

応募区分：研究型論文

シスコシステムズ社製無線 LAN アクセスポイント CAP3602E の最大比  
合成 (Maximal Ratio Combining:MRC) ダイバーシチ受信性能の実験的検  
討 -より信頼性の向上した無線 LAN の実現を目指して-

松戸 孝 (まつど たかし)

ネットワークシステムズ株式会社ビジネス推進グループ 第1 製品技術部 ワイヤレス・モバイルチーム

宇都宮 光之 (うつのみや みつゆき)

ネットワークシステムズ株式会社ビジネス推進グループ 第1 製品技術部 ワイヤレス・モバイルチーム

田中 政満 (たなか まさみつ)

ネットワークシステムズ株式会社ビジネス推進グループ 第1 製品技術部 ワイヤレス・モバイルチーム

中野 清隆 (なかの きよたか)

ネットワークシステムズ株式会社ビジネス推進グループ 第1 製品技術部 ワイヤレス・モバイルチーム

丸田 竜一 (まるた りゅういち)

ネットワークシステムズ株式会社ビジネス推進グループ 第1 製品技術部 ワイヤレス・モバイルチーム

力石 靖 (ちからいし やすし)

ネットワークシステムズ株式会社ビジネス推進グループ 第1 製品技術部 ワイヤレス・モバイルチーム

山下 聖太郎 (やました せいろう)

ネットワークシステムズ株式会社ビジネス推進グループ 第1 製品技術部 ワイヤレス・モバイルチーム

## ■ 要約

より信頼性の向上した無線LANの実現を目指してシスコシステムズ社製の無線LANアクセスポイントのCAP3602Eの最大比合成(Maximal Ratio Combining:MRC)ダイバーシチ受信性能を一般的な事務所のフロア環境において実験的に検討した。その結果、受信アンテナ数の増加に伴いMRCダイバーシチ受信によりSNRは増加していく傾向は認められるが、受信アンテナ数が2本から4本へ増加したときのSNRの増加が小さく、飽和状態のようにも思えた。CAP3602Eにはより信頼性を向上できる潜在能力があるものと考えており、改善の可能性を期待している。さらに、干渉波が存在するときのMRCダイバーシチ受信はその動作原理から言われているように必ずしも最適な受信をしているわけではないということを確認できた。定性的には、SNRの低下が大きい場合に雑音電力が極めて大きい状況のときは干渉波が存在するときであると判断して、MRCダイバーシチ受信で合成するアンテナ数を単純に減少させることで受信性能を改善するという対処案を提案した。

## 目次

1. まえがき.....	4
2. 選択ダイバーシチ受信(LAPI242AG に実装)と MRC ダイバーシチ受信 (CAP3602E に実装) の実験的 性能比較.....	5
2.1. 実験目的.....	5
2.2. 実験方法.....	6
2.2.1. 実験システムの構成.....	6
2.2.2. 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.....	7
2.2.3. 実験場所の環境.....	7
2.2.4. 実験の手順.....	8
2.2.5. 測定データの処理手順.....	8
2.3. 実験結果.....	9
2.4. 考察.....	10
3. 受信アンテナ数の違いによる MRC ダイバーシチ受信 (CAP3602E に実装) の実験的 性能比較... ..	10
3.1. 実験目的.....	10
3.2. 実験方法.....	10
3.2.1. 実験システムの構成と実験場所の環境.....	10
3.2.2. 受信部(RX)の CAP3602E の受信アンテナ数を変化させる方法.....	10
3.2.3. 実験の手順と測定データの処理手順.....	11
3.3. 実験結果.....	11
3.3.1. 送信部(TX)と受信部(RX)の偏波が共に垂直(V)の場合.....	11
3.3.2. 送信部(TX)の偏波が水平(H)、受信部(RX)の偏波が垂直(V)の場合.....	11
3.4. 考察.....	12
3.4.1. MRC ダイバーシチ受信の SNR の累積確率分布の理論値.....	12
3.4.2. MRC ダイバーシチ受信の SNR の累積確率分布の測定値と理論値の比較.....	13
3.4.3. CAP3602E の MRC ダイバーシチ受信に望まれる改善.....	14
4. 干渉波が存在するときの MRC ダイバーシチ受信 (CAP3602E に実装) 性能の実験的 検討.....	14
4.1. 実験目的.....	14
4.2. 実験方法.....	14
4.2.1. 実験システムの構成.....	14
4.2.2. 実験場所の環境と 2.4GHz 帯の干渉波の状況.....	15
4.2.3. 実験の手順.....	16
4.2.4. 測定データの処理手順.....	16
4.3. 実験結果.....	16

4.4. 考察.....	17
4.4.1. 干渉波が存在するときのMRCダイバーシチ受信性能.....	17
4.4.2. 干渉波が存在するときのCAP3602EのMRCダイバーシチ受信性能を改善する提案.....	18
5. むすび.....	18
6. 謝辞.....	19
7. 参考文献.....	19

## 1. まえがき

無線 LAN は、免許不要の無線局として誰でも自由に使えることから（また、電波利用料も、なし）、その利用は、法人向け、家庭向け、公衆向け等として急速に拡大している。職場での無線 LAN 利用率が約 70%(1756 人中)という動向調査結果(2011 年)もあり、また、通信事業者ごとに専用の周波数で運用する移動通信のトラフィックが 2015 年頃までにはその 64%が無線 LAN 利用でオフロードされることも推計されている[1]。無線 LAN は、数少ない周波数を他の利用者や他の無線局と共用して運用するという通信品質を確保する点ではかなり不利な制約条件をもちながらも、重要な社会インフラの一つに急成長している。通信品質を確保するために無線 LAN の信頼性向上の技術の進化が、今後、さらに必要とされる。

受信装置系や送信装置系が正常に動作していて、かつ、混信（干渉）もない場合、無線通信の状態や信頼性を劣化させる要因は、電波の空間における状況、即ち、電波伝搬の状況である。

無線 LAN 通信では、親局である無線 LAN アクセスポイント（以下 AP と記載する）と子局である無線 LAN クライアント端末（以下 CL と記載する）間の電波伝搬路の遮へい、遮へいに伴う電波の回折、さらには、反射・散乱が多数回繰り返されて多重経路（マルチパス）による電波の振幅や位相の変動（フェージング）が電波伝搬劣化要因となる。一般に無線 LAN 通信では、AP と CL 間の見通しを確保して電波伝搬路の遮へいをあらかじめ極力避けてシステム構築するので、電波伝搬劣化要因としては反射波や散乱波によるマルチパスフェージングの影響が大きくなる。マルチパスフェージングは、AP と CL 間の電波伝搬環境の時間的変化と CL の利用位置や移動による空間的変化に伴い、受信信号（受信電力や、受信電力対雑音電力の比(SNR)）を劣化させる。受信信号の劣化を回避して、より安定して信頼性の高い高速な無線 LAN 通信を実現するためにはマルチパスフェージングへの対策が必要となる。AP と CL に実装されているマルチパスフェージングへの対策がダイバーシチ受信と呼ばれる電波を受信する装置側での技術である[2]。

ダイバーシチ受信にはいくつかの方法があるが、無線 LAN 通信では空間ダイバーシチ受信が採用されている。マルチパスフェージングが発生している場合、ある場所では、電波強度が低いのに、ほんの少しはなれた場所では電波が強いという状況になっている。この状況下では、一つの受信アンテナでは電波の受信信号劣化が激しい場合でも、少し離れた場所にもう一つの受信アンテナを置けば、どちらか一方は良好な受信特性であることが期待できる。このように複数の受信アンテナを受信信号の変動が無相関になる程度に離して置き、その受信出力を選択または合成する受信技術が空間ダイバーシチ受信である。

空間ダイバーシチ受信の一つの方法である選択ダイバーシチ受信は、受信信号（受信電力や SNR）の強度が最も高い受信アンテナを選択し、切り替えて使う方法である。選択ダイバーシチ受信は、実装する場合の構成が簡単なので、初期の IEEE802.11b の無線 LAN 製品からも実装されており、その後の IEEE802.11ag 時代にも継続して無線 LAN 製品に実装されてきている。IEEE802.11abg 対応のシスコシステムズ社製の AP の LAPI242AG にも、選択ダイバーシチ受信が実装されている[3]。LAPI242AG は、2.4GHz 帯 (11bg) 向け受信用にアンテナが 2 本、実装されていて、選択ダイバーシチ受信により、どちらか 1 本の受信アンテナからの信号が復調されて利用されている。LAPI242AG の 5GHz 帯 (11a)

