

STTC-MIMO 方式のアンテナ構成と伝送特性

中川 孝之 鵜澤 史貴 居相 直彦

NHK 放送技術研究所 〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11

{nakagawa.t-em, uzawa.f-hu, iai.n-ds}@nhk.or.jp

あらまし 今後、ロードレース中継などで使用することになる 1.2GHz/2.3GHz 帯移動中継用 FPU の新しい伝送方式として、ARIB STD-B57 標準規格に採用された時空間トレリス符号化 MIMO (STTC-MIMO) 方式について、走行コース沿いの受信点で受信アンテナの間隔、素子数や偏波などのアンテナ構成を変えて伝送特性を比較する実験を行った。その結果、同一偏波の受信アンテナの間隔を 5 波長から 20 波長まで広げた場合に、受信相関特性と BER 特性が改善されることを確認した。また、一カ所で受信する方法として、直線偏波のクロス八木アンテナを 45 度傾けて使用する方法は、見通し内では有効であるが、見通し外では受信アンテナ間隔が 5 波長の場合に比べても特性が悪く、円偏波のクロス八木アンテナを用いた方が伝送特性が良いなどの知見が得られた。

キーワード 時空間トレリス符号, MIMO, アンテナ間隔, 偏波

Transmission Characteristics and Antenna Configuration of STTC-MIMO Scheme

Takayuki NAKAGAWA Fumiki UZAWA and Naohiko IAI

NHK Science and Technology Research Laboratories 1-10-11 Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo, 157-8510 Japan

E-mail: {nakagawa.t-em, uzawa.f-hu, iai.n-ds}@nhk.or.jp

Abstract As per STTC-MIMO (Space-Time Trellis Code - Multiple-Input Multiple-Output) scheme, which was adopted in ARIB STD-B57 standard for 1.2-GHz/2.3-GHz band mobile FPU (Field Pick-up Unit), experiments were done to evaluate the transmission characteristics with regard to the antenna configuration. When antenna spacing of same polarized receiving antennas is changed from 5 to 20 wavelengths, 20-wavelength spacing brings better performance because of low MIMO channel correlation. Use of linearly polarized cross Yagi-Uda antenna with 45-degree rotation is effective in LOS environment, while in NLOS environment the performance is worse than 5-wavelength spacing, and use of circularly polarized cross Yagi-Uda antenna is better than linearly polarized.

Keyword STTC, MIMO, Antenna Spacing, Polarization

1. はじめに

ロードレース中継などで用いる移動中継用 FPU (Field Pick-up Unit) は、770~806MHz (以下「800MHz 帯」と記す) の電波を使用する OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式 [1] が現在使用されている。NHK では、移動中継用 FPU に対して、現在の OFDM 方式と比べて同等以上の回線信頼性と 2 倍の伝送容量を実現する技術として、送信と受信に複数のアンテナを用いて伝送を行う MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 方式の研究に取り組み、符号化利得により屋外見通し内の高相関環境および屋外見通し外のマルチパスフェージング環境で安定した伝送が期待できる、時空間トレリス符号化 MIMO (STTC-MIMO ; Space-Time Trellis Code-Multiple-Input Multiple-Output) 方式について研究を進めてきた [2][3]。

その後、総務省の周波数再編のアクションプランの

改定により、700~900MHz の電波は携帯電話用に使用し、移動中継用 FPU の周波数は 2019 年 3 月 31 日までに 1.2GHz 帯および 2.3GHz 帯 (以下「新周波数」と記す) に移行することが決まった。新周波数では、自由空間伝搬損失や遮蔽損失が 800MHz 帯に比べて大きくなる。これらを補うために 2 送信 2 受信 (2×2) の STTC-MIMO 方式を導入した新周波数対応の FPU を試作し、ロードレース中継のコースで伝送実験を実施した [4][5][6]。その結果、新周波数においても STTC-MIMO 方式の効果が示され、従来の OFDM 方式と STTC-MIMO 方式で新周波数の制度整備が進み、ARIB STD-B57 として標準化された [7]。

