

## 到来波分離型アダプティブアレー受信システムに関する検討

志村友衣<sup>†</sup> 和田知久<sup>‡</sup>

<sup>† ‡</sup> 琉球大学工学部情報工学科 〒903-0129 沖縄県中頭郡西原町千原1番地

Email: <sup>†</sup> 23ban.yui@gmail.com <sup>‡</sup> wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

あらまし 2011年7月24日にアナログTV放送が終了し、地上デジタル放送へと置き換わりOFDM化が続いている。また、OFDMの高速移動体での利用が進んでおり、フェージング耐性向上が一層必要とされている。具体的には、マルチパス、妨害波の影響、移動時に発生するドップラーシフト等への対策が求められる。本論文では、2アンテナ構成のダイバーシティ受信装置を想定し、適応的に指向性を変化させ妨害波を抑圧し、所望波を増幅して受信するアダプティブアレーアンテナ技術と、Post-FFT型最大比合成(MRC)という技術を移動体向けデジタル放送受信装置に適応し、MMSE型アレーアンテナとMRCを用いたキャリアダイバーシティの2段構成のハイブリッド受信機の検討を行った。その結果、GI越えの遅延波が存在する状況で、64QAM変調方式において従来のPost-FFT型MRCによるOFDM受信機では実現できなかった、BERが $10^{-2.5}$ でfdのmax値が58Hzのドップラー周波数シフトに対応可能であることが確認された。これは、速度では約132km/hということになり、GI越え長遅延波の存在状況での高性能移動受信を実現できる。本稿ではこの検討内容を報告する。

キーワード OFDM, アダプティブアレー, レイリーフェージング, MRC, MMSE

### Study on Adaptive Array and Carrier Diversity Hybrid OFDM receiver for ISDB-T mobile reception

<sup>†</sup> Yui SHIMURA <sup>‡</sup> Tomohisa WADA

<sup>† ‡</sup> Department of Information Engineering, University of the Ryukyus 1 Senbaru Nishihara, Okinawa, 903-0129 Japan

Email: <sup>†</sup> 23ban.yui@gmail.com <sup>‡</sup> wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

**Abstract** This paper proposes an MMSE adaptive array antenna and MRC carrier diversity hybrid receiver for mobile OFDM digital TV receivers. By utilizing RLS algorithm for MMSE array antenna, long delayed signal more than Guard Interval (GI) can be suppressed. The RLS algorithm successfully demonstrated high speed array weight convergence less than 3 to 4 OFDM symbols. By the combination of the multi-beam adaptive array antenna and carrier diversity, higher mobile reception performance such as more than 100km/h could be realized even under long delay more than GI condition. The detail design and simulation results are disclosed in this report.

**Keywords** OFDM, Adaptive Array, Rayleigh fading, MRC, MMSE

## 1 はじめに

アンテナで通信をする際、電磁波を送受信することになる。電磁波は空間を通過して伝わる為、決まったパイプを通

る訳ではなく無限に開かれた自由空間に放出されることとなる。無論電磁波エネルギーを生成するにはエネルギーが必要となり、不必要な方向へ放出されることはエネルギーの無駄となるだけでなく、他の通信への電波汚染として迷

惑を及ぼす可能性もある。よって、アンテナの性能を表す重要なパラメータの一つとして、電磁波の方向を制御する指向特性がある。無限に開かれた空間といっても、実際に通信をする環境は開かれた空間ではなく障害物が存在する。街中を移動する場合は周りがビルで囲まれていたり、遠くには山があるなど、陸上移動通信においては電波の伝搬経路が見通しになることはほとんどなく、障害物による反射、回折、散乱により電波の伝搬経路は複数（多重伝搬路）となる。つまり、送信時には1波であったものが到来時には遅延や減衰を含んだ物もあり複数波になるということである。それらのマルチパスの干渉により受信レベルが激しく変動することをマルチパスフェージングといい、デジタル通信においては、符号の誤り率特性が劣化する要因となる。更に、OFDMのような高速信号伝送時には信号の周波数が広帯域となるので各多重波に伝搬遅延時間差があると、信号の周波数成分は部分的に激しく減衰する周波数選択性フェージングとなる。

