

[依頼講演] 車載用地上デジタル放送受信のための アダプティブアンテナにおける合成アルゴリズムの実験的研究

田端 隆伸[†] 藤元 美俊[‡] 安里 博一^{††} 和田 知久^{††, ‡‡} 堀 智[†]

[†] 小島プレス工業(株) 〒470-0207 愛知県みよし市福谷町広久伝 15 番地

[‡] 福井大学 〒910-8507 福井県福井市文京 3 丁目 9 番 1 号

^{††} (株)マグナデザインネット 〒901-0152 沖縄県那覇市前島 3 丁目 1 番 15 号

^{‡‡} 琉球大学 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地

E-mail: [†] {t-tabata, hori}@kojima-tns.co.jp, [‡] fujimo@u-fukui.ac.jp,

^{††} asato@MagnaDesignNet.com, ^{‡‡} wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

あらまし 日本の地上デジタル放送 ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial) では、マルチパスに強い OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : 直交波周波数分割多重) 方式が採用されている。移動体受信において、マルチパスフェージングの影響を軽減するため、筆者らはアダプティブアレーアンテナ技術を用いた車載用受信システムを提案してきた。しかし、走行中にはドップラーシフトも発生し、受信性能に悪影響を及ぼす。車両の前後に各 2 本 (合計 4 本) のアンテナを搭載することが多く、ボデーなどの影響により車両前後での指向性は異なる。そのため、車両前後で異なる周波数のドップラーシフトが発生し、移動速度が速いほど周波数の差が大きくなる。この影響を低減するため、車両前後の各 2 本のアンテナで受信される信号を独立して合成を行う構成を提案し、従来の構成に対する BER 特性の優位性を実証する。

キーワード 地上デジタル放送, ISDB-T, OFDM, ドップラーシフト, アダプティブアレーアンテナ

Experimental Study on combining algorithm in Adaptive Antenna for ISDB-T Automobile Reception

Takanobu TABATA[†] Mitoshi FUJIMOTO[‡]

Hirokazu ASATO^{††} Tomohisa WADA^{††, ‡‡} and Satoshi HORI[†]

[†] Kojima Industries Corporation. 15 Hirokuden, Ukigai-Cho, Miyoshi-Shi, Aichi, 470-0207 Japan

[‡] University Of Fukui 3-9-1 Bunkyo, Fukui-Shi, Fukui, 910-8507 Japan

^{††} Magna Design Net, Inc. 3-1-15 Maejima, Naha-Shi, Okinawa, Japan

^{‡‡} University of the Ryukyus 1 Aza-Chihara, Nishihara-Cho, Cyuto-Gun, Okinawa, Japan

E-mail: [†] {t-tabata, hori}@kojima-tns.co.jp, [‡] fujimo@u-fukui.ac.jp,

^{††} asato@MagnaDesignNet.com ^{‡‡} wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

Abstract In ISDB-T (Terrestrial digital TV broadcasting in Japan), Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is adopted as a modulation scheme. We proposed an automobile reception system using adaptive array antenna technology to reduce the effect of fading. However, the reception performance deteriorates due to influence of the Doppler shift which occurs with moving of the vehicle. In many cases, four antennas are mounted on a vehicle (Front:2 antennas, Rear:2 antennas), the directivity of those antennas are directed to front and rear of the vehicle, respectively. Therefore the Doppler frequency is different between front side and rear side of the vehicle, and the difference between the frequencies is increased as the speed becomes high-speed. For overcoming this problem, we proposed a system which combines independently the signals at 2 antennas(Front) and 2 antennas(Rear). From an experimental result, it is proved that the BER performance of the proposed system is better compared with ordinary systems.

