

ビーム/ヌル同時ステアリング方式を用いた時空等化器

広帯域移動通信を実現するためには、符号間干渉、同一チャネル干渉の増大、高周波数化に起因する伝搬損の増大という課題を克服する必要がある。これらの課題を解決する技術の一つとして時空等化がある。

今回、空間と時間の信号処理を別々に行うことにより、演算量を削減できるビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器について検討した。本装置を用いた送受信機を製作し、フィールド実験により有効性を確認したので報告する。

とみきと 富里 繁 三木 信彦 浅井 孝浩 松本 正

1. まえがき

近年、マルチメディア移動通信の実現へ向けて、数10Mbit/sの情報伝送速度を目標とした、広帯域移動通信が検討されている[1]。

このような広帯域移動通信では、遅延時間が数10シンボルにもおよぶ遅延波が到来するため、符号間干渉の影響が大きな問題となる。また、周波数利用効率の向上という点では、同一チャネル干渉の軽減が重要となる。さらに、今後、帯域確保という点から使用する周波数が高くなることが予想されるが、その場合、伝搬損の増大に対する補償技術が必要となる。

これらの課題を克服する技術のひとつとして、空間的な信号処理を行うアダプティブアレーアンテナ（AAA：Adaptive Array Antenna）と、時間的な信号処理を行う適応等化器を融合させた時空等化器がある[2]。

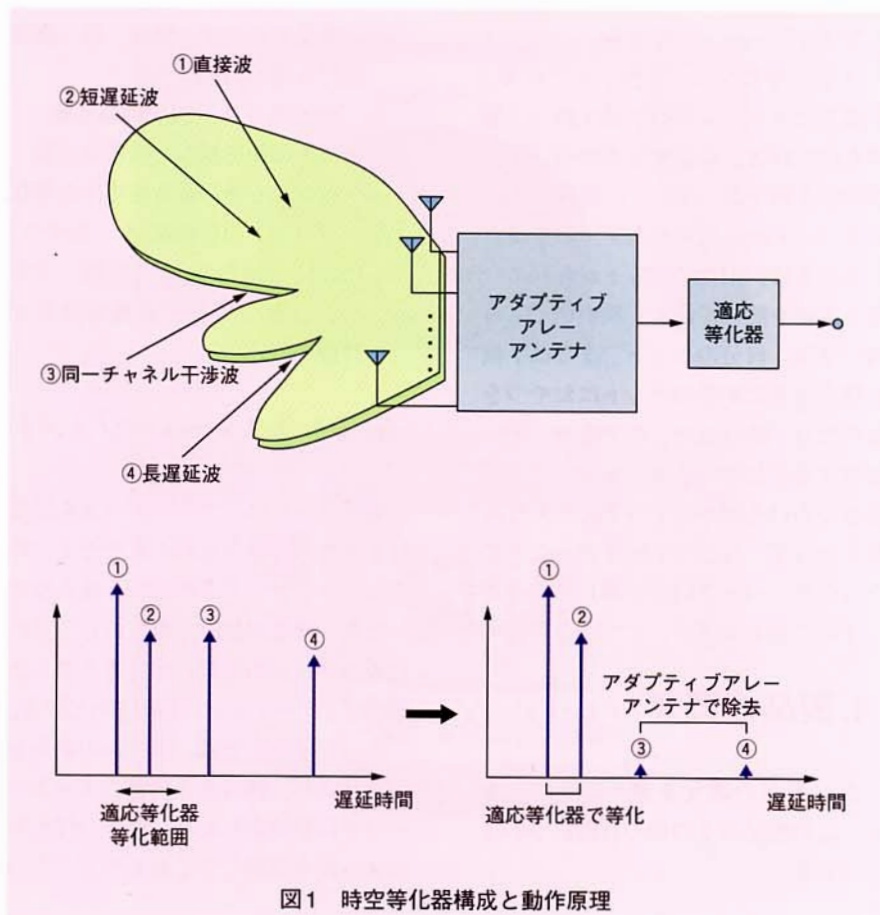
この時空等化器の構成、および動作原理を図1に示す。図1に示されるように、時空等化器は、空間等化を行うAAAの後段に時間等化を行う適応等化器を接続したもので、まず、前段のAAAにより同一チャネル干渉と、適応等化器の等化範囲を超えるような長遅延波を除去する。次に、AAA後段の適応等化器により、等化可能な遅延時間