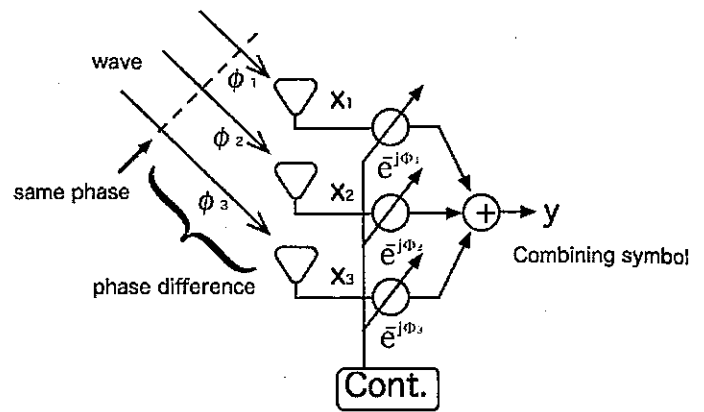


図 1: アダプティブアレイアンテナシステム

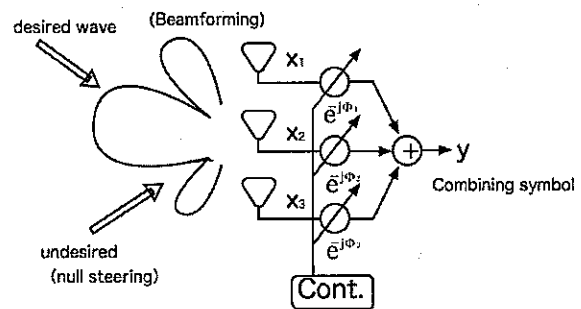


図 2: 重み係数による指向性制御

## 2 アダプティブアレイアンテナ

移動体通信でのフェージングによる受信信号電力の落ち込みはマルチパス波の重畳が原因であると先に述べた。受信信号電力が落ち込むと通信が途切れる事になるので、電力の変化を抑える必要がある。複数のアンテナを近距離（※本研究では波長の半分の距離）に並べ、各アンテナの受信信号に一定の相関を生じさせ、合成時の重み係数を調整することで指向性を形成することができるのがアレイアンテナである。（図 1）

また、移動通信においては環境が刻々と変化していく。その環境の変化と共に適応的に重み係数を制御することで、環境に合わせて指向性を制御することができる。このアダプティブアレイアンテナを用いると、所望信号を最大電力で受信しながら、同時に異なる方向から到来する干渉波を消すこともできる。（図 2）

## 3 OFDM 通信システム

移動体で放送波を受信する場合、多重波伝搬環境となりフェージングによる伝送品質の劣化が問題となる。その対策として遅延波と周波数利用効率の向上を両立した OFDM 伝送が広く用いられている。

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 通信システムとは、直交周波数多重分割方式と呼ばれる無線通信システムの一つであり、地上波デジタル放送の受信機にも採用されている。全ての送信信号に直交性を保持させることで、信号を重ねても受信機で FFT(高速フーリエ変換)によって分離させることが可能となっている。それにより、周波数領域を有効活用でき従来よりも多くの信号を送信することで、高速伝送が実現されている。また、遅延波による伝送品質の低下を防止する為に、シンボルとシンボルの間にガードインターバル (GI: Guard Interval) が挿入されている。

こうした利点はあるものの、マルチキャリア伝送であるので1つのサブキャリアあたりの帯域幅はシングルキャリア伝送に比べ狭く、その分移動に伴うドップラーシフトの影響を受け易い。

