

高速車両に適した移動通信方式について

浜村昌則

高知工科大学工学部
〒 782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185

E-mail: hamamura.masanori@kochi-tech.ac.jp

要約：本稿では、著者らの研究グループが提案している高速車両用の新しい移動通信方式について、研究成果の一部を紹介している。提案方式は、高速移動車両内のユーザによる快適なインターネット接続を可能にするものであり、外部基地局 - 車両内中継局間通信および車両内中継局 - ユーザ間通信の二つからなる。前者に関して、複数の適応アルゴリズム (CMA 及び MMSE アルゴリズム) を用いる車速感応型適応アンテナ (VSR-AA) の性能を示している。結果として、直接波及び反射波の到来角が極めて近い場合を除き、従来は困難であった多重波伝搬路における直接波の分離・捕捉が可能となることを明らかにしている。後者に関しては、高速通信を実現するために処理利得を下げても、遅延波干渉の影響を受けにくい新しいスペクトル拡散方式を提案し、その性能を示している。

Abstract : This paper introduces part of our research on wireless communication systems for fast moving mobiles. Our proposed system enables access to the Internet with mobile units from the inside of the fast moving carriages such as the Shinkansen by means of a transponder. The proposed system consists of two phases of communications: 1) base station to transponder and 2) transponder to mobile terminals. In order to avoid interference from reflected waves, vehicular speed response adaptive antenna (VSR-AA) with two kinds of smart algorithms is applied to 1). As a result, it is shown here that we can separate out the direct wave from other arrival waves. Again, a spread spectrum system is proposed and is applied to 2). As a result, it is shown that the second phase of the communications has tolerance for interference caused by delayed waves, even when a small processing gain is chosen for fast, comfortable communications.

1. はじめに

新幹線など長距離輸送の高速車両内から自由にインターネットに接続 (データ通信) できるようになると便利である。もちろんこの場合には、周囲の乗客に対する十分な配慮が必要である。その実現手段の一つとして、著者は、2001年から車両に中継局の機能を持たせる方法を考

えてきた^①。これは、車両内のユーザが微弱あるいは小電力の電波により、中継局経由で間接的に、外部とデータ通信を行うという方法であり、ペースメーカー利用者への配慮を技術的に可能とし得る方法である。

一方で、周波数資源枯渇の対策及び大容量化の目的から、ミリ波など高い周波数の電波の利

用が検討されている。しかし、使用する周波数が高くなるにつれて、ドップラー効果に起因する周波数シフトのシフトレンジ拡大が問題となる。車両の中継局と外部の基地局との通信にミリ波の利用を想定すると、この点が、小電力で高速・高品質な通信を実現する際のボトルネックとなる。

車両内中継局とユーザとの間の通信においては、伝搬環境は静的または準静的なフェージング環境となるため、通信性能がユーザのいる場所に大きく依存するようになる。この問題による悪影響は、送信電力を上げることにより改善できる場合もあるが、時間遅延の大きな信号が存在するいわゆるマルチパスの環境では、送信電力を大きくするだけでは通信性能を改善できない場合が生じる。また、送信電力による性能改善は、ペースメーカー利用者への配慮を同時に達成するのが難しい。そのため、送信電力を上げずに、なおかつユーザのいる場所に依存せずに、通信性能のみを向上させる新しい技術が必要となる。

本稿では、外部基地局と車両内中継局の間の通信性能の改善法、ならびに、車両内中継局とユーザの間の通信性能の改善法について、著者らの研究成果の一部を紹介する。

2 外部基地局—車両内中継局間通信

2.1 車速感応型アダプティブアレー

高速移動車両通信における下り回線の通信性能を大幅に向上する方式として、著者らは車速感応型適応アンテナ (Vehicular Speed Response Adaptive Antenna : VSR-AA) を提案している²⁾。文献(2)では、アレーアンテナの重み更新にMMSE (Minimum Mean Square Error) アルゴリズムを用いている。その構成図を図1に示す。