内の遅延波を等化する。この適応等化器の動作により、AAAで除去する干渉波数を低減するとともに、パスダイバシティ効果を得ることができる。

このように、時空等化器では、AAAと適応等化器がそれぞれ役割を適切に分担することにより、単体で動作させる場合と比較して、大幅な特性改善効

果が期待できる。

時空等化器はその信号処理方法の違いにより、一括処理型[2]と分離処理型[3][4]に分けられる。一括処理型は、空間、時間の信号処理を同時に行う方式で、最適な受信特性を得ることができるが、制御パラメータ数が多く、演算量が多くなるという問題がある。一



方、分離処理型は、信号処理を分けて行う方式である。このため、一括処理型と比較して演算量を少なくすることができ、ハードウェア化が容易であるという特徴がある。

このような分離処理型時空等化器の中に、ビーム/ヌル同時ステアリング方式[5]を用いるAAAと、DDFSE (Delayed Decision Feedback Sequence Estimation) 型適応等化器[6]とを備えたビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器がある[7]。ビーム/ヌル同時ステアリング方式は、ビームステアリングによる希望波方向への鋭いビーム形成と、ヌルステアリングによる干渉波方向への深いヌル形成を特徴としている。これにより受信電力の確保と、干渉波の効果的な除去が可能となる。また、DDFSEは最尤系列推定MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation) を行うビタビアルゴリズムにおいて状態数を削減する手段で、現実的な演算量で比較的長い遅延時間の遅延波を等化できるため、ハードウェア化には適している。

ドコモでは、このような特徴を持つビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器を用いた送受信装置を試作し、この試作装置を用いてフィールド実験を行った。そこで、以下では、まずビ

ーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器の構成および動作原理を示し、次に試作装置の概要を述べる。最後にフィールド実験結果について示す。

2. 構成と動作原理

試作したビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器は、ビーム/ヌル同時ステアリング方式に基づくAAAと、DDFSE型適応等化器から構成されている。以下では、各々の構成およびその動作を示す。

2.1 ビーム/ヌル同時ステアリング方式

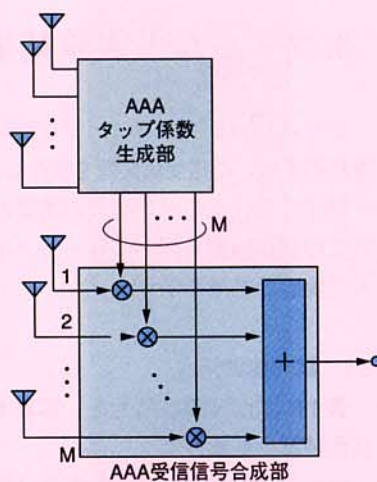
ビーム/ヌル同時ステアリング方式を用いたAAAでは、受信信号の到来方向を推定し、その推定結果に基づいてAAAのビームパターンを生成している。また、AAAビームパターン生成時には、全体のアンテナ素子をビームステアリング用とヌルステアリング用に仮想的に分割し、それぞれ別々にアンテナ素子のタップ係数を計算して、その後でこれらのタップ係数を合成することにより、実際に送受信に用いるビームパターンを生成している。このように分割してビームパターンを生成することにより、一括してビームパターンを生成する場合と比較して演算量