これまでの 2×2 STTC-MIMO 方式の伝送実験により、送受ともに 2 つのアンテナは同一の垂直偏波とし、アンテナ間隔を広くすると、ダイバーシチ効果により伝送特性が改善されることが知られている [4]。一方、受

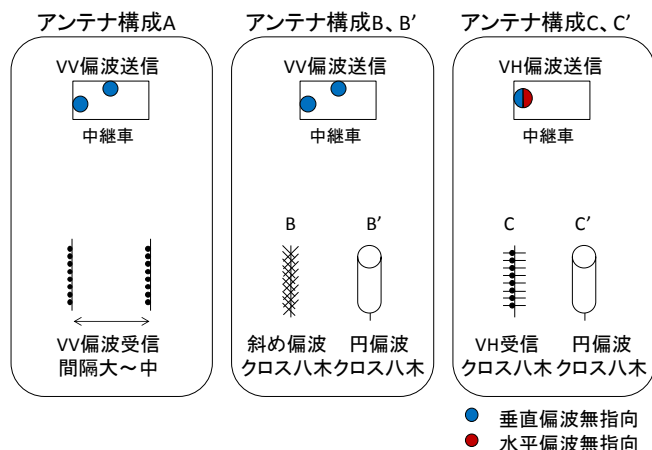


図 1 アンテナ構成の分類

信点のスペースに余裕がなく、受信アンテナの間隔を広げられない場合に、直線偏波（垂直・水平）のクロス八木アンテナを 45 度傾けて使用する方法や、円偏波（右旋・左旋）のクロス八木アンテナを使用することによって、一カ所で受信可能であることが知られていた。しかし、その伝送特性は明らかではなかった。

今回、2×2 STTC-MIMO 方式に関して、走行コース沿いの受信点で受信アンテナの間隔、素子数や偏波などを変えて伝送特性を評価する実験を行い、アンテナ構成と伝送特性の関係を調査したので報告する。

2. アンテナ構成

今回前提としたアンテナ構成について図 1 を用いて説明する。アンテナ構成 A は、送信アンテナと受信アンテナを設置するスペースに余裕がある場合を想定しており、2 つの送信アンテナは同一の垂直偏波で中継車の屋上に間隔を離して設置し（以下「VV 偏波送信」と記す）、2 つの受信アンテナも送信と同一の垂直偏波で間隔を離して設置する（以下「VV 偏波受信」と記す）方法である。

アンテナ構成 B は、受信アンテナを設置するスペースに余裕がない場合を想定しており、アンテナ構成 A と同じ VV 偏波送信であるが、受信アンテナは直線偏波（垂直・水平）のクロス八木アンテナを 45 度傾けて一カ所で受信する（以下「斜め偏波受信」と記す）方法である。また、アンテナ構成 B' はその変形で、受信アンテナに円偏波（右旋・左旋）のクロス八木アンテナを用いて一カ所で受信する（以下「円偏波受信」と記す）方法である。

アンテナ構成 C は、さらに送信アンテナを設置するスペースにも余裕がない場合を想定しており、送信アンテナに垂直偏波／水平偏波共用の水平面無指向性アンテナを用いて一カ所で送信し（以下「VH 偏波送信」

表 1 STTC-MIMO 伝送装置の主な仕様

項目	内容	
FFT クロック周波数	20.45074MHz	
FFT ポイント数	1024 (1K)	2048 (2K)
占有帯域幅 [MHz]	17.12	17.19
サブキャリア数	総数	857
	Data	672
	CP	108
サブキャリア変調方式	16QAM, 8PSK, QPSK	
内符号	64 状態 16QAM-STTC 32 状態 8PSK-STTC 16 状態 QPSK-STTC	
外符号	RS(204,188), RS(204,166)	
内インタリーブ	周波数, 時間 (378ms)	
外インタリーブ	バイト (11TS パケット内)	
有効シンボル長 [us]	50.07	100.14
ガードインタバル長 [us]	6.26	12.52
シンボル長 [us]	56.33	112.66
伝送容量 [Mbps] (204-Byte TS レート)	20.877(QPSK) ~47.718 (16QAM)	