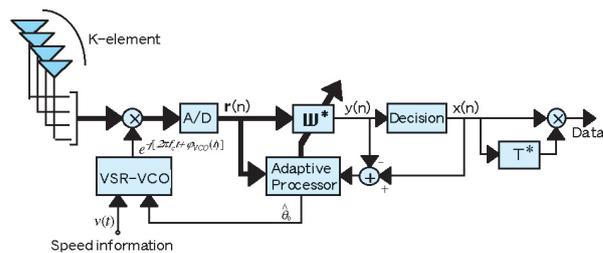


図1 車速感応適応アンテナ

これまでに行ってきた性能評価では、通信環境として仲上ライスフェージングを想定しており、それ以外の環境での検討は行っていない。そこで、強勢な反射波が存在する伝搬環境での検討を行った。今回仮定する非選択性通信路(直接波と反射波の到着時間差が、信号のシンボル長と比べ十分小さい通信路)では、直接波と反射波の到来角が近接していると、短時間で2波を分離するのは本質的に難しい。よって、本研究では、2波の到来角がどの程度まで近接すると通信性能に影響が出るかを把握すること、ならびに、2波の相互干渉を軽減する新しい方式を提案することが目的となる。

2.2 提案方式

これまでのVSR-AAにはMMSEアルゴリズムを適用してきた。このアルゴリズムは、受信機で再生した情報データと受信信号の差が最小となるようアレーアンテナ重みを制御・更新する方法であり、強勢な反射波が存在しない環境では高い通信性能を示す。その他に、CMA (Constant Modulus Algorithm) が知られている³⁾⁴⁾。CMAは、検出信号レベルを一定値に近づけるようアンテナ重みを制御・更新するアルゴリズムであり、反射波の影響を軽減できる可能性が高い。このアルゴリズムには受信機で情報データを再生する必要がないという長所もある。しかし、所望波と非所望波が共に定包絡線性を有している時には、どちらを捕捉するか予測できないという欠点があり、そのままでは小さな電力の信号を受信してしまう場合が出てく

る。そこでMMSE アルゴリズムとCMA を併用する方式を提案し、検討してみた。その構成図を図2に示す。

2.3 性能評価

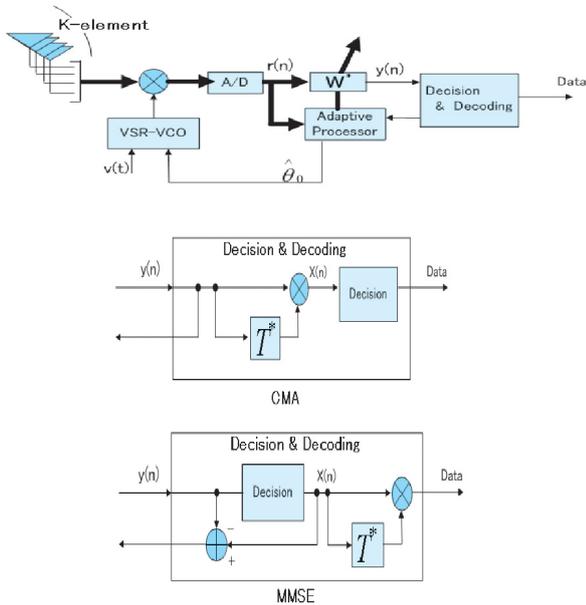


図2 提案方式

今回は簡単のため直接波の到来角 (Angle-Of-Arrival: AOA) を 45deg 固定とし、反射波到来角 (θ) を $0 \leq \theta \leq 180\text{deg}$ の範囲で変化させた。到来角はいずれの場合も、移動体の進行方向を基準 (0deg) としている。通信路としてはライスファクタ = 5.0 の仲上ライスフェージングに、強勢な反射波 1 波が追加で到来する伝搬環境を想定した。また、シンボルレート ($1/T$) = 200 ksymbols/s、キャリア周波数 = 60GHz、移動体速度 = 180km/h として、 $f_p T = 0.05$ のフェージングとした。アンテナ素子は素子数を 8 とし、移動体の進行方向と平行に 1/4 波長間隔で等間隔に配置した。データ変調には差動符号化 BPSK(Binary Phase Shift Keying) を用いた。直接波と反射波の電力比は 4 とした。直接波のビットエネルギーを E_b として定義し、 E_b と白色ガウス雑音の片側電力密度 N_0 との比を $E_b/N_0 = 0\text{dB}$ とした。計算機シミュレーションの結果の例を図3に示す。

