験の前に、ダイポールアンテナの既知の E 面(ダイポールアンテナ素子を含む面)の指向性パターンを利用して本実験システムによる簡易な測定方法の性能を把握するための実験を実施した。

2.1. 実験目的

E 面の指向性パターンが既知である(メーカーの公開情報あり)ダイポールアンテナに対して、一般的な事務所のフロア環境において、5GHz 帯無線 LAN 電波(IEEE802.11a, 20MHz 幅伝送)を使った簡易な測定を実施して、その測定結果(E 面の指向性パターン)とメーカーの公開情報を比較することによって、本実験システムによる簡易な測定方法の性能を把握する。

2.2. 実験システムの構成と測定諸元

図 1 に実験システムの構成を、表 1 に実験での測定諸元を示す。実験システムは送信・通信系と受信系で構成される。

まずは、送信・通信系のビーコン波送信部(TX)のダ

イポールアンテナの E 面の指向性パターンが受信系でどの程度の状況で測定可能となるかを確認する。ビーコン波送信部(TX)はシスコシステムズ社製の無線 LAN の自律型 AP 製品の AP1242AG に同社製の 5GHz 帯用ダイポールアンテナ製品の ANT5135D-R を 1 本取り付けて(利用するアンテナコネクタを Primary port の Right だけ利用に設定)、5GHz 帯無線 LAN のチャンネル番号 44(中心周波数 5220MHz)の電波(11a, 20MHz 幅伝送)でビーコン波を 20msec 間隔で送信する。そのビーコンの電波を受信系の受信部(RX)で受信して、その電波の受信電力とその際の雑音電力を 20msec 間隔の時系列データとして記録部で記録する。

なお、5GHz 帯用ダイポールアンテナ製品の ANT5135D-R の指向性パターンは、メーカーであるシスコシステムズ社から公開されている[9]。

受信系の受信部(RX)は同社製の集中制御型 AP 製品の LAP1242AG にビーコン波送信部(TX)と同じアンテナ製品の ANT5135D-R を 1 本取り付けて(利用するアンテナコネクタを Primary port の Right だけ利用に設定)、同社製の無線 LAN コントローラ CT2504 で制御される。本実験の受信部(RX)の LAP1242AG は、電波を送信しない受信専用装置(Sniffer mode)として動作させる。

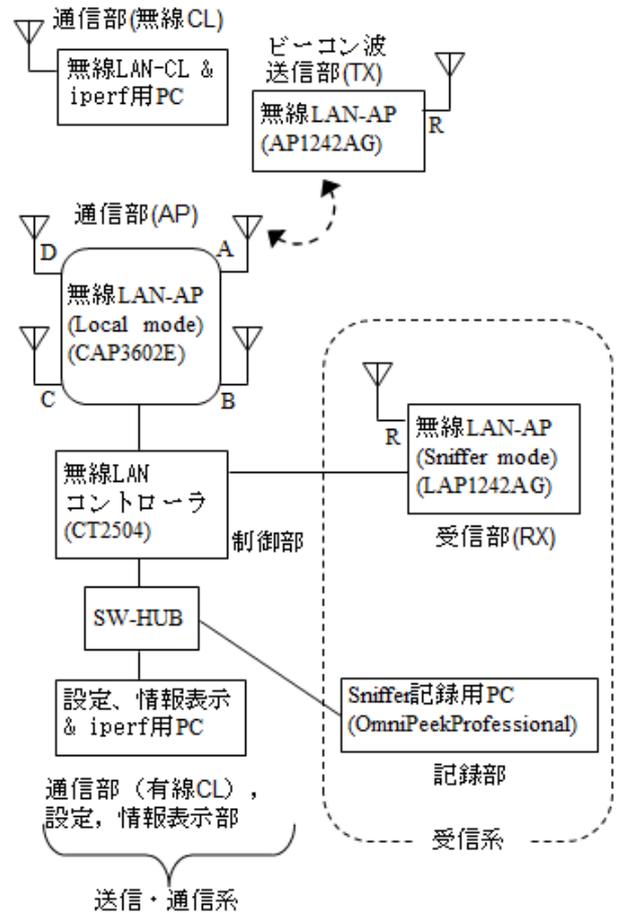


図 1 実験システムの構成

●送信・通信系、受信系共通	
送受信中心周波数	5220MHz
チャンネル番号	44
伝送帯域幅	20MHz
IEEE標準	IEEE802.11a
●ビーコン波送信部(TX) (Cisco AP1242AG)	
送信電力	8dBm
アンテナ	Cisco ANT5135D-R ダイポール
アンテナ数	1 (Primary Port-Right接続)
アンテナ利得	3.5dBi
アンテナ水平面内指向性	無指向性
アンテナ垂直面内半値角	40度
偏波(床面に対して)	水平
ビーコン間隔	20msec
アンテナコネクタ中心の床面からの高さ	1.23m
IOS ソフトウェア version	12.4(25d)JA2
●通信部(無線CL)	
ノート型PC型番名	Dell Latitude D430
ノート型PCのOS	WindowsXP
無線LANモジュール型番名	Intel PRO/Wireless3945ABG Network Connection
PC液晶画面の傾斜角度(床面に垂直から奥側への傾斜)	20度
PC液晶画面の最上端部の床面からの高さ	0.72m
●通信部(有線CL)	
ノート型PC型番名	Panasonic CF-R5
ノート型PCのOS	WindowsXP
●通信部(AP) (Cisco CAP3602E)	
AP mode	Local mode(通信モード)
送信電力	7dBm
空間ダイバーシチ受信の方法	MRCダイバーシチ受信
送信ビームフォーミングの方法	Cisco Client Link 2.0(Implicit feedback方式の1つ)
アンテナ数	2または4
アンテナ間隔(コネクタAとBの中心間、及びコネクタCとDの中心間)	約2.87波長
アンテナ間隔(コネクタBとCの中心間、及びコネクタAとDの中心間)	約1.91波長
アンテナ	Cisco ANT2524DW-R Dual-band ダイポール
アンテナ利得	4dBi
アンテナ水平面内指向性	無指向性
アンテナ垂直面内半値角	39度
偏波(床面に対して)	垂直
アンテナコネクタ中心の床面からの高さ	1.17m