Keyword ISDB-T, OFDM, Doppler shift, adaptive array antenna

1. まえがき

日本の地上デジタル放送は 2003 年に 3 大都市圏で開始され、2006 年には全都道府県で放送が開始された。変調方式は近年、広帯域デジタル通信において、無線・有線の区別を問わず広く使われている直交波周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) 方式が採用されている [1]。

OFDM は直交する多数のキャリアを用いたマルチキャリアデジタル変調方式の一種であり、周波数利用効率が比較的良く、FFT (Fast Fourier Transform) による変復調処理が可能など多くの特徴がある。OFDM の各キャリアは周波数選択性フェージングに対して、低い伝送レートに設定されるので、一つのキャリアをみるとフラットフェージングとなる。また、遅延波の影響を軽減するために、各 OFDM の有効シンボルの先頭にガード区間が設定されている。これにより、特にマルチパス環境において、単一キャリア方式に対して優れた性能を発揮することが知られている [2]。

しかし、OFDM 信号の特性を利用するだけでは、実際の移動体通信でのフェージング対策は困難である。そこで、地上波デジタル放送の規格では、伝送するデータ間に同期信号を内挿し、マルチパス対策を行っている [3]。また一方で、アンテナ素子を複数本用いて、受信する信号電力を環境に応じて適応的に制御する研究も盛んに行われている。その一つがアダプティブアレーアンテナ [4] 技術である。これは、アンテナ素子で受信する信号間の相関を用いて、各アンテナ素子の重み付けを算出し、重み付け合成をすることにより、アンテナで受信する信号電力の適応制御を行う。

これまでに、4 本の無指向性アンテナを用いたリニアアレー配置の場合において、合成アルゴリズムの基礎検討を実施した [5]-[6]。しかし、実際の車両搭載状態では、ボデーの影響を受けるため 4 本のアンテナは搭載位置によって指向性が異なる。車両が送信タワーに対しどの方向を向いても、到来波を均等に受信できるように、車両の前後に各 2 本のアンテナが搭載されることが多い。そのため、車載状態では指向性アンテナ、プラナーアレー配置の条件となることから、筆者らは最適な合成方法やアルゴリズムの検討を行ってきた [7]-[9]。これらの結果より、静特性においては、特に GI (Guard interval) より長い遅延波を受信する場合、Post-FFT 型と比較すると本システムの方式である Pre-FFT 型が優れていることを示した [8]-[9]。また、アルゴリズムの比較では、遅延波を抑圧することが可能である最小 2 乗誤差規範 (Minimum Mean Square Error: MMSE) が、最も BER (Bit Error Rate) 特性が優れていることを示した [8]-[9]。

本報告では、走行時 (動特性) における性能評価を実施した。動特性では、ドップラーシフトによる性能劣化が懸念される。特に車載状態では、アンテナ指向性により車両前方に搭載されたアンテナは、主に車両前方から到達する信号を受信し、同様に車両後方に搭載されたアンテナは、主に車両後方から到達する信号を受信する。また、車両が送信タワーに向かっている場合、車両前方から到達する信号はドップラーシフトの影響により、送信周波数より高く受信される。一方、反射などで車両後方から到達する信号は、送信周波数より低く受信される。従って、車両前方のアンテナと車両後方のアンテナは異なる信号を受信することとなる。この問題を解決するために、新しい合成方法を提案し、従来方式に対する優位性を実証する。また、最適な合成アルゴリズムについても検証を実施した。

本報告の構成は、以下の通りである。2 章でシステムの構成を述べ、3 章で本システムに搭載されるアルゴリズムを説明する。4 章で評価条件を述べ、5 章で評価と評価結果に関する考察を行い、6 章で結論を述べる。

2. システム構成

本報告では、アンテナ 4 本を車両の前後に各 2 本搭載した場合のシステムについて検討を行う。車両に対するアンテナの搭載位置を図 1 に示す。車両の x 方向のアンテナ間隔を dx 、 y 方向を dy とする。各アンテナの指向性を図 2 に示す。各アンテナに対し、車両の前後でメインローブが存在する方向の利得を F 、その逆方向の利得を B として前後比を F/B で表すこととする。