これらの対策として、先に述べたアダプティブアレーの適応指向性制御が用いられる。その代表的指導原理の1つとして最大比合成 (MRC) がある。本研究では、これの入力信号を従来通り受信波形そのものとしたものと、受信波形から所望波と干渉波を分離し、それを入力信号とした2通りのシミュレーションを行う。分離した到来信号を利用することで、従来よりも高速な移動体でのフェージング耐性向上を目指す。

以下の図3に従来法と提案法のブロック図を示す。

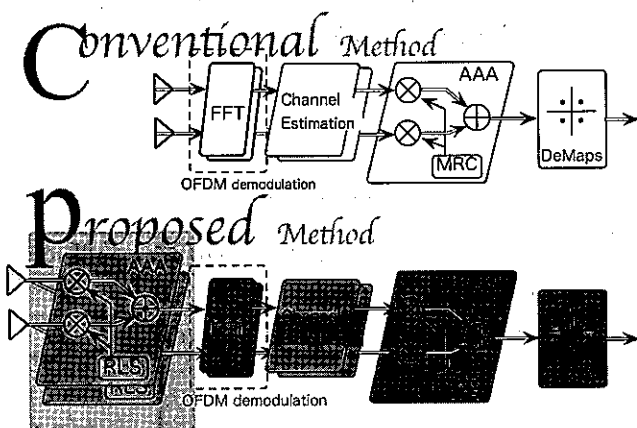


図3: 従来法と提案法のブロック図

## 4 MRC

最大比合成 (MRC:Maximal Ratio Combining) は、合成後のSNRを最大化することを指導原理の目的としている。各アンテナ素子で受信した信号の複素振幅を検出し、その複素共役を各アンテナ素子に対する重み係数として用いる。これにより受信信号の位相だけでなく、振幅に応じて重み係数の振幅も制御させることになり、SNRが最大となる。

最大比合成では、到来波が所望波のみである場合、確実に所望波の方向に指向性のメインビームを形成することができる。

今回は post-FFT 型 MRC なので、各素子毎に FFT を受け、サブキャリア毎に最大比合成を行う。つまり、有効シン

ボル長と同程度の遅延波まではすべて合成されるが、それ以外は無視されることとなる。これにより、超遅延波による信号品質の劣化は免れる。

## 5 RLS アルゴリズムによる所望波と干渉波の分離

提案手法の場合、前述した Post-FFT 型 MRC 機構の前に到来波の分離を行う必要がある。アダプティブアレー方式には種類があるが、MMSE はその中でも欲しい信号を強めるビームフォーミングの機能と、要らない信号を抑圧するマルチステアリングの両方の機能を備えた数少ない方式である。到来波の分離にはこの Pre-FFT 型 MMSE を利用しており、再帰的最小二乗法 (RLS:Recursive Least Square) で MMSE 動作を実現している。最小平均二乗誤差法 (MMSE:Minimum Mean Square Error) は、受信側で用意する参照信号と実際のアレーアンテナ出力の差 (誤差信号) を最小にすることで最適な重み係数 ( $w$ ) を決定するシステムである。実際の重み係数は、次式で示す誤差信号の二乗平均が小さくなるように決定される。[2]

$$E [|e(t)|^2] = E [|r(t) - W^H X(t)|^2]$$

この式を最小化する手法の1つとしてあるのが再帰的最小二乗法 (RLS:Recursive Least Square) である。過去の値と、収束速度や安定性を左右するステップサイズと呼ばれる定数で  $w$  推定を行う。このステップサイズを環境に応じて適応的に制御できるようにしたのが RLS である。

このアルゴリズムを実現するには所望波である参照信号が必要となる。

OFDM 伝送では、遅延対策としてガードインターバルが付加されることは先に述べた。GI は有効シンボル期間の末尾を有効シンボル期間の前にコピーしたものである。送信信号においては GI (Head-GI) と有効シンボル期間の末尾部分 (Tail-GI) は全く同一波形である。(図4) この所望波の Tail-GI を参照信号、Head-GI を受信信号とすることで、RLS により重み係数 ( $w$ ) を決定する。(図5) これにより、干渉波が抑圧され、所望波を抽出することができる。(※干渉波の抽出についても同様)