を削減できる。

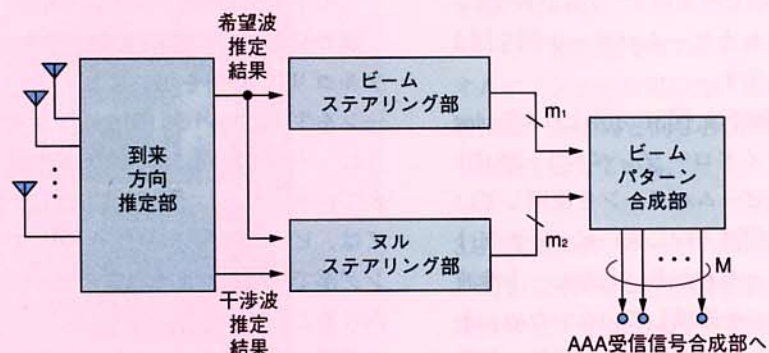
図2にビーム/ヌル同時ステアリングAAAの構成について示す。AAAタップ係数生成部とAAA受信信号合成部から成り、AAAタップ係数生成部は、さらに到来方向推定部とビームステアリング部、ヌルステアリング部、ビームパターン合成部に分けることができる。また、図3にビーム/ヌル同時ステアリングAAAによるビームパターン生成例を示す。図3では、矢印で示すような方向から希望波（実線）、および干渉波2波（点線）が受信される場合を仮定している。

図2のAAAタップ係数生成部では、まず、到来方向推定部で受信信号の到来方向を到来方向推定アルゴリズムにより推定する。試作装置では、MUSIC (Multiple Signal Classification) アルゴリズム[8]を用いている。次に、この推定結果を用いてビームステアリング部、ヌルステアリング部、およびビームパターン合成部においてAAAビームパターンを生成する。

ここでは全体のアンテナ素子数を M とし、ビームステアリング用素子数を m_1 、ヌルステアリング用素子数を m_2 として説明する。ビームステアリング部では、あらかじめ鋭いビームを持つ m_1 素子のビームパターン（ビーム方



(a) 基本構成



(b) AAAタップ係数生成部

AAA : Adaptive Array Antenna

図2 ビーム/ヌルステアリング方式

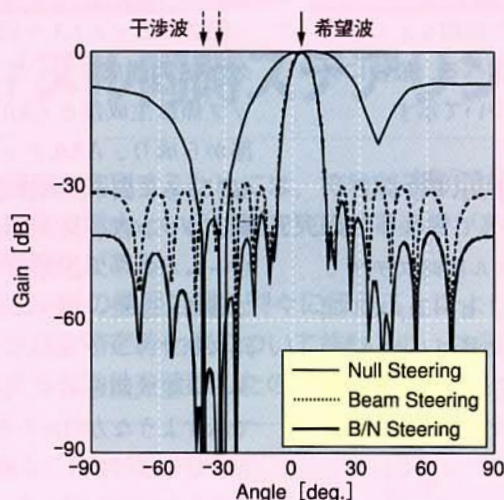
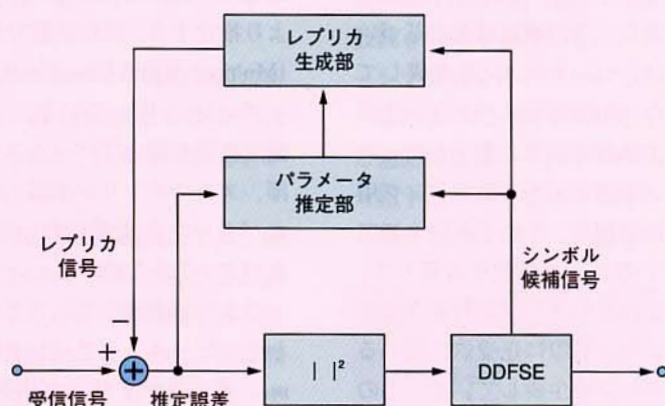