と記す)、受信アンテナは直線偏波（垂直・水平）のクロス八木アンテナを傾けずに用いて一カ所で受信する（以下「VH 偏波受信」と記す）方法である。また、アンテナ構成 C' はその変形で、受信アンテナに円偏波（右旋・左旋）のクロス八木アンテナを用いて一カ所で受信する方法である。

3. 実験方法

試作した STTC-MIMO 伝送装置を用いて、2.3GHz 帯で 2×2 STTC-MIMO 方式の伝送実験を行った。伝送装置の主な仕様を表 1 に、送受信条件を表 2 に示す。

送信アンテナは、アンテナ構成 A, B および B' の場合、マイクロバスの屋上に垂直偏波の 2 段コーリニアアンテナ (5dBi) を 2.5m (約 20 波長) の間隔で 2 本設置した。また、アンテナ構成 C および C' の場合、垂直偏波／水平偏波共用の水平面無指向性アンテナ (6dBi) を一カ所に設置した (図 2)。

受信点は、NHK 放送技術研究所 (以下「技研」と記す) の 13 階屋上の南西角とし、図 3 (a) のように南 (世田谷通り) 側の基準位置および基準位置から 5 波長 (0.64m), 10 波長 (1.28m), 20 波長 (2.55m) 離れた位置にポール①～④を設置して、アンテナ構成 A の場合は、垂直偏波の 8 素子八木アンテナまたは 26 素子八木アンテナを 4 本取り付け、このうちの 2 本を受信に使用した (図 3 (b))。また、アンテナ構成 B, B', C および C' の場合、直線偏波（垂直・水平）の 8 素子クロス八木アンテナ、および円偏波（右旋・左旋）の 8 素子クロス八木アンテナを、図 3 (a) の基準位置のポール①に取り付けた (図 3 (c))。

表 2 送受信条件

送信周波数	2350MHz
周波数帯域幅	17.2MHz
送信出力	10W+10W (MIMO)
送信アンテナ	2 段コーリニア (5dBi), 垂直/ 水平偏波共用無指向性 (6dBi)
送信アンテナ間隔	2.5m (約 20 波長)
送信アンテナ高	3m
受信アンテナ	8 素子/26 素子八木 (11/18dBi) 8 素子クロス八木 (直線偏波) 8 素子クロス八木 (円偏波)
受信アンテナ間隔	5/10/20 波長 (1 波長=0.128m)
受信アンテナ高	約 70m

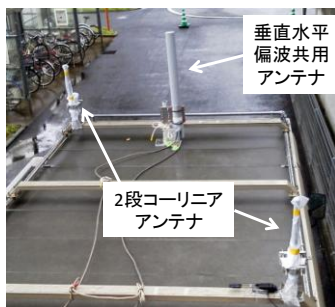
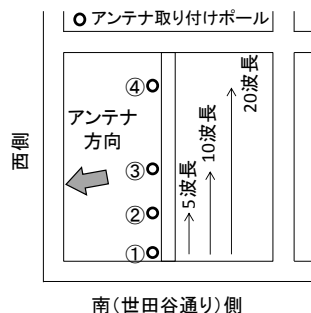
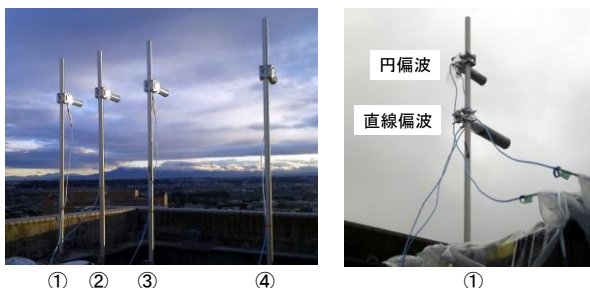