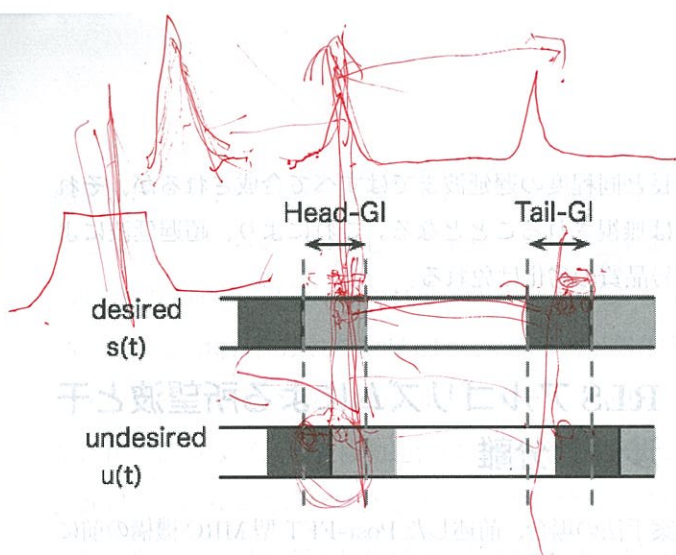


図 4: GI を利用する MMSE における信号抽出のタイミング

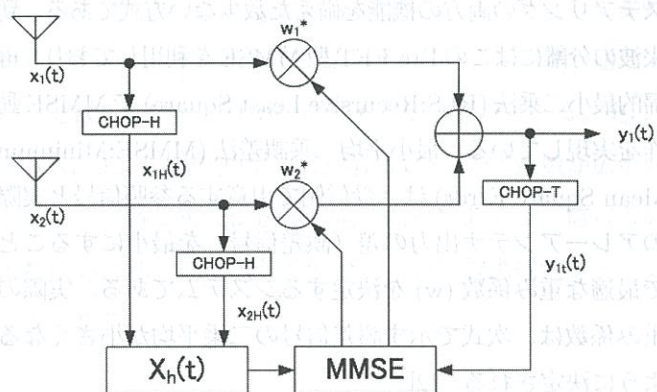


図 5: GI を利用する MMSE の構成

## 6 提案手法

今回の提案手法では、Pre-FFT 型 MMSE と Post-FFT 型 MRC の組合せによりお互いの欠点を補わせることで性能の向上を試みた。

Pre-FFT 型 MMSE だけでは合成時にノイズの大きい干渉波をその儘合成してしまうことによる劣化が問題となり、Post-FFT 型 MRC だけでは所望波と相関が無い強力な干渉波が来た時でも利得が大きい場合そちらを積極的に受信してしまい劣化することが問題となっていた。

しかし、MMSE を行い、干渉波と所望波を分離した後 MRC を行うことで、ノイズの多い方の波の合成は最小にし、乱れの余り無い…つまり所望波に近い波形をしている波からの利得を大きくするということが実現できると考えられる。

## 7 シミュレーション

本研究では Demap 後の結果を性能評価する。表 1 に MATLAB 上でのシミュレーション条件について示す。また、表 2 に到来波の条件、図 6 にその角度についても示した。

表 1: シミュレーション条件 (ISDB-T)

素子数/間隔	2 / 1/2 波長
変調方式	64QAM
有効シンボル長	1008 us
FFTwindow-size	8k (8192)
GI 長	1k (1024)
総キャリア数	5617
忘却係数	0.99
$\delta$	1000
イタレーション回数	10

表 2: 到来波

	遅延時間	DU 比	角度 [deg]
第一波 (直接波)	0 point	0.0 dB	60
第二波 (干渉波)	200,1200point	3.0 dB	-30