●受信部(RX) (Cisco LAP1242AG)	
AP mode	Sniffer mode (受信専用モード)
アンテナ	Cisco ANT5135D-R ダイポール
アンテナ数	1 (Primary Port-Right接続)
アンテナ利得	3.5dBi
アンテナ水平面内指向性	無指向性
アンテナ垂直面内半値角	40度
偏波(床面に対して)	水平(対ビーコン波送信部)/ 垂直(対通信部)
アンテナコネクタ中心の床面からの高さ	1.23m(対ビーコン波送信部)/ 1.17m(対通信部)
●通信部(TOPスループット測定ソフトウェア iperf)	
ソフトウェア Version	2.0.5.1
サーバー側設定コマンド	<code>iperf -s -w 512K -i 1</code>
クライアント側設定コマンド	<code>iperf -c IPアドレス -w 512K -i 1 -t 30</code>
●制御部(Cisco CT2504)	
機能mode	Local mode(通信モード)と、 Sniffer mode (受信専用モード)
ソフトウェア version	7.6.100.0
●記録部(Wild Packets OmniPeekProfessional)	
ソフトウェア version	7.9.1

表 1 実験での測定諸元

測定対象であるビーコン波送信部(TX)のダイポールアンテナと受信部(RX)のダイポールアンテナは、両方とも床面に対して水平に設置した、水平偏波の状況である。

2.3. 受信部(RX)の AP での受信電力と雑音電力を時系列データとして記録する測定方法

受信部(RX)の AP の LAP1242AG は、制御部の無線 LAN コントローラ CT2504 で制御される。この CT2504 では制御する AP を、電波を送受信して無線 LAN 通信する通常の mode から、電波を送信しない受信専用装置(Sniffer mode)へ設定変更することが可能である[10]。Sniffer mode では、受信部(RX)の受信アンテナと AP が伝搬してきた無線 LAN の電波を受信し続け、その結果、無線 LAN のパケットをキャプチャし続ける動作をする。そしてキャプチャされたパケットは記録部の Sniffer 記録用 PC のパケット解析のソフトウェアである Wild Packets 社製 OmniPeekProfessional で実時間で解析して各種情報(例えば AP と CL 間の相互接続する手順等)を表示、また、記録保存が可能である。

OmniPeekProfessional で解析されたパケット毎の情報の中に、パケット毎の受信電力(単位: dBm)とその

際の雑音電力(単位:dBm)も記録されている。例えば、ビーコンの電波が 20msec 毎に送信されていると、そのパケットも 20msec 毎に受信、そしてキャプチャされているので、ビーコンの電波の受信電力とその際の雑音電力が 20msec 毎に測定された時系列データとして記録されることになる。

2.4. 実験場所の環境

図 2 に、本実験場所の環境をフロア平面概要図として示す。本実験場所は、一般的な事務所の居室フロア環境と理解できる。本実験は休日に実施しており、居室は数人以下の着席状態である。

本実験でのビーコン波送信部(TX)の固定位置は、図 2 の AP であり、床面からの高さは 1.23m である。測定対象であるビーコン波送信部(TX)のダイポールアンテナは床面に対して水平に設置した水平偏波の状況であるが(従ってダイポールアンテナの E 面は床面に対して水平面)、同アンテナの先端部は 0 度方向であり、同アンテナへの給電コネクタは 180 度方向になる。

送受信間の見通しを確保できるフロアの通路上で、ビーコン波送信部(TX)から 5m 離れた位置に受信部(RX)の測定経路を設置した。その受信部(RX)の測定経路は、AP を中心にした半径 5m の円周上を、30 度間隔で 0 度から 330 度までの 12 方位に設置した。各方位での受信電力からビーコン波送信部(TX)のダイポールアンテナの E 面の指向性パターンを確認する。

受信部(RX)の床面からの高さは、ビーコン波送信部(TX)のそれと同様に 1.23m である。受信部(RX)のダイポールアンテナは、床面に対して水平に設置した水平偏波の状況であり、各方位では、同アンテナの軸は円周の接線方向を向き、同アンテナの主ビーム方向は、ビーコン波送信部(TX)のダイポールアンテナを向いている。

受信部(RX)の位置変化に伴うマルチパスフェージングの状況で測定するために、図 2 の受信部(RX)の 30 度間隔の各方位の測定経路では、0.6m の距離を 5 秒間かけてゆっくりと移動させている。受信部(RX)は台車の上に載せてあり、人がその台車を概ね一定の速度でゆっくりと移動させている。