図3 ビームパターン生成例



DDFSE : Delayed Decision Feedback Sequence Estimation

図4 DDFSE型等化器構成

向：0°）を生成しておき、このビームパターンから、希望波方向にビームが向くようなビームパターンを計算する。

生成されたビームパターン例を図3に点線で示す。

試作装置では、図3に示すようなTaylor分布（サイドローブレベル：-30dB）に基づくビームパターンを使用しているが、希望波方向に鋭いビームを向けていることがわかる。ただし、干渉波方向にヌルを形成していないため、干渉波に対しては固定的な減衰量しか得られない。

一方、ヌルステアリング部では、希望波、および干渉波の到来方向推定結果を用いて希望波方向にビームが向

き、干渉波方向にヌルが向くような m_2 素子のビームパターンを生成する。

この生成例を図3に細実線で示す。

試作装置では、Howell-Applebaumアルゴリズム[9]を用いてビームパターンを生成している。図から分かるように、干渉波方向に深いヌルが形成されている。ただし、希望波方向については、ビームは向くがビームステアリング部で生成したような鋭いビームを向けることはできない。

最後にこれらの m_1 素子、および m_2 素子のタップ係数をビームパターン合成部において畳み込み演算により合成し、 M 素子AAAビームパターンを生成する。

この生成例を図3に太線で示す。この図から分かるように、希望波方向に鋭いビームを向け、かつ干渉波方向に深いヌルを向けている。

AAA受信信号合成部では、AAAタップ係数生成部が算出したAAA各素子のタップ係数を、各々の受信信号に複素乗算し、これらを加算することによりAAA合成信号を出力する。

2.2 DDFSE

DDFSEは、MLSEを行うビタビアルゴリズムにおいて、状態数を削減した手法である。レプリカ生成器におけるタップについて、すべての送信シンボル候補に基づく状態数を持つタップと、それらのタップの状態に対応するパス履歴をパスメモリから読み出し、そのパス履歴から決まるシンボル候補を固定的に用いるタップに分割することにより、ビタビアルゴリズムの状態数を減らし、その結果、全体の演算量を現実的な値まで削減している。

図4にDDFSE型等化器の構成を示す。MLSE型等化器[10]と同様な構成で、DDFSE部が出力するシンボル候補からレプリカ信号を生成し、受信信号（AAA出力信号）とレプリカ信号の比較結果に基づいて伝送路推定およびビタビアルゴリズムの処理を行っている。

3. フィールド実験結果

ビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器を用いた送受信装置を試作した。

以下では、この試作装置の概要およびこの試作装置を用いて行ったフィールド実験の結果を示す。

3.1 試作機諸元

表1に試作装置の諸元を、写真1に試作装置を示す。

アクセス方式として時分割多元接続方式（TDMA：Time Division Multiple Access）/FDD（Frequency Division Duplex）を、変調方式としてGMSK

表1 試作機諸元

アクセス方式	TDMA/FDD
変調方式	GMSK
送受信周波数	5GHz帯
伝送速度	1.5Mbit/s×4
基地局送受信用アンテナ素子数	19素子
到来方向推定用アンテナ素子数	8素子
移動局アンテナ	オムニアンテナ
適応等化器	8状態15タップDDFSE

DDFSE: Delayed Decision Feedback Sequence Estimation

FDD: Frequency Division Duplex

GMSK: Gaussian-Filtered Minimum Shift Keying

TDMA: Time Division Multiple Access (時分割多元接続方式)



(a) アンテナ部



(b) ビーム制御部



(c) 適応等化部

写真1 試作装置写真

(Gaussian-Filtered Minimum Shift Keying) を用いている。送受信周波数は5GHz帯で伝送速度は1.5Mbit/s×4チャンネルである。

基地局側の受信機として、ビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器を用いている。基地局送受信アンテナの素子数 M は19であり、ビームステアリング用素子数 m_1 を16、およびヌルステアリング用素子数 m_2 を4とした。