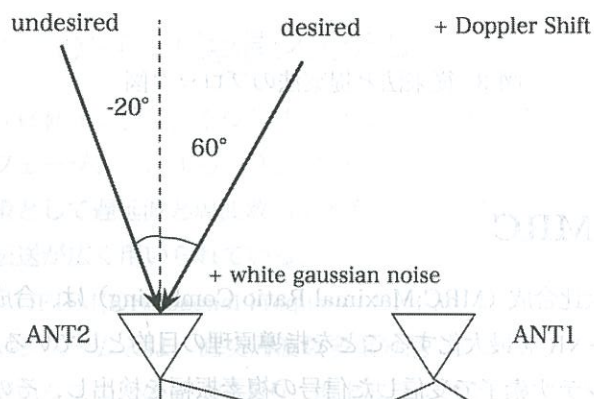


図 6: 到来波における角度

## 8 実験結果

まず、RLSによるWの収束具合を見る為にstatic環境下でもシミュレーションを行った。図7のように収束速度は速い。

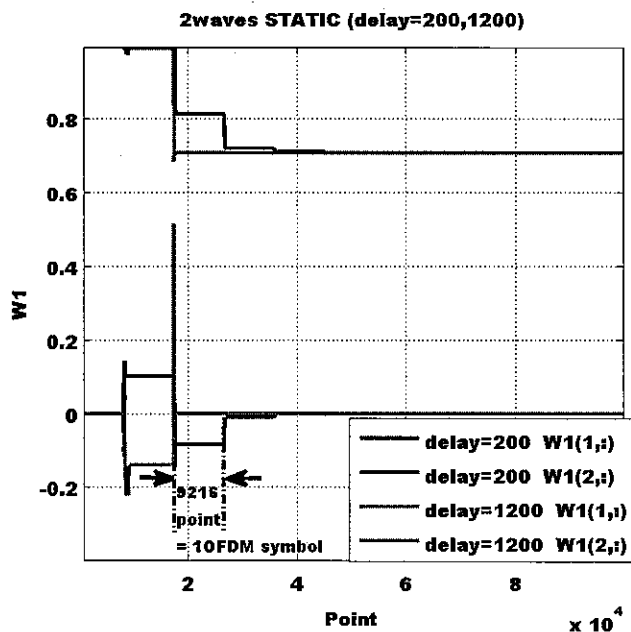


図7: STATIC環境下でのWの収束状況

一方、所望波と干渉波の2波レイリーフェージング環境下でも行った結果が図8である。これを見ても分かるように、多少揺れはあるものの、収束速度はドップラーシフトが上がっても変わり無いといえる。

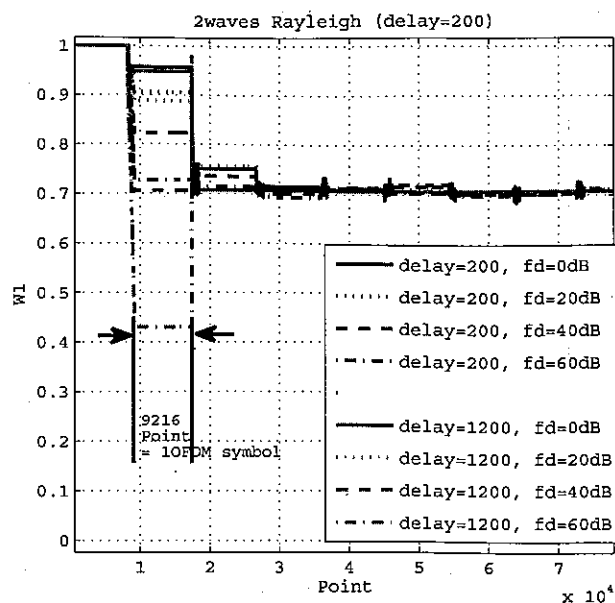


図8: レイリー環境下でのWの収束状況

このRLSにより生成したWを用いて信号の取り出しを行ったのが提案方式である。従来法、提案法ともに、干渉波の遅延時間がGI内のもの(delay:200)と、GI越え(delay:1200)の物についてのBERを図9に示す。このグラフより、GI内でBERが $10^{-2.5}$ の場合fdのmax値が58Hzまで対応可能であることが分かる。これは、速度で言えば約132km/hということになる。図10よりGI越えでも同様の値まで対応可能となったことが分かる。これより従来法と比べて性能が向上している事が確認できる。