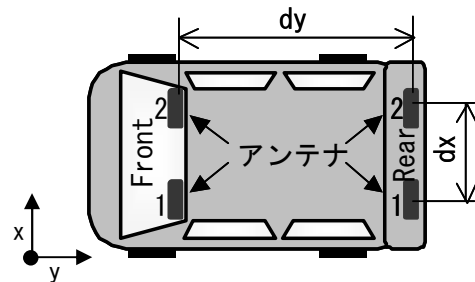


図 1 アンテナ搭載位置

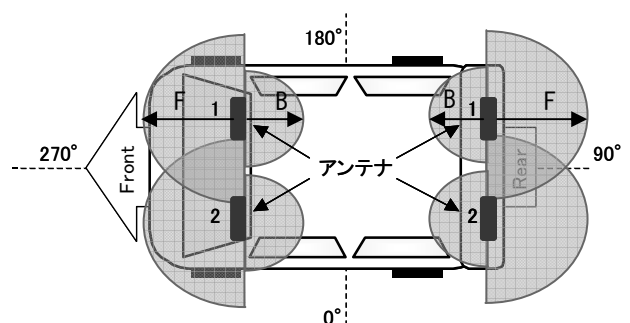


図 2 アンテナ指向性

合成方法は大きく分類すると、OFDM 復調処理である FFT 前で合成を行う Pre-FFT 型、FFT 後で合成を行う Post-FFT 型の 2 種類が存在する。提案システム構成は前者の Pre-FFT 型アダプティブアレーである。従来の提案システム構成（4 合成）を図 3 に示す。この構成は、車両の前後に各 2 本、全 4 本搭載したアンテナからの受信信号を第 3 章で述べる 3 種類のアルゴリズムのいずれかで合成を行い、合成された信号に対し周波数誤差補正を行った後、OFDM 復調処理をして映像、音声を出力する。このシステム構成では、前述のように車両前後方のアンテナで異なる周波数の信号を受信した場合、それらを一様に合成してしまうため、性能が劣化してしまうと考えられる。この問題を解決するための提案システム構成（2+2 合成）を図 4 に示す。車両の前方に搭載されたアンテナ 2 本からの受信信号と、後方に搭載されたアンテナ 2 本からの受信信号をそれぞれ、合成を行い、各合成信号に対し、独立の周波数誤差補正を行う。各信号に対し OFDM 復調処理を行い、サブキャリアを抽出した後、各サブキャリアに対しキャリアダイバシティを行う。

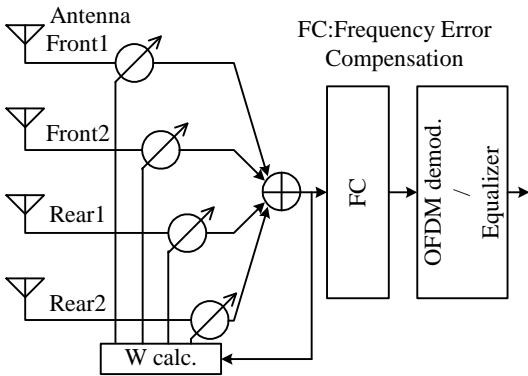


図 3 従来（4 合成）システム構成：Pre-FFT 型

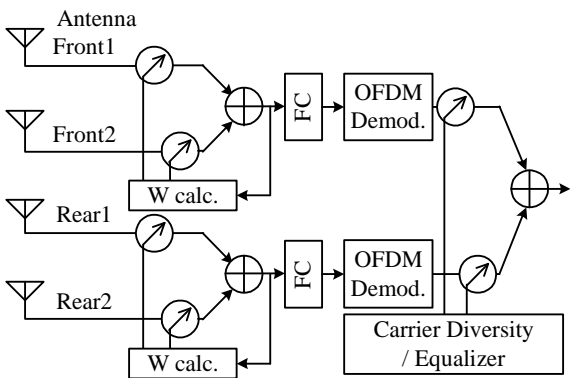


図 4 提案（2+2 合成）システム構成：Pre-FFT 型

また今回、図 5 に示す Post-FFT 型システムも比較のため特性評価を実施した。本報告では便宜上これ以降、このシステムを 4FFT と表記する。4FFT は上記同様、全 4 本搭載したアンテナの受信信号に対しそれぞれ OFDM 復調処理を行い、各サブキャリアを抽出する。その後、各サブキャリアに対しキャリアダイバシティを行う構成である。