図 2 送信点のアンテナ配置



(a) 受信アンテナの配置図



(b) 八木アンテナの配置 (c) クロス八木アンテナの配置

図 3 受信点のアンテナ配置

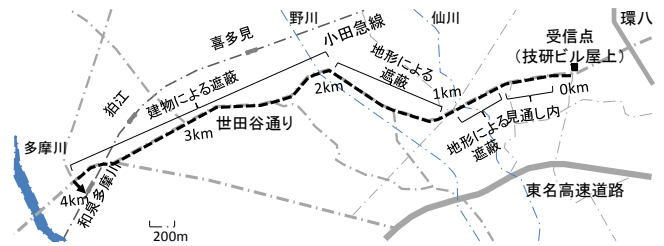


図 4 走行コース

移動局は、技研の正門をスタート地点とし、和泉多摩川駅のロータリーをゴール地点として、世田谷通りを約 4km 走行した (図 4)。

16QAM の 2 送信 STTC-MIMO-OFDM 信号を試験信号とし、外符号の RS (204,188) 復号部で検出するバイト誤り率から 1 秒ごとのビット誤り率 (内符号復号後) を換算して求めた (以下「換算 BER」と記す)。なお、RS 復号部で訂正エラーとなった場合には誤り率が正しくないため、換算 BER の値を $1E-1$ に置き換えた。

また、遅延プロファイルおよび受信電力の測定も実施した。遅延プロファイルは、全キャリアを既知情報とした OFDM 信号を送受信し、推定した伝搬路応答を逆フーリエ変換することにより求めた。

4. 実験結果と考察

4.1. 受信電力特性

8 素子八木アンテナを図 3 (a) の①から④の位置に設置して測定した受信電力を図 5 に示す。世田谷通りから離れた③や④の位置では、①の位置に比べて受信電力が若干小さくなる傾向にある。図 5 の受信電力特性は、今回の伝搬環境を考慮すると以下のように説明される。スタート地点は受信アンテナの直下であるため最初は技研ビルの遮蔽およびアンテナの半値角から外れて弱く受信される。走行とともに徐々に受信電力が大きくなり、200m 付近でアンテナビーム内に入ると受信電力が理論値とほぼ同じ見通し内の環境になる。500m から先は下り坂で見通し外となり、750m 付近が谷になるため受信電力が低下する。1km 付近で標高が上昇するのに合わせて受信電力も理論値に近づくが、その後は山の裏側に回りこむため見通し外となり急激に受信電力が低下し、理論値よりも 30dB 低い受信電力となる。また、2km から先は主に道路沿いなどにある建造物や高架による遮蔽を受けて見通し外となり、理論値よりも 10 から 30dB 低い受信電力となる。