## 9 まとめ

本稿では、Pre-FFT 型 MMSE と Post-FFT 型 MRC を利用した到来波分離型アダプティブアレーアンテナを提案した。今後はマルチパスの条件や本数を増やしたシミュレーションを行う。

### 文献

- [1] 神谷 幸宏 "MATLAB によるデジタル無線通信技術", コロナ社, 15th May 2009.
- [2] 菊間 信良 "アダプティブアンテナ技術", オーム社, 10th Oct 2003.
- [3] 藤元 美俊 "OFDM 伝送と受信アレー信号処理の基礎", July 2011.

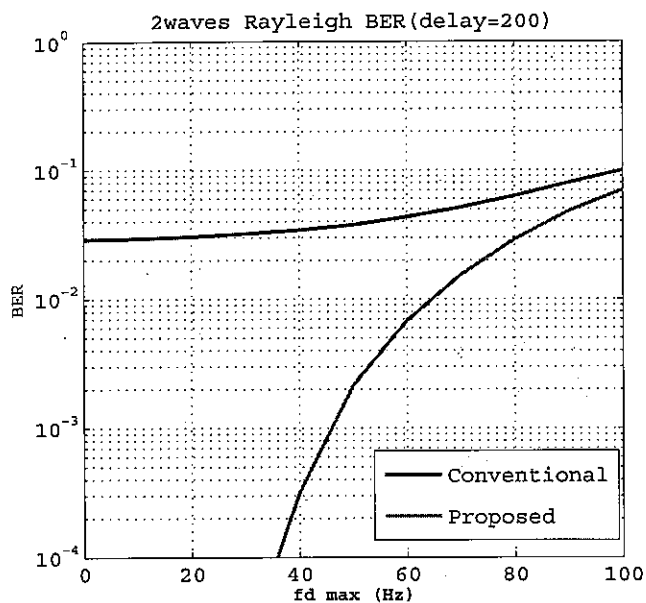


図 9: fd 毎の BER の推移 (GI 内)

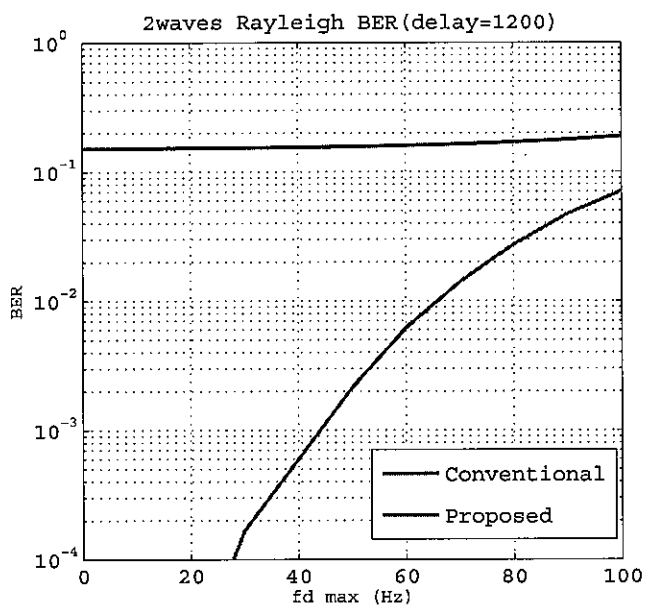


図 10: fd 毎の BER の推移 (GI 越え)