

平成17年度
研究開発成果報告書

新世代移動機用適応アンテナシステム
に関する研究開発

委託先： 富士通(株)

平成18年4月

情報通信研究機構

平成17年度 研究開発成果報告書
(一般型)

「新世代移動機用適応アンテナシステムに関する研究開発」

目次

1	研究開発課題の背景	3
2	研究開発の全体計画	4
2-1	研究開発課題の概要	4
2-2	研究開発目標	5
2-2-1	最終目標	5
2-2-2	中間目標	6
2-3	研究開発の年度別計画	7
3	研究開発体制	8
3-1	研究開発実施体制	8
4	研究開発実施状況	10
4-1	副課題ア) RF-MEMS デバイスの研究開発	10
4-1a	RF-MEMS 可変キャパシタの研究開発	10
4-1a-1	テーマの位置づけ	10
4-1a-2	実施状況	10
4-1a-3	まとめと今後の課題	12
4-1b	RF-MEMS スイッチの研究開発	13
4-1b-1	テーマの位置づけ	13
4-1b-2	実施状況	13
4-1b-3	まとめと今後の課題	17
4-1c	RF-MEMS 移相器の研究開発	18
4-1c-1	テーマの位置づけ	18
4-1c-2	実施状況	18
4-1c-3	まとめと今後の課題	19
4-2	副課題イ) 適応アンテナの研究開発	20
4-2a	RF-MEMS 可変キャパシタを用いたアンテナ自動整合回路	20
4-2a-1	テーマの位置づけ	20
4-2a-2	実施状況	20
4-2a-3	まとめと今後の課題	23
4-2b	RF-MEMS 可変キャパシタを用いた適応アンテナ	24
4-2b-1	テーマの位置づけ	24
4-2b-2	実施状況	24
4-2b-3	まとめと今後の課題	26

4-2c	RF-MEMS 可変移相器を用いた適応アンテナ	27
4-2c-1	テーマの位置づけ	27
4-2c-2	実施状況	27
4-2c-3	まとめと今後の課題	33
4-2d	電波伝搬測定	34
4-2d-1	テーマの位置づけ	34
4-2d-2	実施状況	35
4-2d-3	まとめと今後の課題	40
4-3	副課題ウ) 適応制御方式・アルゴリズムの研究開発	41
4-3-1	テーマの位置づけ	41
4-3-2	実施状況	41
4-3-3	まとめと今後の課題	45
4-4	副課題エ) 実証実験	46
4-4-1	テーマの位置づけ	46
4-4-2a	狭帯域伝送システムによる実証実験の実施内容	46
4-4-2b	広狭帯域伝送システムによる実証実験の実施内容	46
4-4-3	まとめと今後の課題	46
4-5	総括	47
5	参考資料・参考文献	49
5-1	研究発表・講演等一覧	49

1 研究開発課題の背景

近年の移動体通信機器の技術動向としては、市場が飽和傾向に近づくにつれて携帯電話の先のニーズに応えるべく、無線 LAN 機器、ユビキタス機器などへの広がりを見せています。国内においても、サービスを開始から5年が経過しようとする高速データ通信第3世代携帯電話の加入者数は、今や PDC 方式の加入者数を越えようとする勢いです。また ADSL 加入者の急速な伸びによって、家庭内無線 LAN 製品の需要もここ数年で非常な伸びを見せています。無線 LAN 製品の広がりや家庭内にとどまらず、高速固定回線から家庭までの「ラスト1マイル」を接続するものとして、IEEE802.16-2004 が固定無線アクセス向けにまず標準化され、最近移動体向けに IEEE802.16e-2005 が標準化されました。さらに 802.20 などの標準化が策定中であり、これらの規格に準拠したブロードバンド機器市場の拡大が予想されます。以下、本研究開発における成果である RF-MEMS デバイス、アンテナ自動整合回路および RF 処理型適応アンテナのそれぞれについて、それらの技術分野の現状を含めて説明します。

RF-MEMS デバイスの低消費電力動作、低挿入損失、高アイソレーション、および高い線形性などの特徴は、移動体通信機器に必要とされる低消費電力や、送信信号のスペクトル有効活用という点から見て理想的であると考えられます。例えば高い周波数利用効率が求められる第4世代携帯電話および、WiMax として標準化されている IEEE802.16e-2005 などのブロードバンド無線移動通信の規格に準拠した機器への RF-MEMS デバイスの需要が見込まれます。次世代移動体通信までを視野に入れると、デジタル処理の複雑化による消費電力の増加を抑えることが重要な課題になるため、デジタル処理部の少ない RF 処理型適応アンテナが有利になります。ここで RF-MEMS デバイスの特長である低消費電力、低挿入損失などの特性が、RF 回路の性能に大きく依存する RF 処理型適応アンテナを用いた大容量移動体通信に対してプラスに働くと考えられます。さらに OFDM の採用によって、送信系に対して高い線形性が要求されると考えられますが、RF-MEMS デバイスの大きな特徴である高い線形性がここでもメリットになります。一例として、インピーダンス整合装置を移動体機器の送信系のパワーアンプ出力に用いると電力効率が改善することが期待されますが、整合回路に含まれる可変高周波素子を従来の半導体素子(たとえばバラクタ)から RF-MEMS 可変キャパシタに置き換えることにより、高い線形性をもつ送信回路を実現できます。

また別の MEMS の応用例として、アンテナの自動整合装置が挙げられます。携帯電話使用時における近接物体(人体など)の影響によって、アンテナインピーダンスと内部回路との間の不整合状態が生じ、送受信時に効率の良い電力伝送ができなくなります。このアンテナ性能劣化を補償する目的で、アンテナ自動整合装置を FOMA などの第3世代、または 3.9G と呼ばれるスーパー3G および第4世代携帯電話機へ搭載することを考えます。本製品は簡単な回路構成とアルゴリズムを用いていることから回路規模が小さく、既存の携帯電話製品と親和性が良いので、1チップ化次第、各社製品への普及が期待できます。

本研究開発における RF 処理型アダプティブアレーアンテナは、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 信号処理の採用により、都市部のマルチパス環境下において、利得向上およびアナログ信号処理による携帯機バッテリーの消費電力低減、またダイバーシチ、干渉抑圧による通信品質向上などのメリットを有します。この RF 処理型適応アレーアンテナを、WiMax の移動体に対応した規格である IEEE802.16e-2005 に準拠した無線モジュールとして、ラップトップ PC 等の比較的大型の情報端末に搭載することを考えます。802.16 は MAN (Metropolitan Area Network) の無線インターフェイス仕様を定義したもので、IEEE WirelessMAN 規格という正式

な通称が与えられており、既存のセルラー方式の携帯電話に比較して、簡易な構成で低コストなモバイル通信サービスを提供できる技術として今後さらに幅広い市場を創出するものとして注目されています。また、その高速データ伝送のポテンシャルから、第3.5世代や第4世代携帯電話システムと競合あるいは補完する技術として、新規参入事業者のみならず、既存のセルラー事業者からも注目されている方式です。

現在のところ ADSL などの有線ブロードバンドサービスは、サービスの範囲外であったり、インフラが追いつかないなどの理由で、恩恵を受けられないユーザがまだ多数存在します。また 802.11b/g などのワイヤレス LAN は、住居やビル内および近距離の通信に限定されます。一方 802.16 の拡張仕様である 802.16-2004 および 802.16e-2005 によれば、MAN サービスでは基地局 1 つあたり半径数 km にわたる範囲での移動体におけるサービスが可能になるため、基地局の周辺に居住する広い範囲のユーザは、無線端末のみの購入で現在の ADSL や 802.11b/g に相当するブロードバンドによるサービスを享受できると考えられます。

また最近の無線通信技術の広がりにより、セルラー携帯電話や無線 LAN などの本研究開発が目標としてきた移動体通信技術と、人間の居住空間にさらに密接にかかわったパーソナルな BAN(Body Area Network)や PAN(Personal Area Network)、さらにセンサネットワークなどとの融合を図る技術分野が現れてきています。これらの技術は人間の活動を阻害せず、普段はその存在を意識させないことが重要です。またいろいろな通信規格の混在によって、お互いの通信の妨害となることは避けなくてはなりません。ここで低挿入損失の RF-MEMS の使用によりセンサ用バッテリー交換の煩わしさを低減したり、高い線形性を持った MEMS デバイスの使用によって、限りある周波数の利用効率の向上を図ることが可能になるなど、この融合分野においても MEMS デバイスの利用が大いに期待されます。

2 研究開発体の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

本研究開発においては、RF-MEMS デバイスを応用した携帯端末用適応アンテナシステムの実用化に関する研究開発を行う。携帯端末固有の省スペース、3次元可動性、高速移動性、周囲の物理的／電波伝搬的に激しい環境変化に高速に適応し得る適応アンテナシステムとして、

- ・ 端末用のチューナブル整合回路を含めた新しい適応アンテナシステムを提案するとともに、その実用化に供する

- ・ RF-MEMS デバイス

- ・ 当該適応アンテナシステムの方式・制御アルゴリズム

の開発を行う。最終的には、本研究開発から携帯端末用適応アンテナシステムの事業化・商品化へつながる基盤的な革新技术が創出され、高精細な動画像を含むマルチメディアの大容量伝送が、便利に、安価で、格差無く国民各層にサービスされ得る新世代無線通信システムの実現に繋がることが期待される。

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標（平成19年3月末）

副課題ア) RF-MEMS デバイスの研究開発

1. 可変キャパシタ
 - 1) 容量： 2~5 pF (容量変化率250%)
 - 2) 使用周波数： ~5 GHz 帯
 - 3) 駆動電圧： 0.5~3.6 V
 - 4) Q： >1000
 - 5) 小型、軽量
2. 可変インダクタ
 - 1) インダクタンス値： 2~8 nH
 - 2) 使用周波数： ~5 GHz 帯
 - 3) 駆動電圧： 0.5~3.6 V
 - 4) Q： >1000
 - 5) 小型、軽量
3. 移相器
 - 1) 可変位相範囲： 0~ π (連続可変)
(本移相器を二つ用いて0~ 2π 連続可変の移相器を構成できます)
 - 2) 使用周波数： ~5 GHz 帯
 - 3) Q： >1000
 - 4) 構成は上記可変インダクタと可変キャパシタを π 型回路としたもの

副課題イ) アンテナ・RF回路の開発（現在「適応アンテナの研究開発」に名称変更）

5GHz前後のRF周波数、100MHz程度の帯域において、実装ターゲット表面あるいは内部に、

- ・数素子~十数素子のアンテナを、アレー状にあるいはダイバーシチ配置する。
- ・アンテナ素子形状として、プリント型のパッチアンテナ、ダイポールアンテナ、内部埋め込み用逆Fアンテナ、ポール型のモノポールアンテナアレーで評価を行う。
- ・適応整合回路のパッケージを試作し、人体、カバン、デスクなど周囲環境との接触かつ適応アンテナ動作時に常に50 Ω 整合が可能なことを確認する。MEMS可変容量キャパシタによる π 型整合回路を用いる。

副課題ウ) 適応制御方式・アルゴリズムの研究開発

アンテナ素子形状、複数アンテナ配置方法とその接続形態に特化した適応アンテナシステム制御方式を開発する。副課題エにより、様々な伝搬環境の中での有効な動作が確認できていること。

副課題エ) 実証実験

上記試作を組み合わせてテストベッドを構築しフィールド高速走行実験を行い、様々な伝搬環境の中で提案制御方式を評価終了していること。

2-2-2 中間目標 (平成17年1月末)

副課題ア) RF-MEMS デバイスの開発

1. 可変キャパシタ
 - 1) 容量: 2~5 pF (容量変化率 250%)
 - 2) 使用周波数: ~5 GHz 帯
 - 3) 駆動電圧: 0.5~3.6 V
 - 4) Q: >500
 - 5) 小型、軽量
2. 可変インダクタ
 - 1) インダクタンス値: 2~8 nH
 - 2) 使用周波数: ~5 GHz 帯
 - 3) 駆動電圧: 0.5~3.6 V
 - 4) Q: >500
 - 5) 小型、軽量
3. 移相器
 - 1) 可変位相範囲: $0 \sim \pi$ (連続可変)
(本移相器を二つ用いて $0 \sim 2\pi$ 連続可変の移相器を構成できます)
 - 2) 使用周波数: ~5 GHz 帯
 - 3) Q: >500
 - 4) 構成は上記可変インダクタと可変キャパシタを π 型回路としたもの

副課題イ) アンテナ・RF回路の開発 (現在「適応アンテナの研究開発」に名称変更) 5GHz 前後の RF 周波数、100MHz 程度の帯域において、実装ターゲット表面あるいは内部に、

- ・数素子~十数素子のアンテナを、アレー状にあるいはダイバーシチ配置する。
- ・アンテナ素子形状として、プリント型のパッチアンテナ、ダイポールアンテナ、内部埋め込み用逆Fアンテナ、ポール型のモノポールアンテナアレーで評価を行う。
- ・適応整合回路のパッケージを試作し、人体、カバン、デスクなど周囲環境との接触かつ適応アンテナ動作時に常に 50Ω 整合が可能なことを確認する。

MEMS可変容量キャパシタによる π 型整合回路を用いる。

ここまでは、最終目標と同じだが、本中間目標では、動作原理確認のため比較的大きなテスト基板上で試作評価することとし、小型化は検討しない。

副課題ウ) 適応制御方式・アルゴリズムの研究開発

計算機シミュレーションにより、OFDM ベースの下り回線において、 $5 \mu s$ 以下程度のマルチパス遅延分散、および正規化ドップラーシフト $fdTs=0.05$ 以下の条件において、誤り訂正後のビット誤り率のエラーフロアが 1×10^{-5} 以下程度となる適応アンテナシステム方式・アルゴリズムを開発する。

副課題エ) 実証実験

装置試作を完了し、フェーディング模擬装置、電波暗室においてシミュレーションで予想される所望の評価結果が示されていること。フィールド実験は行わない。

2-3 研究開発の年度別計画

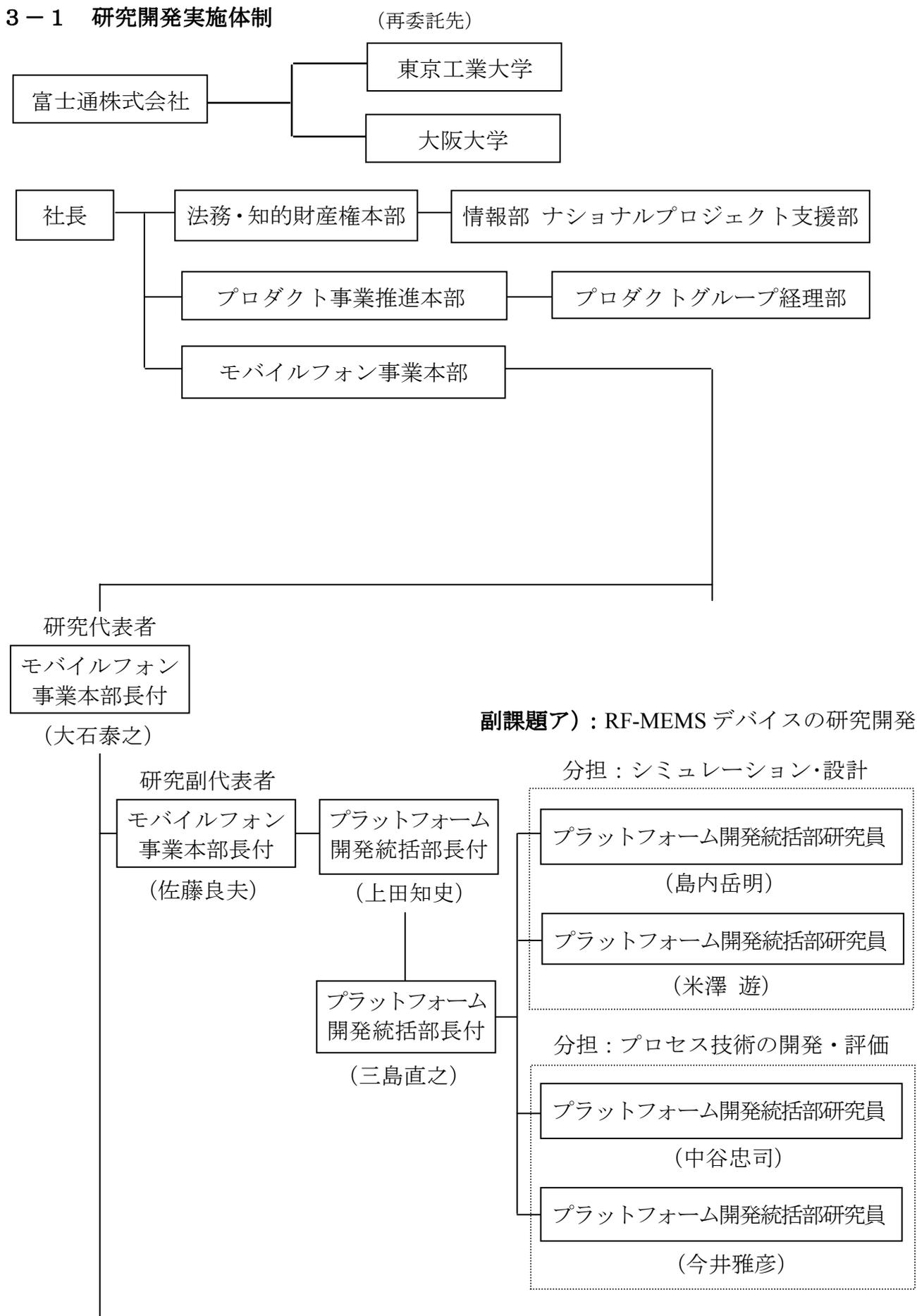
(金額は非公表)

研究開発項目	H14 年度	H15 年度	H16 年度	H17 年度	H18 年度	計	備 考
副課題ア) RF-MEMS デバイスの研究開発							再委託: 東京工業大学 (H15 年度～H18 年度) 再委託: 大阪大学 (H14 年度～H18 年度)
副課題イ) 適応アンテナの研究開発							
副課題ウ) 適応制御方式・アルゴリズム の研究開発							
副課題エ) 実証実験							
間接経費							
合 計							

- 注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。
 2 備考欄に再委託先機関名を記載
 3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



副課題イ：適応アンテナの研究開発

プラットフォーム開発統括部研究員

(井田一郎)

プラットフォーム開発統括部研究員

(横尾郁)

プラットフォーム開発統括部研究員

(本田敦)

プラットフォーム開発統括部研究員

(ソルワー・ホセイン)

東京工業大学

(大学院理工学研究科助教授 高田潤一研究室)

副課題ウ：適応制御方式・アルゴリズムの研究開発

プラットフォーム開発統括部研究員

(本田敦)

大阪大学

(大学院工学研究科教授 北山 研一研究室)

副課題エ：実証実験

プラットフォーム開発統括部研究員

(井田一郎)

4 研究開発実施状況

4-1 RF-MEMS デバイスの研究開発

4-1 a RF-MEMS 可変キャパシタの研究開発

4-1 a-1 テーマの位置付け

本テーマは、インピーダンス整合回路および適応アンテナに搭載する可変キャパシタに関するものです。

4-1 a-2 実施状況

本年度は、システムサイドの要望により、目標の容量値範囲を、従来の 2→5pF から、1→2pF への低容量化と、また、システム化や製品化のために必須となりますパッケージ化についての検討を始めました。

－ 低容量化 －

昨年度 (ver. 11.2) および本年度 (ver. 13.0) 開発の可変キャパシタの外観を図 4-1a-1 および図 4-1a-2 に、また、スペックを表 4-1a-1 に示します。



図 4-1a-1 可変キャパシタ (ver.11.1)