ビームステアリングにおいては、Taylor分布に基づくビームパターンを用いており、ヌルステアリング用アルゴリズムとしては、Howell-Applebaumアルゴリズムを用いた。また、到来方向推定用に別途8素子アレーアンテナを有し、到来方向推定用アルゴリズムとしてはMUSICを用いている。

本試作装置では、最も受信電力が大きいパスを希望波として選択し、この方向にビームを向けるようなビームパターンを生成する。

DDFSE型適応等化器のタップ数は15とした。ただし、すべての状態を考慮するタップは4タップで、残りの11タップはパスメモリからのフィードバックのみである。このため、遅延時間が $3T$ (T :シンボル周期) 以内であれば、MLSE型と同等の受信特性が得られるとともに、遅延時間が $4T \sim 14T$ までの遅延波の影響を除去できる。また、本試作装置には、等化器のタップ係数から遅延スプレッドを求める機能を備えている。

一方、移動局用のアンテナとしてはオムニアンテナを用いた。また、受信機には、基地局と同じDDFSE型適応等化器を備えている。

3.2 実験条件

図5に実験場所の地図を示す。実験場所はドコモR&Dセンタ周辺であり、基地局アンテナをドコモR&Dセンタの屋上に設置した。基地局アンテナの地上からの高さは約20mである。到来方向を図5に示すように定義した。

実験方法としては、まず基本性能を



図5 測定場所

評価するため移動局を静止して実験を行い、次に走行実験を行った。また、実験ではビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器の受信特性を評価するため、上り回線のBER (Bit Error Rate) 特性を評価した。

本実験では、干渉局は設定しておらず、ビームパターン生成時のヌルは希望局信号の遅延波に向くことになる。

3.3 静止実験

図5のA、B、およびC地点において、移動局を静止させた状態で受信BER特性を評価した。

以下に結果を示す。

(1) A地点

A地点は基地局から見通しがある。また、到来方向推定結果から到来波が1波であることが確認された。さらに、適応等化器のタップ係数から求めた遅延スプレッドは、 $1T$ 以下であった。このことから、静特性と同等の受信特性が得られることが予想される。

そこで、試作装置の基本動作と性能を確認するため、このA地点で受信BER特性を評価することとした。

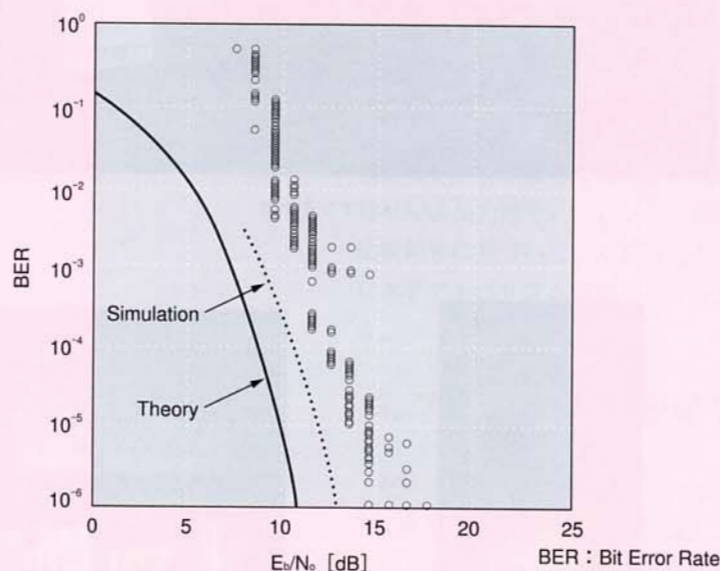


図6 A地点でのBER特性

この位置でのフィールド実験によるBER特性を図6に示す。

横軸の受信 E_b/N_0 は、AAA各素子の合成後の値を用いた。BERについては0.5秒間の平均BERを取得しており、その結果を図6に○印で示した。また比較のため、GMSK変調同期検波時の静特性理論曲線を実線で、計算機シ