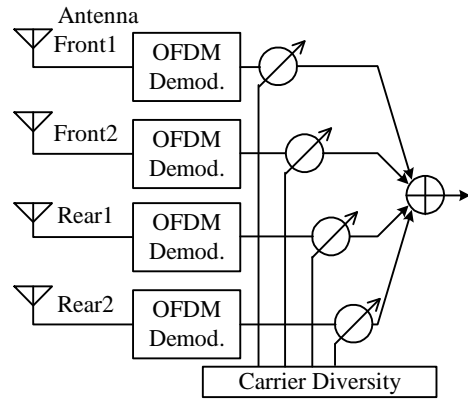


図 5 4FFT システム構成：Post-FFT 型

3. 搭載アルゴリズム

K 素子アンテナで構成されるアレーアンテナを想定する。受信信号と重み係数は次式で表される。

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_K(t)]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_K]^T \quad (2)$$

アレーの合成出力信号は

$$y(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) \quad (3)$$

であり、上添字 T , H はそれぞれ転置、共役転置を表す。

OFDM 変調信号と遅延波の構成を図 6 に示す。信号は、GI (T_g) 及び、有効シンボル間隔 (T_e) から成る。

同期のとれている信号を基準としてベースバンド信号の Head GI からガード区間分 (T_g 時間) を取り出したものを入力信号 $x_{hK}(t)$ とする。同様に、ベースバンド信号の Tail GI からガード区間分 (T_g 時間) を取り出したものを入力信号 $x_{iK}(t)$ とする。受信信号の表記を以下に定義する。

Head GI でサンプルした信号：

$$\mathbf{X}_h(t) = [x_{h1}(t), x_{h2}(t), \dots, x_{hK}(t)]^T \quad (4)$$

Tail GI でサンプルした信号：

$$\mathbf{X}_i(t) = [x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iK}(t)]^T \quad (5)$$

合成出力：

$$y_h(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}_h(t), y_i(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}_i(t) \quad (6)$$

本報告では、特性の異なる 3 種類のアルゴリズムを採用した。1 つ目は最大比合成法 (Maximum Ratio Combining: MRC) であり、重み係数 \mathbf{W}_{MRC} は以下で表される。

$$\mathbf{W}_{MRC} = E[\mathbf{X}_h(t) y_h^*(t)] \quad (7)$$

ここで、 $E[\cdot]$ は期待値演算を表す。

2 つ目は、アレーメインビームフォーマ法 (Array Main Beam Former: AMBF) であり、重み係数 \mathbf{W}_{AMBF} は以下で表される[5].

$$\mathbf{W}_{AMBF} = E[\mathbf{X}_h(t) y_h^*(t)] \quad (8)$$

3 つ目は、最小 2 乗誤差規範 (Minimum Mean Square Error: MMSE) であり、重み係数 \mathbf{W}_{MMSE} は以下で表される[6].