図 4-1a-2 可変キャパシタ (ver.13.0)

表 4-1a-1 可変キャパシタの比較

	<i>ver. 11.2</i>	<i>ver. 13.0</i>
目標容量[pF]	2.0-5.0	1.0-2.0
設計容量[pF]	1.3-6.0	0.4-1.8
チップサイズ [mm ³]	1.8 x 1.5 x 0.35	←
チップ内 V. C. 数	1	4
Q 値 (2pF, 2.45GHz)	30-50	100-200

目標容量の変更にともない、サイズの小型化、キャパシタ構成電極や線路長などのディメンジョンの見直しを行った結果、Q 値 (2pF, 2.45GHz) を、従来の 30-40 から 100-200 と大幅に向上させることが可能となりました。

次に、図 4-1a-3 および図 4-1a-4 に、バラクタと MEMS 可変キャパシタの反射特性 (300kHz-8GHz)、図 4-1a-5 および図 4-1a-6 に、容量成分および Q 値の周波数依存性を示します。

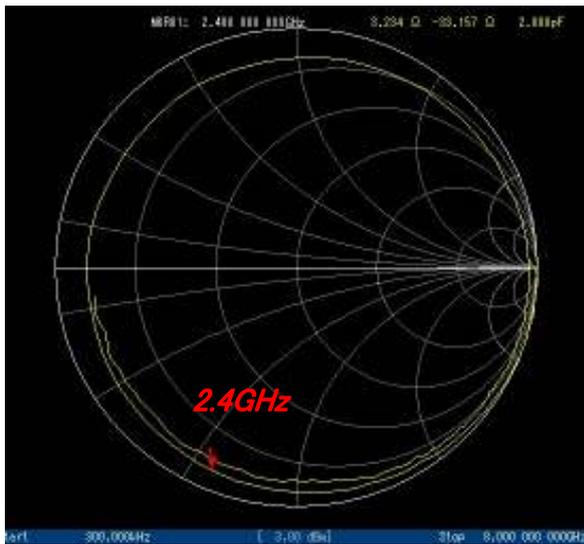


図 4-1a-3 バラクタの反射特性

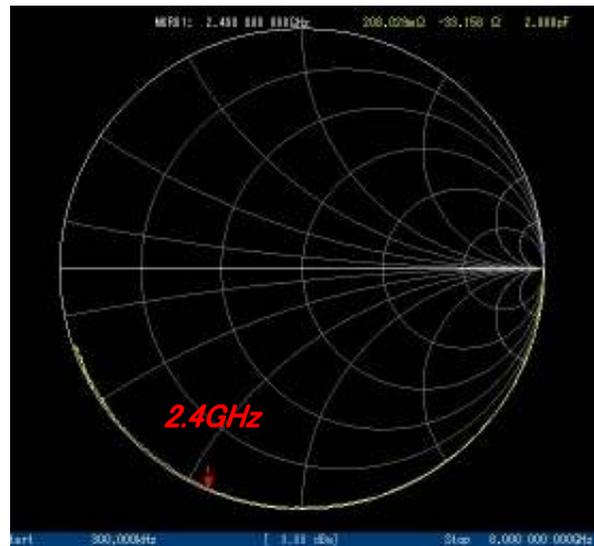


図 4-1a-4 可変キャパシタの反射特性

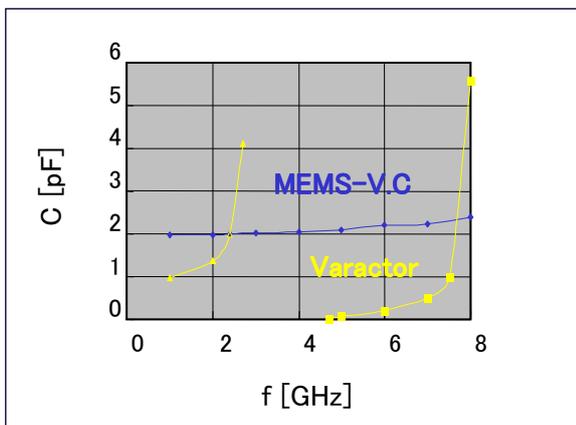


図 4-1a-5 容量成分の周波数依存性

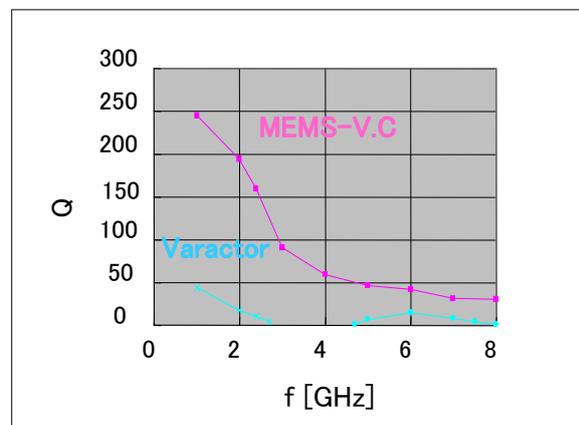


図 4-1a-6 Q 値の周波数依存性

このように、バラクタに対して MEMS 可変キャパシタは、容量成分の周波数依存が少なく、また、全ての周波数において、Q 値が高いことも確認しました。これらの理由は、デバイス中のインダクタンス成分や抵抗成分が少ないためと考えられます。

ー パッケージ化 ー

パッケージに可変キャパシタを搭載したときの外観を、図 4-1a-7 に示します。今回は、セラミックスパッケージへワイヤーボンディング実装により可変キャパシタを搭載しました。このパッケージへの搭載前後の C-V 特性と反射特性は、図 4-1a-8 および図 4-1a-9 に示します。C-V 特性は、低電圧側での容量が増加し、高電圧側での容量は減少し、結果として、容量変化が小さくなってしまいました。そして、反射特性は、抵抗成分が大きくなり Q 値が低下 (138.9→43.5)、また、共振周波数も低下してしまいました。これらの特性変化の理由は、可変キャパシタにパッケージやワイヤーの LCR 成分が、付加したためだと考えられます。このパッケージ化による特性劣化の対策が、今後の大きな課題となります。

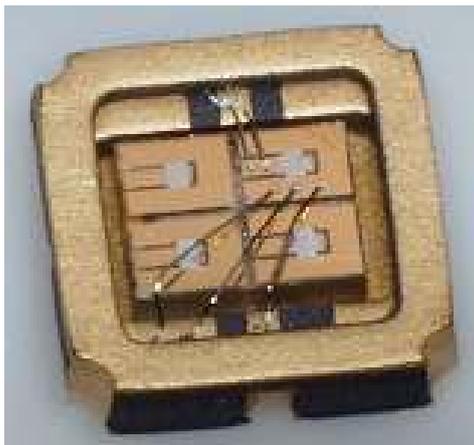


図 4-1a-7 可変キャパシタの実装状態とパッケージの外観

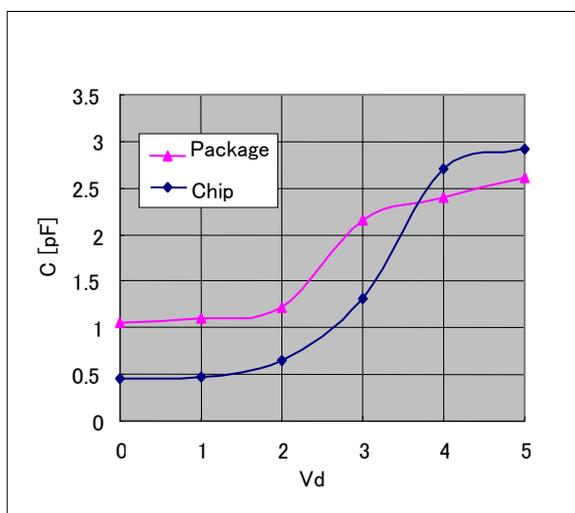


図 4-1a-8 C-V 特性の変化

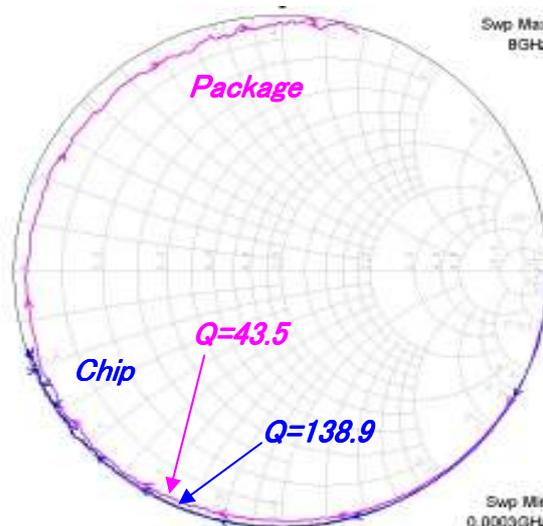


図 4-1a-9 反射特性の変化

4-1a-3 まとめと今後の課題

キャパシタ構成電極や線路等のディメンジョンを見直すことにより、チップ状可変キャパシタのQ値 (2pF、2.45GHz) を、従来の30-40から100-200と大幅に向上することが出来ました。

また、可変キャパシタのパッケージ化を行い、1-2.6pF/5V、Q=43.5 (2pF、2.45GHz) の特性を達成しました。しかしながら、パッケージやワイヤーによるLCR成分が付加され、特性が大きく変化することが分かりました。そこで、平成18年度は、チップ状可変キャパシタ内部のLCR成分、パッケージやワイヤーにより発生するLCR成分を分析し、パッケージによる特性変化を抑制について検討していきます。Q値は、アプリケーションのシミュレーション結果より、60程度あれば実用上問題ないことが分かっていますので、パッケージ状態で、 $Q \geq 60$ を当面の目標として開発を進めます。

4-1b RF-MEMS スイッチの研究開発

4-1b-1 テーマの位置付け

本テーマは、適応アンテナシステムに搭載する移相器中のスイッチング素子に関するものです。

4-1b-2 実施状況

挿入損失およびアイソレーション特性については平成 16 年度まで最終目標値が得られたため、平成 17 年度は駆動電圧の 10V 以下への低減を最優先課題として開発を進めました。また動作速度の評価を行いました。

ー 低電圧化 ー

静電駆動型において、アクチュエータの設計変更と作製条件の調整を行いました。具体的にはアクチュエータ電極サイズを 2 倍に、バネ定数を約 1/3 にするとともに、エアギャップを 3/4 まで狭くしました。図 4-1b-1 は低駆動電圧素子の SEM 写真です。試作の結果、図 4-1b-2 に示すように駆動電圧を従来の 40V から 10V 以下に低減しました。これはチャージポンプ等の昇圧回路と併用すれば移動端末に搭載可能な電圧です。スイッチング特性は図 4-1b-3 に示すように駆動電圧に依存しますが、9V 駆動のときにも 5GHz での挿入損失とアイソレーションはそれぞれ 0.3dB 以下と 30dB 以上を確保しています。駆動電圧の低減により挿入損失が従来の 0.1dB よりやや増加していますが、これは接点の押圧が減少したためと考えられます。これについては接点 ON 状態でのアクチュエータ部のエアギャップがより狭くなるよう犠牲層の膜厚とカンチレバーの反り量を制御して改善を図ります。

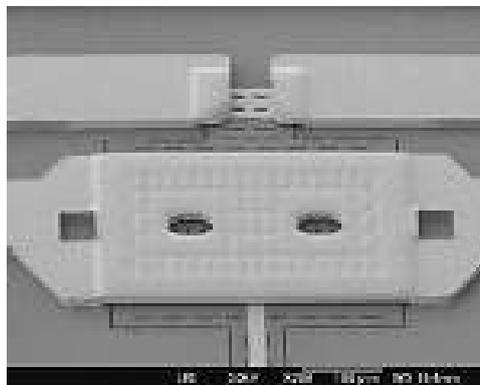


図 4-1b-1 低駆動電圧素子の SEM 写真

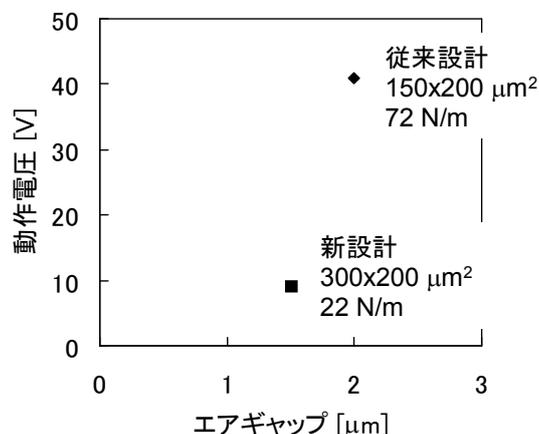


図 4-1b-2 動作電圧の低減結果

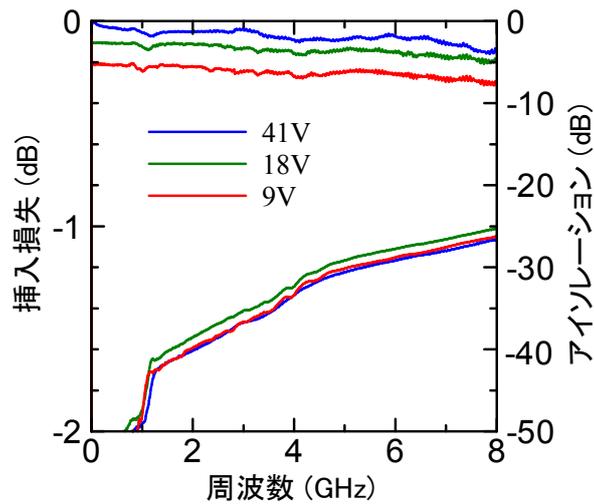


図 4-1b-3 スイッチング特性の駆動電圧依存性

圧電駆動型については、PZT 圧電膜の膜質向上などプロセス改善を進め、20V でのスイッチング動作を確認しました。挿入損失およびアイソレーションは静電駆動型と同等の特性が得られています。図 4-1b-4 は試作素子の写真です。カンチレバーのバネ定数は静電駆動型より 10 倍程度大きいため、これを小さくすることでさらに低電圧駆動が期待できます。バネ定数の弱い設計ではカンチレバーの反り量の制御など製造プロセスを確立するのが今後の課題となります。

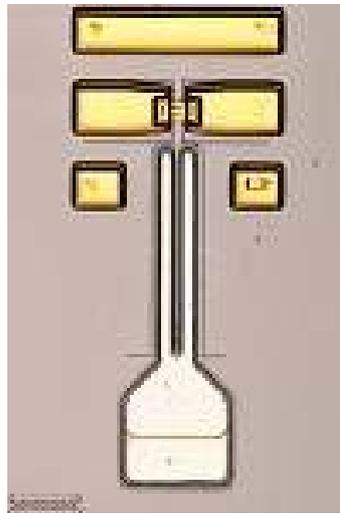


図 4-1b-4 圧電駆動型の試作素子の写真

— 動作速度の評価 —

図 4-1b-5 は静電型素子の動作速度を測定するための評価回路で、図 4-1b-6 は、測定結果例です。図 4-1b-7 に示します様に、OFF 状態から ON 状態への動作速度は、動作電圧に依存しますが、 $80 \mu\text{s}$ 以下の値が得られ、ON 状態から OFF 状態への動作速度は $5 \mu\text{s}$ 以下の値であることを確認しています。

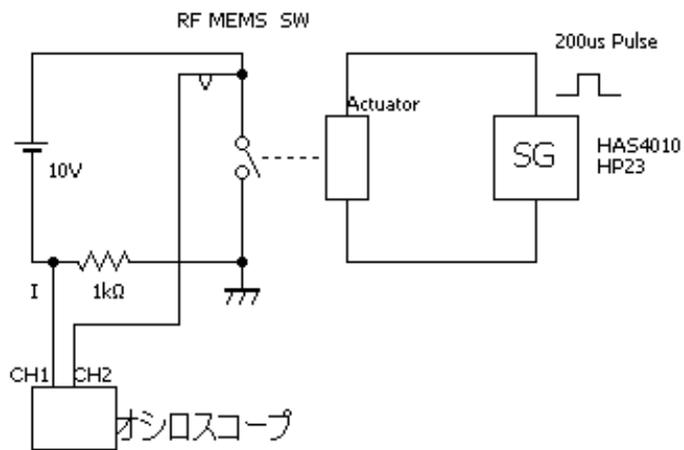


図 4-1b-5 動作速度の評価回路

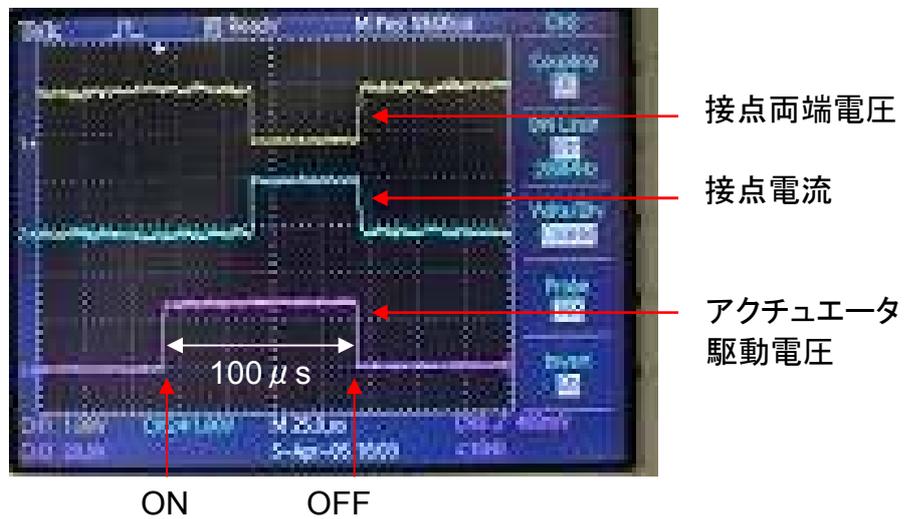


図 4-1b-6 動作速度の評価波形

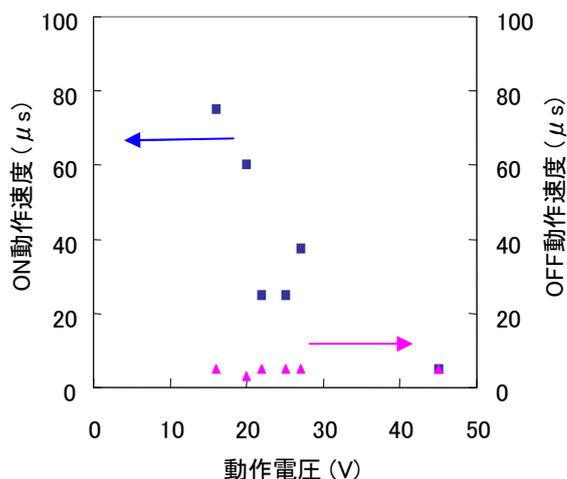


図 4-1b-7 動作速度の測定結果

- 動作歩留りの改善 -

量産のためには素子の動作歩留りの向上が必須です。従来、犠牲層（SOI 基板の中間酸化膜）のエッチング残りや犠牲層エッチング後の最終乾燥工程でのカンチレバーのスティッキング（固定部への張り付き）、およびアクチュエータ部での上下電極の電気的ショート不良などの原因により、アクチュエータの動作歩留りは 10%程度に過ぎませんでした。そこで以下のような作製プロセスの改善を行いました。まず、図 4-1b-8 のように中間酸化膜を除去してからメッキ電極を形成するプロセスの導入により犠牲層のエッチング残りを低減しました。また、カンチレバーを加工する際にサポートビームで固定部と接続しておき、最後にドライエッチングでビームを切断することでスティッキング不良を回避しました。そして、メッキ電極形成前にシード層をパターニングすることでショート不良を低減しています。以上のプロセス変更によりアクチュエータの動作歩留りは 80%程度まで改善することが出来ました。