向け受信アンテナも2本が実装されていて2.4GHz帯(11bg)と同様である。

空間ダイバーシチ受信のもう一つの方法である最大比合成(Maximal Ratio Combining:MRC)ダイバーシチ受信は、各受信アンテナで受信した電波の振幅と位相の両方を調整して合成するとき最大のSNRとなるように合成出力を得る方法である。MRCダイバーシチ受信は、選択ダイバーシチ受信よりは原理のうえで良好な特性を得ることができるが、回路構成が複雑になりコスト増加にもなるので、市販されている無線LAN製品ではこれまで実装がされてこなかった。しかしながらIEEE802.11n対応の無線LAN製品が登場すると、MRCダイバーシチ受信が実装された。11nは一台のAPやCLで複数の送受信するアンテナ(含む関連装置)を実装して、伝送する周波数帯域幅を一定に保ちながらも、空間的に送受信する伝送路(ストリーム)を多重化する(MIMO:Multiple Input Multiple Output)技術で高速伝送を実現している。11n対応の無線LAN製品では、このMIMO技術が基本であり、一台のAPやCLで複数の送受信するアンテナの実装も基本となっているので複数の受信アンテナによるMRCダイバーシチ受信を実現しやすい。特に11n対応のAPは、AP本体がある程度の大きさを有しているため波長程度以上のアンテナ間隔を確保して複数のアンテナを実装しやすい、また商用電源による連続稼働も可能なため電力消費する複数の送受信装置も実装しやすい。従って、11n対応のAPは、2本から4本のアンテナ数を用いたMRCダイバーシチ受信を実装した製品が一般的である。11n対応のシスコシステムズ社製のAPのCAP3602Eにも、MRCダイバーシチ受信が実装されている[3],[4]。CAP3602Eは、アンテナコネクタをDual-band(2.4GHz帯と5GHz帯)対応として4個具備していて、Dual-band(2.4GHz帯と5GHz帯)対応アンテナを利用することにより、2.4GHz帯(11bgn)向け受信用にアンテナが4本、及び5GHz帯(11an)向け受信にもアンテナが4本、各々実装されている。

本論文では、より信頼性の向上した無線LANの実現を目指して、シスコシステムズ社製のAPのCAP3602EのMRCダイバーシチ受信性能を一般的な事務所のフロア環境において実験的に検討して、その特徴を明らかにし、改善案を考察、提案する。第2章では、選択ダイバーシチ受信(LAP1242AGに実装)とMRCダイバーシチ受信(CAP3602Eに実装)を実験的に性能比較して、それらの性能の差を明らかにする。第3章では、受信アンテナ数の違いによるMRCダイバーシチ受信(CAP3602Eに実装)を実験的に性能比較して、その特徴を明らかにし、期待する改善案を考察する。第4章では、干渉波が存在するときのMRCダイバーシチ受信(CAP3602Eに実装)性能を実験的に検討して、その特徴を明らかにし、改善案を提案する。

## 2. 選択ダイバーシチ受信(LAP1242AGに実装)とMRCダイバーシチ受信(CAP3602Eに実装)の実験的性能比較

### 2.1. 実験目的

市販されている無線LAN製品のAPを利用して、MRCダイバーシチ受信は、選択ダイバーシチ受信より優れているか否かを確認する。具体的には、シスコシステムズ社製の無線LANのAP製品のCAP3602Eに実装されたMRCダイバーシチ受信(受信アンテナ数は4本)の性能と、同製品のLAP1242AGに実装された選択ダイバーシチ受信(受信アンテナ数は2本)の性能を比較する。なお、CAP3602EとLAP1242AGにおいて受信アンテナ数の違いはあるが、市販されている無線LAN製品の

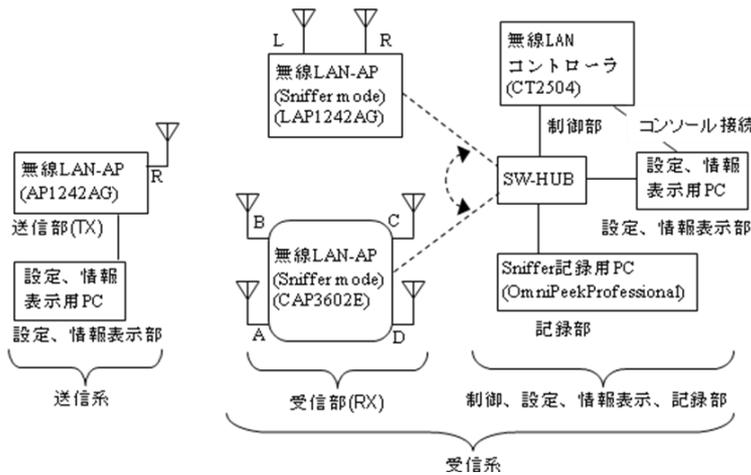


図1. 実験システムの構成

表1. 実験での測定諸元

送受信部(TX,RX) 共通	送受信中心周波数	5,300MHz
	チャンネル番号	60
	伝送帯域幅	20MHz
	IEEE標準	IEEE802.11a
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)	垂直
	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	0.72m
	IOS ソフトウェア version	12.4(21a)JY
受信部(RX) 共通	AP mode	Sniffer mode (受信専用モード)
	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	1.04m
受信部(RX) (Cisco LAP1242AG)	空間ダイバーシチ受信の方法	選択ダイバーシチ受信
	アンテナ数	2
	アンテナ間隔 (コネクタ Primary(Right) と Leftの中心間)	約1.15波長
受信部(RX) (Cisco CAP3602E)	空間ダイバーシチ受信の方法	MRCダイバーシチ受信
	アンテナ数	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2.92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1.94波長
制御部(Cisco CT2504)	機能mode	Sniffer mode (受信専用モード)
	ソフトウェア Version	7.4.100.0
記録部 (Wild Packets OmniPeekProfessional)	ソフトウェア Version	6.8.2

AP として通常に利用する方法での性能比較が意義あるので、両製品の受信アンテナ数の違いは許容して性能比較する。

## 2.2. 実験方法

### 2.2.1. 実験システムの構成

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系と受信系で構成される。送信系の送信部(TX)は、シスコシステムズ社製の無線LANの自律型AP製品のAPI242AG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(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60(中心周波数5,300MHz)の電波でビーコンを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(この記録方法の詳細は後述する)。なお、5GHz帯無線LANのチャンネル番号60(中心周波数5,300MHz)には干渉波は存在していないことは、後述する項目4.2.2の方法を

5GHz 帯にも適用して、確認済みである。

MRC ダイバーシチ受信の性能を測定する場合には受信部(RX)は集中制御型 AP 製品の CAP3602E を動作させ、選択ダイバーシチ受信の性能を測定する場合には受信部(RX)は同製品の LAP1242AG を動作させる。CAP3602E と LAP1242AG は、シスコシステムズ社製の無線 LAN コントローラ CT2504 で制御される。CAP3602E の MRC ダイバーシチ受信には、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 を 4 本、また、LAP1242AG の選択ダイバーシチ受信にも、同製品の ANT2524DW-R を 2 本、各々取り付けて動作させる。本実験の受信部(RX)の CAP3602E と LAP1242AG は、電波を送信しない受信専用装置(Sniffer mode)として動作させるので、接続する受信アンテナの種類は自由に選択できる。CAP3602E と LAP1242AG で受信測定条件を同じにするために、本実験では CAP3602E で通常に利用されるアンテナの ANT2524DW-R を LAP1242AG の受信アンテナとしても利用する。

### 2.2.2. 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 と CAP3602E 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[5]。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 のフレームをキャプチャし続ける動作をする。なお、本論文では、「パケット・キャプチャ・ソフトウェア」等の一般的な呼び方にならない、この後、無線 LAN のパケットと記載する。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。なお、OmniPeekProfessional では、送信部の MAC アドレスによるフィルタを設定した。