$$\mathbf{W}_{MMSE} = \mathbf{R}_{X_h X_h}^{-1} \mathbf{W}_{AMBF} \quad (9)$$

ただし、 $\mathbf{R}_{X_h X_h} = E[\mathbf{X}_h(t) \mathbf{X}_h^H(t)]$ である。

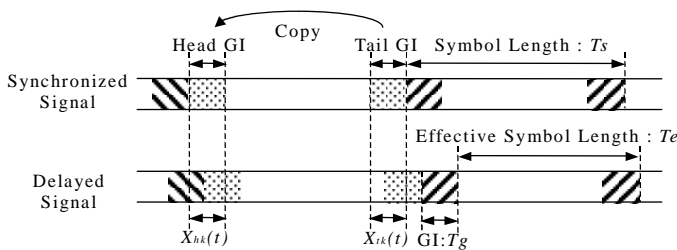


図 6 OFDM 変調信号と遅延波の構成

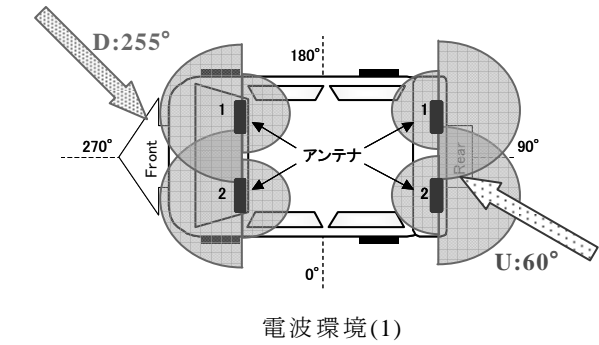
4. 評価条件

上記のシステムにおいて、フェージングシミュレータを用いて、BER 特性のベンチ評価実験を行った。

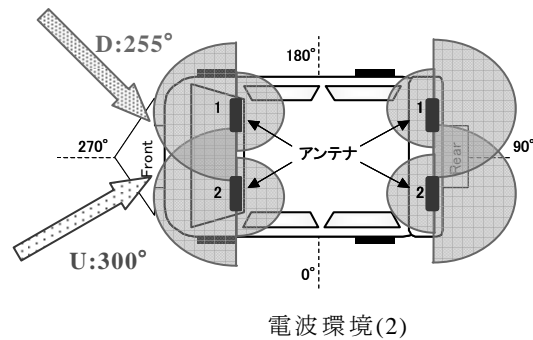
測定周波数は 35ch (中心周波数: 605.143MHz) とし、OFDM 信号条件を表 1 に示す。アンテナ搭載位置は、理想的に ($dx: 0.5\lambda$, $dy: 0.5\lambda$) とし、アンテナ指向性の F/B は 0 dB または 10dB とした。到来する電波環境は先行波である所望波 (D: Desired signal) と遅延波 (U: Undesired signal) の 2 波とし、 $D/U=3$ dB または 10dB とした。また、所望波に対する遅延波の遅延時間を 21 ($1/6 \cdot GI$) [μs] とした。各電波環境の到来方向を図 7 に示す。車両の移動速度は、0,60,120,180km/h とした。

表 1 OFDM 信号条件

キャリア数	5617
有効シンボル長	1008 μs
キャリア間隔	0.992kHz
GI長(1/8)	126 μs
キャリア変調方式	64QAM



電波環境(1)



電波環境(2)

図 7 電波環境

5. 評価結果

各条件において、2+2 合成 (MRC, AMBF, MMSE)、4 合成 (MRC, AMBF, MMSE)、4FFT の BER 特性評価結果を以下に示す。電波環境(1), $F/B=0$ dB, $D/U=3$ dB の場合を図 8, $F/B=10$ dB の場合の BER 特性評価結果を図 9 に示す。また、電波環境(1), $F/B=0$ dB, $D/U=10$ dB の場合を図 10, $F/B=10$ dB の場合の BER 特性評価結果を図 11 に示す。

同様に、電波環境(2), $F/B=0$ dB, $D/U=3$ dB の場合を図 12, $F/B=10$ dB の場合の BER 特性評価結果を図 13 に示す。また、電波環境(2), $F/B=0$ dB, $D/U=10$ dB の場合を図 14, $F/B=10$ dB の場合の BER 特性評価結果を図 15 に示す。