壁面の状況は図 2 のとおりであるが、居室の天井と床面の距離は 2.51m であり、天井の材質は石膏ボードである。床面にはカーペットが敷かれている。

2.5. 実験の手順

送信・通信系のビーコン波送信部(TX)のダイポールアンテナの E 面の指向性パターンは、次の手順で測定、記録した各方位での受信電力から確認する。

(Step1)ビーコン波送信部(TX)の AP1242AG からビーコンの電波を連続送信。

(Step2)受信部(RX)を図 2 の中のある方位の測定移動経

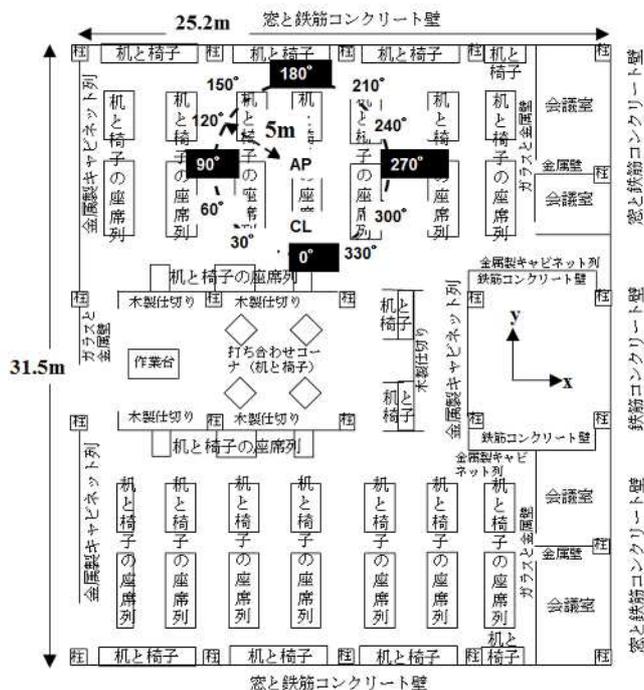


図 2 実験場所の環境(フロアの平面概要図)

路の出発地点へ移動。

(Step3)受信部(RX)を 10 秒間静止させた状態で、受信系記録部の OmniPeekProfessional でキャプチャしたパケットを記録する。

(Step4)パケットの記録を(Step3)から連続した状態で、受信部(RX)を、AP を中心とする半径 5m の円周上を時計周り方向に、0.6m の距離を 5 秒間かけてゆっくりと移動させる。受信部(RX)は台車の上に載せてあり、人がその台車を概ね一定の速度でゆっくりと移動させている。

(Step5)パケットの記録を(Step4)から連続した状態で、受信部(RX)を 10 秒間静止させた後に、パケットの記録を停止する。1 回の測定で 25 秒間の測定データが記録されたことになる。

(Step6)次の方位の測定経路へ向けて(Step2)へ。

2.6. 測定データの処理手順

ビーコン波送信部(TX)のダイポールアンテナの E 面の指向性パターンを描くために、各方位での受信電力値は、2.5 節の手順で記録した測定データから次の処理手順で、採用する。

(Step1) OmniPeekProfessional で 1 つの測定方位における測定データを表示させて、CSV 形式へ変換した測定データを作成する。

(Step2) CSV 形式へ変換した 1 つの測定方位における測定データをマイクロソフト社製の表計算ソフトウェア EXCEL で参照し、ビーコンのパケット毎のキャプチャした時刻に着目して、ゆっく

り移動測定した 2.5 節 (Step4) の 5 秒間の測定データを抜き出す。

(Step3) ゆっくり移動測定した 5 秒間の 1 つの測定方位における測定データの中の各パケットにおける受信電力(単位: dBm)に着目する。

なお、ビーコン波送信部(TX)で電波のビーコンの間隔は 20msec に設定したが、これは 5 秒間で 250 パケットのビーコン波送信に相当する。しかし測定されたパケット数はゆらいでおり、各方位での 5 秒間の測定パケット数を 12 方位で平均すると 244 パケットとなった。ここで受信部(RX)は 0.6m の距離を 5 秒間かけてゆっくりと移動しているので、 $0.0025\text{m} (=0.6\text{m}/244)$ 毎の位置で 1 つのパケットが、つまり 1 つの受信電力が測定できたことになる。送受信の周波数 5220MHz の波長は 0.0575m なので、0.0025m は約 1/23 波長に相当する。

(Step4) 1 つの測定方位では、平均 244 個の受信電力データを記録できていたので、この受信電力の累積確率分布の 50% 値を、その方位での受信電力値として採用した。

2.7. 実験結果

2.6 節までの手順で得られた測定データによって描いたビーコン波送信部(TX)のダイポールアンテナ ANT5135D-R の E 面の指向性パターンを図 3 に示す。文献[9]に示されたメーカーの公開情報 (E-Plane Pattern) と比較すると、図 3 は、ダイポールアンテナの軸線上になる 0 度付近と 180 度付近の各方向の指向性パターンの低下状況を表現できていないが、概ねの傾向を把握することはできていることがわかる。

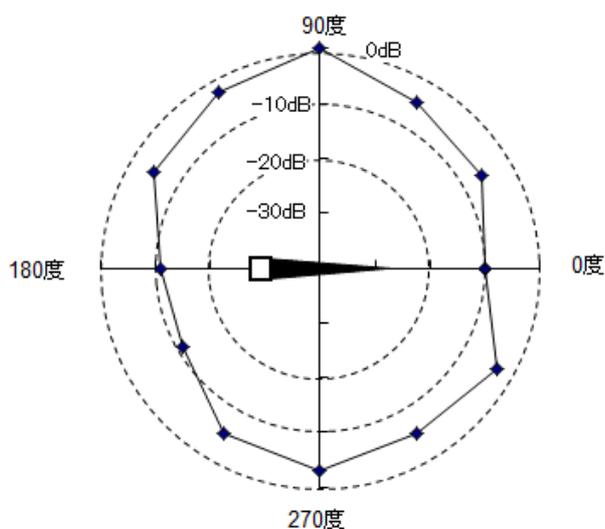


図 3 ダイポールアンテナ ANT5135D-R の E 面指向性パターンの簡易測定結果 (周波数: 5220MHz, 伝送帯域幅: 20MHz)