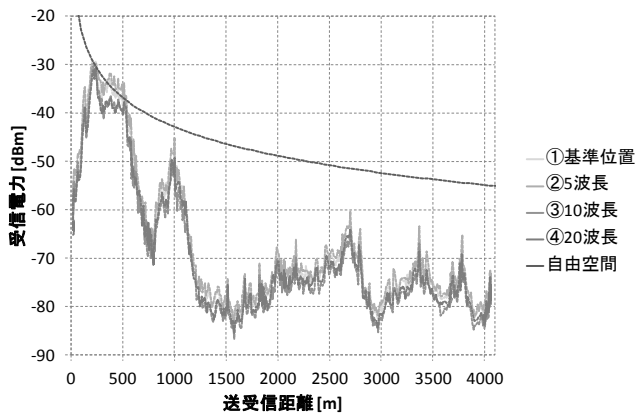


図 5 8 素子八木アンテナの受信電力

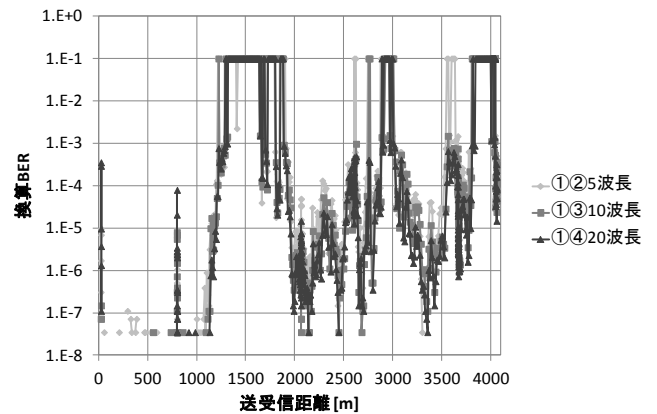


図 8 8 素子八木アンテナの換算 BER 特性

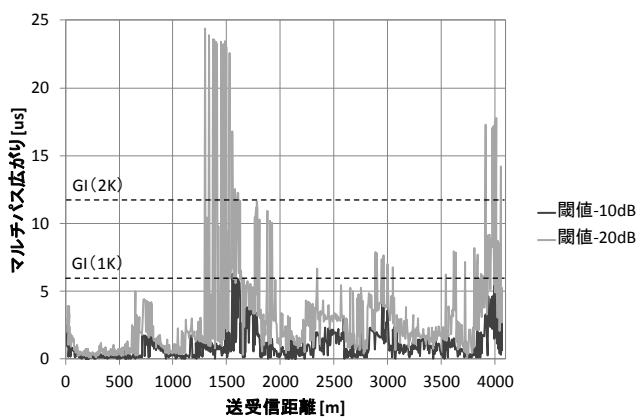


図 6 8 素子八木アンテナのマルチパス広がり

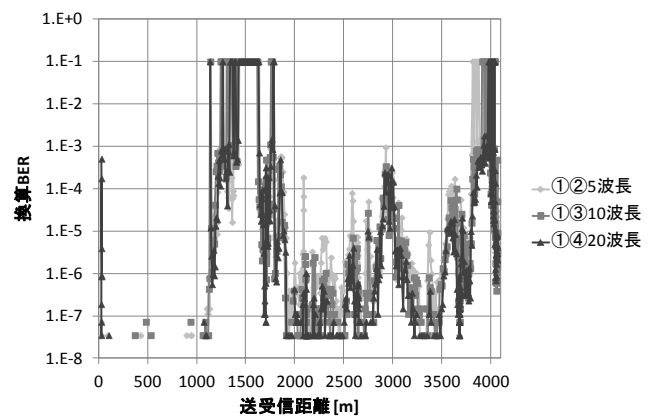


図 9 26 素子八木アンテナの換算 BER 特性

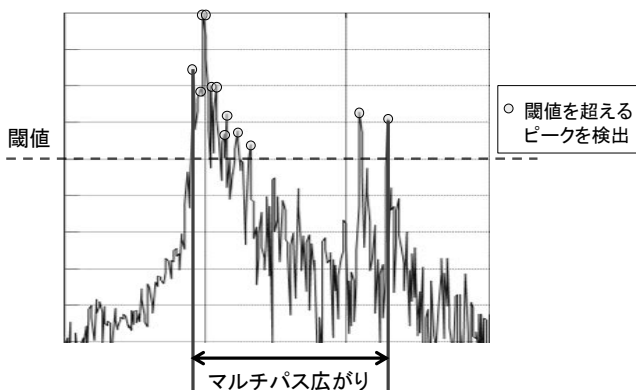


図 7 マルチパス広がりの説明図

4.2. 遅延プロファイル特性

図 3 (a) のポール①に設置した 8 素子八木アンテナで受信した場合の遅延プロファイルの結果を図 6 に示す. 図 6 はマルチパス広がりをプロットしたものであり, マルチパス広がり, は, 図 7 に示すように, 遅延プロファイルのピークからの閾値を -10dB および -20dB とした時の, 最初に閾値を上回る到来波と最後に閾値を上回る到来波の遅延時間の差である. 図 6 よ

り, 主に見通し外で閾値 -20dB のマルチパス広がりが FFT ポイント数 1K の信号のガード期間 $6\mu\text{s}$ を超えている部分が多くあり, 直接波の遮蔽が大きいところでは, FFT ポイント数 2K の信号のガード期間 $12\mu\text{s}$ を超える場合も存在することがわかる.

4.3. アンテナ構成 A の伝送特性

アンテナ構成 A として, VV 偏波送信で, STTC-MIMO の復調に使用する 2 つの受信アンテナの間隔を 5 波長, 10 波長, 20 波長とした場合の伝送特性を比較した. 受信アンテナは 8 素子と 26 素子八木アンテナを用いた. FFT ポイント数 1K の信号について, それぞれの素子数のアンテナ間隔における換算 BER を図 8, 図 9 に, 受信相関係数の分布を図 10, 図 11 に示す.