各グラフの横軸は車両移動速度、縦軸はビタビ複合前 (誤り訂正なし) の BER 特性を示している。それぞれのデータは、長い点線が 4 合成、実線が 2+2 合成を示し、 \square のマークが MRC アルゴリズム、 \triangle のマークが AMBF アルゴリズム、 \circ のマークが MMSE アルゴリズムの評価結果を示している。また、比較のため短い点線で \times のマークが 4FFT の評価結果を示している。

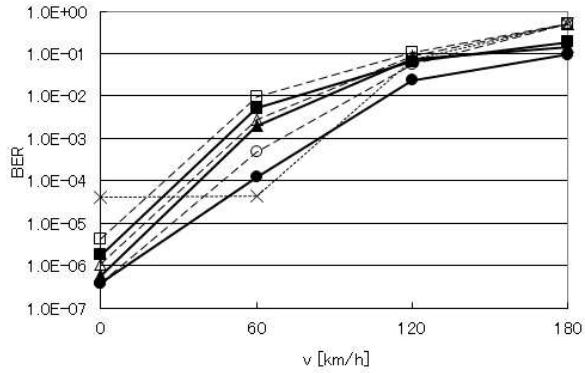


図 8 BER 特性

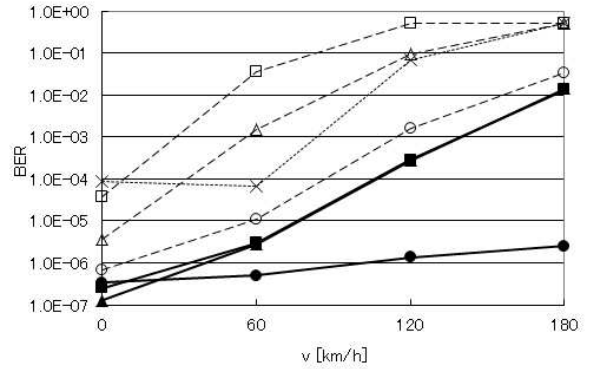


図 9 BER 特性

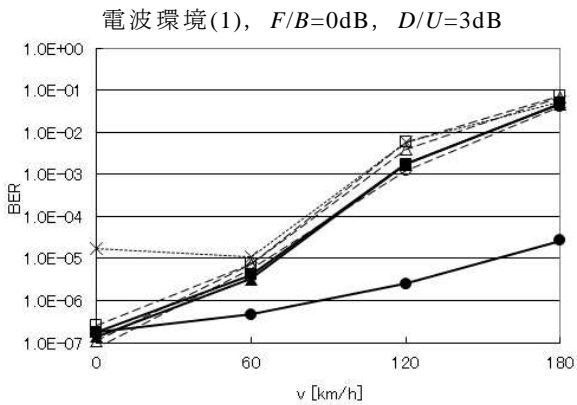


図 10 BER 特性

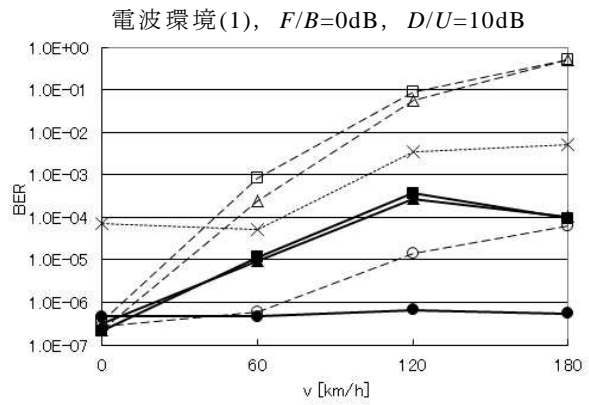


図 11 BER 特性

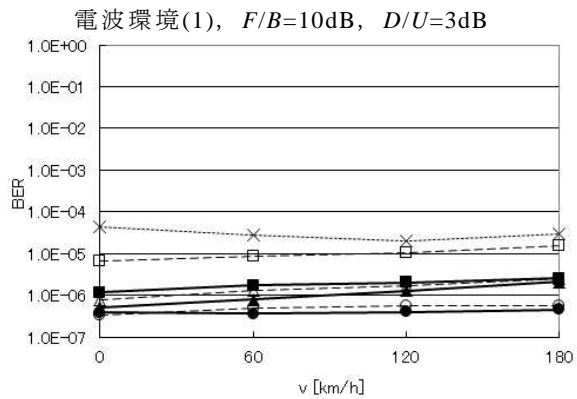


図 12 BER 特性