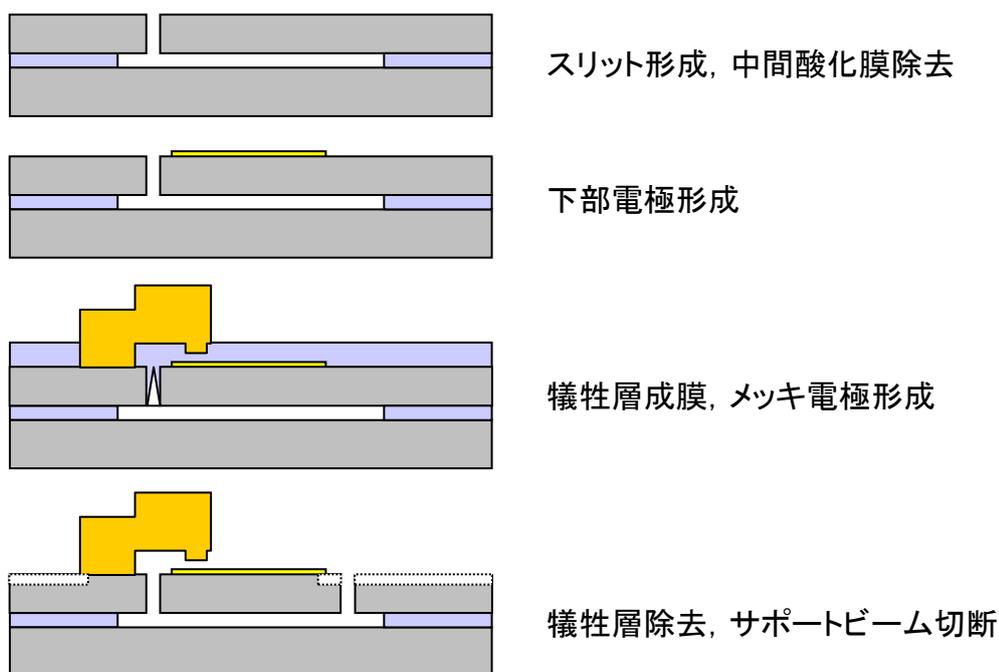


図 4-1b-8 歩留り改善プロセス

4-1b-3 まとめと今後の予定

アクチュエータの設計変更と作製条件の調整を行い、駆動電圧を従来の 40V から 10V 以下に低減することが可能となりました。また、動作速度の評価を行い、ON 状態、および、OFF 状態への動作時間が $80\mu\text{s}$ および $5\mu\text{s}$ 以下であることを確認しました。

来年度は、信頼性評価を中心に検討を行います。その中で、接点の耐久性（ON/OFF 繰り返し寿命）の向上が最重要課題と考え、電極の密着性や接点表面の清浄化や不活性ガス封入パッケージングなどの検討を進めます。

4-1c RF-MEMS 移相器の研究開発

4-1c-1 テーマの位置付け

本テーマは、適応アンテナシステムに搭載する移相器に関するものです。

4-1c-2 実施状況

本年度は、デバイスの試作および評価とそれぞれの問題点の抽出を目標に開発を行いました。作製プロセスの見直しを行うことで、安定した試作が可能となってきました。試作した5bit 移相器の例を図4-1c-1に示します。そして、評価を進めていく中で、予想より寄生するインダクタンスやキャパシタが大きく、これらが特性に大きな影響を与えていることが分かってきました。寄生成分の発生原因調査を行った結果、固定インダクタンスやキャパシタンスチップ（図4-1c-3）を線路基板に実装する際に発生し、実装条件により変動することが分かりました。また、線路を形成するときの条件で、抵抗が変動し、特性がバラツクことも分かってきました。

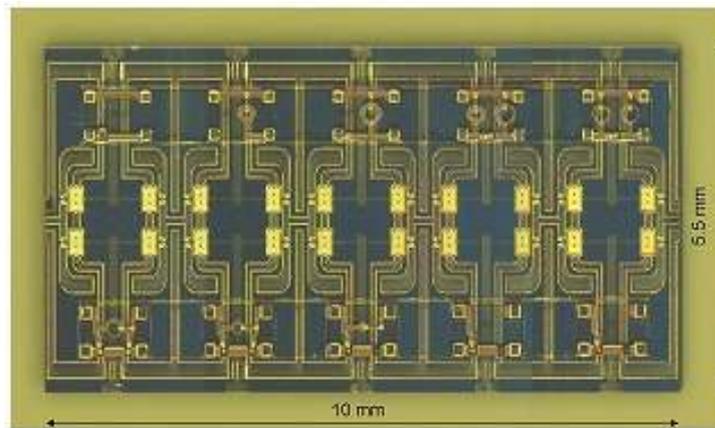


図 4-1c-1 5bit 移相器の試作例

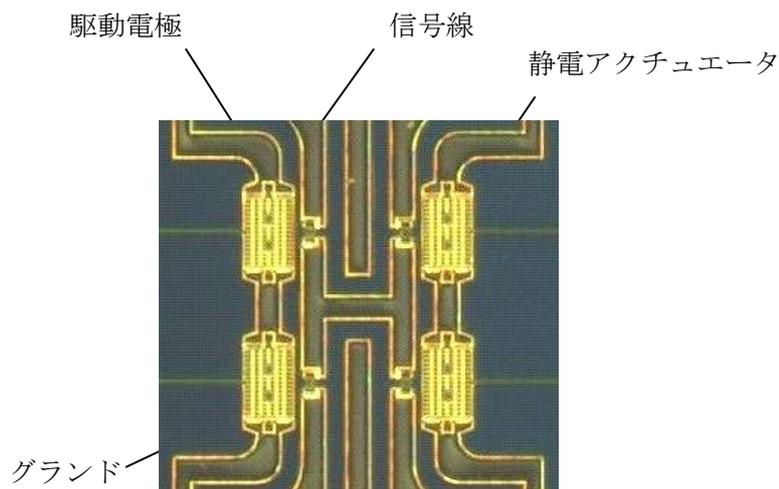


図 4-1c-2 スイッチ部

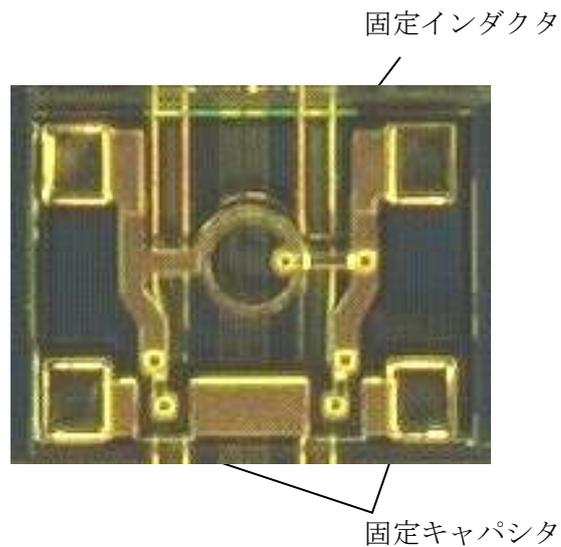


図 4-1c-3 固定インダクタンスおよびキャパシタチップ

4-1c-3 まとめと今後の予定

作製プロセスの見直しを行い安定した試作が可能となりました。また、試作した 5bit 移相器の評価を進める中で、固定インダクタやキャパシタチップの実装条件による寄生インダクタンスやキャパシタンス変動、線路回りの寄生容量の存在、作製条件による線路抵抗の変動などの問題点を抽出することが出来ました。そこで、平成18年度は、寄生インダクタンスとキャパシタンスの低減と、線路の低抵抗化の観点から検討を行い、低損失化を図ります。また、同時に、実装技術開発も行い完成度の向上を目指します。

4-2 副課題イ) 適応アンテナの研究開発

4-2 a RF-MEMS 可変キャパシタを用いたアンテナ自動整合回路

4-2 a-1 テーマの位置づけ

本テーマは、移動体通信機が人体近傍で用いられる際に、アンテナインピーダンスが変化する影響を受けて送信出力および受信感度が劣化する現象を、アンテナ自動整合回路によって補償することを目的とします。その際、アンテナ直下に位置する整合回路に、低挿入損失、高い線形性、低消費電力等の優れた特性を有する MEMS 可変キャパシタを用います。

4-2 a-2 実施状況

平成 17 年度は受信側のアンテナ自動整合回路を検討します。「インピーダンスの自動整合」という観点からは、送信側および受信側両方への適用が考えられますが、送信側への適用は「パワーアンプの効率向上」という点を重視する一方、受信側への適用は「微小な受信電力をより効率よく RF 回路に送り込む」という点が重視されるため、より精密な制御アルゴリズムが必要になります。この技術は送信側にも適用可能なため有意義であると考えられます。

受信用アンテナ自動整合装置(AIMS: Adaptive Impedance Matching System)の構成を図 4-2 a-1 に示します。今回の構成では受信電力検出器としてアナログ・デバイゼズ社のパワーディテクタ IC AD8318 を用います。AD8318 によって検波された受信電力は、フィードバック信号としてマイクロコントローラ(MCU)の A/D 変換器に入力されます。MCU 内での演算結果は、D/A 変換器およびオペアンプを経由してバラクタダイオード #1, #2 に供給されます。以下に図 4-2 a-2 のフローチャートを用いて、MCU におけるアルゴリズムを説明します。本自動整合装置は、人体や近接物体の動きによる比較的遅い電力変動の補償を目的としているため、比較的速いフェージングを平均化してその影響を取り除く目的で約 1.4ms の間隔で 30 点のデータを取得し、これを平均したものを時刻 t_1 における受信電力に対応する A/D 変換後の電圧値(V_{pt1})とし、これをリファレンス値とします。その直後に同様にデータ取得と平均化を行い、これを t_2 における受信電力(V_{pt2})とし、 V_{pt1} と V_{pt2} の比較を行います。この時、 $V_{pt1} - V_{pt2} > 0$ 、つまり t_1 と比較して t_2 において受信電力が減少していたならば適応制御を行うが、かつ $V_{pt1} - V_{pt2} > x_1$ ならば適応制御のルーチンを 2 回行い、 $x_1 \geq V_{pt1} - V_{pt2} \geq x_2$ ならば、それほど電力は減少していないと判断し、ルーチンを

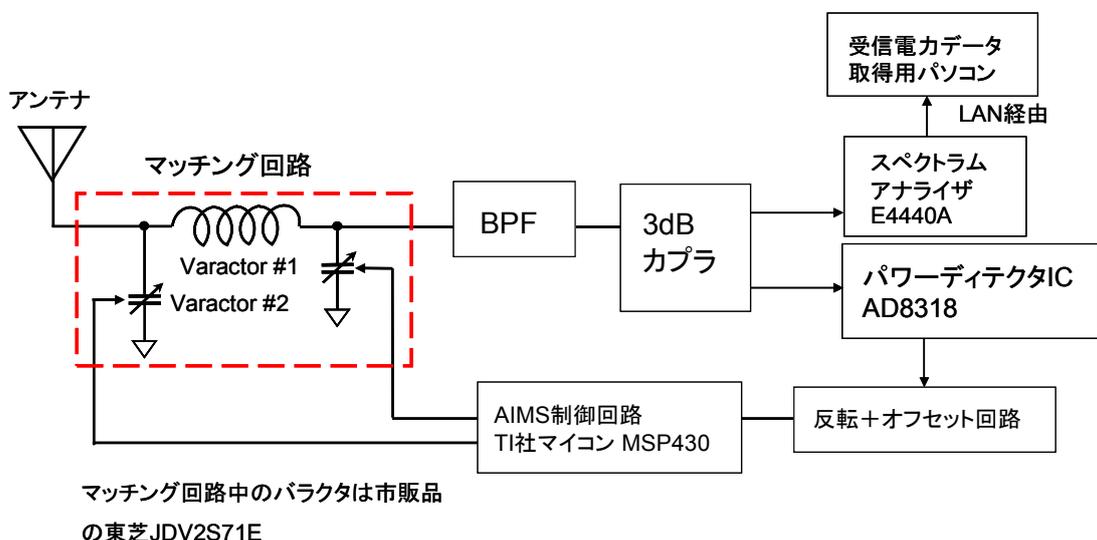


図 4-2 a-1 受信用アンテナ自動整合装置構成図

1回で終了します。この閾値 $x1, x2$ は、送信アンテナからの信号が存在しないときにノイズ等の影響で誤って適応制御を行わないように、かつ人体の影響などが存在するときには速やかに適応制御を開始するように決定します。

適応制御のルーチン内では、まず2つのバラクタダイオード（以下バラクタと略する）のうち、#1のバラクタに微小な電圧増加を与えます。これをテスト信号と呼ぶことにします。その結果受信電力が増加すれば、そのままバラクタに加える電圧を一定時間増加し続けます。反対に受信電力が減少していたら、最初のテスト信号による微小な電圧増加の方向が誤りであったと判断し、即座にバラクタに加える電圧を一定時間減少し続けます。この間、制御を受けないバラクタ#2の制御電圧は、最後に制御を受けた時の制御終了時の値に保持されています。バラクタ#1の制御の後に即座にバラクタ#2の制御を同様に行います。

本受信用 AIMS の効果を確認するために、実験室環境下において受信電力の場所率測定を行いました。図4-2 a-3に測定環境の見取り図を示します。測定周波数は 4.5GHz の CW であり、送信コリニアアンテナからは 10dBm の電力を放射しました。台車上に受信コリニアアンテナ、RF 受信系および受信データ取得用のスペクトラムアナライザを搭載し、図3中の①～⑨の地点において台車を静止させ、以下に述べるように近接物体の動的な影響を人工的に発生させた環境下で受信電力データを取得しました。地点①～⑦までは両側あるいは片側に近接した物体および壁が存在するが、地点⑧、⑨においては周囲に壁は存在しません。図4-2 a-4に今回人体又は近接物体の影響を発生させるために用いた装置の構成を示します。本装置の先端に金属の反射体を取り付け、これを正弦波状の周期で往復運動させました。受信アンテナと反射体の距離が一番近いときの距離は約 10cm です。反射体は発泡スチロールの立方体型ブロック (30×21×11cm³) 全体にアルミホイルをまんべんなく巻いたものです。また装置本体は駆動用モーターおよび固定用金具を除き木製で、三脚は金属製です。往復運動の周期は約 1.6s であり、ストロークは約 16cm です。図4-2 a-3における各測定点において反射体を往復運動させ、その間の受信電力を 50ms 間隔で 200 ポイント取得しました。

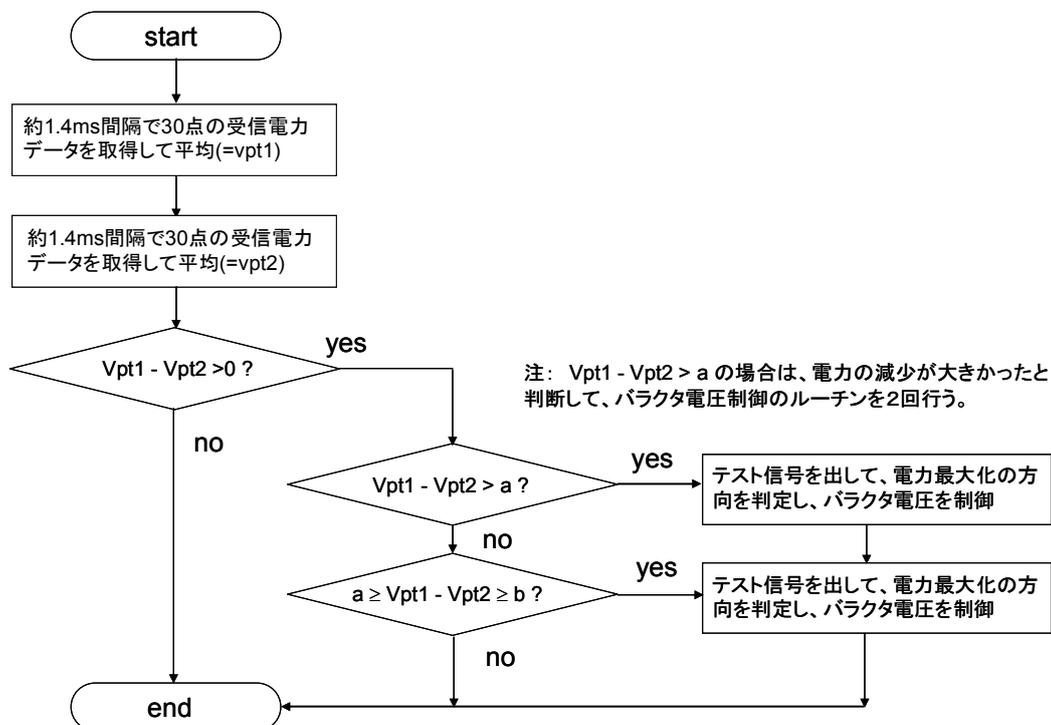


図4-2 a-2 アンテナ自動整合装置制御アルゴリズムのフローチャート

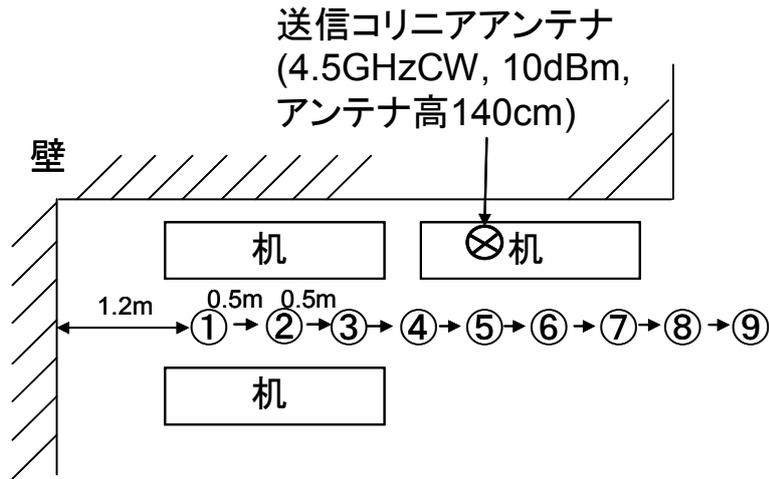
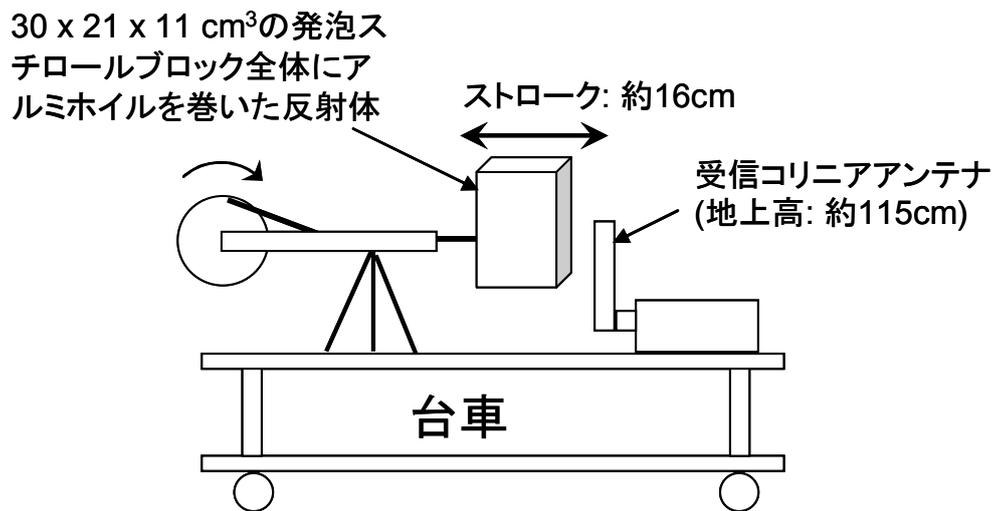