本実験システムによる簡易な測定方法による測定性能は、上述の程度であることを承知して、この後の実験と検討を進める。

3. 送信ビームフォーミングの指向性パターンを確認するための実験

3.1. 実験目的

複数のダイポールアンテナ (垂直偏波) を実装した AP において、Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターン (床面に対して水平面内) は無指向性になっていることを、一般的な事務所のフロア環境において、5GHz 帯無線 LAN 電波 (IEEE802.11a, 20MHz 幅伝送) を使った簡易な測定方法の実験により、確認する。

3.2. 実験システムの構成と測定諸元

図 1 に実験システムの構成を、表 1 に実験での測定諸元を示す。第 2 章の実験と異なり、送信・通信系が、ビーコン波送信部(TX)から、通信部(AP)と通信部(無線 CL)へ変更になる。受信系は第 2 章の実験と同じである。

通信部(AP)は、シスコシステムズ社製の無線 LAN の集中制御型 AP 製品の CAP3602E であり、Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink を実装している。CAP3602E は 11n 対応の AP であるが、その対応時点の version として、Cisco ClientLink2.0 を実装していると表現されることもある。

通信部 (AP) の アンテナ は、同社製の Dual-band(2.4GHz 帯と 5GHz 帯)用ダイポールアンテナ製品の ANT2524DW-R[11]を 2 本、または 4 本 (実装可能な最大数) を実装させた場合の指向性パターン (床面に対して水平面内) を確認する。なお、通信部 (AP) のダイポールアンテナも、受信部 (RX) のダイポールアンテナも、床面に対して垂直、即ち、垂直偏波として設置している。

通信部 (無線 CL) と通信部 (有線 CL) の間で CAP3602E の通信部 (AP) と CT2504 の制御部を経由して iperf を利用した TCR (Transmission Control Protocol) でのスループット測定を実施する際に、通信部 (AP) から通信部 (無線 CL) への下り回線方向では Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink2.0 が仕様により常時動作している状況であるが、その際に、2.3 節と同様な方法により、無線区間の電波 (5GHz 帯無線 LAN のチャンネル番号 44 (中心周波数 5220MHz), 11a, 20MHz 幅伝送) を受信系でパケットキャプチャとして記録することで、送信ビームフォーミングの指向性パターン (床面に対して水平面内) を確認することを試みる。

3.3. 実験場所の環境

実験場所の環境は、2.4 節で述べた環境と同じである。本実験では、通信部（無線 CL）の固定位置は、床面からの高さ 0.72m で図 2 の CL である。通信部（AP）の固定位置は、図 2 の AP であり、床面からの高さは 1.17m である。AP と CL 間の水平距離は 4m であるが、AP と CL 間には金属製の什器が存在していて見通しは無い状況である。

受信部（RX）の床面からの高さは、通信部（AP）のそれと同様に 1.17m であるが、受信部（RX）と通信部（AP）間の見通しは確保されている。受信部（RX）は、各方位で、通信部（AP）から通信部（無線 CL）への下り回線方向の電波を受信する。

3.4. 実験の手順

Cisco ClientLink を実装した通信部（AP）の送信ビームフォーミングの指向性パターン（床面に対して水平面内）は、次の手順で測定、記録した各方位での受信電力から確認する。通信部（AP）のダイポールアンテナ（垂直偏波）は、2 本、または 4 本（実装可能な最大数）を実装させた 2 つの場合で実験を行うが、両方の場合において、次の同じ手順である。

- (Step1) 通信部（有線 CL）を iperf のサーバに設定する。
- (Step2) 受信部（RX）を図 2 の中のある方位の測定移動経路の出発地点へ移動。
- (Step3) 図 2 の CL に設置した通信部（無線 CL）を iperf のクライアントに設定し、TCP でのスループット測定通信を開始する（測定時間は 30 秒間に設定）。この状態で 5 秒間経過させる（この経過時間内で Step4 以降のための準備を作業者が実施する）。
- (Step4) 受信部（RX）を 10 秒間静止させた状態で、受信系記録部の OmniPeekProfessional でキャプチャしたパケットを記録する。スループット測定通信も自動継続している。
- (Step5) スループット測定通信とパケットの記録を（Step4）から連続した状態で、受信部（RX）を、AP を中心とする半径 5m の円周上を時計周り方向に、0.6m の距離を 5 秒間かけてゆっくりと移動させる。受信部（RX）は台車の上に載せてあり、人がその台車を概ね一定の速度でゆっくりと移動させている。
- (Step6) パケットの記録を（Step5）から連続した状態で、受信部（RX）を 10 秒間静止させた後に、パケットの記録を停止する。1 回の測定で 25 秒間のパケットキャプチャ測定データが記録されたことになる。この時点で（Step3）から 30 秒間経過となりスループット測定通信は自動的に終了する。
- (Step7) 次の方位の測定経路へ向けて（Step2）へ。

3.5. 測定データの処理手順

Cisco ClientLink を実装した通信部（AP）の送信ビームフォーミングの指向性パターン（床面に対して水平面内）を描くために、各方位での受信電力値は 3.4 節の手順で記録した測定データから次の処理手順で、採用する。