ミュレーション結果を点線で示す。図6に示すように、フィールド実験による実測値は、 $BER = 10^{-5}$ の点で、計算機シミュレーションと比較して、2dB以下の劣化であり、良好な動作が確認できた。

(2) B地点

B地点は基地局から見て見通し外と

なる。到来方向推定結果から到来波は3波であることが分かった。

ここではAAAの効果を確認するため、基地局の受信アンテナをオムニアンテナとした場合についても評価を行い比較した。

まず、到来方向推定により得られたMUSICスペクトラムを図7に点線で示す。図から、 -13° 、 11° 、 30° の方向から3波受信されていることがわか

る。到来方向推定により推定された受信電力は、 -13° 方向の到来波が最大であった。このため、 -13° 方向を希望波としてビームを向け、その他の2波を干渉波としてヌルを向けるようなビームパターンを生成する。このときのビームパターンを図7に実線で示す。

次にこの地点でのBER特性を図8に示す。ビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器を用いた場合を●印で、

アンテナをオムニアンテナに変えた場合を○で示す。図8からビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器を用いることによりBER特性が大きく改善している。この理由は以下のとおりである。

オムニアンテナの場合、図7のMUSICスペクトラムに現れている3波がすべて受信されるため、遅延スプレッドが $3.5T$ という大きな値となる。本実験で用いているDDFSE型適応等化器では、MLSE型等化器と同等の特性が得られるのは $3T$ 遅延までであるため、このように遅延スプレッドが大きい場合には、受信特性が劣化することとなる。一方、ビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器を用いた場合、遅延スプレッドは $1T$ 以下となる。これは、AAAでビーム幅を絞ることでより大きな遅延を持つ受信波が除去されるからである。この結果、良好な特性が得られている。

以上のことから、AAAを用いることにより、遅延スプレッドを低減することができ、受信特性を改善できることが確認できた。

(3) C地点

C地点についても、基地局から見通し外となる。

この位置におけるBER特性を図9に示す。

ビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器を用いた場合を●で、適応等化器を用いない場合（AAAのみ使用）を○で示す。適応等化器タップ係数から求めたAAA出力の遅延スプレッドは、 $2.5T$ であった。この位置では、ほぼ同一方向から多数の遅延パスが到来することが到来方向推定と遅延プロファイル測定結果から分かった。このため、AAAを用いてビーム幅を絞るだけでは、遅延スプレッドを十分低減できず、AAAのみの場合には遅延パスの影響により受信特性が大幅に劣化する。一方、AAAだけでなく適応等化器も用いる時空等化器の場合、遅延パスも信号電力として取り込むことができる。