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。

本実験では、同じ実験場所の環境で、受信部(RX)を選択ダイバーシチ受信のときと、MRC ダイバーシチ受信のときで、各々、Sniffer mode で測定して、ビーコンの電波の受信電力とその際の雑音電力を時系列データとして記録することにより、受信部(RX)の違いによる性能評価を実施している。

### 2.2.3. 実験場所の環境

図2に、本実験場所の環境をフロアの平面概要図として示す。本実験場所は、一般的な事務所のフロア環境と理解できる。送受信間の見通しを確保できるフロア中央部の通路上で、送信部(TX)から 11.7m 離れた位置に受信部(RX)の移動経路を設置した。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を測定するために、受信部(RX)は、図2の中の座標軸の y 方向に、2.28m の距離を 10 秒間かけてゆっくりと移動させている。

送信部(TX)と受信部(RX)が設置された図2の左側部分は、人が多数存在し着席して仕事をする居室であるが(机と床面の距離は 0.71m)、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

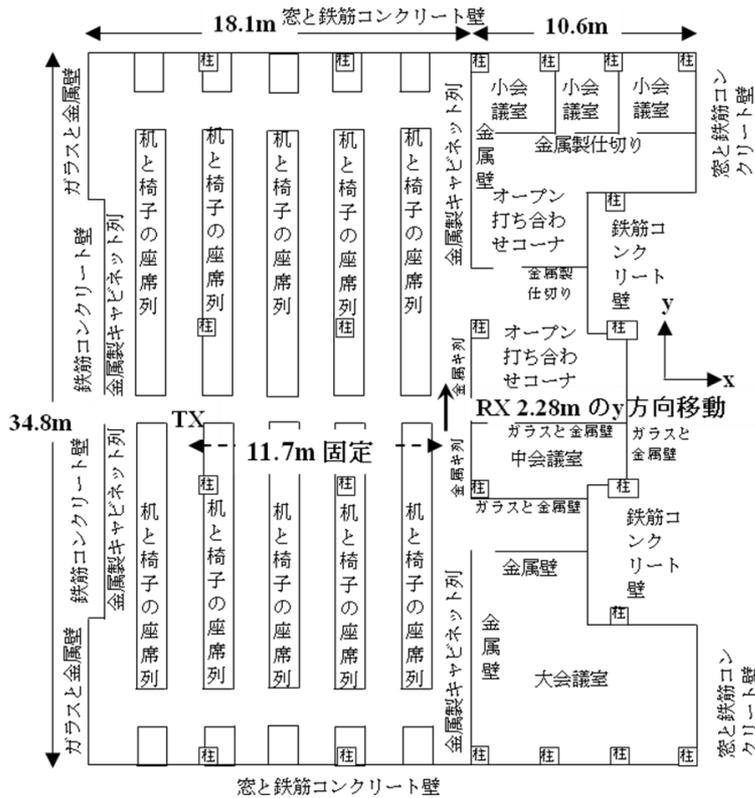


図2. 実験場所の環境 (フロアの平面概要図)

から連続した状態で、受信部(RX)を、図2の中の座標軸のy方向に、2.28mの距離を10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。

(Step4)パケットの記録を(Step3)から連続した状態で、受信部(RX)を5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20秒間の測定データが記録されたことになる。

#### 2.2.5. 測定データの処理手順

(Step1)OmniPeekProfessionalで1回の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回の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5秒から15秒の間の10秒間の測定データを抜き出す。

(Step3)ゆっくり移動測定した10秒間の1回の測定データの中の各パケットで、受信電力(単位: dBm)と雑音電力(単位: dBm)から、受信電力対雑音電力の比(SNR(単位: dB))を計算して、SNRのデータ列を追加する。

なお、送信部(TX)で電波のビーコンの間隔は20msecに設定したが(10秒間で500パケットのビーコンに相当)、測定されたパケット間隔の頻度は20msecが約87.9%、24msecが約12.1%であった。従って10秒間の測定データとしては489パケットとなった。ここで受信部(RX)は2.28mの距離を10秒間かけてゆっくりと移動しているので、 $0.0047\text{m} (=2.28\text{m}/489)$  毎の位置で一つのパケットが、つまり一つの受信電力や一つのSNRが測定できたことになる。送受信の周波数5,300MHzの波長は0.0566m

る。壁面の状況は図2のとおりであるが、居室部の天井と床面の距離は2.65m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。

#### 2.2.4. 実験の手順

LAP1242AGの選択ダイバーシチ受信とCAP3602EのMRCダイバーシチ受信の測定データは、各々次の手順で測定、記録した。

(Step1)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5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。  
(Step3)パケットの記録を(Step2)

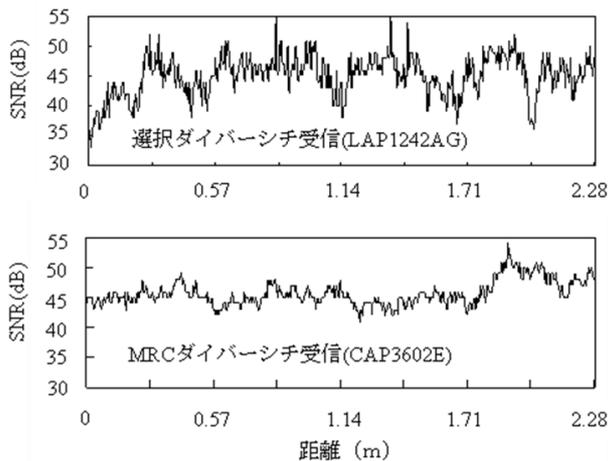


図3. 選択ダイバーシチ受信(LAP1242AG、受信アンテナ数2本)とMRCダイバーシチ受信(CAP3602E、受信アンテナ数4本)のSNR対距離の比較

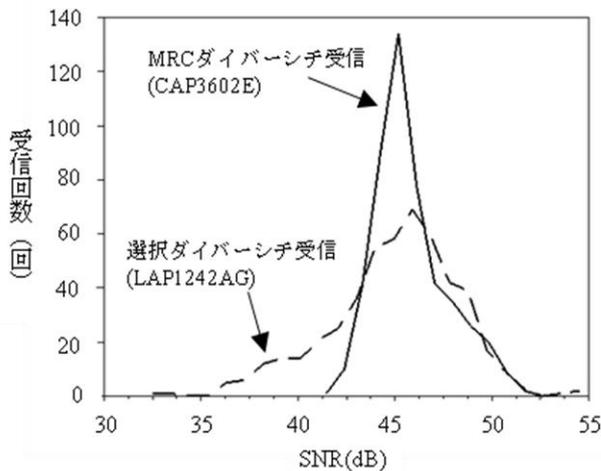


図4. 選択ダイバーシチ受信(LAP1242AG、受信アンテナ数2本、破線)とMRCダイバーシチ受信(CAP3602E、受信アンテナ数4本、実線)のSNRの頻度分布

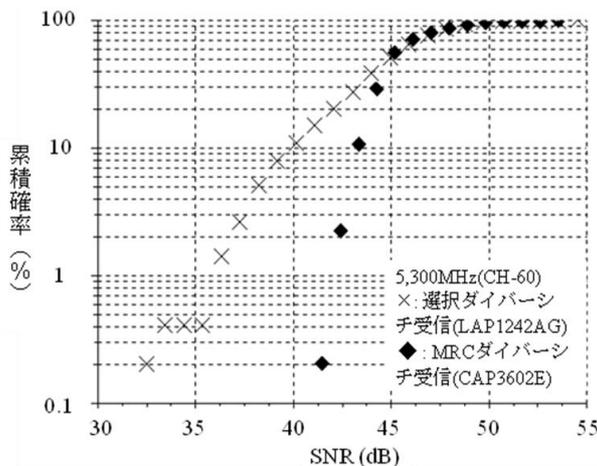


図5. 選択ダイバーシチ受信(LAP1242AG、受信アンテナ数2本)とMRCダイバーシチ受信(CAP3602E、受信アンテナ数4本)のSNRの累積確率分布

なので、0.0047mは約1/12波長に相当する。

### 2.3. 実験結果

図3にLAP1242AGの選択ダイバーシチ受信(受信アンテナ数2本)とCAP3602EのMRCダイバーシチ受信(受信アンテナ数4本)で測定したSNRの時系列データを示す。横軸は項目2.2.5.で述べたように距離(単位:m)に換算して示した。選択ダイバーシチ受信に比べて、MRCダイバーシチ受信のほうがSNRの変動幅が小さくなっている傾向がある。