8 素子八木アンテナで受信した場合の特性として, 図 5 の受信電力が低い, あるいは図 6 のマルチパス広がりが大きいところで換算 BER 特性が悪くなっている. アンテナ間隔を広くすることにより受信相関係数が小さい方に分布し (図 10), 伝送特性が改善されることがわかる (図 8). 但し, アンテナ直下に関して

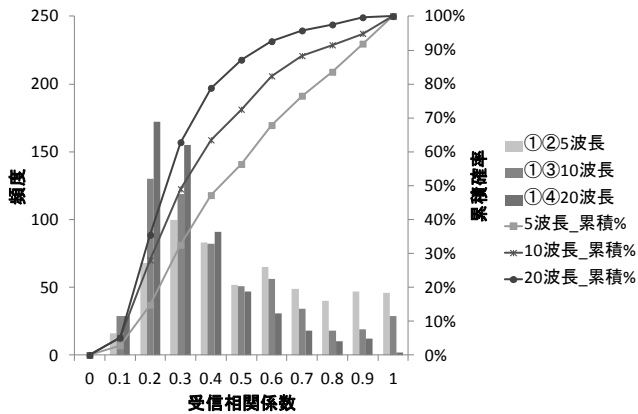


図 10 8 素子八木アンテナの受信相関

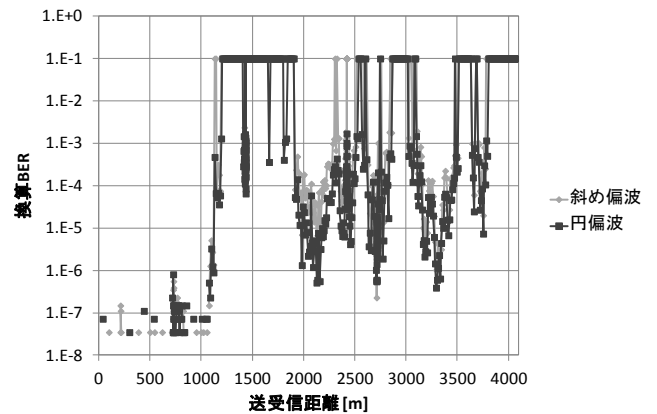


図 12 斜め偏波受信と円偏波受信の換算 BER

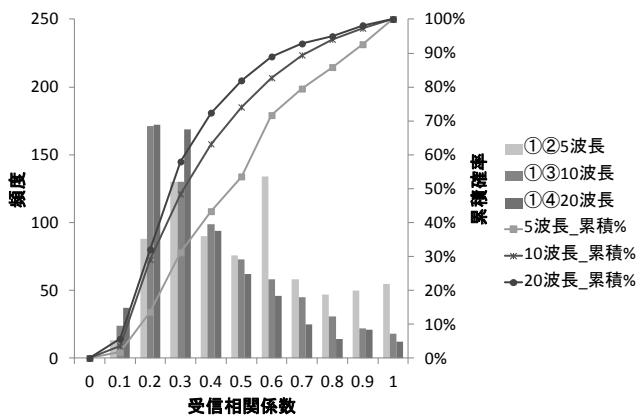


図 11 26 素子八木アンテナの受信相関

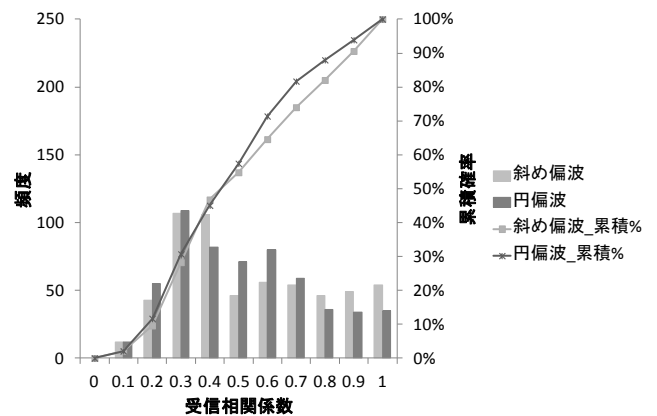


図 13 斜め偏波受信と円偏波受信の受信相関

は、世田谷通りから離して設置したアンテナの条件が悪くなり劣化が生じたようである。

26 素子八木アンテナで受信した場合も、傾向は同じであるが、アンテナ利得が 7dB 大きくなるため受信電力が大きくなり、また、アンテナの半値角が絞られるため到来波がある程度制限され、全体的に 8 素子よりも換算 BER 特性が改善されている (図 9)。受信相関係数についても、アンテナ間隔を広くすることにより受信相関係数が小さい方に分布した (図 11)。