- (Step1) OmniPeekProfessional で 1 つの測定方位における測定データを表示させて、CSV 形式へ変換した測定データを作成する。
- (Step2) CSV 形式へ変換した 1 つの測定方位における測定データをマイクロソフト社製の表計算ソフトウェア EXCEL で参照し、iperf による TCP スループット測定通信のパケット毎のキャプチャした時刻に着目して、3.4 節（Step5）のゆっくり移動測定した 5 秒間のパケットキャプチャ測定データを抜き出す。
- (Step3) ゆっくり移動測定した 5 秒間の 1 つの測定方位における測定データの中の各パケット（通信部（AP）から通信部（無線 CL）への下り回線のパケット）における受信電力（単位：dBm）に着目する。この各パケットは、iperf のサーバである通信部（有線 CL）から iperf のクライアントである通信部（無線 CL）への TCP の ACK（確認応答）パケットである。

なお、通信部（AP）のダイポールアンテナが 2 本の場合、各方位での 5 秒間の測定パケット数を 12 方位で平均すると 5641 パケットとなった。ここで受信部（RX）は 0.6m の距離を 5 秒間かけてゆっくりと移動しているため、 0.000106m （ $=0.6\text{m}/5641$ ）毎の位置で 1 つのパケットが、つまり 1 つの受信電力が測定できたことになる。送受信の周波数 5220MHz の波長は 0.0575m なので、 0.000106m は約 $1/542$ 波長に相当する。

同様に、通信部（AP）のダイポールアンテナが 4 本の場合、各方位での 5 秒間の測定パケット数を 12 方位で平均すると 5699 パケットとなった。ここで受信部（RX）は 0.6m の距離を 5 秒間かけてゆっくりと移動しているため、 0.000105m （ $=0.6\text{m}/5699$ ）毎の位置で 1 つのパケットが、つまり 1 つの受信電力が測定できたことになる。送受信の周波数 5220MHz の波長は 0.0575m なので、 0.000105m は約 $1/548$ 波長に相当する。

- (Step4) 1 つの測定方位では、通信部（AP）のダイポールアンテナが 2 本の場合は平均 5641 個の受信電力データを、通信部（AP）のダイポールアンテナが 4 本の場合は平均 5699 個の受信電力データを記録できていたので、これらの各受信電力の累積確率分布の 50% 値を、その方

位での受信電力値として採用した。

3.6. 実験結果

3.6.1. 通信部(AP)のダイポールアンテナが 2 本の場合

通信部(AP)のダイポールアンテナが 2 本の場合において、Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターン(床面に対して水平面内)を図 4 に示す。図 4 は、3.5 節までの手順で得られた測定データによって描いている。

通信部(AP)の 2 本のダイポールアンテナ A と同 B は図 4 に示されたように、床面に対して垂直の状態では、方位 0 度と同 180 度を結ぶ軸線上に配置されている。それら 2 本のダイポールアンテナ間隔は表 1 に示したように約 2.87 波長である。通信部(無線 CL)は、方位 0 度方向である。

図 4 により、通信部(AP)のダイポールアンテナ(垂直偏波)が 2 本の場合において、Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターン(床面に対して水平面内)は、無指向性であると理解できる。

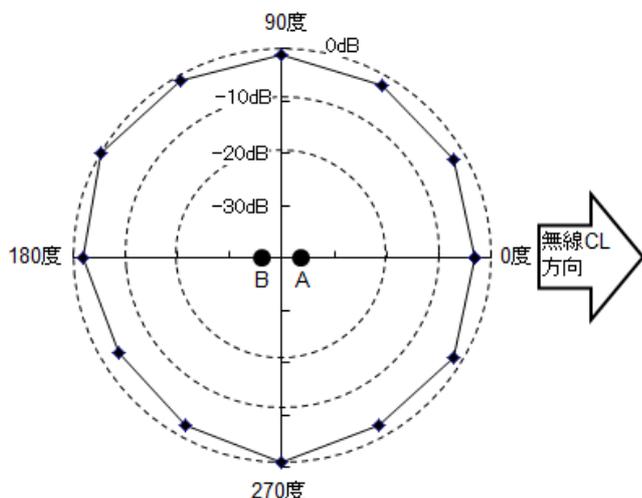


図 4 通信部(AP)のダイポールアンテナが 2 本 (A と B)の場合における Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターン(床面に対して水平面内)、周波数：5220MHz、伝送帯域幅：20MHz

3.6.2. 通信部(AP)のダイポールアンテナが 4 本の場合

通信部(AP)のダイポールアンテナが 4 本の場合において、Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターン(床面に対して水平面内)

を図 5 に示す。図 5 は、3.5 節までの手順で得られた測定データによって描いている。

通信部(AP)の 4 本のダイポールアンテナ A、同 B、同 C、及び、同 D が図 5 に示されたように、床面に対して垂直の状態では、長方形の頂点上に配置されている状況である。それら 4 本のダイポールアンテナ間隔は表 1 に示したようにダイポールアンテナ A と同 B 間が約 2.87 波長、同 B と同 C 間が約 1.91 波長である。通信部(無線 CL)は、方位 0 度方向である。

図 5 により、通信部(AP)のダイポールアンテナ(垂直偏波)が 4 本の場合において、Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターン(床面に対して水平面内)は、無指向性であると理解できる。

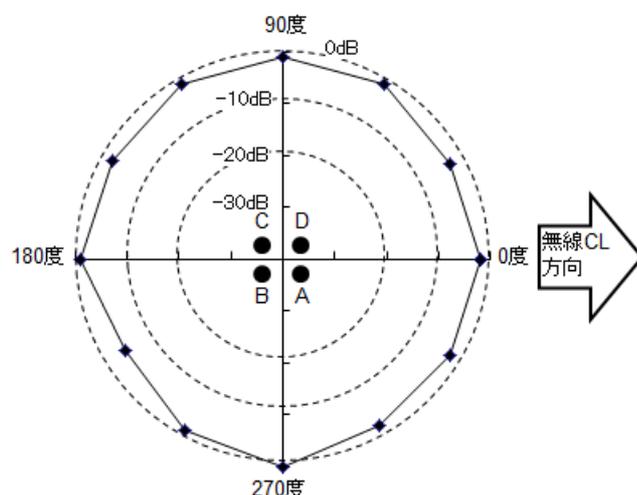


図 5 通信部(AP)のダイポールアンテナが 4 本 (A、B、C、及び D)の場合における Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターン(床面に対して水平面内)、周波数：5220MHz、伝送帯域幅：20MHz