図4には、図3の測定データをSNRの頻度分布として示した。図4の縦軸は各SNRの値での受信回数であるが、各ダイバーシチ受信での総受信回数は489である。SNRの変動幅の違いがさらに明確にわかる。LAP1242AGの選択ダイバーシチ受信では、約22dBのSNRの変動幅であるが、CAP3602EのMRCダイバーシチ受信では、約12dBのSNRの変動幅に減少している。選択ダイバーシチ受信に比べて、MRCダイバーシチ受信に比べて、MRCダイバーシチ受信のほうがSNRの劣化が小さく、かつ、より安定したSNRを得られている。

図5には、図4の測定データをSNRの累積確率分布として示した。図4の受信回数をSNRの小さい側から累積していき、その累積値を総受信回数(本実験では489)で割り算して百分率で表現したものが図5である。累積確率1%のSNRに着目すると[6]、選択ダイバーシチ受信に比べて、MRCダイバーシチ受信のほうが約6dB大きいSNRを得られている、即ち、ダイバーシチ利得が約6dB

大きいことがわかる。

## 2.4. 考察

2.3節の実験結果で示された CAP3602E の MRC ダイバーシチ受信は LAP1242AG の選択ダイバーシチ受信よりダイバーシチ利得が約 6dB 大きい性能は、CAP3602E の MRC ダイバーシチ受信は LAP1242AG の選択ダイバーシチ受信より、より遠くに位置する CL からの電波の受信を可能にする、または、同じ位置にある CL にはマージンをより大きくもって電波の受信の安定化に貢献する。

従って、11a しか運用しない無線 LAN であっても、11n 対応 (11n 標準としては 11a を下位互換している) で、MRC ダイバーシチ受信を実装している CAP3602E を採用することによって、より信頼性の向上した無線 LAN を実現できる。

## 3. 受信アンテナ数の違いによる MRC ダイバーシチ受信 (CAP3602E に実装) の実験的性能比較

### 3.1. 実験目的

市販されている無線 LAN 製品の AP を利用して、MRC ダイバーシチ受信は、受信アンテナ数が増加すると性能が良くなっているか否かを確認する。具体的には、シスコシステムズ社製の無線 LAN の AP 製品の CAP3602E に実装された MRC ダイバーシチ受信で、受信アンテナ数を 4、3、2 及び 1 の各本に変化させたときの性能を比較する。

### 3.2. 実験方法

#### 3.2.1. 実験システムの構成と実験場所の環境

図1の実験システムの構成で受信系の受信部(RX)としてはCAP3602Eだけを使い、その他の構成は図1のとおりである。実験での測定諸元は、受信系は表1で受信部(RX)としてはCAP3602Eだけを使い、そのアンテナ数の変更については項目3.2.2.のとおりであり、他は表1のとおりである。送信系の測定諸元は表1で1箇所追加がある。それは、送信部(TX)の偏波(床面に対して)を垂直の他に、水平の場合も実験を実施した。

実験場所の環境は、項目2.2.3.に記載のとおりである。

#### 3.2.2. 受信部(RX)のCAP3602Eの受信アンテナ数を変化させる方法

受信部(RX)のCAP3602Eで動作させる受信アンテナ数は、制御部のCT2504で設定変更する。表2にCAP3602Eの受信アンテナ数とアンテナコネクタの動作設定状態(ONまたはOFF)を示す。同状態をOFFにしたアンテナコネクタからは、受信アンテナは取り外した。なお、制御部のCT2504で受信

表2. CAP3602Eの受信アンテナ数とアンテナコネクタの動作設定状態

		アンテナコネクタ				備考
		A	B	C	D	
受信アンテナ数	4	ON	ON	ON	ON	
	3	ON	ON	ON	OFF	
	2	ON	ON	OFF	OFF	
	1	ON	ON(注)			(注) インピーダンスが50オームの擬似負荷で終端。

アンテナ数を1本の設定は拒否されたので、アンテナコネクタAとBをONにしつつ、アンテナコネクタBはインピーダンスが50オームの擬似負荷で終端して、アンテナコネクタAにだけアンテナを接続して受信アンテナ数1本の場合の測定をした。

### 3.2.3. 実験の手順と測定データの処理手順

実験の手順は、CAP3602Eの各受信アンテナ数毎に項目2.2.4.に記載のとおり実験を実施した。また、送信部(TX)の偏波(床面に対して)を垂直の他に、水平の場合も実験を実施した。

測定データの処理手順は、項目2.2.5.に記載のとおりである。

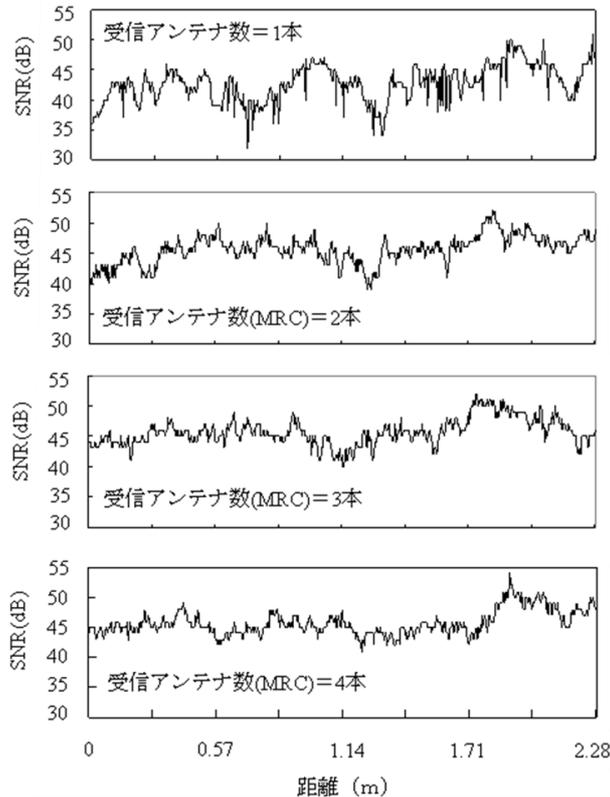


図6. MRCダイバーシチ受信(CAP3602E)での受信アンテナ数の違いによるSNR対距離

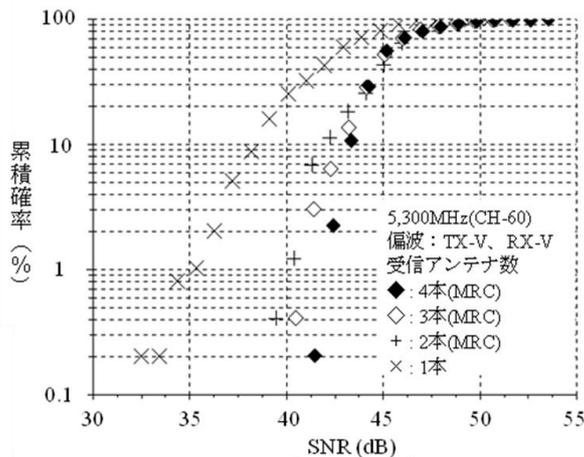


図7. MRCダイバーシチ受信での受信アンテナ数の違いによるSNRの累積確率分布 その1 (測定時の偏波:TX-V, RX-V)

### 3.3. 実験結果

#### 3.3.1. 送信部(TX)と受信部(RX)の偏波が共に垂直(V)の場合

送信部(TX)と受信部(RX)の偏波(床面に対して)が共に垂直(V)の場合の実験結果について述べる。図6に、MRCダイバーシチ受信(CAP3602E)での受信アンテナ数を変えて測定したSNRの時系列データを示す。横軸は項目2.2.5.で述べたように距離に換算して示した。受信アンテナ数が増加するとSNRの変動幅が小さくなっていく傾向がある。

図7には、図6の測定データをSNRの累積確率分布として示した。累積確率1%のSNRに着目すると、受信アンテナ数が1本に比べて、4本のMRCダイバーシチ受信のほうが約7dB大きいSNRを得られている、即ち、約7dBのダイバーシチ利得を得られていることがわかる。しかしながらMRCダイバーシチ受信の受信アンテナ数が2本から4本へ増加したときの累積確率1%でのダイバーシチ利得の増加は約1.5dBにとどまっている。