図 4 - 2 a - 3 受信電力測定環境の見取り図。①～⑨は受信アンテナの静止位置である。



- ・ 反射体の往復運動の周期：約 1.6 sec
- ・ データ取得は 1 地点毎に 50msec 間隔で 200 ポイント取得
- ・ スペアナの設定(Agilent E4440A)： 中心周波数: 4.5GHz, span: 0Hz, RBW: 100kHz, sweep time: 10ms, average: 2 回

図 4 - 2 a - 4 人体及び近接物体の動的影響を発生させるために用いた装置および受信アンテナの配置

図 4 - 2 a - 5 に実験結果を示します。AIMS 動作時と、非動作時の比較を行いました。横軸は受信電力 (電力検出器 AD8318 の入力における値)、縦軸は受信電力の累積分布確率です。実線は AIMS を動作させて受信電力を測定した結果であり、破線はバラクタ#1, #2 とともに固定電圧を与えたときの受信電力です。固定電圧値はともに約 25.4V であり、この時アンテナとマッチング回路の系を、マッチング回路側から見た場合の反射係数の絶対値

はおよそ -18dB です。図4-2 a-5は、図4-2 a-3の環境で①～⑨までの各地点における測定を、AIMS動作時および固定電圧時ともに2日間にわたって、計4回繰り返したデータの総計によるものです。図4-2 a-5より、主に -55dBm ～ -65dBm 程度の低い受信電力値において、AIMS動作時には非動作時と比較して 1.5dB ～ 2.0dB 程度の受信電力改善が達成されていることが分かります。しかしながら、 -60dBm 程度以下の受信電力レベルでは電力検出器AD8318の入出力間の線形性が大きく崩れてくるので、この範囲では応答速度が低下するなどの影響により、制御がよりレベルの大きい受信電力時と同じように行われていないため注意が必要です。

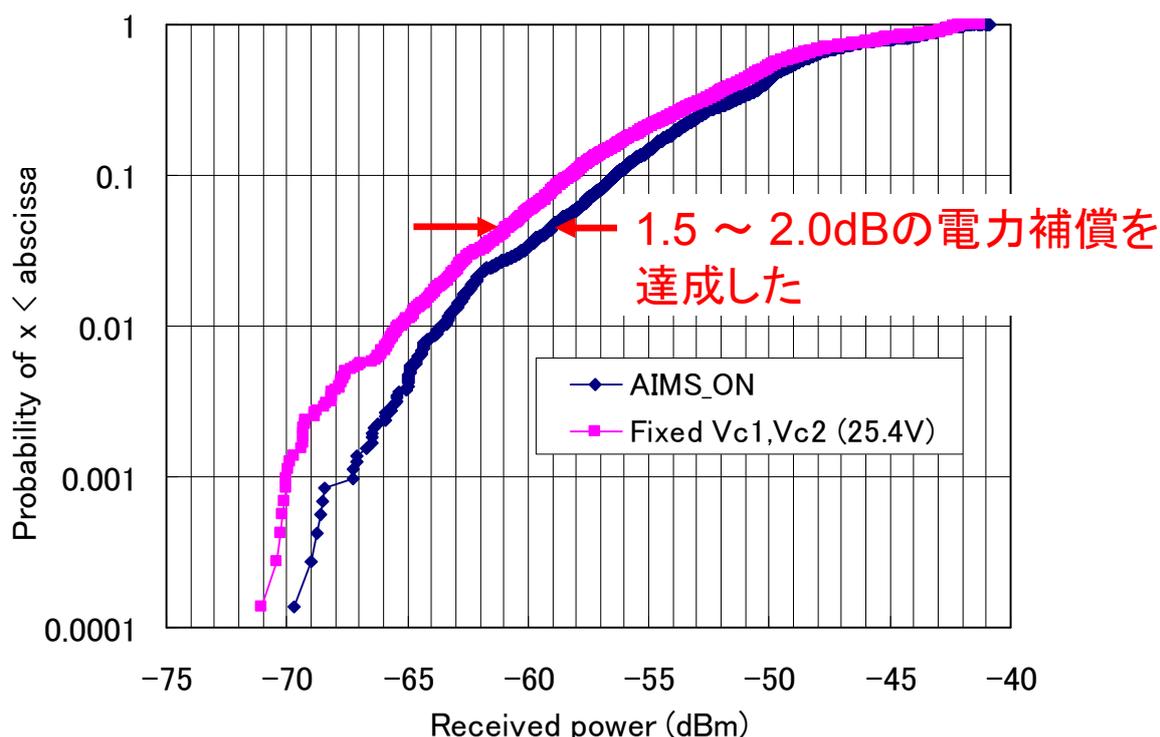


図4-2 a-5 受信電力レベルの累積分布関数。アンテナ自動整合回路を用いた場合、用いない場合と比較して 1.5dB ～ 2.0dB の受信電力改善が得られている。

4-2 a-3 まとめと今後の課題

アンテナ自動整合回路については現在受信適応アンテナシステムへの適用を考えて、受信電力を最大化するアルゴリズムを用いた実験を行いました。その結果、アンテナ近傍の人体などの反射物の影響を考慮しつつCW信号を受信した場合には、固定整合回路を用いたアンテナシステムと比較して最大 1.5dB ～ 2.0dB の受信電力改善効果が見られました。

また平成17年度は制御回路にマイクロコンピュータを採用したことにより、製品化する際の低消費電力化、小型化にメドがつかしました。最終的に 100MHz の広帯域信号時に $1\sim 2\text{dB}$ の受信電力改善効果が得られれば、1本のアンテナのまま1.5本のアンテナを用いたのと同程度の効果が得られることから、この程度を目標とすれば実装面積に制約の厳しい移動体通信用携帯機器への適用メリットは大きいと考えられます。2006年5月までにはフィールド実験を終える予定であり、送信側への適用についても、実際に移動機内のパワーアンプ出力に用いて実験を行う予定です。

4-2 b RF-MEMS 可変キャパシタを用いた適応アンテナ

4-2 b-1 テーマの位置づけ

複数のアンテナ素子を持つダイバーシチアンテナは、通品品質の向上及び干渉波抑圧のために効果的です。本テーマの適応ダイバーシチアンテナは、2つのアンテナ素子で受信した信号を、A/D変換する前にRF信号の状態での位相をそろえて等利得合成します。この構成により、A/D変換器を含むベースバンド信号処理部が1系統で済むので、消費電力及び回路の小規模化が図れます。信号の位相調整には高周波素子として優れた特性を有するMEMS可変キャパシタを用います。

4-2 b-2 実施状況

平成17年度は可変キャパシタを用いたダイバーシチアンテナの検討を行いました。主に東京工業大学で開発されたRF-DA(Radio-Frequency-combining-type Diversity Antenna)のシミュレーションにより、2~4ブランチアンテナシステムにおいて、選択合成型(SC: selection combining)ダイバーシチアンテナよりも1~2dBのSNR(Signal-to-Noise power Ratio)改善を確認しました。以下に検討の詳細を示します。

図4-2 b-1に今回検討した可変キャパシタを用いたRF-DAの構成ブロックを示します。図中のreactance control circuitの詳細を図4-2 b-2に示します。1つのアンテナブランチにつき、1つの可変キャパシタを用います。

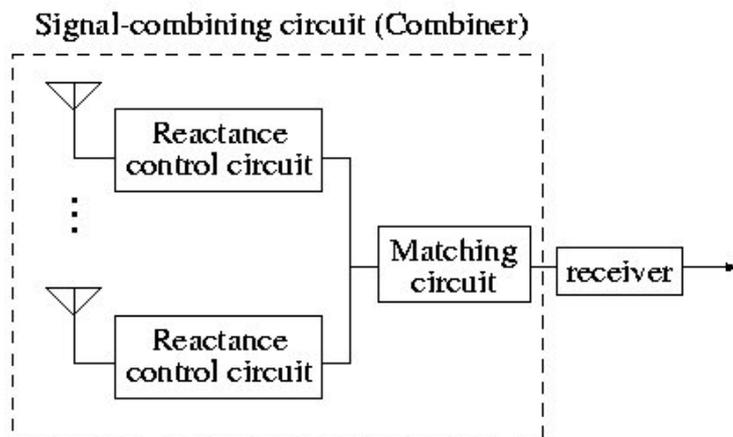


図4-2 b-1 提案ダイバーシチアンテナ(RF-DA)の構成ブロック図

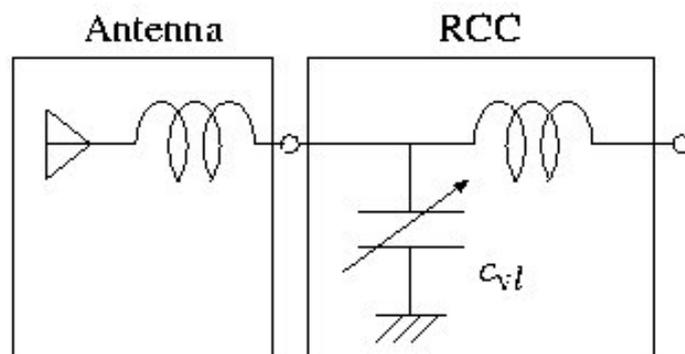


図4-2 b-2 リアクタンス制御回路とアンテナの構成図

図4-2b-3に2ブランチおよび4ブランチ RF-DA の受信電力のシミュレーションにおける SNR (Signal-to-Noise power Ratio)の累積確率分布を示します。計算条件は周波数5GHzにおいて室内環境を想定し、マルチパス波が3次的に同確率でランダムに受信アンテナに到来すると仮定しています。到来波の振幅は無相関のレイリー分布に従い、位相はランダムです。図4-2b-2における可変キャパシタの可変範囲を0.7pF~6.0pFと仮定しています。図中 Reference antenna はダイポールアンテナ単独時の値です。

本シミュレーションにおいては、同時に他のダイバーシチの方式との比較も行っています。すなわち SC (selection combining)、EGC (equal-gain combining)、MRC (maximum-ratio combining)との比較です。原理上 MRC が一番良い性能を得ることが出来ますが、振幅調整が入るため、これを RF 回路で実現すると回路構成が複雑になるという問題点があります。図より MRC が一番大きい SNR を実現していますが、2ブランチダイバーシチアンテナにおいては提案 RF-DA と比較して、5%累積確率点においてわずか0.6dB程度の差異しかありません。さらに提案 RF-DA は EGC と同等の性能を達成できることが分かります。また SC と比較しておよそ1dB高いSNRを得ることが出来ています。一方4ブランチになると提案 RF-DA と MRC との差は1.6dBに開きますが、RF-DA は SC よりも1.7dB、EGC よりも0.9dB高いSNRを得ています。

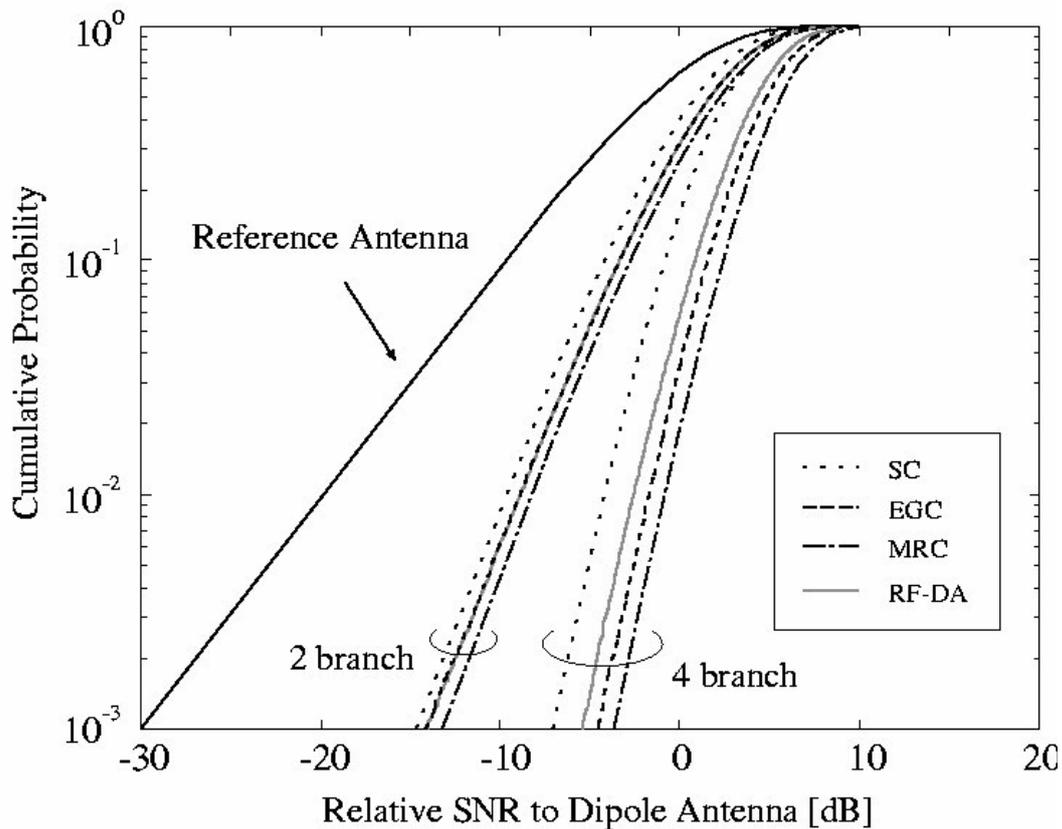


図4-2b-3 受信 SNR の累積確率分布

表 4-2 b-1 各ダイバーシチ方式と提案 RF-DA の性能まとめ (劣化率 5%時)

	SC	EGC	MRC	RF-DA
2 branch	6.8	7.7	8.3	7.7
4 branch	10.9	13.3	14.2	12.6

(Unit: dB)

4-2 b-3 まとめと今後の課題

提案した RF-DA の性能をシミュレーションにより検証しました。その結果、2 アンテナ時には EGC と同等の、また 4 アンテナ時には EGC をわずかですが凌駕する SNR が得られることが分かりました。しかしながらこのダイバーシチアンテナシステムを実際に製作する際には、RF 信号合成部と内部 RF 回路との間の良好なマッチング、および低損失な可変キャパシタンスが不可欠であることから、本シミュレーションによる検討どおりの性能を引き出すには、時間をかけて設計、製作をする必要があります。今後は PC 等実機への搭載も考慮しますが、本シミュレーションの結果は原著論文化されており、理論的には一応の結論が出たと考えますので、実機の製作が困難と判断される場合には再検討も必要となると考えられます。

4-2c RF-MEMS 可変移相器を用いた適応アンテナ

4-2c-1 テーマの位置づけ

前項の「可変キャパシタを用いた適応アンテナ」は、信号位相の制御を簡単な可変リアクタンス回路で行い、さらにコンバイナを用いず直接合成しているので回路構成が非常にシンプルであり、消費電力も小さいというメリットがある反面、位相調整の際に信号の振幅も変化してしまうという問題があります。一方、本項のテーマである「可変移相器を用いた適応アンテナ」は、位相と振幅をそれぞれ独立に制御できるので、制御の自由度が大きくなるという利点があります。しかしながら、RF信号の振幅、位相を制御するためには回路が複雑になるという問題があります。そこで平成17年度は移相器を用いた適応アンテナの検討に加えて、構成がより簡単な偏波選択型 MIMO アンテナシステムの検討を行いました。

4-2c-2 実施状況

図4-2c-1(a)に偏波選択型 MIMO アンテナの外観図を示します。それぞれ3偏波を持つアンテナ素子4個が1つの基板上に載っています。(b)に構成図と各偏波に対応するポートの配置図を示します。

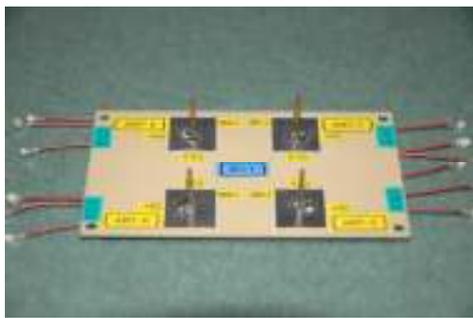


図4-2c-1(a) 3偏波選択型 MIMO アンテナ外観

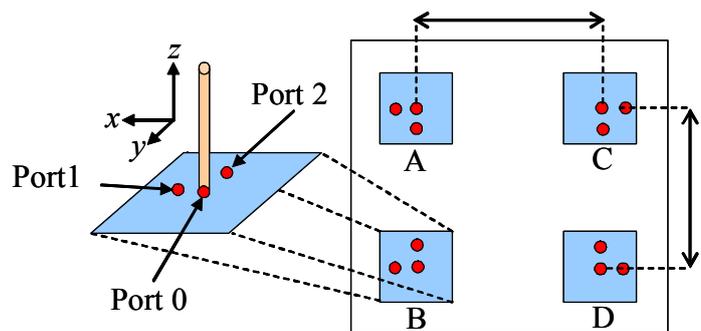


図4-2c-1(b) 各偏波用素子と給電点との関係図

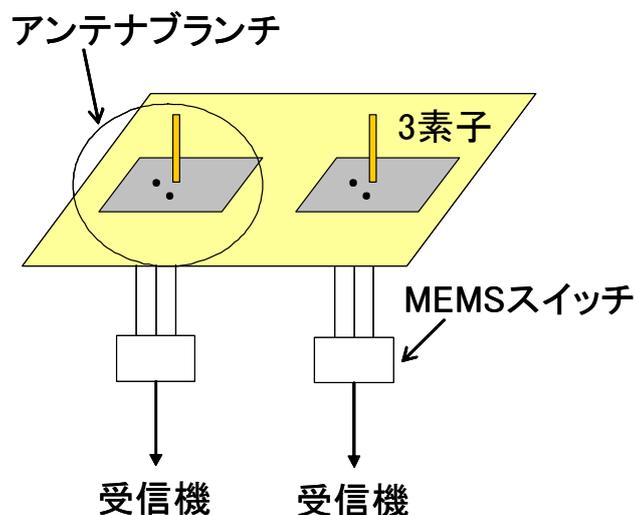


図4-2c-2 3偏波選択型アンテナを用いた2ブランチ MIMO アンテナシステムの構成図

図4-2c-2に、実験に用いた2素子MIMOアンテナシステムを示します。図4-2c-1では4素子が示されておりますが、今回は検討の初期段階であることから、このアンテナの2素子分のみを使用して検討しております。将来的には4素子MIMOに拡張可能です。

図4-2c-3に実験環境を示します。机、椅子、什器等が散在する実験室で伝搬路の伝達関数測定を行いました。送信アンテナを図中のTxの位置に置き、受信アンテナを図のPosition 1からPosition 30までおよそ50cm置きに静止させ、各地点でBERを算出しました。図4-2c-4に送受アンテナおよび受信アンテナ付近の構成図を示します。本MIMOアンテナは移動機への適用を予定していることから、実使用環境を出来るだけ模擬するために、アンテナ近傍に人体に非常に近い電気特性をもつ「人体ファントム」を設置して測定しました。人体ファントムがアンテナ近傍に存在すると、アンテナの近傍界を乱すため、アンテナ素子上の電流分布が変化し、放射パターンや入力インピーダンスが変化するなどの影響が生じます。測定における受信アンテナ単体およびアンテナと人体ファントムとの位置関係を図4-2c-5に示します。