3.7. 考察

実験結果の 3.6 節の図 4 と図 5 から、複数のダイポールアンテナ(垂直偏波)を実装した AP において、Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングは、指向性が特定方向に強められるという状況ではなく、指向性パターン(床面に対して水平面内)は、無指向性であると確認できた。そこで、この無指向性であるということ、通信部(AP)のダイポールアンテナ(垂直偏波)が 2 本の送信ビームフォーミング(Cisco ClientLink)の場合について、指向性パターンのシミュレーションによって定性的に理解することを試みた[12]。

指向性パターンのシミュレーションは、アンテナ解析ソフトウェア MMANA(Makoto Mori ANALyzer)を用いた[13]、[14]。アンテナ解析ソフトウェア MMANAは、米海軍海洋方式センタ（Naval Ocean Systems Center）で開発された「MININEC(A Mini-Numerical Electromagnetic Code) Version3」を基に、アマチュア無線家の森誠氏（JE3HHT）が作成したモーメント法によるアンテナ解析ソフトウェアである。

指向性パターンのシミュレーションは次の Step で進めた。

(Step1)通信部(AP)のアンテナであるダイポールアンテナ製品の ANT2524DW-R が 1 本のときの E 面の指向性パターンについて、メーカ公表のパターン（Elevation Plane Patterns for 5GHz）[11]と MMANA でシミュレーションしたパターンが、概ね等しくなるように、MMANA でシミュレーションする際のアンテナ素子の長さとおさを決めた。なお、周波数は実験で使用した 5GHz 帯無線 LAN のチャンネル番号 44 の中心周波数 5220MHz とし、アンテナは自由空間中に存在すると仮定した。

最終的に、ダイポールアンテナ素子の長さは 7cm（約 1.22 波長）、直径は 2mm(約 0.035 波長)と決定し、(Step2)以降の MMANA でのシミュレーションを実施した。なお、モーメント法におけるダイポールアンテナ素子の分割は MMANA の自動均等分割を用いた。分割幅は波長/40 に近い値なる[13]、[14]。

図 6 は、この決定した値によってシミュレーションしたダイポールアンテナ 1 本のときの E 面の指向性パターンである。MMANA でのシミュレーション結果は 90 度から 180 度を經由して 270 度までの範囲は表示されないが、中央給電のダイポールアンテナ素子 1 本なので、その範囲の E 面の指向性パターンは 90 度と 270 度を結ぶ軸線に対して 90 度から 0 度を經由して 270 度までの範囲の指向性パターンが対称になっていると理解できる。なお、H 面の指向性パターンは無指向性になっていた（図示は省略する）。

(Step2) 通信部(AP)のダイポールアンテナ（垂直偏波）が 2 本の送信ビームフォーミング（Cisco ClientLink）の場合の指向性パターン（床面に対して水平面）をシミュレーションするための MMANA への設定値は、次のように決定した。

(2-1)ダイポールアンテナ A と同 B の 2 本の間隔は、第 3 章の実験時の値、即ち、16.5cm（5220MHz における約 2.87 波長）とした。

(2-2) モーメント法におけるダイポールアンテナ

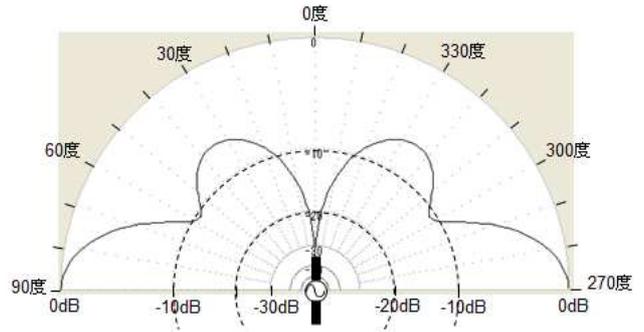


図 6 ダイポールアンテナ素子 1 本（長さ約 1.22 波長、直径約 0.035 波長）の E 面指向性パターンのシミュレーション結果。周波数：5220MHz、自由空間

素子の分割は上記(Step1)と同様である。

(Step3)第 3 章の実験は 11a の 20MHz 幅伝送で実施したが、ここでは簡易に考察するために、20MHz 幅伝送における中心周波数 5220MHz と、その上下 5MHz の周波数、即ち、5225MHz と 5215MHz の 3 波について、MRC ダイバーシチ受信と送信ビームフォーミングの重み付けが実施されたと仮定する。そして最終的に送信ビームフォーミングの際の各アンテナへの給電電圧は、次のように重み付け（振幅と位相）されたと仮定し、MMANA への設定値とした。

- (3-1) 3 波すべてにおいて、ダイポールアンテナ A と同 B に、同振幅の電圧を給電する。
- (3-2) 5215MHz においてダイポールアンテナ B に給電される電圧の位相は同 A のそれより、- 10 度とする。
- (3-3) 5220MHz においてダイポールアンテナ B に給電される電圧の位相は同 A のそれより、- 50 度とする。
- (3-4) 5225MHz においてダイポールアンテナ B に給電される電圧の位相は同 A のそれより、- 190 度とする。