#### 3.3.2. 送信部(TX)の偏波が水平(H)、受信部(RX)の偏波が垂直(V)の場合

送信部(TX)だけの偏波(床面に対して)を水平(H)に変更した実験結果について述べる。図8にはMRCダイバーシチ受信(CAP3602E)でのアンテナ数を変えて測定したSNRの累積確率分

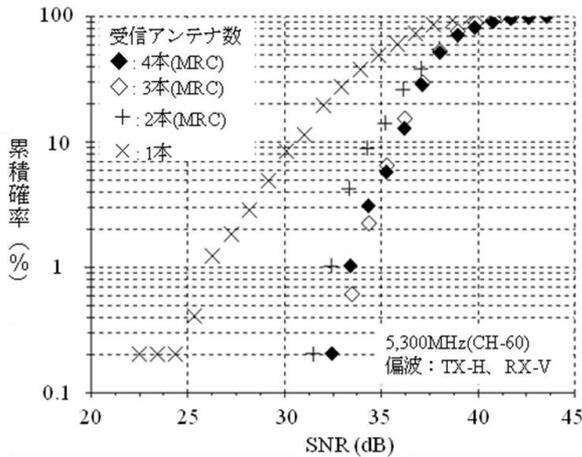


図8. MRC ダイバーシチ受信での受信アンテナ数の違いによるSNRの累積確率分布 その2 (測定時の偏波:TX-H, RX-V)

図6、7及び8からは、受信アンテナ数の増加に伴いMRC ダイバーシチ受信によりSNRは増加していく傾向は認められるが、受信アンテナ数が2本から4本へ増加したときのSNRの増加が小さく、飽和状態のようにも思える。そこで、MRC ダイバーシチ受信のSNRの累積確率分布について、参考文献[2]と[7]により導かれる理論値と本実験の測定結果を比較した。

#### 3.4.1. MRC ダイバーシチ受信のSNRの累積確率分布の理論値

本実験では、送信部(TX)と受信部(RX)の間の見通しは確保されているので、受信部(RX)で受信される電波の変動(フェージング)は、送信部(TX)からの定常的な直接波と周辺の様々な物体からの反射波や散乱波が合成された変動になる。この変動は、仲上-ライスフェージングと呼ばれる[2]。

そして仲上-ライスフェージング環境において、反射波や散乱波が複数の受信アンテナ毎に無相関に変動することを仮定できる場合には、MRC ダイバーシチ受信におけるSNR(単位は比として表現されるので、なし)の確率密度関数 $f(\gamma; N)$ の理論式は次式になる[7]。

$$f(\gamma; N) = \frac{K}{\Gamma_d} \left( \frac{\gamma}{N\Gamma_d} \right)^{\frac{1}{2}(N-1)} \exp \left\{ -K \left( \frac{\gamma}{\Gamma_d} + N \right) \right\} I_{N-1} \left( 2K \sqrt{\frac{N\gamma}{\Gamma_d}} \right) \quad (1)$$

$\gamma$ : SNR,

$N$ : 受信アンテナ数

$\Gamma_d$ : 直接波のSNR,

$\Gamma_s$ : 反射波や散乱波の平均SNR

$K$ : ライスファクタ  $\left( \frac{\Gamma_d}{\Gamma_s} \right)$ ,  $I_{N-1}$ :  $(N-1)$  次の第1種変形ベッセル関数

それゆえ、MRC ダイバーシチ受信におけるSNRの累積確率分布関数 $F(\gamma_{ct}; N)$ の理論式は次式になる。

布を示した。累積確率1%のSNRに着目したダイバーシチ利得は、項目3.3.1と同様な結果になった。即ち、受信アンテナ数が1本の受信から受信アンテナ数が4本のMRCダイバーシチ受信へ増加したときのダイバーシチ利得は約7dBであるが、MRCダイバーシチ受信の受信アンテナ数が2本から4本へ増加したときのダイバーシチ利得の増加は約1dBにとどまっている。

#### 3.4. 考察

3.3節でも述べたように、実験結果の

$$F(\gamma_{ct}; N) = \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{ct}} f(\gamma; N) d\gamma \quad (2)$$

$\gamma_{ct}$ : 累積するSNRのしきい値,       $\gamma_{\min}$ : SNRの最小値

なお、上記の仮定は、反射波や散乱波の到来角度広がりが大きくて、受信アンテナの間隔が電波の波長程度以上に広い場合に適用できる仮定であるが、図2に示した本実験場所の環境と表1に示した実験での測定諸元（受信部(RX) (Cisco CAP3602E)のアンテナ間隔）から、本実験ではこの仮定が適用できると判断した。

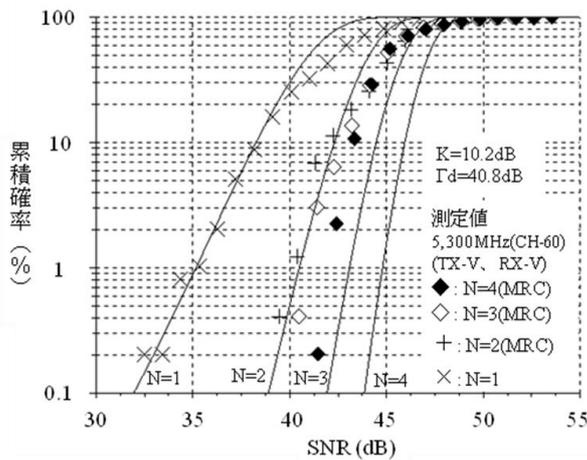


図9. MRC ダイバーシチ受信（受信アンテナ数N=1から4）でのSNRの累積確率分布の測定値（記号）と理論値（実線）の比較 その1(測定時の偏波:TX-V, RX-V)

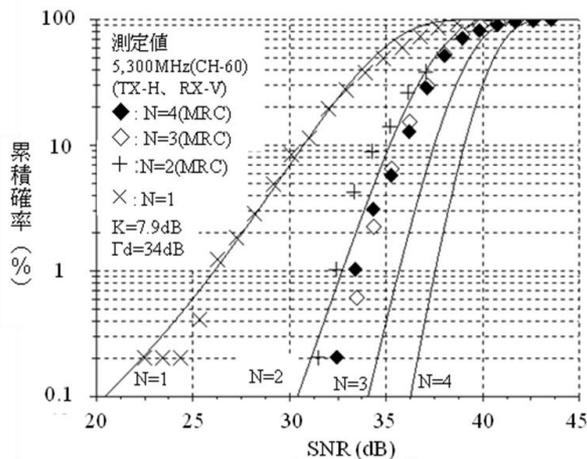


図10. MRC ダイバーシチ受信（受信アンテナ数N=1から4）でのSNRの累積確率分布の測定値（記号）と理論値（実線）の比較 その2(測定時の偏波:TX-H, RX-V)

### 3.4.2. MRC ダイバーシチ受信の

#### SNRの累積確率分布の測定値と理論値の比較

図9は、測定結果である図7に理論値を追加記載したMRCダイバーシチ受信のSNRの累積確率分布である。なお、理論値を追加記載する際には、式(2)へ入力したSNRは単位をdBに変換している。理論値は、まず、受信アンテナ数N=1の測定値に理論値が概ね適合するようにK(=10.2dB)とΓd(=40.8dB)を決定し、続いて受信アンテナ数N=2, 3, 及び4の理論値を計算して追加記載した。図9において、受信アンテナ数N=2の場合、測定値と理論値は概ね一致している。しかしながら、受信アンテナ数N=3の場合は、累積確率1%のSNRに着目したダイバーシチ利得は、測定値が理論値より約2dB小さい状況である。また、受信アンテナ数N=4の場合は、同ダイバーシチ利得は、測定値が理論値より約3dB小さい状況である。

図10は、測定結果である図8に理論値を追加記載したMRCダイバーシチ受信のSNRの累積確率分布である。上述の図9と同様にして理論値を計算して追加記載した。なお、受信アンテナ