図4-2c-6～図4-2c-8にそれぞれPosition 1、10、30におけるBERを示します。BERは6回の平均値を採用しています。

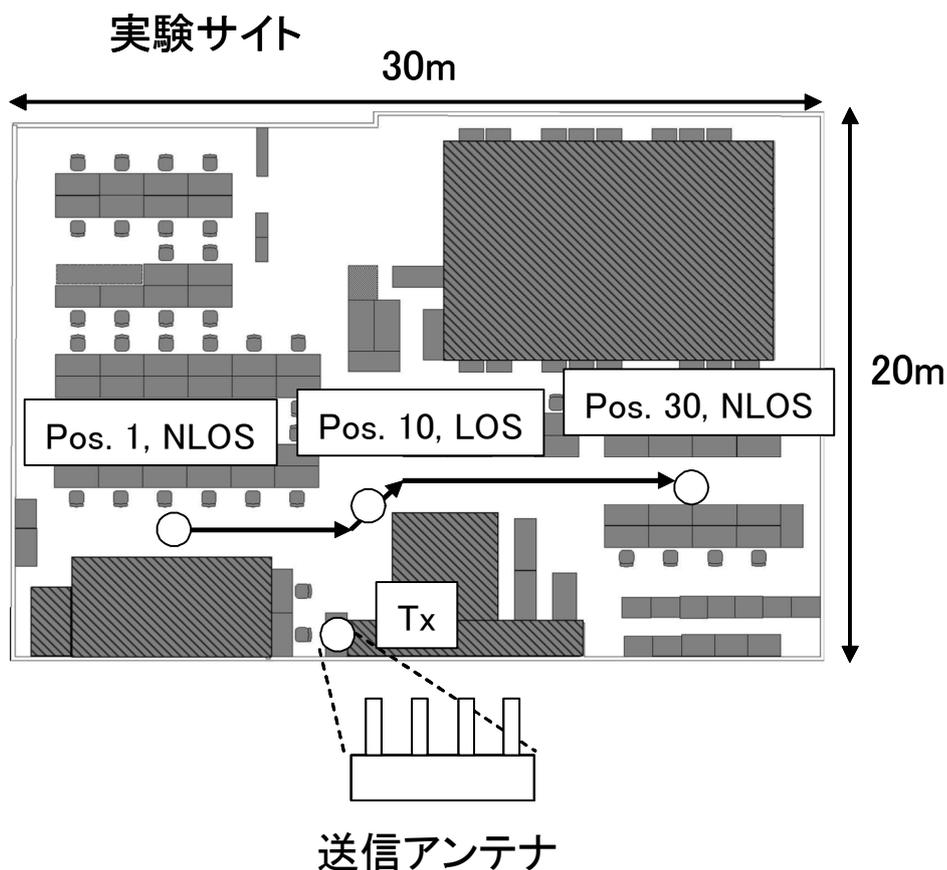


図4-2c-3 測定環境の平面見取り図。送信アンテナはTxの位置にあり、受信アンテナが図中の→を移動する。

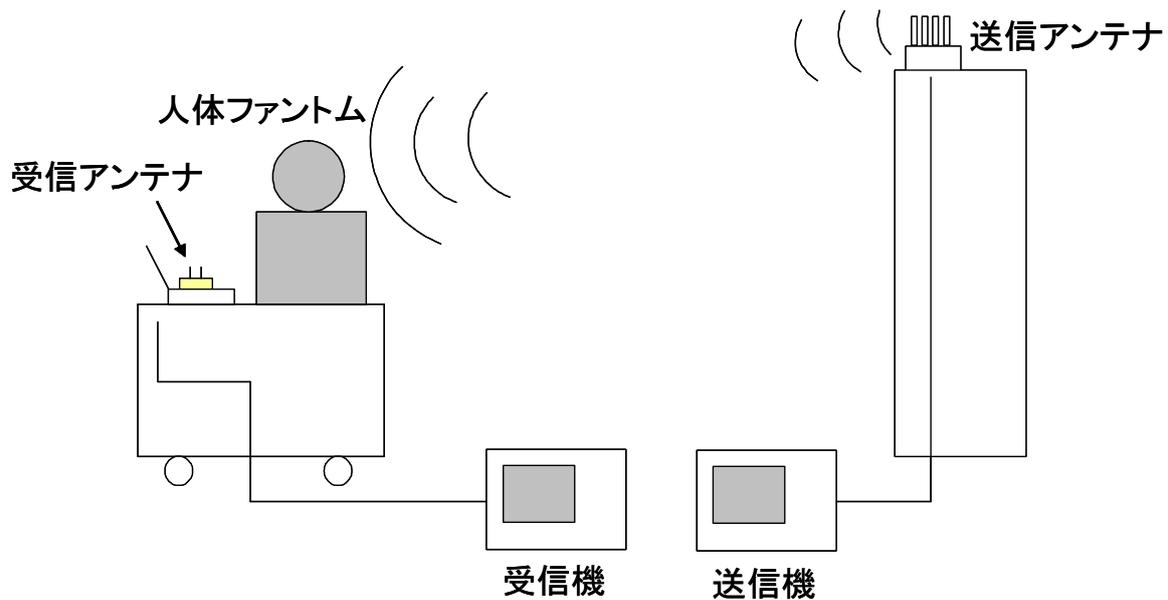


図 4-2 c-4 測定における送信アンテナと受信アンテナ系の概略図

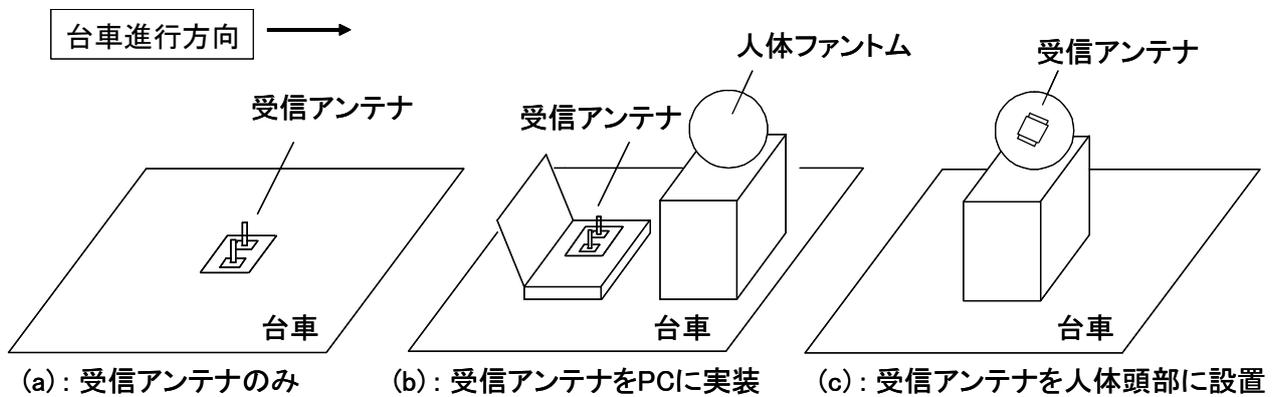


図 4-2 c-5 受信アンテナと PC および人体ファントムの配置図

図 4-2 c-6 は図 4-2 c-3 の Position 1 の位置に台車があるときの BER 測定結果を、図 4-2 c-5 のそれぞれの受信アンテナ構成時について示したものです。図中の「PC とファントム」は図 4-2 c-5 の「(b)受信アンテナを PC に実装」に該当します。また「ファントムで通話」は「(c)受信アンテナを人体頭部に設置」に該当します。実線と破線はそれぞれ「3 偏波の中から一番 BER が良好になるように選択した場合」および「アンテナを選択せず、常に Port0 のモノポールアンテナのみを受信に使用した場合」を意味しています。図に示すとおり、平均 $BER=10^{-3}$ (赤の破線で表示) おける送信電力が、「(a)アンテナのみ」で「アンテナを選択した場合」の場合に一番小さくなっています。さらに「(c)ファントムで通話」の場合に「モノポールアンテナを使用した場合」で、所要送信電力が一番大きくなっています。この原因として、アンテナをファントム上に設置して使用して

いるので、インピーダンスが変化して不整合が生じたことによる受信電力の低下のほかに、放射パターンの変化による利得の低下が考えられます。

さらに注目すべき点は、「Port0(モノポール)を用いた場合と比べて、アンテナを選択して BER を最良にしたときの送信電力の改善度（どれだけ送信電力が少なくて済むか）」です。図4-2 c-6を見ると、「(a)アンテナのみ」の場合で BER=10⁻³における改善度はおよそ 3dB です。一方「(b)PC とファントム」の場合、改善度はおよそ 10dB と大きく、さらに「(c)ファントムで通話」では、およそ 12dB と、所要送信電力を低減するのに非常に大きな効果が得られているのが分かります。ただしこの測定結果は Position 1 に特有の値ですので、使用者の移動が見込まれる場合には他の地点でも測定する必要があります。そこで図4-2 c-7、4-2 c-8に Position 10、30 の結果を示します。Position 10 は受信アンテナと送信アンテナが見通しの関係になる(Ling-of-Sight: LOS)位置ですが、(a)の改善度が Position 1 と比較してかなり大きくなっています。一方(b)の改善度は小さくなっています。改善度に差が出る理由として、「アンテナのみ」と「PC とファントム」および「ファントムで通話」の各場合において、ファントム等を含めたアンテナ受信系の受信電力パターンが互いにすべて異なっているからであると考えられます。つまり Position 1 のように NLOS (Non-Line-of-Sight: 見通し外)環境の場合は、受信電力の偏波は LOS の場合と比較して全空間において均一化する傾向にあるといえますが、近傍に反射体が存在した場合、これからの強い反射波が受信アンテナの受信パターンの強い方向と一致した場合は、アンテナ選択をしないモノポールの場合と比較してより強い電波が受信できると考えられます。LOS 環境においては、もともと送信アンテナが垂直偏波ですので、選択をした場合の改善度が小さくなることが予想されますが、やはり近傍に強い反射体が存在した場合には、受信アンテナ系の受信パターンにかなりの程度依存して改善度が決まります。上記の理由より、改善度に差が出ると考えられます。

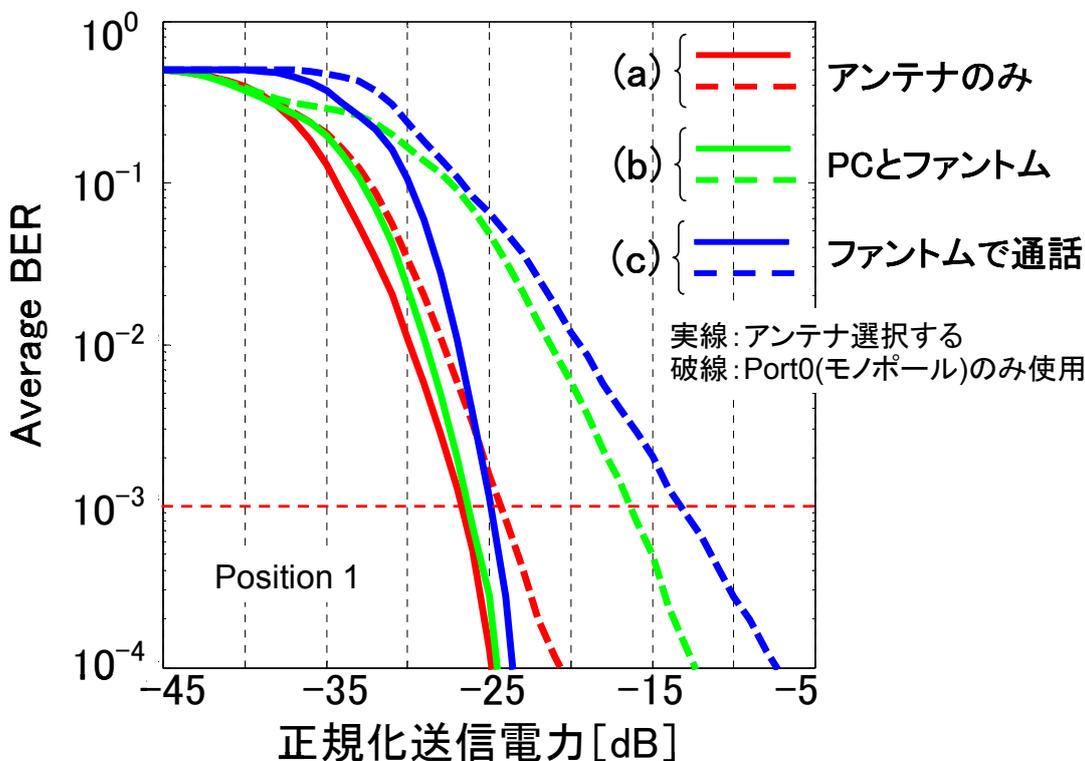


図4-2 c-6 Position 1 における平均 BER。横軸は送信電力で正規化してある。

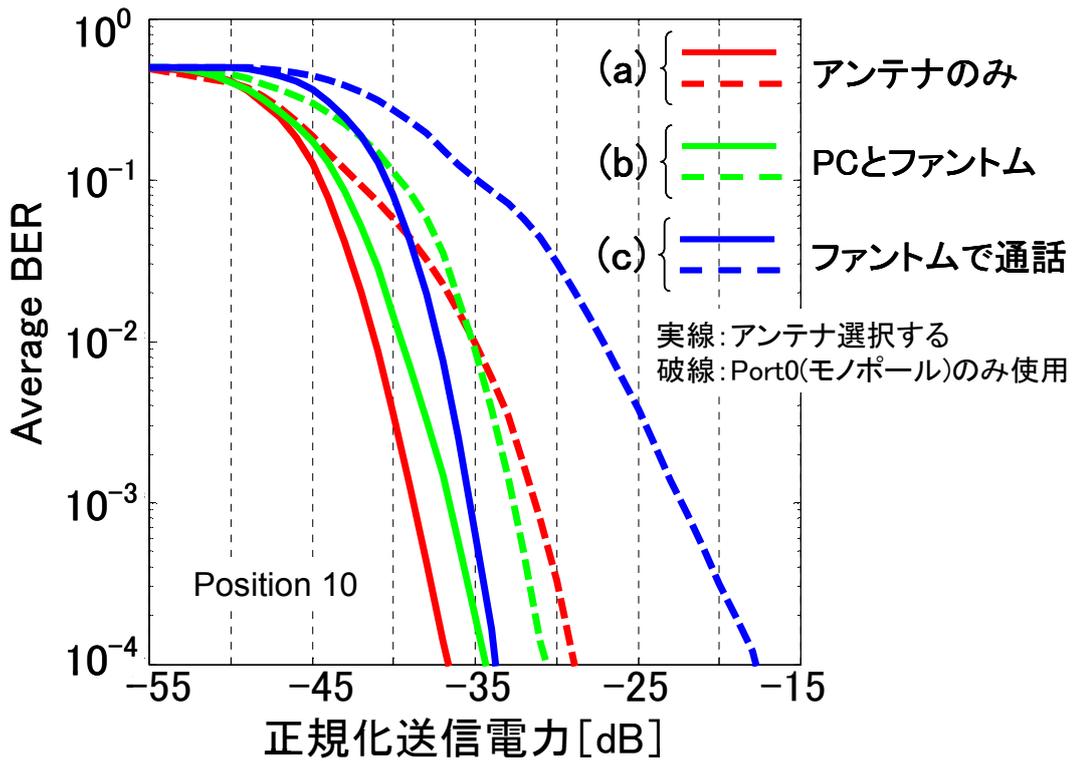


図 4 - 2 c - 7 Position 10 における平均 BER。このとき送信アンテナと受信アンテナは LOS(見通し)である。

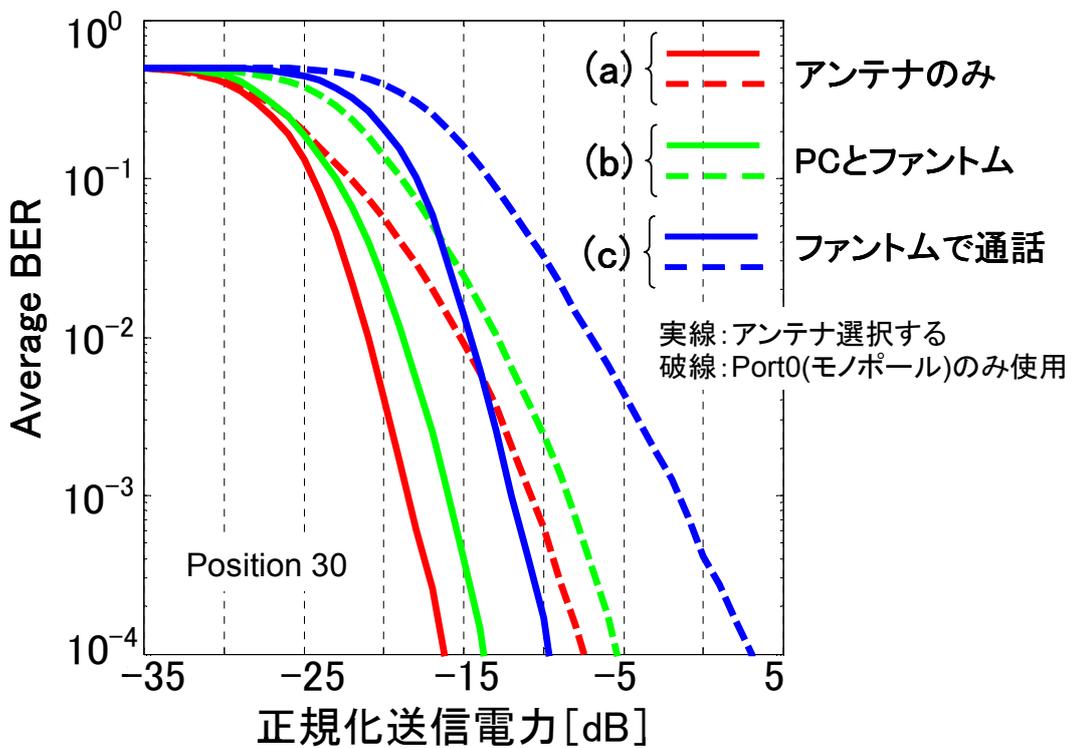


図 4 - 2 c - 8 Position 30 における平均 BER。

以上代表値として、Position 1、10、30 における平均 BER 値を示しましたが、図 4-2 c-9 に、Position 1~30 までのすべての地点における平均 BER 値の CDF（累積分布関数）を示します。これによると累積度数 50%点において「(a)アンテナのみ」の場合におよそ 5dB、「(b)PC とファントム」、「(c)ファントムで通話」の場合についてはおよそ 7dB の送信電力低減を確認しました。これにより、本提案の 3 偏波選択 MIMO アンテナシステムの有用性が実証されました。

図 4-2 c-10 に、ここまでの「3 偏波選択」の代わりに、図 4-2-1 においてパッチ部分の Port1 と Port2 のみを用いた「2 偏波選択 MIMO アンテナ」を用いた場合のアンテナ選択による送信電力低減効果の CDF を示します。「2 偏波選択」を検討した理由は、モノポールアンテナが存在していると、実装スペースに制約のある携帯機器への適用が難しくなるためです。しかしながら「2 偏波選択」を用いてもなお、送信電力低減効果が見られれば、この方式が有効であることが実証できます。この際、「選択なし」はモノポールアンテナが単独で存在している場合を仮定しています。図を見ると、「3 偏波選択」との一番大きな違いは、「2 偏波選択」においては改善度がマイナスになる可能性があるということです。しかしながら累積度数 50%点においては、「(a)アンテナのみ」でおよそ 2.5dB、「(b)PC とファントム」、「(c)ファントムで通話」の場合でおよそ 5dB と、良好な送信電力低減効果が得られることを確認しました。