(Step4)各波について MMANA で H 面（床面に対して水平面に相当）の指向性パターンをシミュレーションする。なお、ダイポールアンテナは自由空間中に存在すると仮定した。

図 7 は、5215MHz における MMANA でシミュレーションした H 面の指向性パターン（床面に対して水平面に相当）である。無線 CL は 0 度方向である。

図 8 は、5220MHz における MMANA でシミュレーションした H 面の指向性パターン（床面に対して水平

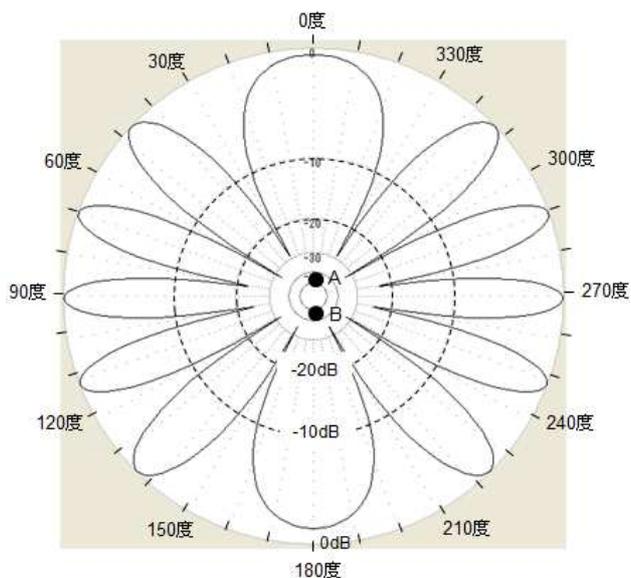


図 7 ダイポールアンテナ素子（長さ 7cm，直径 2mm，垂直偏波）2本（A と B，間隔 16.5cm）の H 面（床面に対して水平面に相当）の指向性パターンのシミュレーション結果．周波数：5215MHz，自由空間，B の給電電圧の位相は A に対して-10 度，B と A の給電電圧は同振幅．

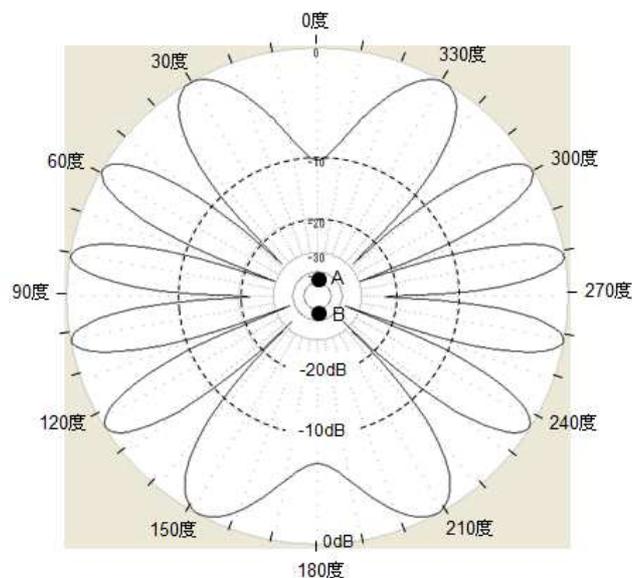


図 9 ダイポールアンテナ素子（長さ 7cm，直径 2mm，垂直偏波）2本（A と B，間隔 16.5cm）の H 面（床面に対して水平面に相当）の指向性パターンのシミュレーション結果．周波数：5225MHz，自由空間，B の給電電圧の位相は A に対して-190 度，B と A の給電電圧は同振幅．

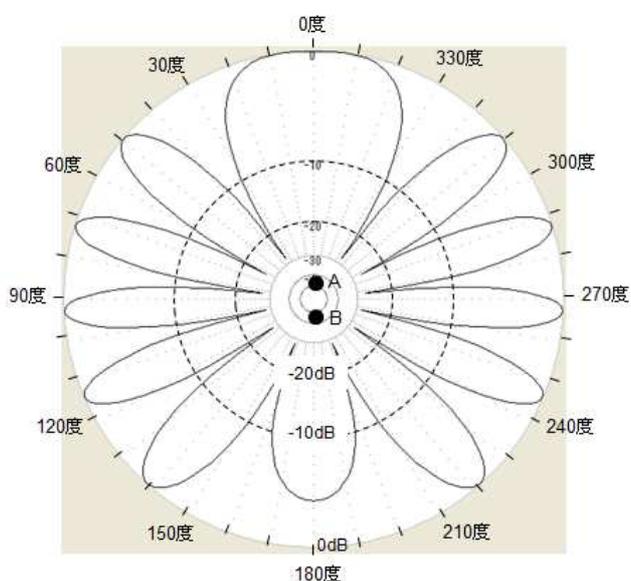


図 8 ダイポールアンテナ素子（長さ 7cm，直径 2mm，垂直偏波）2本（A と B，間隔 16.5cm）の H 面（床面に対して水平面に相当）の指向性パターンのシミュレーション結果．周波数：5220MHz，自由空間，B の給電電圧の位相は A に対して-50 度，B と A の給電電圧は同振幅．

面に相当)である．無線 CL は 0 度方向である

図 9 は，5225MHz における MMANA でシミュレーションした H 面の指向性パターン（床面に対して水平面に相当）である．無線 CL は 0 度方向である

仮定した中心周波数 5220MHz での 11a の 20MHz 幅伝送時は，図 7，図 8，及び，図 9 が合成された H 面の指向性パターン（床面に対して水平面に相当）になると考えられるので，H 面の指向性パターン（床面に対して水平面に相当）は概ね無指向性になると推測される．