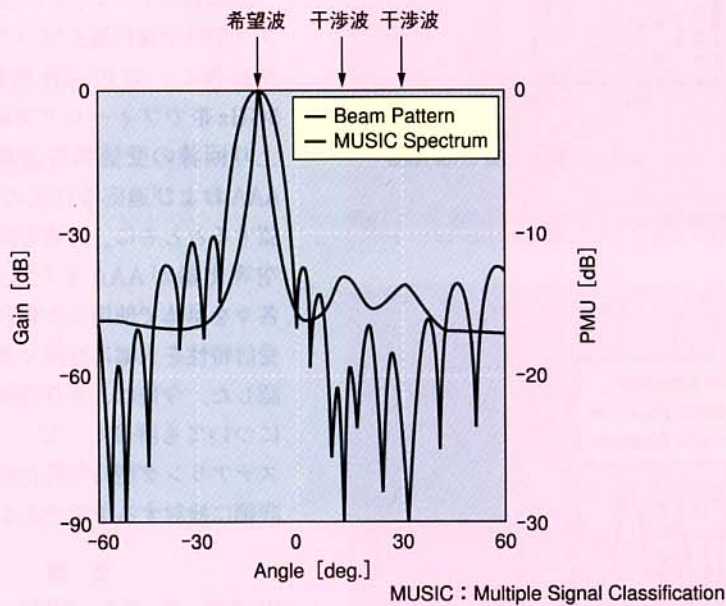


図7 B地点での到来方向推定結果とビームパターン

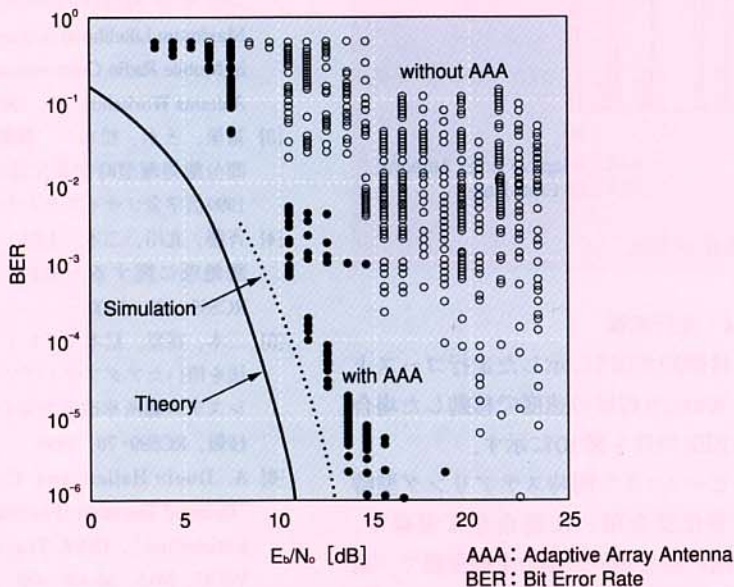


図8 B地点でのBER特性

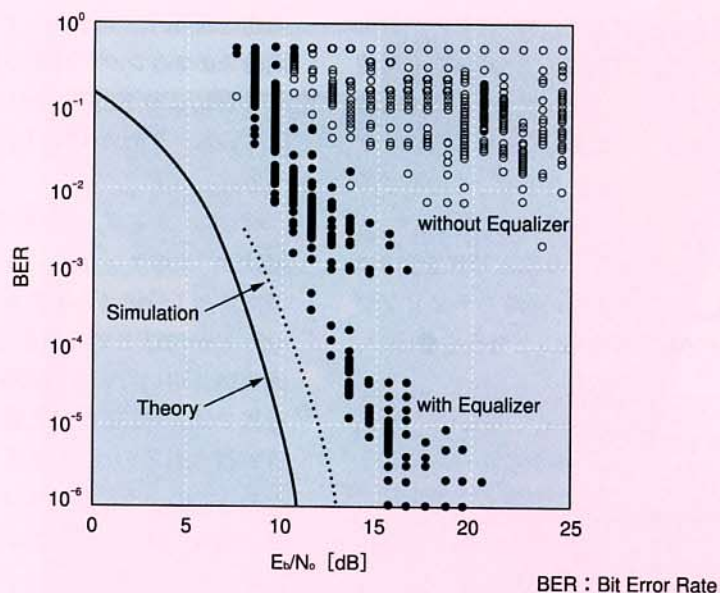


図9 C地点のBER特性

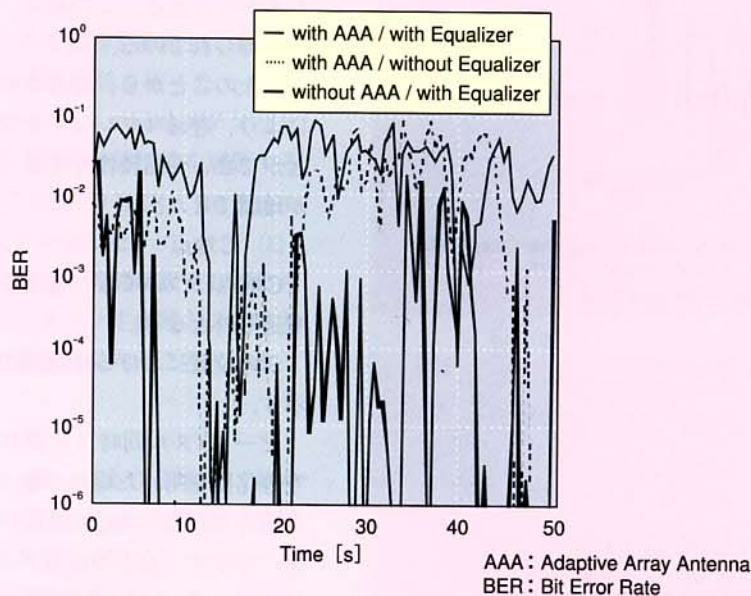


図10 走行実験によるBER特性

このため、大幅に受信特性が改善し、A地点とほぼ同等の受信特性を得ることができる。

以上のことから、同一方向から大きな遅延スプレッドを持つ遅延パスが到来する場合、AAAだけでなく適応等化器も併用することが非常に有効であることが確認できた。

3.4 走行実験

移動局が図5に示した走行コース上を30km/h程度の速度で移動した場合のBER特性を図10に示す。

ビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器を用いた場合を太実線で、AAAのみを用いた場合を細実線で、適応等化器のみを用いた場合を点線で示す。AAA、適応等化器、どちらか一方

のみを用いた場合には、BERが 10^{-2} より悪くなる場所が比較的多く見られるが、両者を併用することにより、ほとんどの点で、BERが 10^{-4} 以下となっていることが分かる。このように、時空等化器はAAAまたは適応等化器を単体で動作させるより、大幅にBERを改善できることが確認できた。

4. あとがき

基地局にビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器を用いた送受信装置を試作し、この試作装置を用いて5GHz帯でフィールド実験を行った。上り回線の受信特性評価結果から、AAAおよび適応等化器の有効性を確認するとともに、両者を融合させた時空等化器がAAAまたは適応等化器各々を単体で使用した場合と比較して受信特性を大幅に改善できることを確認した。今後は、下り回線の受信特性についても評価し、ビーム/ヌル同時ステアリング型時空等化器の有効性を詳細に検討する予定である。

文 献