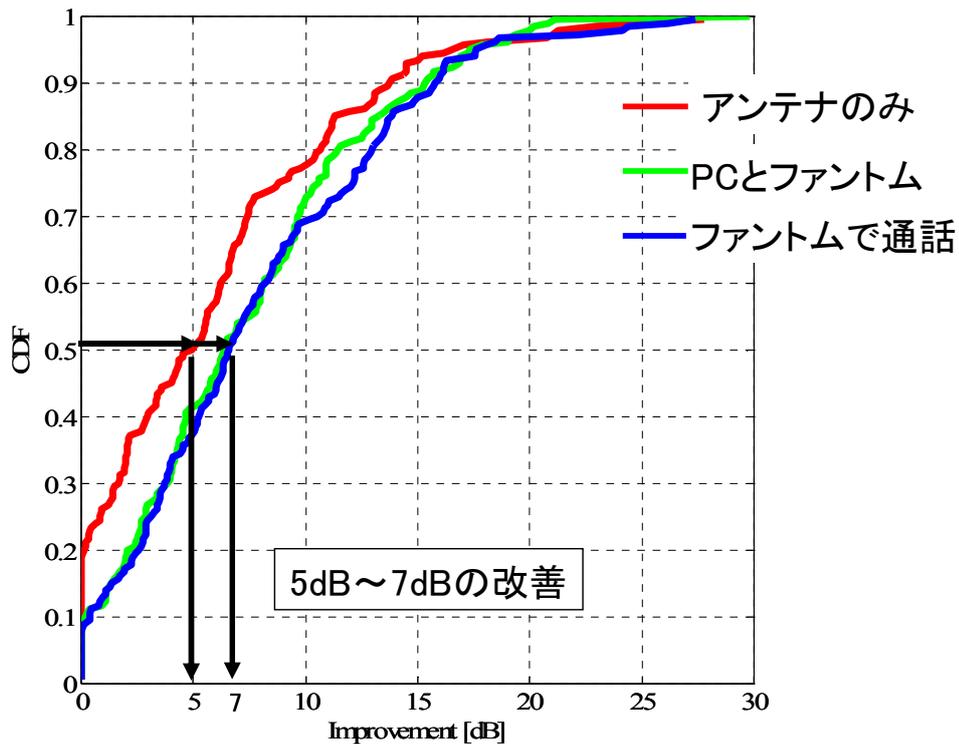


図 4-2 c-9 3 偏波選択型アンテナによる Position 1~30 までの各地点における平均 BER の累積分布関数。常に送信電力低減の効果が得られていることが分かる。

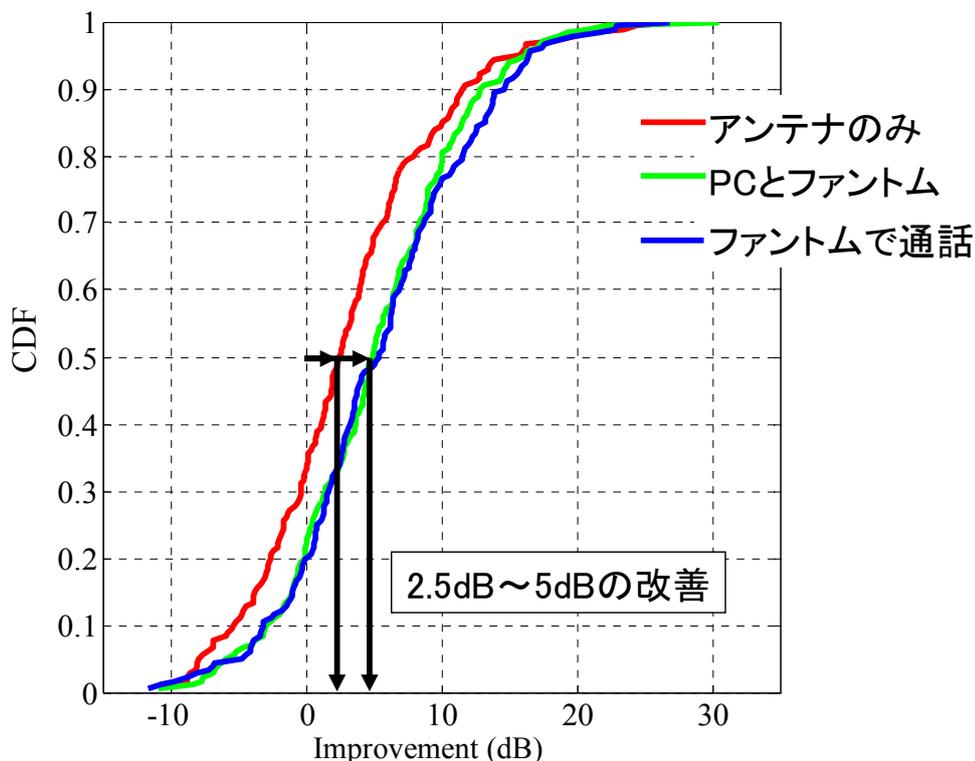


図 4-2c-10 2 偏波選択型アンテナによる Position 1~30 までの各地点における平均 BER の累積分布関数。アンテナ選択をしない場合はモノポールが単独で存在していると仮定した場合である。送信電力低減の効果は必ずしも得られるとは限らないが、CDF の 50%点においては良好な結果が得られている。

4-2c-3 まとめと今後の課題

MIMO アンテナを構成する際、移相器を用いるよりも構成が簡単な「偏波選択型アンテナ」を用いて、実使用環境を模擬した測定を行いました。その結果、「3 偏波選択型アンテナ」においては、アンテナ選択アルゴリズムが常に最良の BER を与えるアンテナを選択すると仮定したとき、5dB~7dB の高い送信電力低減効果が得られることが分かりました。一方平面アンテナのみで構成される低プロファイルの「2 偏波選択型アンテナ」によっても、2.5dB~5.0dB の送信電力低減効果が得られることが明らかになりました。今後は副課題エ) アルゴリズムの開発の研究グループと連携しながら、アンテナ選択のためのアルゴリズム開発および、より実機に近い状態での測定を予定しています。

4-2 d 電波伝搬測定

4-2 d-1 テーマの位置づけ

適応アンテナシステムの開発には電波伝搬特性の解明が必須ですが、100 MHz 級の広帯域伝送における移動機側の電波伝搬特性は、これまで移動通信用アンテナシステムに応用できるような形では明らかにされておられません。従って本研究では、移動機受信に特化して電波伝搬測定を行います。

電波伝搬測定装置（チャンネルサウンダ）を用いて、特に MIMO チャンネルの応答行列を測定します。図 4-2 d-1 にマルチパス伝搬環境におけるチャンネル応答行列の概念図を示します。チャンネルサウンダは周囲環境毎のチャンネル応答行列を測定し、伝搬路の特性をアンテナ特性を含まない形で表現できます。この特長を用いて、対象とする伝搬環境のチャンネル応答行列をまずチャンネルサウンダで測定し、これをシミュレーションに用いることにより適切なアンテナアレー、変調方式等を選択することができ、MIMO システムの設計を見通しよく行うことが可能になります。

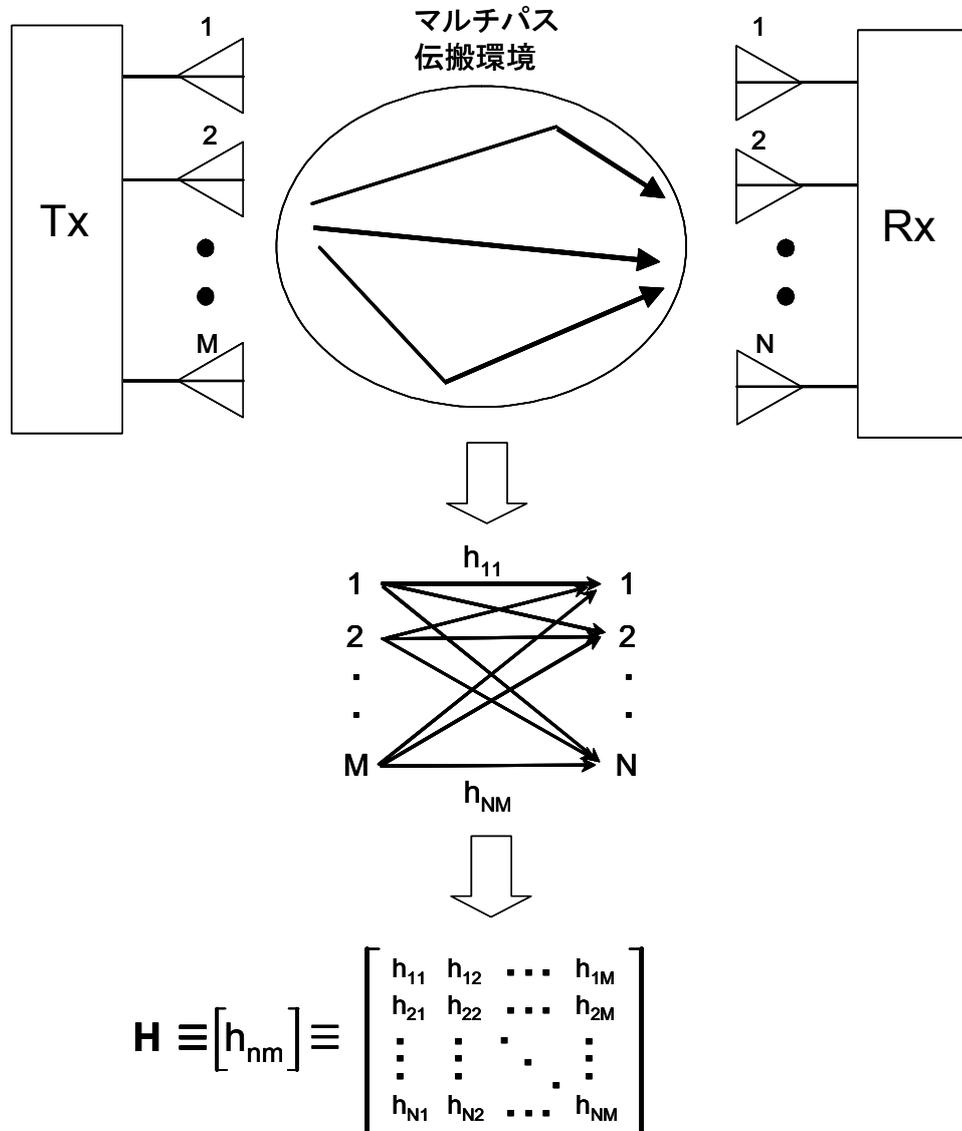


図 4-2 d-1 チャンネル応答行列の概念図

4-2 d-2 実施状況

図4-2 d-2に今回測定を行った場所とその周辺の地図を示します。東京工業大学南3号館に送信アンテナを設置し、受信アンテナを赤い実線に沿って移動しました。

まず最初に、本測定環境下で「Kroneckerモデル」と呼ばれるモデルが適用できるかどうかの検討を行いました。Kroneckerモデルとは、「送信アンテナと受信アンテナの間に相関が無い。つまり送信アンテナと受信アンテナは直接的にはカップリングしていない」と仮定するものです。この仮定を行うと、送信アンテナと受信アンテナの設計を、お互いの放射パターンを考慮することなく個別に行うことが出来るなど、MIMO伝送システムを単純に考えることが出来るため広く用いられてきました。この仮定の下にMIMO伝送容量は、

$$C = \log_2 \det(\mathbf{I}_{4 \times 4} + \frac{SNR}{4} \mathbf{H} \mathbf{H}^H) \quad (4-2-1)$$

($\mathbf{I}_{4 \times 4}$ は単位行列。 \mathbf{H} はMIMOチャネル行列。 $(\cdot)^H$ は複素共役転置の作用素である。)

と表現できます。式(4-2-1)による伝送容量と実測による4×4 MIMO伝送容量の比較を図4-2 d-3 (水平偏波について)、図4-2 d-4 (垂直偏波について)に示します。図より、実測値は式(4-2-1)よりも平均でおよそ7%小さくなっています。これは受信アンテナと送信アンテナの間にある程度の相関があるということを意味します。しかしながら本測定環境においては、実際の伝送容量が小さめになることをあらかじめ考慮することにより、Kroneckerモデルの適用は可能であると考えられます。



図4-2 d-2 東京工業大学近辺における地図。電波伝搬測定を行う際には赤い線上を移動する。

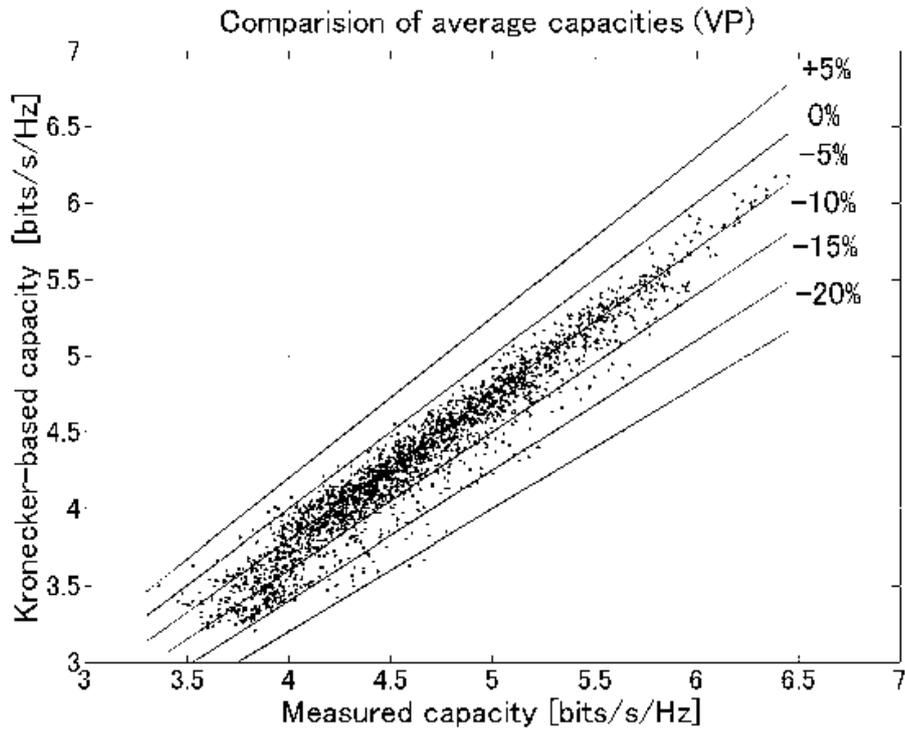


図 4-2 d-3 Kronecker モデルと実測値との垂直偏波についてのチャンネル容量比較

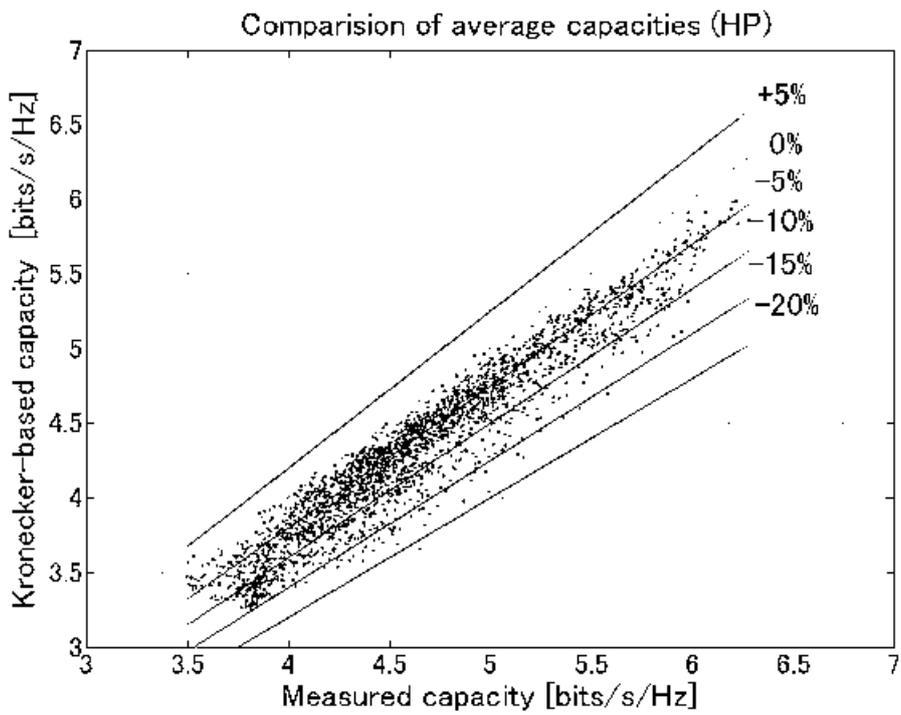


図 4-2 d-4 Kronecker モデルと実測値との水平偏波についてのチャンネル容量比較

続いて「クラスタリング」の検討を行いました。図4-2 d-5の「Route1」の経路を受信アンテナが移動したときに、ある強度の受信電力が観測されたときの受信アンテナから見た電波の到来方向(DOA: Direction of Arrival)と、そのときの送信アンテナ側から見た電波の方向(DOD: Direction of Departure) との関係プロットしたものが図4-2 d-6です。この図において DOA=0度は受信アンテナから見た送信アンテナの方向、DOD=0度は送信アンテナから見た受信アンテナの位置とします。この時、送信、受信アンテナの周辺や、伝搬路に高層の建造物が存在しなければ、DODは常に0度付近となるので、受信電力強度のプロット点はDOD=0度の線上付近にのみ存在するはずですが、ところが送信電力を反射、散乱するような建造物が存在すると、受信アンテナにおいて到来した電波の方向は、DOD=0度と一致しない場合が現れます。反射体の数が多いほど、DOD=0度から外れるプロット点が多く存在するようになります。

さらにこの考察を進めると、「ある特定のDODにおける受信電力プロット点が多く見られるということは、その方向に何か電磁波を反射するような建造物が存在している」と結論付けることができます。さらに送信アンテナからの電波放射の瞬間から、受信アンテナにその電波が到達するまでの間に、もし伝搬路のいろいろな地点に反射、散乱体が存在すれば、同時刻に発射された信号も、それらの反射、散乱体により信号電力が分割された形で、異なる到達時間で受信アンテナに到達するはずですが、この時間を測定することにより、先のDOA測定とあわせて「どの方向で、どの距離に」そのような建造物が存在するかを特定することが出来ると言えます。この作業をクラスタリングと呼びます。