4.4. アンテナ構成 B および B' の伝送特性

アンテナ構成 B および B' として、VV 偏波送信で、斜め偏波受信および円偏波受信の 8 素子クロス八木アンテナを図 3 (a) の基準位置①に設置して伝送特性を比較した。FFT ポイント数 1K の信号についての換算 BER 特性を図 12 に、受信相関係数の分布を図 13 に示す。

アンテナ構成 B の斜め偏波受信の結果 (図 12) とアンテナ構成 A の VV 偏波受信の結果 (図 8) を比較すると、主に見通し外の部分で、斜め偏波受信は VV

偏波受信のアンテナ間隔 5 波長と比べて 1 桁程度、20 波長と比べて 2 桁程度換算 BER 特性が悪くなった。図 12 でアンテナ構成 B の斜め偏波受信とアンテナ構成 B' の円偏波受信を比べると、場所によってはあるが、円偏波受信の方が換算 BER 特性が 1 桁程度良い傾向にあった。これは、円偏波受信の方が受信相関係数が低い方に分布するためと考えられる (図 13)。

4.5. アンテナ構成 C および C' の伝送特性

アンテナ構成 C および C' として、垂直水平偏波共用アンテナによる VH 偏波送信で、VH 偏波受信および円偏波受信の 8 素子クロス八木アンテナを図 3 (a) の基準位置①に設置して伝送特性を比較した。FFT ポイント数 1K の信号についての換算 BER 特性を図 14 に示す。

アンテナ構成 C の VH 偏波受信の結果 (図 14) とアンテナ構成 A の VV 偏波受信の結果 (図 8) を比較すると、アンテナ構成 C の VH 偏波受信の方が見通し内の安定性は良いが、見通し外では、アンテナ構成 A の VV 偏波受信の特にアンテナ間隔 20 波長よりも悪い

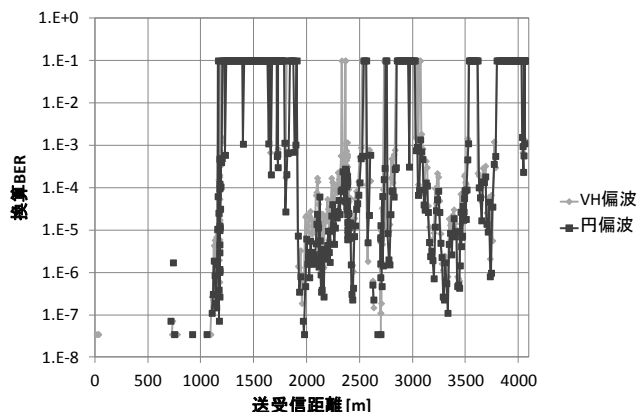


図 14 VH 偏波送信の換算 BER 特性

結果となった。但し、アンテナ構成 B の結果 (図 12) とアンテナ構成 C の結果 (図 14) を比較すると、アンテナ構成 B の斜め偏波受信よりもアンテナ構成 C の VH 偏波受信の方が特性が良かった。さらに、図 14 でアンテナ構成 C の VH 偏波受信とアンテナ構成 C' の円偏波受信を比較すると、場所によってはあるが、円偏波で受信する方が 1 桁程度特性が良い傾向にあった。その理由として、VH 偏波で送信して VH 偏波で受信する場合は、ダイバーシチ効果が得られにくい、円偏波で受信することで、交差偏波成分が大きくなり、ダイバーシチ効果が増すことが考えられる。