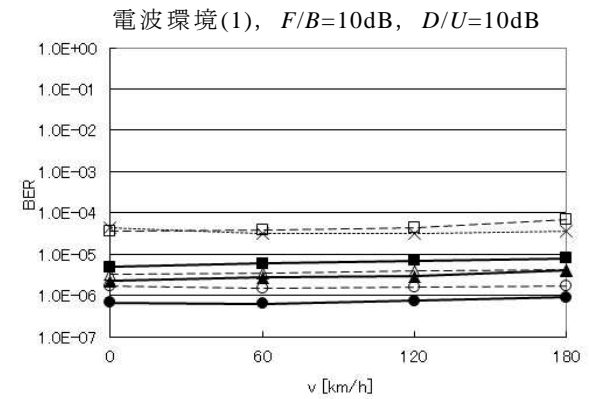


図 13 BER 特性

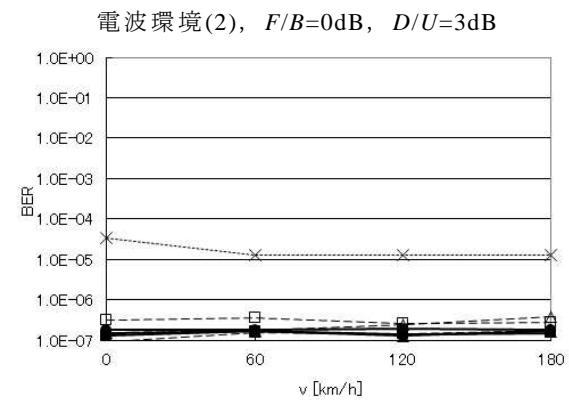


図 14 BER 特性

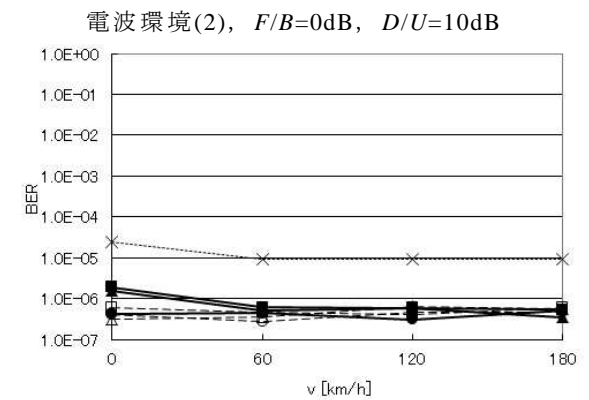
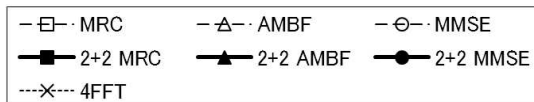


図 15 BER 特性

電波環境(2), $F/B=10\text{dB}$, $D/U=3\text{dB}$

電波環境(2), $F/B=10\text{dB}$, $D/U=10\text{dB}$



1) 電波環境の比較

はじめに、電波環境(1): 図 8~11 と電波環境(2): 図 12~15 を比較する. 全体的に電波環境(1)より電波環境(2)の方が良好であった. 電波環境(2)は、所望波と遅延波が同方向であるため、ドップラーシフトは同一の周波数だけ発生し、周波数誤差補正も同一の値となるため、周波数誤差が少なく、比較的エラーが発生しにくい環境であることが原因と考えられる.