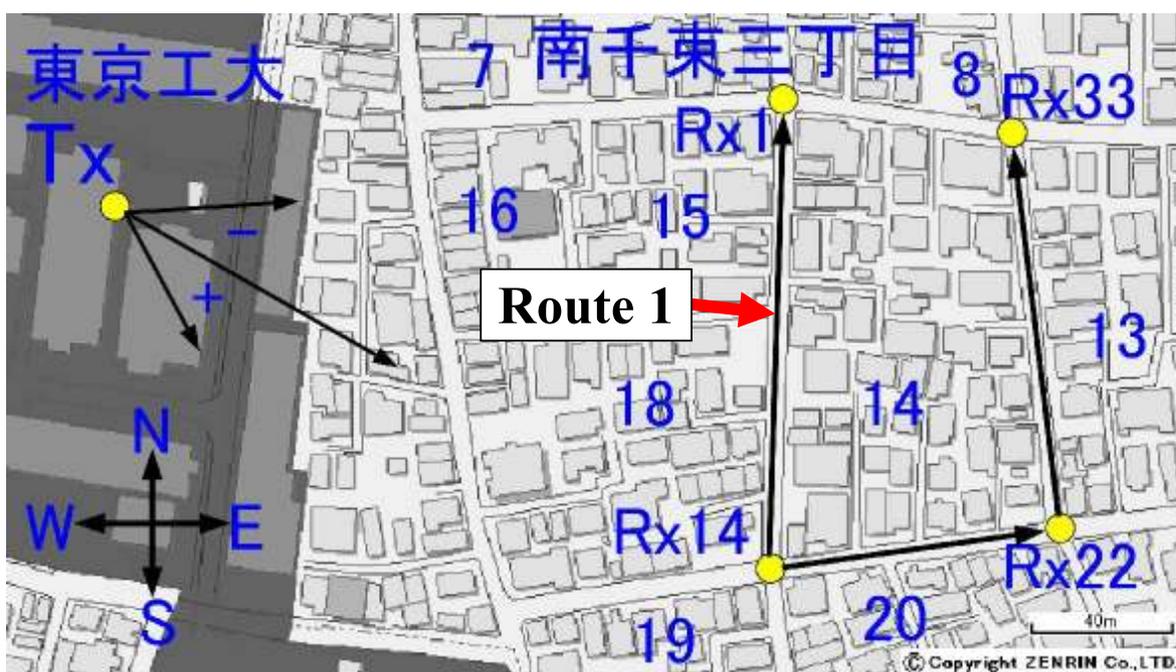


図4-2 d-5 伝搬測定における送信アンテナの放射方向および受信アンテナの移動経路

図4-2 d-6に受信電力強度と、そのときのDODとDOAの関係を示します。この図では、DOD=0度はアンテナの正面(図4-2 d-5において送信アンテナTxから出ている最も長い矢印の方向)、DOA=0度は図4-2 d-5において受信アンテナが進む向き、

すなわち Route1 の黒い矢印方向と定義しています。障害物による反射、散乱体による影響により、DOD が 0 度以外のところにも受信電力が観測されています。受信アンテナの移動範囲すべてにおいて得られた結果をすべてプロットし、これから送信アンテナより直接受信アンテナに到達したと考えられる波を取り除くと、図 4-2 d-7 のようなグラフになります。つまり固定した構造物がどの方向に分布しているかが明らかになります。

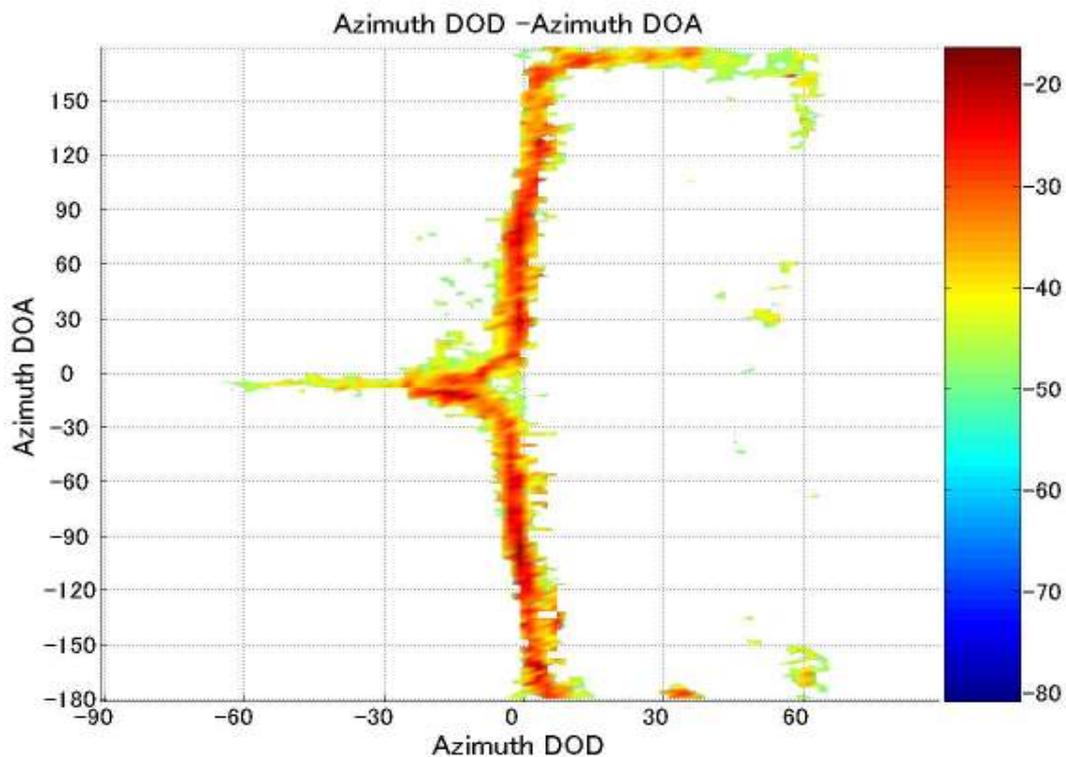


図 4-2 d-6 Route 1 を受信アンテナが移動したときの受信電力強度とそれに対応する DOD および DOA

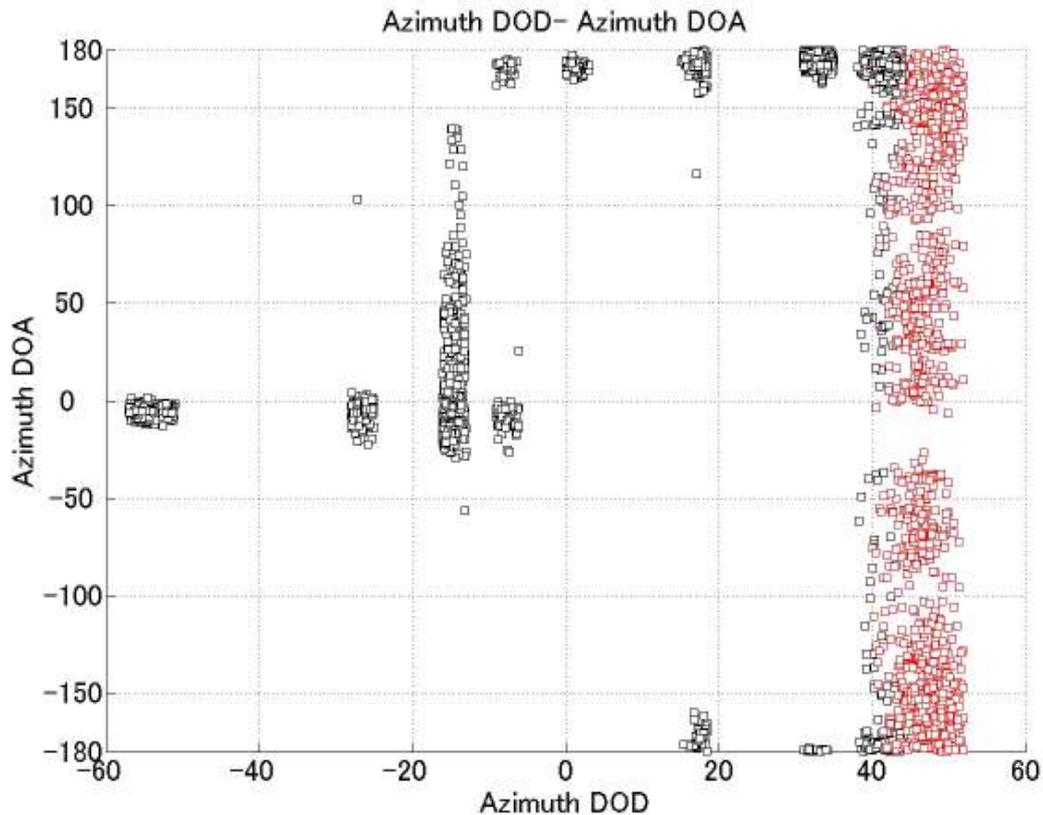


図4-2d-7 図4-2d-5の全経路を移動したときの受信波のプロットとそのクラスタリング（ただし送信アンテナから受信アンテナへの直達波を除く）。

クラスタリングの過程はレーダーの原理と類似していますが、送信アンテナと反射物との間が見通しであるレーダーと大きく異なるのは、本チャネルサウンダによる測定においては、「散乱による電波の伝搬メカニズムをどこまで考慮して、送受アンテナ間の伝達関数を正確にデータ化できるか」という点にあります。ただし、本測定法では放射、到来方向を推定するために、放射・受信波が平面波であると仮定しています。この仮定を満足しない波、たとえば例えば近傍の建造物におけるエッジ部分で散乱されたような波をどのように扱うかについては現在でも確立した方法はなく、今後の検討課題です。

4-2d-3 まとめと今後の課題

平成17年度の伝搬測定において、以下の事柄が明らかになりました。

- (1)目黒区大岡山周辺の住宅地環境においては、Kroneckerモデルが適用できる。これにより伝搬モデルの簡素化を図ることが出来る。
- (2)クラスタリングにより、比較的遠方の大きい構造物が特定できた。

これらの結果を利用して、最終的には伝搬路特性を精度良くデータとして保存することを目指します。このデータの有用性は、特性が既知のアンテナの放射パターン等のデータと結合してシミュレーションを行うことにより、実験環境下において最適なアンテナシステム的设计構築を実験でなくシミュレーションにより行うことができることにあります。これにより、開発の効率が飛躍的に向上することが期待されます。今後はセルラー環境で最も多く見られる状況である、屋内→屋外の伝搬測定も行う予定です。

4-3 副課題ウ) 適応制御方式・アルゴリズムの研究開発

4-3-1 テーマの位置づけ

MEMS は現在の高周波半導体可変素子と比較して、低挿入損失、高い線形性などの特徴を有します。しかしながら現状ではスイッチング速度やキャパシタンスの可変速度など、半導体の性能に及ばないものもあります。そこで現時点で MEMS を広帯域移動体通信に用いるためには、MEMS の弱点をカバーするようなアルゴリズムを採用する必要があります。本研究においては、計算量を低減して MEMS の遅いスイッチング速度に対応する検討を行いました。

4-3-2 実施状況

平成 17 年度は前項 4-2 c で実施した「偏波選択型 MIMO アンテナシステム」について、アンテナ選択のための新しいアルゴリズムを提案し、シミュレーションによる検討を行いました。4-2 c における実験では、「アンテナ選択が常に正しく行われていたとしたら、このように送信電力低減の効果が期待できる」という結果を示しましたが、実際はリアルタイムで正しいアンテナを選択するようなアルゴリズムが必要となります。ここでアンテナのどの素子を選択するかによって BER が最小になったり、受信信号の SNR (Signal-to-Noise power Ratio) が最大になったり、または伝送容量が最大になったりします。ここで重要なのは、たとえば SNR が最大するとき、必ずしも同時に伝送容量が最大になったり、BER(Bit Error Rate)が最小にならないということです。そこで本検討ではいくつかの基準でアンテナを選択して、それらの各場合において BER を比較します。アンテナの選択基準としては以下のようなものが考えられます。

- (1)SNR (Signal-to-Noise power Ratio)が最大になる
- (2)BER(Bit Error Rate)が最小になる
- (3)伝送容量が最大になる
- (4)状態数(Condition number: 最大固有値と最小固有値との比。最小値は 1 であるが、この値が 1 に近いほど、MIMO としての特徴を最大限に生かすことが可能になる)を最小にする
- (5)アンテナの選択は全くランダムに行う

が考えられます。

本研究においては、この他に「各アンテナ素子間の相関係数の総和と各アンテナへの受信電力の総和との比が最小になる」という基準を提案します。相関係数が小さければ小さいほど、MIMO におけるパスの分離が容易になるので、MIMO の特徴を最大限に活かします。一方、受信電力が大きければ大きいほど SNR が高くなります。本提案方式のメリットは以下のとおりです。

- (1)行列の積計算や行列式を求める必要がないので、他の基準と比較して計算速度を高速化できる。例えば 4×4MIMO において 16 サブキャリアの時、提案方式を用いると伝送容量最大基準と比較してわずか 6%程度の計算量で済む。
- (2)フラットフェージング環境時には相関係数の計算はコヒーレント帯域幅内に 1 回だけですむため、計算時間が少なくて済む。

本研究開発における提案基準も含めた上記の選択基準に従って、アンテナ選択を行った場合の BER のシミュレーション結果を図 4-3-1 から図 4-3-4 に示します。この検討では、前項 4-2 c で取得した実測データを元にシミュレーションを行いました。

た。図4-3-1から図4-3-3までは、前項の図4-2-3の中のそれぞれ Position 1、10、30 におけるアンテナ選択結果です。各図の横軸は、各素子から受信される受信信号の平均値を雑音電力で割ったものです。この規格化によって、送受アンテナが LOS であるか NLOS であるか関係なく、つまり電波伝搬路の損失に関係なく本アンテナシステムを評価することが出来ます。その他の計算条件は表4-3-1に示すとおりです。

シミュレーション結果の解釈は、たとえば受信アンテナが Position 1 の位置にある図4-3-1を見てみると、BER 最小選択がもちろん BER の最小値を与えます。つまり同じ BER を達成するのに、他の選択方法と比較した場合に一番受信電力が小さくて済む選択方式であると言えます。BER= 10^{-3} の線で比較すると、次に伝送容量最大選択が良好で、続いて本提案方法、さらに状態数最小選択、ランダム選択、SNR 最大選択と続きます。一方図4-3-2においては、図4-2-3で分かる通り、受信アンテナと送信アンテナが見通しの状態(Line-of-Sight: LOS)にあるため、送信アンテナの偏波に合致した受信アンテナの偏波を選択したときの BER と、ランダムに選択した場合の差が非常に大きくなっていることが分かります。BER= 10^{-3} の線で比較すると、BER 最小選択が一番良く、次に提案方式、SNR 最大選択、容量最大選択が同じで、続いて状態数最小、ランダム選択と続きます。Position 30 においても選択方式による優位性の順位は同様であるものの、同じ BER を達成するための所要受信電力の差が小さくなっています。これは Position 30 は受信アンテナと送信アンテナが互いに見通し外であるため、受信アンテナの各素子には周囲環境によって散乱を受けた送信電力がより一様に受信されるため、選択方式間の差異が小さくなっているためだと考えられます。

図4-3-4には Position 1~30 までの各点における BER のすべての平均を示します。注目すべきは、本提案のアンテナ選択アルゴリズムによりその他のどの選択基準よりも良好な特性が得られている点です。結果として、提案選択方式は BER を基準とした場合、最良の選択方法よりもおおむね 1~3dB だけ受信電力を多く要することが分かりました。現在、この所要受信電力をなるべく小さくするための改良案を検討しています。

表4-3-1 アンテナ選択アルゴリズムシミュレーションの際の条件一覧

Number of transmitters	4
Number of receivers	4
Number of polarization antennas	3
Modulation	QPSK-OFDM
Number of data subcarriers	52 (including 4 pilot subcarriers)
FFT/Guard interval length	64/16 samples
Interleave size	12x8
Encoding	Convolution (R=1/2, K=7)
Decoding	Viterbi Algorithm
Code rate	1/2
Constraint length	7