数  $N=1$  の測定値に理論値が概ね適合するように決定した  $K(=7.9\text{dB})$  と  $\Gamma_d(=34\text{dB})$  は、図9のそれらより小さい値となった。この理由は次のように推測する。図10の測定結果は、送信部(TX)の送信アンテナの偏波(床面に対して)を水平偏波に設定し、受信部(RX)の受信アンテナの偏波(床面に対して)を垂直偏波に設定した場合であるので、受信される電波では直接波の寄与が減り、反射波や散乱波の寄与が増えていると推測される。 $K$  と  $\Gamma_d$  の定義は数式(1)に記載のとおりなので、従って、送受とも垂直偏波の場合の図9の  $K$  と  $\Gamma_d$  に比べて、図10のそれらは小さくなったと推測する。

図10において、受信アンテナ数  $N=2$  の場合、測定値と理論値は概ね一致している。しかしながら、受信アンテナ数  $N=3$  の場合は、累積確率1%のSNRに着目したダイバーシチ利得は、測定値が理論値より約3dB小さい状況である。また、受信アンテナ数  $N=4$  の場合は、同ダイバーシチ利得は、測定値が理論値より約4dB小さい状況である。

### 3.4.3. CAP3602E のMRC ダイバーシチ受信に望まれる改善

項目3.4.2の測定値と理論値の比較結果を見ると、CAP3602EのMRCダイバーシチ受信は、受信アンテナ数が3本または4本のときは、もっとダイバーシチ利得が大きくても良いと考えられる。受信アンテナ数が3本または4本のときに測定値のダイバーシチ利得の増加が小さくて飽和状態のようにも思える明確な理由は不明であるが、例えば、次のような状況も推測できる。

(推測1) CAP3602Eの他の機能(例えば、複数の伝送速度の制御等[8])との関係で総合的に調整された結果が、本実験結果で判明した性能であり、仕様とおりの性能なのか?

(推測2) CAP3602EをSniffer modeで動作させたときには、MRCダイバーシチ受信が正常に機能しない仕様なのか?

本論文の筆者としては、CAP3602Eには信頼性を向上できる潜在能力があるものと考えており、改善の可能性を期待している。

なお、他社製品の状況は不明であり、機会があればその状況を確認したい。

## 4. 干渉波が存在するときのMRCダイバーシチ受信 (CAP3602Eに実装) 性能の実験的検討

### 4.1. 実験目的

MRCダイバーシチ受信はその動作原理から言われているように、干渉波が存在するときは必ずしも最適な受信をしているわけではない[9],[10]。そこで、干渉波が存在するときに、市販されている無線LAN製品のAPを利用して、MRCダイバーシチ受信の性能がどのような状況になるかを確認する。具体的には、シスコシステムズ社製の無線LANのAP製品のCAP3602Eに実装されたMRCダイバーシチ受信で、干渉波が多く存在する2.4GHz帯を用いて、受信アンテナ数が4本と2本の性能を同時に測定して比較する。

### 4.2. 実験方法

#### 4.2.1. 実験システムの構成

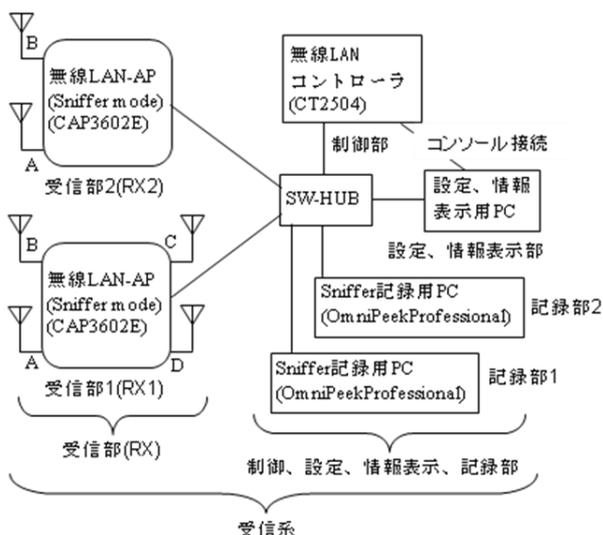


図11. 図1から変更した実験システムの構成の受信系

表3. 表1から変更した実験での測定諸元

送受信部(TX, RX) 共通	送受信中心周波数	2,412MHz
	チャンネル番号	1
	IEEE標準	IEEE802.11g
送信部(TX) (Cisco AP1242AG)	アンテナ	Cisco ANT4941 ダイポール
	アンテナ利得	2.2dBi
	アンテナ垂直面内半値角	70度
受信部(RX) 共通	アンテナ利得	2dBi
	アンテナ垂直面内半値角	63度
	RX1とRX2の水平の設置間隔 (アンテナコネクタRX1-BとRX2-Aの中心の間隔)	約1.89波長
	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1.33波長
受信部1(RX1)	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0.88波長
	アンテナ数	4
受信部2(RX2)	アンテナ数	2

チャンネルの干渉波の状況を把握した。

図12は、RRM (Radio Resource Management) 機能[13]で測定した2.4GHz帯の各チャンネルの無線LAN(正しい使い方をしているIEEE802.11シリーズ)の電波の受信電力と利用率の状況である。2.4GHz帯のすべてのチャンネルに無線LANの電波が到来して利用されていることがわかる。これらの電波は本実験のビーコンの電波のMRCダイバーシチ受信に対しては干渉波となる。

図13は、モニタ mode のCisco CleanAir Technology 機能で測定した2.4GHz帯の各チャンネルの無線LAN(正しい使い方をしているIEEE802.11シリーズ)以外の干渉源からの受信電力の状況である。

図1の実験システムの構成において、受信系を図11に示すように変更した。受信部(RX)と記録部に各々一台の装置を追加した。受信部1(RX1)はCAP3602Eに4本のアンテナを使い、受信部2(RX2)はCAP3602Eに2本のアンテナを使って、各々MRCダイバーシチ受信をする。記録部1は受信部1(RX1)の測定データを、記録部2は受信部2(RX2)の測定データを、各々記録する。また実験での測定諸元は表1において、変更のある部分を表3に示す。後述するが、ほぼ常に干渉波が存在する2.4GHz帯無線LANのチャンネル番号1(中心周波数

2,412MHz)の電波のビーコン(20msec間隔)で実験を実施した。受信部1(RX1)と受信部2(RX2)を水平方向(図2のy方向)に約1.89波長(約23.5cm)の間隔で設置して同時に移動させて、同じ干渉波の状況になるように配慮して測定、及び記録をした。

#### 4.2.2. 実験場所の環境と2.4GHz帯の干渉波の状況

実験場所の環境は、項目2.2.3に記載のとおりである。また、2.4GHz帯の干渉波の状況は、次のように把握した。

本実験の開始直前と終了直後に図11の受信部1(RX1)のCAP3602Eをモニタ mode のCisco CleanAir Technology 機能[11], [12]に一時的に変更して制御部のCT2504を経由して2.4GHz帯の各

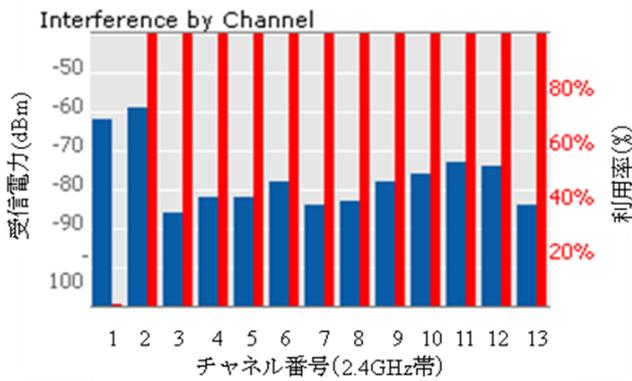


図 12. RRM 機能で測定した 2.4GHz 帯の受信電力 (各チャンネルの左側) と利用率 (同右側)