2) 2+2 合成システムと 4 合成システムの比較

次に、性能差が顕著に表れている電波環境(1)において検証する. 同じアルゴリズムで比較すると、全体的に 2+2 合成システムの方が優れている. 特に、速度が速い場合 (ドップラーシフトが大きい場合) において性能劣化が少なくなっている. さらに、4FFT システムと 2+2 合成システムを比較すると、全体的に 2+2 合成システムの方が優れている. これより、前後で独立して合成、周波数誤差補正を行う構成の方が優位であり、今回の提案システムの有効性を示すことができたといえる.

3) アルゴリズムの比較

最後に、各アルゴリズムの比較を行う. MMSE, AMBF, MRC の順で BER 特性が良いといえる. これによって、MMSE の妨害波を抑圧する機能が有効であることも示された. 図 8, 10 と図 9, 11 により、 D/U の影響を比較すると、より D/U が大きい方が MMSE の妨害波抑圧の効果が高いと考えられる.

これらより、提案システムの 2+2 合成において、MMSE アルゴリズムを使用することで、多くの受信環境で、良好な BER 特性を得られることが示された.

6. むすび

本報告では、車両の走行状態 (動特性) における BER 特性評価を実施した. 車両にアンテナを搭載する場合、前後に各 2 本のアンテナが搭載されることが多いが、ボデーなどの影響により前後で利得が異なる指向性となる. また、動特性では、ドップラーシフトによる性能劣化が懸念され、このアンテナ配置の場合、車両前方のアンテナと車両後方のアンテナは異なる周波数の信号を受信することとなる.

これらの問題を解決するため、前後 2 本のアンテナからの受信信号をそれぞれ合成し、独立の周波数誤差補正後に、OFDM 復調処理を行い、キャリアダイバシティを行うシステム構成を提案した.

BER 特性の評価結果により、提案システム構成の優位性を示すことができた. また、アルゴリズムに関しては、妨害波の抑圧が可能な MMSE が最も優れていることが示された. これらより、提案システムの 2+2 合成において、MMSE アルゴリズムを使用することで、

多くの受信環境で、良好な BER 特性を得られることが示された.

文 献

- [1] 伊丹誠, “デジタル放送/移動体通信のための OFDM 変調技術”, トリケップス, 2000 年.
- [2] 都竹愛一郎, 永塚 守, “ゴースト波がデジタル放送に与える影響の検討,” テレビ学技報, vol.20, no.2, pp.57-62, Jan. 1996.
- [3] 山田宰, “デジタル放送ハンドブック” 株式会社オーム社, 2003 年.
- [4] 菊間信良, “アダプティブアンテナ技術”, 株式会社オーム社, 2003 年.
- [5] S.Hori, N.Kikuma, T.Wada, M.Fujimoto, “Experimental Study on Array Beam Forming Utilizing The Guard Interval in OFDM,” International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP05), pp.257-260, Vol.1, 2005.
- [6] S.Hori, N.Kikuma, N.Inagaki, “MMSE adaptive array utilizing Guard Interval in the OFDM systems,” Electronics and Commun. in Japan, Pt.1, Wiley Periodicals, Inc., Vol.86, No.10, pp. 1-9, 2003.
- [7] T. Tabata, H. Asato, D. H. Pham, M. Fujimoto, N. Kikuma, S. Hori, T. Wada, “Experiment Study on Adaptive Array Antenna System for ISDB-T High Speed Mobile Reception,” IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APS2007), Hawaii, USA, June 2007.
- [8] 田端隆伸, 菊間信良, 堀 智, 安里博一, 和田知久, “車載用地上デジタル放送受信のためのアダプティブアレーアンテナシステムの実験的研究,” 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会技術報告書, Vol.108 No.148, A・P2008-71, pp.195-200, July. 2008.
- [9] T. Tabata, N. Kikuma, T. Wada, S. Hori, M. Fujimoto, H. Asato, “Experimental Study of Adaptive Array Antenna System for ISDB-T Mobile Reception,” International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP09) 2009, Bangkok, Thailand, Oct. 2009.