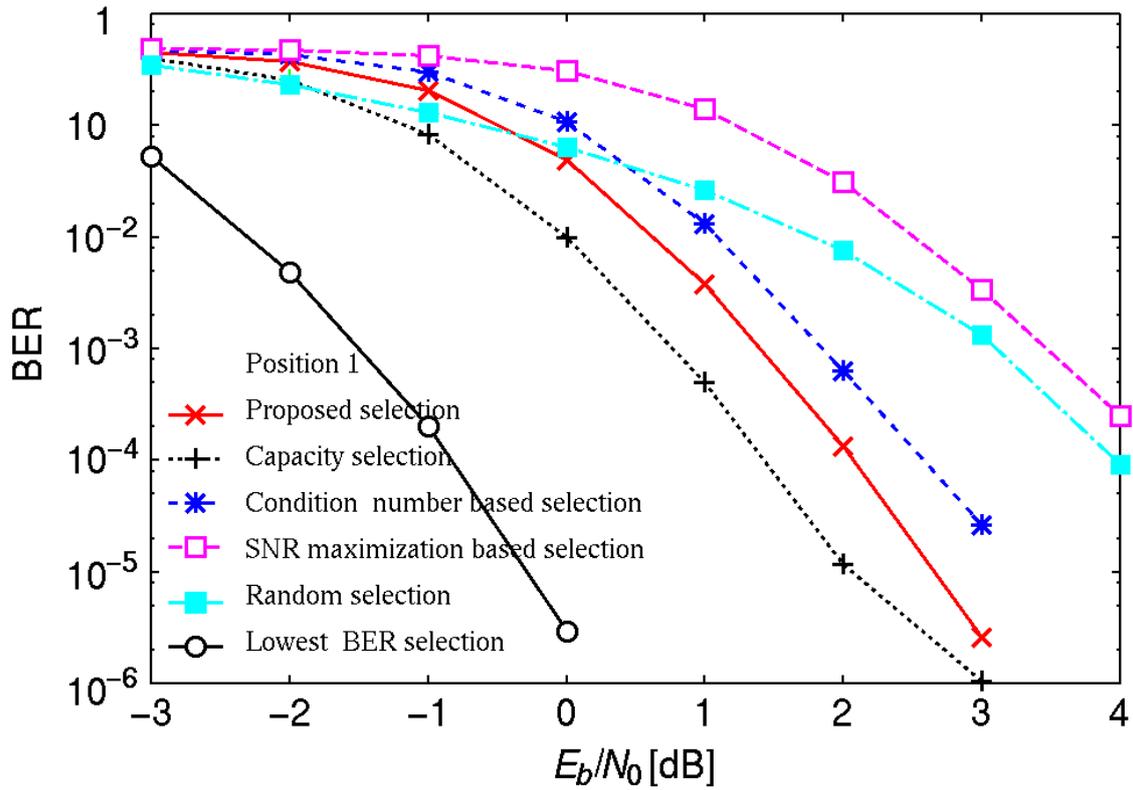


図 4-3-1 Position 1 における、各アンテナ選択基準による BER の違い

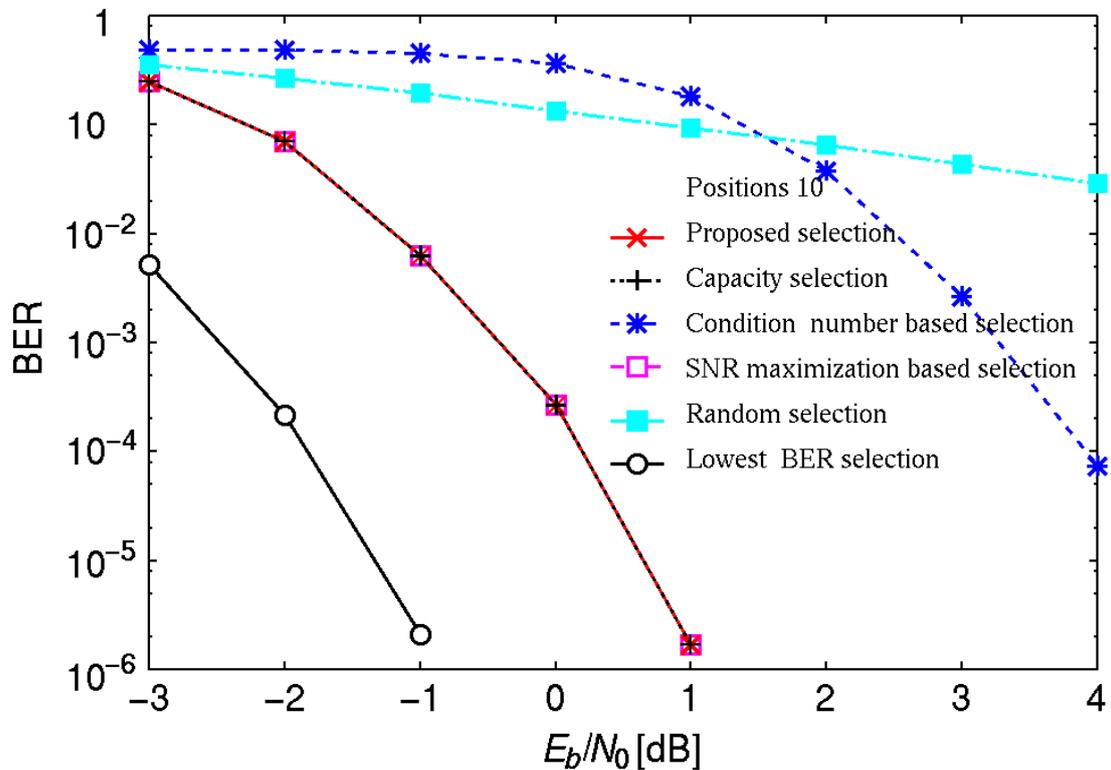


図 4-3-2 Position 10 における、各アンテナ選択基準による BER の違い

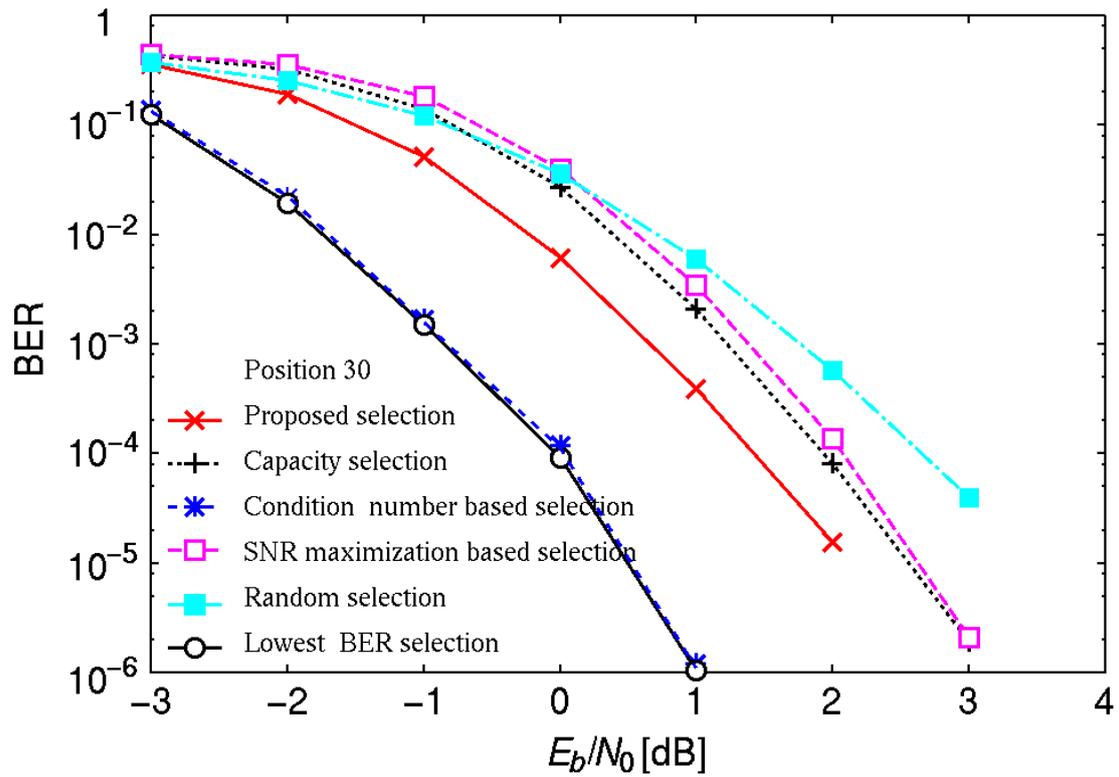


図 4-3-3 Position 30 における、各アンテナ選択基準による BER の違い

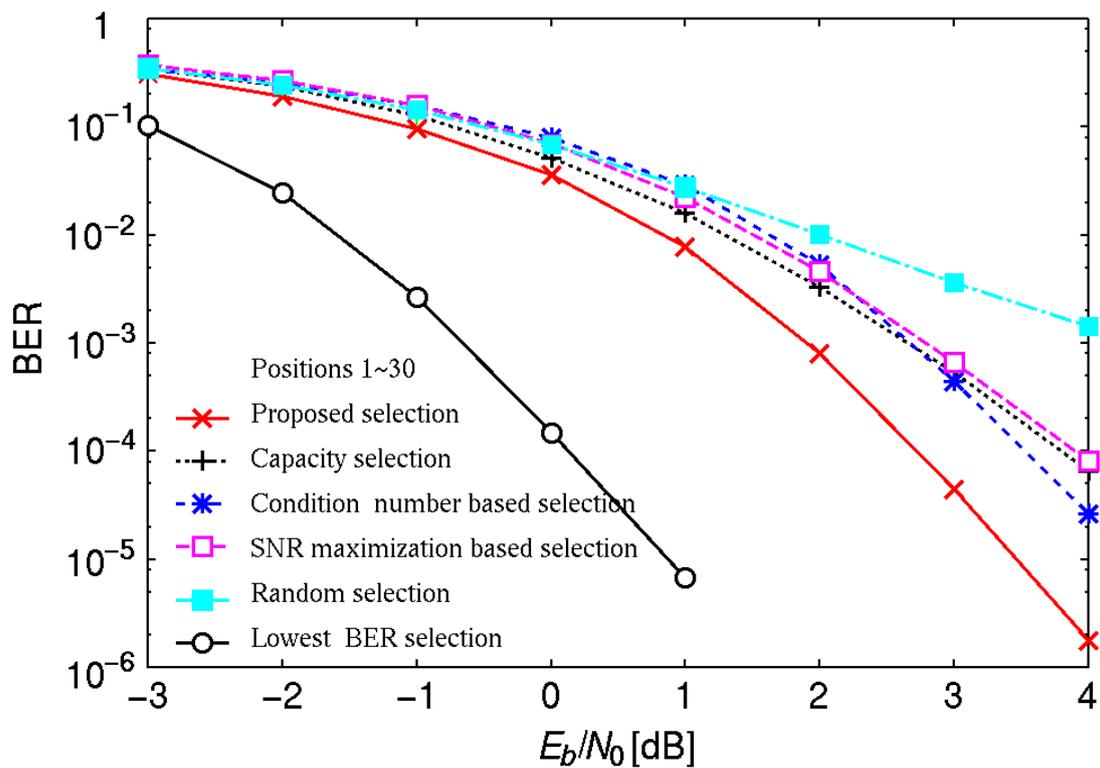


図 4-3-4 Position 1~30 までの、各アンテナ選択基準による BER の平均

4-3-3 まとめと今後の課題

平成17年度は前項4-2cで実施した「偏波選択型MIMOアンテナシステム」について、アンテナ選択のためのアルゴリズムを提案し、シミュレーションによる検討を行いました。この提案選択方法においては電力と相関係数の比を評価関数として、これを最小にするアルゴリズムを用いていますが、今回の測定環境下で取得したデータをもとにBERをシミュレーションした結果の平均値を取ると、SNR最大基準、状態数最小基準、ランダム基準、および容量最大基準のすべてに勝る良好な特性が得られることを確認しました。今後さらに最良値を目指して改善の余地があります。アプローチとして、アンテナ選択の場合の数が今回のものより少ない、簡単な構成の2x2MIMOアンテナシステムによる検討を行う予定です。

4-4 副課題エ) 実証実験

4-4-1 テーマの位置づけ

無線信号伝送システムを開発し、前記の副課題アとイで研究開発される RF-MEMS 可変キャパシタ/移相器応用適応アンテナを受信アンテナに用いて、前記の副課題ウで研究開発される適応制御方式・アルゴリズムを受信装置のデジタル信号処理部に実装し、伝送ビット誤り率、受信コンスタレーション、伝送動画像を測定し、従来アンテナとの性能差を比較するのが本テーマの目的です。

4-4-2 a 狭帯域伝送システムによる実証実験の実施内容

平成 16 年度までに本システムを用いた測定により、上記 4-2 c 項「RF-MEMS 可変移相器を用いた適応アンテナ」で述べた結果を得ました。現在可変移相器を用いた適応アンテナの発展形として、3 偏波切り替え型 MIMO アンテナシステムの開発も併せて行っています。平成 18 年度は、この MIMO システムのリアルタイムでの評価のために受信信号処理系の FPGA 化を行います。この作業はハードウェアの特性を考慮したノウハウの蓄積が必要です。最終的に測定条件を変化させたときの SNR 改善率がリアルタイムで測定できることが目標です。

4-4-2 b 広帯域伝送システムによる実証実験の実施内容

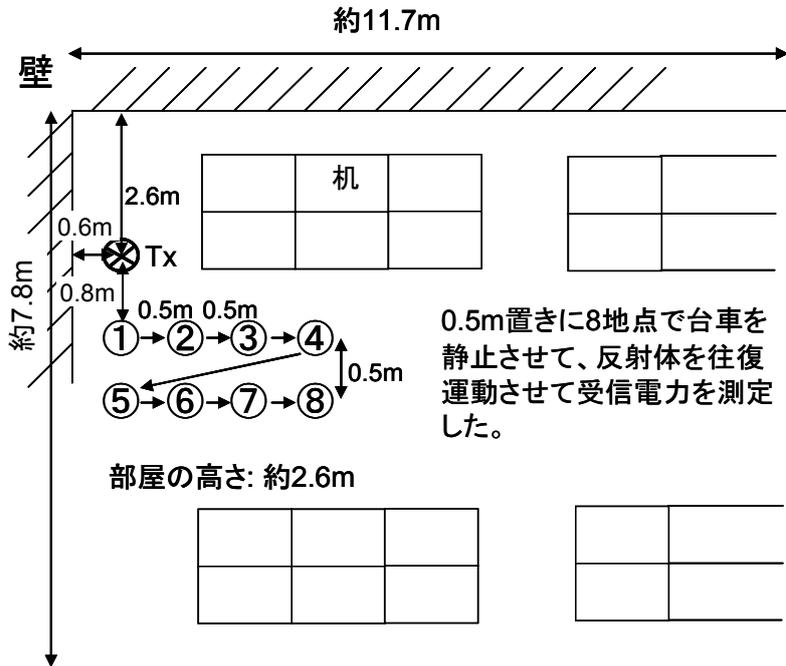
平成 17 年度は 4.5GHz 広帯域伝送システムの実験局免許を取得し、主に室内において、アンテナ自動整合装置を用いた 1 アンテナ受信系における受信電力改善効果を測定しました。4-2 a 項「RF-MEMS 可変キャパシタを用いたアンテナ自動整合回路」で行ったのと同様の測定を、100MHz の帯域を持つ信号を用いて実施しました。図 4-4-1 に測定環境の見取り図を示します。机が図のように存在するオフィス環境を模擬しています。図中各地点において図 4-2 a-4 で用いた装置を動作させながら 100 ポイントのデータを取得し、その後台車の位置をプラスマイナス 5mm 程度の範囲内でわずかに移動し、さらに 100 ポイントのデータを取得します。このように、同一地点で 3 回の測定を行います。図 4-4-2 に測定受信電力の CDF を示します。これより、今回の測定環境下でのおおよそすべての受信電力レベルの範囲にわたって、アンテナ自動整合回路を用いた場合に、固定の整合回路を用いた場合と比較して 0~0.5dB 程度の受信電力改善が得られました。4-2 a で行った実験と比較して、受信電力改善の度合いが小さいですが、これが測定環境の違いによるものなのか、100MHz の広帯域信号の特性に起因するものなのかを現在調査中です。

4-4-3 まとめと今後の課題

現在狭帯域伝送実験システムの信号処理高速化および MIMO 化を進めています。信号処理速度を向上させるため、受信ベースバンド信号処理部分の FPGA 化に取り組むと同時に、MIMO のアルゴリズムを組み込んでいます。作業量を考慮しながら、どの程度まで無線 LAN 規格 802.11n に準拠した信号フォーマットを用いたシステムにするかを検討しています。

また広帯域測定については、アンテナ自動整合装置によるフィールド実験を行う予定です。さまざまな環境下において、平均して 1~2dB の受信電力改善が得られることを目標とします。

送信アンテナ: コリニアアンテナ
 (fc=4.5GHz, 4dBm, アンテナ高約219cm)



- ・ 反射体の往復運動の周期：約 2.0 sec
- ・ データ取得は 1 地点毎におよそ 100msec 間隔で 100 ポイント取得
- ・ データ取得用スペアナの設定(Agilent E4440A): 中心周波数: 4.5GHz, RBW: 1.5MHz (100MHz 帯域時), 300kHz(20MHz 帯域時), sweep time: 10ms, average: 0 回

図 4 - 4 - 1 測定環境の平面見取り図

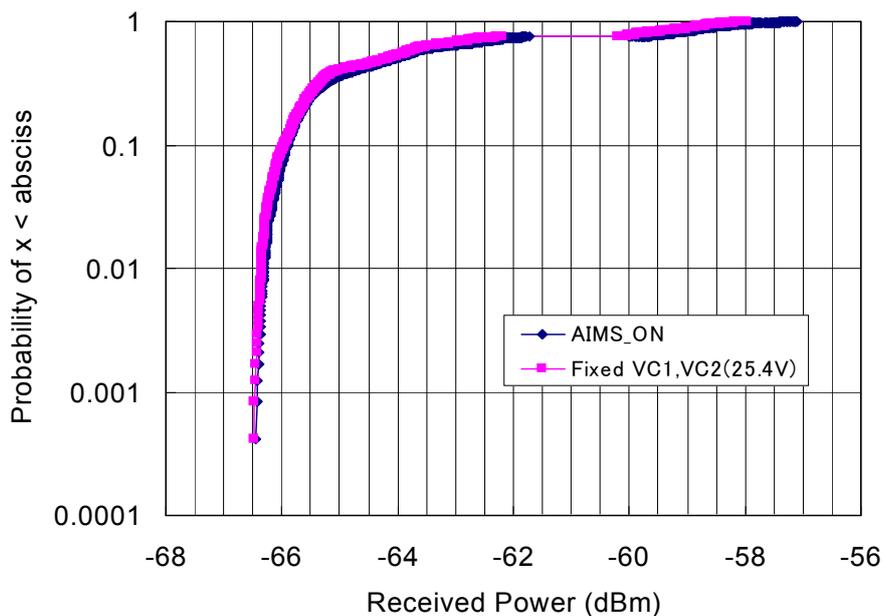


図 4 - 4 - 2 受信電力の CDF 値。同一地点で 3 回の測定を行った

4-5 総括

研究開発の進捗状況はおおむね良好です。以下に概要を記載します。

「副課題ア) RF-MEMS デバイスの研究開発」においては、MEMS デバイスの Q 値が受託時の目標値とはまだ差があるものの、現時点での Q 値を 30%程度改善すれば、パッケージありの状態でも 2.45GHz においては実用上問題ない性能になります。その他 MEMS スイッチも、実用上問題のない性能が歩留まり良く再現される体制が整いつつありますので、これを利用した MEMS 可変移相器の製造計画も進みつつあり、いずれも委託研究期間内に性能の実証を終える予定です。

「副課題イ) 適応アンテナの研究開発」においては、「4-2d 電波伝搬測定」が本格的に始まり、有用なデータが取得されています。最終的には精度の良い電波伝搬環境のデータ化およびモデル化が目標です。その他のサブテーマについても基本的なシステムの構成は確立し、その理論的な有用性が確認されておりますので、最終年度は実証実験による成果を出すための洗練化の段階に入ります。

「副課題ウ) 適応アンテナの制御方式・アルゴリズムの研究開発」については、偏波選択型 MIMO アンテナに適用可能な効果的なアルゴリズムが提案されました。さらに性能向上を図っている段階です。

「副課題エ) 実証実験」についても、現在成果を出すための調整段階であると言えます。狭帯域伝送システムを用いた MIMO 測定が予定されておりますが、アルゴリズムの実装に向けて検討を行っている段階です。また広帯域システムを用いた測定についても、無線局免許、機材ともに準備が整ったことから、現在フィールド測定に向けた検討を進めている段階です。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

- [17-1] 上田政則, 上田知史, 「無線通信用 RF-MEMS デバイス」(「雑誌 Fujitsu」記事) .
- [17-2] Y. Nakaya, A. Honda, I. Ida, Y. Oishi, and S. Hara, “Performance of an RF adaptive array antenna for WLAN user client,” WPMC 2005, Aalborg, Denmark, Sept. 2005, pp. 411 – 415.
- [17-3] 井田, 大石, 高田, ”移動機用アンテナ自動整合装置,” 信学技報 SR 研究会, vol. 105, no. 217, pp.143 – 146, 2005 年 7 月.
- [17-4] 井田, 大石, 高田, ”アンテナ自動整合装置の受信アンテナへの応用,” 信学ソ大, B-1-200, 2005 年 9 月.
- [17-5] チャン, 原, 中谷, 井田, 大石, ”5GHz 帯無線 LAN システムにおける 2 素子位相制御型端末用 RF 適応アンテナの基礎実験,” 信学ソ大, B-5-35, 2005 年 9 月.
- [17-6] 三野, チャン, ジャ, 原, 中谷, 井田, 大石, ”5GHz 帯 2×2 MIMO-OFDM における送信アンテナ間隔に対するチャンネル相関特性についての実験的検討,” 信学ソ大, B-5-19, 2005 年 9 月.
- [17-7] Landmann, 高田, ”On the plane wave assumption in indoor channel modeling,” 信学ソ大, B-1-207, 2005 年 9 月.
- [17-8] Tuan, Jia, Hara, Nakaya, Ida, and Oishi, “Performance of phased array antenna with RF-MEMS phase shifters in real environments,” The 2nd IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS 2005), Sapporo, Japan, Aug. 2005, pp. 11 – 15.
- [17-9] Tanaka, Takada, Ida, and Oishi, “Performance evaluation for RF-combining diversity antenna configured with variable capacitors,” IEICE Transactions on Electronics, E89-C, no. 4, pp. 488 – 494, April 2006.
- [17-10] 島内, 今井, 中谷, 上田知史, 佐藤, グエン, 佐脇, “クロスメンブレン型 RF 帯用 MEMS 可変キャパシタの開発,” 第 22 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム (電気学会 E 部門), 東京, 2005 年 10 月.
- [17-11] 富士通, 東工大, 阪大, “新世代移動機用適応アンテナシステムに関する研究開発,” CEATEC 2005, 幕張メッセ, 2005 年 10 月.
- [17-12] 東工大, 富士通, “RF processing adaptive array antenna configured with variable capacitors,” MWE 2005, パシフィコ横浜, 2005 年 11 月.
- [17-13] 東工大, 富士通, “Double directional channel characterization,” MWE2005, パシフィコ横浜, 2005 年 11 月.
- [17-14] Nakaya, Ida, Oishi, and Hara, “Measured capacity evaluation of indoor office MIMO systems using receive antenna selection,” The IEEE 63rd Vehicular Technology Conference (VTC-2006 Spring), Melbourne, Australia, May 2006.
- [17-15] クリアンサック, 高田, 中谷, 井田, 大石, “Verification of Kronecker MIMO channel model in a MLOS macrocellular environment,” 信学総大, B-1-233, 2006 年 3 月.
- [17-16] 本田, 中谷, 井田, 横尾, 大石, 高田, 原, “アンテナ選択に RF スイッチを用いた端末用 MIMO システムの特性,” 信学総大, B-1-232, 2006 年 3 月.
- [17-17] 中谷忠司, 「単結晶シリコンカンチレバー型スイッチ」, (書籍「高周波化時代の RF-MEMS 技術の開発応用」), シーエムシー出版, 2006 年 3 月.