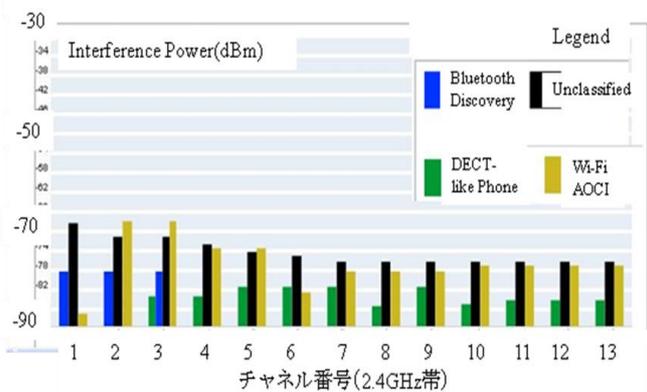


図 13. Cisco CleanAir Technology 機能で測定した 2.4GHz 帯の干渉源の受信電力

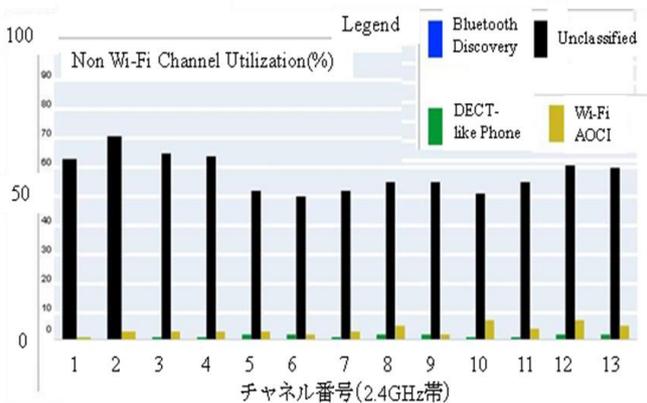


図 14. Cisco CleanAir Technology 機能で測定した 2.4GHz 帯の干渉源の利用率

また図 14 は、同機能で測定した同干渉源の利用率の状況である。2.4GHz 帯のすべてのチャンネルに無線 LAN 以外の様々な用途の電波が到来して利用されており、これらの電波は本実験のビーコンの電波の MRC ダイバーシチ受信に対しては干渉波となる。

上述の図 12、13、及び 14 は本実験の終了直後の記録データであるが、開始直前でも、また、別の日時でも、本実験場所の 2.4GHz 帯の干渉波の状況は、常時、同様な状況である。

#### 4.2.3. 実験の手順

同じ台車の上に受信部 1(RX1)と受信部 2(RX2)を設置して同時に稼働させて、項目 2.2.4.に記載のとおり実験を実施した。約 15 分間以内に、6 回の測定を実施した。なお、前半 3 回と後半 3 回で、受信部 1(RX1)と受信部 2(RX2)の位置を入れ替えている。

#### 4.2.4. 測定データの処理手順

項目 2.2.5.に記載のとおりである。なお、測定されたパケット間隔はゆらいでいて、10 秒間の測定データとしては 478 パケットとなった。受信部(RX)は 2.28m の距離を 10 秒間かけてゆくりと移動しているので、 $0.0048m (=2.28m/478)$  毎の位置で一つのパケットが、つまり一つの受信電力や一つの SNR が測定できたことになる。送受信の周波数 2,412MHz の波長は 0.1244m なので、0.0048m は約 1/26 波長に相当する。

#### 4.3. 実験結果

図 15 に、受信アンテナ数 4 本の受信部 1(RX1)と受信アンテナ数 2 本の受信部 2(RX2)における各 MRC ダイバーシチ受信で、同時に測定した SNR の累積確率分布を示した。SNR が約 35dB 以下では、受信アンテナ数 2 本よりも 4 本のほうが SNR の劣化が大きい状況となった。累積確率 1% の SNR に着目すると受信アンテナ数 2 本に比べて 4 本の SNR は約 10dB 小さくなっている。また、累積確率が 10%以上では、受信アンテナ数 2 本に比べ

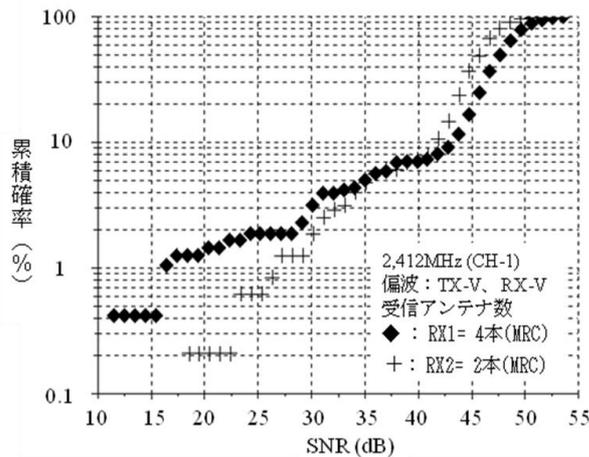


図15. 2.4GHz帯におけるMRCダイバーシチ受信での受信アンテナ数の違いによるSNRの累積確率分布(測定時の偏波:TX-V,RX-V)

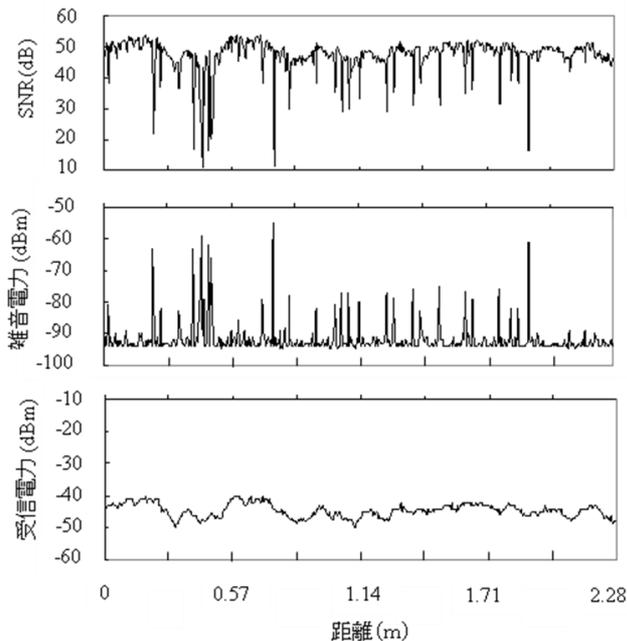


図16. 2.4GHz帯の受信アンテナ数4本の受信部1(RX1)のSNR、雑音電力、及び、受信電力対距離

以内に、6回の測定を実施した。各測定でのMRCダイバーシチ受信の累積確率1%のSNRに着目したときに、受信アンテナ数4本のSNRと同2本のSNRの各状況は、表4のとおりである。MRCダイバーシチ受信しているが、アンテナ数2本のSNRが、同4本のSNRより約10dB以上大きい状況が約3割発生している。

本実験結果から、MRCダイバーシチ受信はその動作原理から言われているように、干渉波が存在するときは必ずしも最適な受信をしているわけではないということを確認できた。

この状況は、動作原理の限界から他社製品でも同様であると思われる。

て4本のSNRは約2dB大きい程度にとどまっている。

図16に、図15に示した受信アンテナ数4本の受信部1(RX1)のSNRの時系列データを、雑音電力と受信電力とともに、横軸を距離に換算して示した。SNRの大きな劣化(低下)は受信電力の劣化(低下)ではなく、雑音電力の劣化(増加)によって発生していることがわかる。なお、5GHz帯での測定結果として図17には、図6でMRCダイバーシチ受信(CAP3602E)のアンテナ数が4本の場合として示したSNRのデータを雑音電力と受信電力とともに同様に示した。図17の縦軸の目盛は図16と同じにしてある。図17によると、5GHz帯の雑音電力は、-93dBm程度でほぼ一定の状態である。

#### 4.4. 考察

##### 4.4.1. 干渉波が存在するときのMRCダイバーシチ受信性能

項目4.2.2.で述べた実験場所の2.4GHz帯の干渉波の状況と、干渉波がないことが判明している5GHz帯での図17の5GHz帯の雑音電力の状況から、図16に示された2.4GHz帯の雑音電力の劣化(増加)の原因は、2.4GHz帯の干渉波であると考えられる。