上記では簡易に考察するために伝送帯域幅 20MHz 内の異なる周波数の 3 波だけでの重み付けを仮定したが，実際の AP 内の MRC ダイバーシチ受信と送信ビームフォーミングの重み付けは，伝送帯域幅内のもっと多くの数のサブキャリアに対して実施されると考えられる．従って合成される指向性パターン（床面に対して水平面）の数も増えることで，より無指向性のパターンになっていくと推測される．

4. まとめ

複数のダイポールアンテナ（垂直偏波）を実装した AP において，Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink の送信ビームフォーミングの指向性パターンを，一般的な事務所のフロア環境での 5GHz 帯無線 LAN 電波

(IEEE802.11a, 20MHz 幅伝送) を使った簡易な測定方法の実験によって, 確認した.

(1) 本実験システムで測定したダイポールアンテナ製品の ANT5135D-R の E 面の指向性パターンは, メーカーの公開情報の概ねの傾向を示していた. 本実験システムは, 簡易な測定方法であるが, その測定性能は上述の程度であることを承知した上で, 利用することは可能である.

(2) Implicit feedback 相当方式で送信ビームフォーミングを実現している Cisco ClientLink を実装した無線 LAN アクセスポイント CAP3602E は, ダイポールアンテナ (垂直偏波) 数が 2 本のときも, また, 4 本のときも, 送信ビームフォーミングの指向性が特定方向に強められるという状況ではなく, 指向性パターン (床面に対して水平面内) は無指向性になっていることを実験により確認した.

(3) アンテナ解析ソフトウェア MMANA による指向性パターンのシミュレーションを簡易な仮定に基づき実施して, 上記項目 (2) の実験結果の妥当性を定性的に理解できた.

(4) 11n と 11ac の各オプション規約で, そして Cisco ClientLink で使われる送信ビームフォーミングという表現は, 他の表現, 例えば「送信波合成ダイバーシチ」という表現として理解することのほうが適切であると思える.

(5) 今後の課題

市販されている無線 LAN 製品の送信ビームフォーミングによる通信品質の改善状況を定量的に確認することである.

謝 辞

仲上-ライスフェージング環境の理論について詳細に解説いただいた電気通信大学 大学院 情報理工学研究科の唐沢好男 教授 (IEEE Fellow) に感謝する. 無線 LAN 製品の様々なことで日頃よりお世話になっているシスコシステムズ合同会社の 大野奈津子様, 中元聡様, 鈴木麻倫子様 に感謝する. 本実験実施の機会を与えていただいたネットワークシステムズ株式会社の篠浦執行役員, 飯田第 1 応用技術部長, 大高スイッチワイヤレスチームリーダーに感謝する.

文 献

- [1] 守倉正博, 久保田周治, "改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書 第 10 章高速化を実現する技術", インプレス R&D, 2008 年 4 月 11 日, ISBN978-4-8443-2546-8.
- [2] Eldad Perahia, Robert Stacey, "Next generation wireless LANs : throughput, robustness, and reliability in 802.11n Chapter12 Transmit beamforming", Cambridge University Press, 2008, ISBN978-0-521-88584-3 hardback.

- [3] Matthew S. Gast, "802.11ac: A Survival Guide Chapter 4 Beamforming in 802.11ac ", <http://chimera.labs.oreilly.com/books/1234000001739/ch04.html>, O'Reilly Media, Inc., 2013, ISBN978-1-4493-4314-9.
- [4] Cisco systems, "Cisco ClientLink: Optimized Device Performance with 802.11n", Cisco systems, http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1130-ag-series/white_paper_c11-516389.html.
- [5] Cisco systems, "All Beamforming Solutions Are Not Equal White Paper", http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-722622.html.
- [6] Cisco systems, "Cisco Wireless ClientLink 3.0 Technology", http://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/at_a_glance_c45-691984.pdf.
- [7] 清水理史, "Draft 11ac で注目されるビームフォーミングとは何か? WZR-1750DHP でビームフォーミングの効果を計測する", 清水理史の「イニシヤ B」, http://internet.watch.impress.co.jp/docs/column/shimizu/20130730_609563.html.
- [8] 浅井裕介, "特集 2 徹底解剖! 802.11ac", 日経 NETWORK, pp.48-64, 2014 年 4 月号.
- [9] Cisco systems, "Cisco Aironet 3.5-dBi Articulated Dipole Antenna (AIR-ANT5135D-R)", Cisco systems, <http://www.cisco.com/en/US/docs/wireless/antenna/installation/guide/ant5135d.html>.
- [10] Cisco systems, "Collecting a Wireless sniffer trace using the Cisco Lightweight AP in Sniffer mode", Cisco systems, <https://supportforums.cisco.com/docs/DOC-19214>, Oct. 24, 2011.
- [11] Cisco systems, "Aironet Dual-band Dipole Antenna (AIR-ANT2524DB-R, AIR-ANT2524DG-R, and AIR-ANT2524DW-R)", Cisco systems, <http://www.cisco.com/en/US/docs/wireless/antenna/installation/guide/ant2524.html>.
- [12] 田口光雄, "解説 電磁波工学教育におけるシミュレータ利用の可能性", 電子情報通信学会誌, vol.96, no.1, pp.41-45, Jan. 2013.
- [13] 森誠, "アンテナ解析ソフト MMANA", <http://www33.ocn.ne.jp/~je3hht/mmana/>.
- [14] 大庭信之, "アンテナ解析ソフト MMANA", CQ 出版, 2007 年 11 月 15 日, ISBN978-4-7898-1240-5.