4.6. 各アンテナ構成での換算 BER の累積確率分布

各アンテナ構成における 8 素子八木アンテナまたは 8 素子クロス八木アンテナ受信での換算 BER の累積確率分布を図 15 に示す。図 15 で、換算 BER の値が $1E-3$ 以下となる割合で評価すると、大きい順に A20 波長 (79.2%)、A10 波長 (77.6%)、A5 波長 (74.2%)、C' (70.7%)、B' (67.4%)、C (66.3%)、B (62.5%) であり、アンテナ構成 A の VV 偏波送信で VV 偏波受信のアンテナ間隔を広くする方法が最も良く、アンテナ構成 C' の VH 偏波送信で円偏波受信する方法や、アンテナ構成 B' の VV 偏波送信で円偏波受信する方法も、少ない特性劣化で伝送が可能な方法であることがわかる。

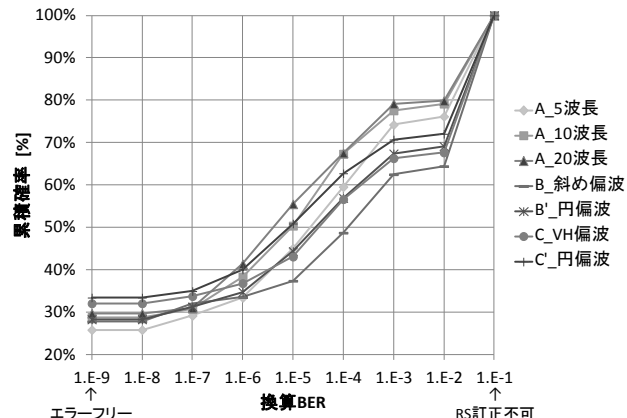


図 15 換算 BER の累積確率

5. まとめ

今回、 2×2 STTC-MIMO 方式に関して、走行コース沿いの受信点で受信アンテナの間隔、素子数や偏波などのアンテナ構成を変えて伝送特性を比較した。

結果として、送受ともに 2 つのアンテナが垂直偏波の場合に、受信アンテナの間隔を広げて受信すると受信相関特性が小さくなり BER 特性が改善されることを確認した。また、2 つの受信アンテナの間隔を広げて設置できない場合は、円偏波 (右旋・左旋) のクロス八木アンテナを用いて一カ所で受信する方法が有効であり、さらに、2 つの送信アンテナの間隔も広げて設置できない場合は、垂直・水平偏波共用アンテナを送信に用いて一カ所で送信し、円偏波 (右旋・左旋) のクロス八木アンテナを用いて一カ所で受信する方法が有効であるという知見が得られた。

文 献

- [1] 電波産業会:「テレビジョン放送番組素材伝送用可搬形 OFDM 方式デジタル無線伝送システム」標準規格 ARIB STD-B33 1.2 版, (2011)
- [2] 中川, 鶴澤, 光山, 池田: “高度化 FPU 用 2×2 STTC-MIMO 伝送装置の開発”, 映情学技報, vol.34, no.21, BCT2010-50, pp.5-8, (2010)
- [3] 中川, 池田: “ 2×2 STTC-MIMO-OFDM システムの性能改善”, 映情学技報, vol.36, no.10, BCT2012-48, pp.69-72, (2012)
- [4] 中川, 鶴澤, 光山, 池田: “ 2×2 STTC-MIMO-OFDM システムの野外実験 —びわ湖マラソンコースの高所受信における伝送特性—”, 映情学技報, vol.36, no.30, BCT2012-62, pp.9-12, (2012)
- [5] 宮田, 神崎, 原ほか: “移動中継 FPU の周波数移行に向けた広島駅伝コース伝搬実験”, 映情学技報, vol.37, no.39, BCT2013-92, pp.17-20, (2013)
- [6] 中川: “時空間トレリス符号化 MIMO 伝送システム”, NHK 技研 R&D, no.143, pp.18-27, (2014 年 1 月)
- [7] 電波産業会:「1.2GHz/2.3GHz 帯テレビジョン放送番組素材伝送用可搬形 OFDM 方式デジタル無線伝送システム」標準規格 ARIB STD-B57 2.0 版 (2014)