本実験では、2.4GHz帯で、約15分間

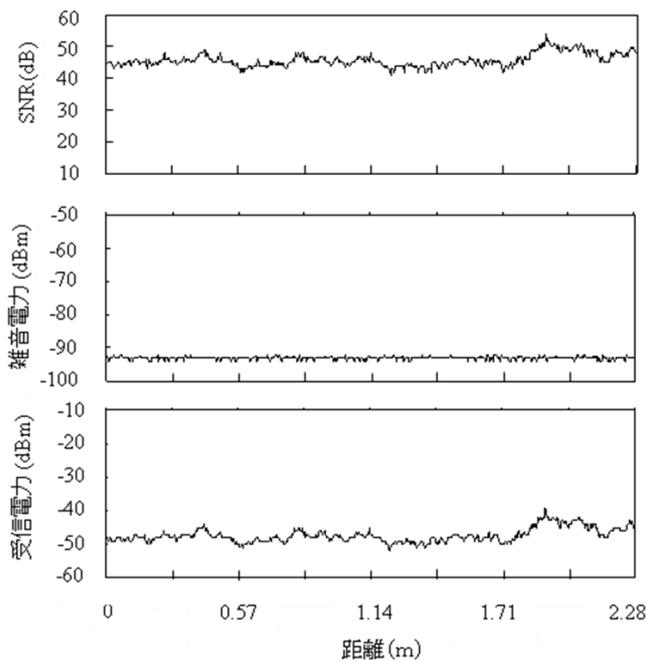


図17. 5GHz帯の受信アンテナ数4本の受信部(RX)のSNR、雑音電力、及び、受信電力 対 距離

表4. 2.4GHz帯でのMRCダイバーシチ受信で測定されたSNRの状況

累積確率1%のSNRの状況 (受信アンテナ数4本と2本のSNRの比較)	発生回数	発生割合	備考
4本のSNR > 2本のSNR	1	17%	約3dB、受信アンテナ数4本のSNRが大
4本のSNR ≒ 2本のSNR	3	50%	
4本のSNR < 2本のSNR	2	33%	約10dB以上、受信アンテナ数2本のSNRが大
合計	6	100%	

ダイバーシチ受信性能の改善のために活用することも有益であると考えられる。

## 5. むすび

本論文では、より信頼性の向上した無線LANの実現を目指して、シスコシステムズ社製のAPのCAP3602EのMRCダイバーシチ受信性能を一般的な事務所のフロア環境において実験的に検討した。その結果、MRCダイバーシチ受信(CAP3602Eに実装、受信アンテナ数4本)は選択ダイバーシチ受信(LAP1242AGに実装、受信アンテナ数2本)よりも、SNRの劣化が小さく、かつ、より安定したSNRを得られることを確認できた。

また、受信アンテナ数の増加に伴いMRCダイバーシチ受信(CAP3602Eに実装)によりSNRは増加していく傾向は認められるが、受信アンテナ数が2本から4本へ増加したときのSNRの増加が小さ

### 4.4.2. 干渉波が存在するときの

#### CAP3602EのMRCダイバーシチ受信性能を改善する提案

図15と図16を見ると、例えば、SNRの低下が大きい場合に、雑音電力が極めて大きい状況のときは、受信アンテナ数4本から同2本の動作に切り替えるならば、SNRの低下を抑圧して信頼性の向上が可能になるとも理解できる。

別途、さらに詳細な検討が必要になると考えられるが、定性的には、SNRの低下が大きい場合に、雑音電力が極めて大きい状況のときは干渉波が存在するときであると判断して、MRCダイバーシチ受信で合成するアンテナ数を、単純に減少させることでMRCダイバーシチ受信性能を改善するという対処案を提案する。特にシスコシステムズ社のAPは、項目4.2.2.で述べたように、RRM機能やCisco CleanAir Technology機能を実装している、干渉波の状況を実時間で詳細に測定しているため、これらの情報も、干渉波が存在するときのMRCダ

く、飽和状態のようにも思えた。CAP3602Eにはより信頼性を向上できる潜在能力があるものと考えており、改善の可能性を期待している。

さらに、干渉波が存在するときのMRCダイバーシチ受信(CAP3602Eに実装)は、その動作原理から言われているように必ずしも最適な受信をしているわけではないということを実験結果からも確認できた。受信アンテナ数2本のSNRが、同4本のSNRより約10dB以上大きい状況が約3割発生していた。定性的には、SNRの低下が大きい場合に、雑音電力が極めて大きい状況のときは干渉波が存在するときであると判断して、MRCダイバーシチ受信で合成するアンテナ数を単純に減少させることで、MRCダイバーシチ受信性能を改善するという対処案を提案した。

無線LAN製品に実装されたMRCダイバーシチ受信性能のさらなる改善が、無線LANの信頼性の向上に大いに貢献することを、筆者は確信する。

## 6. 謝辞

仲上-ライスフェージング環境におけるMRCダイバーシチ受信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太野奈津子様、久保井俊行様、鈴木麻倫子様に感謝する。最後に、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、岩本ビジネス推進グループ参事、飯田第1製品技術部長、大高ワイヤレス・モバイルチームリーダーに感謝する。

## 7. 参考文献

- [1]無線LANビジネス研究会、"無線LANビジネス研究会報告書 参考資料"、総務省、[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000168907.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000168907.pdf)、2012年7月20日。
- [2]唐沢好男、"デジタル移動通信の電波伝搬基礎"、コロナ社、2003年3月17日、ISBN 4-339-00752-8。
- [3]Fred Niehaus、"Understanding RF Fundamentals and the Radio Design of Wireless Networks: Slides from Expert Training Program"、Cisco systems、<https://supportforums.cisco.com/docs/DOC-22956>、Feb. 24, 2012。
- [4]Cisco systems、"Cisco Aironet 3600 Series Access Point Data Sheet"、Cisco systems、[http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps11983/data\\_sheet\\_c78-686782.html](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps11983/data_sheet_c78-686782.html)、参照 Mar. 31, 2013。
- [5]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。
- [6]小川晃一、"携帯端末のアンテナ・テクノロジー解明 第5章スマートアンテナの基礎"、RFワールド、No.16、pp.47-56、CQ出版社、2011年11月1日。
- [7]鶴田誠、唐沢好男、"仲上-ライスフェージング環境におけるMIMOチャネル行列の第1固有値の簡易計算法"、電子情報通信学会論文誌B、Vol.J87-B、no.9、pp.1486-1495、2004年9月。
- [8]守倉正博、久保田周治、"改訂3版 802.11 高速無線LAN教科書 第9章 802.11a/gのOFDM変復調技術"、インプレスR&D、2008年4月11日、ISBN978-4-8443-2546-8。

- [9]畑中芳隆、唐沢好男、"突発的に発生する強い干渉波に耐性を有するソフトウェアアンテナアレーアンテナ相関行列第2固有値のパワーインバージョン特性を利用した一"、電子情報通信学会論文誌 B、Vol.J85-B、no.7、pp.1086-1094、2002年7月。
- [10]鈴木博、"最小2乗合成ダイバーシチ受信における信号伝送特性一希望波合成と干渉波キャンセルとの関係一"、電子情報通信学会論文誌 B-II、Vol.J75-B-II、no.8、pp.524-534、1992年8月。
- [11]Cisco systems、"Cisco CleanAir - Cisco Unified Wireless Network Design Guide"、Cisco systems、[http://www.cisco.com/en/US/products/ps10315/products\\_tech\\_note09186a0080b4bdc1.shtml](http://www.cisco.com/en/US/products/ps10315/products_tech_note09186a0080b4bdc1.shtml)、Sept. 28, 2010.
- [12]松戸孝、宇都宮光之、田中政満、中野清隆、丸田竜一、"Cisco CleanAir Technology (無線LAN周波数帯向けのコグニティブ無線技術)をTVホワイトスペース等で試行させた受信実験一IEEE802.11af草案も考慮しながら一"、第565回URSI-F(日本学術会議 電気電子工学委員会 URSI分科会 非電離媒質伝搬・リモートセンシング小委員会)会合資料、[http://www2.nict.go.jp/pub/ursi-f/doc/URSI\\_F\\_2012June15\\_matsudo.pdf](http://www2.nict.go.jp/pub/ursi-f/doc/URSI_F_2012June15_matsudo.pdf)、2012年6月15日。
- [13]Cisco systems、"Radio Resource Management under Unified Wireless Networks"、Cisco systems、[http://www.cisco.com/en/US/tech/tk722/tk809/technologies\\_tech\\_note09186a008072c759.shtml](http://www.cisco.com/en/US/tech/tk722/tk809/technologies_tech_note09186a008072c759.shtml)、May 17, 2010.