- [1] 中嶋, 秦, 松本, 恵比根: “マイクロ波高速移動通信の検討”, 1998年信学会総合大会B-5-80.
- [2] K. Fukawa and T. Matsumoto: “A New Joint Array Signal Processing Structure and Maximum Likelihood Sequence Estimation in Mobile Radio Communications”, Smart Antenna Workshop '97, 1997.
- [3] 富里, 三木, 松本: “移動通信時間/空間分離処理型時空等化器の受信特性”, 1999年信学会ソサイエティ大会B-5-42.
- [4] 斉藤, 北川, 二木, 上杉: “時空等化分離処理に関する一検討”, 信学技報, RCS99-183, 2000.
- [5] 三木, 富里, 松本: “レイトレーシング法を用いたアダプティブアレーアンテナシステム場所率改善効果の推定”, 信学技報, RCS99-70, 1999.
- [6] A. Duel-Hallen and C. Heegard: “Delayed Decision-Feedback Sequence Estimation”, IEEE Trans. Commun., Vol.37, No.5, pp.428-436, May.1989.
- [7] 三木, 浅井, 富里, 松本: “ビーム/ヌル同時ステアリング方式を用いた時空等

- 化器の受信特性”, 信学技報, RCS2000-13, 2000.
- [8] R. O. Schmidt : “ Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation”, IEEE Trans. AP, Vol.AP-34, No.3, pp.276-280, 1986.
- [9] S. P. Applebaum : “Adaptive Arrays”, IEEE Trans.AP, Vol.AP-24, No.5, pp.585-598, 1976.
- [10] 府川, 鈴木 : “逐次最小二乗形最尤系列推定 (RLS-MLSE) —最尤推定理論の移動無線への応用—”, 信学論 (B-II), J76-B-II, No.4, pp.202-214, Apr.1993.