従来型アレーアンテナ (Ordinary AA) のビット誤り率 (Bit Error Rate: BER) は直接波到来角と反射波到来角の相互関係に依らず、 $\text{BER} = 10^{-1}$ となっており、通信品質は劣悪である。一方で、MMSE アルゴリズム用いた VSR-AA の BER は、直接波と反射波の到来角に差がある場合には $\text{BER} = 10^{-3}$ と良好であるが、反射波到来角が 0deg 付近の時にはやや不満が残る。他方、CMA を用いた VSR-AA は、反射波到来角が 0deg 付近の時には、MMSE アルゴリズムの場合より優れるが、反射波到来角が 90deg 付近の時、BER が著しく劣化する。

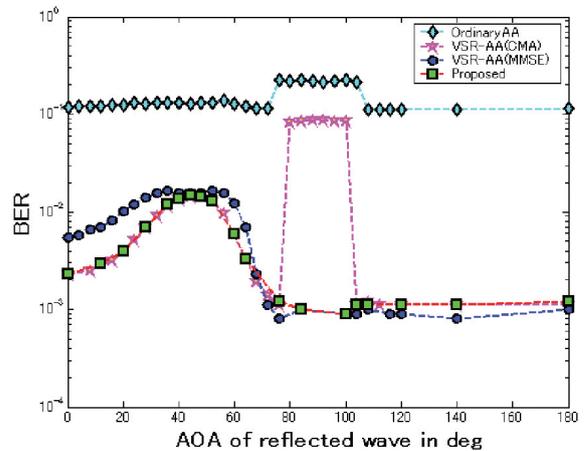


図3 反射波到来角とビット誤り率の関係 (直接波到来角は 45deg 固定、直線波と反射波の電力比は 4)

以上における BER の劣化は、強勢な 2 波が混在する環境で、直接波が存在するにもかかわらず、電力の小さい反射波のみを捕捉してしまったり、反射波の影響を完全に抑圧できなかったりするのが原因である。このことから、伝搬環境によって適した重み更新法は異なり、それによって反射波抑圧能力に著しく差が出てくるのがわかる。そこで提案方式では、CMA 及び MMSE アルゴリズムの長所のみを取り入れる工夫を行った。すなわち、CMA による重みトレーニング終了後の到来波捕捉角が 90deg 付近であれば MMSE アルゴリズムによる重みに切り替えて到来波を受信し、到来波捕捉角が 90deg 付

近以外であれば、CMAによる重みのまま受信し続ける方式である。提案方式(Proposed)における反射波到来角とビット誤り率の関係も図3に示した。図3からわかるように、提案方式を用いることで、電力の大きい到来波を捕捉する性能を向上させることができる。

なお、反射波の到来角が直接波の到来角に近い45deg近傍のときには、提案方式でもBER性能は劣化している。これは、このような環境での2波は、短時間では合成された1波としてしか観測できないためである。しかし、このような場合の直接波と反射波の到来時間差は比較的大きいと予想でき、この場合、スペクトル拡散(直接拡散)方式により反射波を抑圧できる可能性が高い。

3. 車両内中継局—ユーザ間通信

3.1 マルチパス通信路

送信された電波は通常、周囲の建造物や地物に反射されて受信局まで到達する。新幹線などの車両内においても同様であり、通信路はいわゆるマルチパス通信路を形成する。マルチパス通信路では、先行波(又は直接波)と遅延波が互いに干渉するため、通信性能は著しく劣化する。

一方、スペクトル拡散方式の代表的な方式である直接拡散(Direct Sequence: DS)方式は、逆拡散処理によりパス分解が可能となるため、マルチパス通信路に強い。しかしこのパス分解能は、拡散/逆拡散処理に使用するPN系列の系列長に依存し、同一帯域幅内で高速通信を実現するため系列長を短くすると、干渉抑圧能力が大きく低下する。そこで本研究では、系列長が短くともパス間干渉の影響を受けない新しい直接拡散方式についての検討を進めており、その一部を以下に紹介する。

3.2 提案方式

提案方式の通信開始時は通常のDS方式と同じである。ただし、受信側では、受信サンプルベクトルを直交化フィルタ⁵⁾(図4)の入力信号

ベクトルとして扱い、タップ重みの更新処理を行う。ここで受信信号ベクトルとは、受信信号をチップ間隔でサンプリングし、それを系列長分ならべてできる系列をベクトルと見なしたものである。次に受信側は、生成したタップ重みを送信側に通知する。送信側は、そのタップ重みをPN系列として扱い、以降の拡散処理に用いる。受信側もそのタップ重みを、以降の逆拡散処理に用いる。

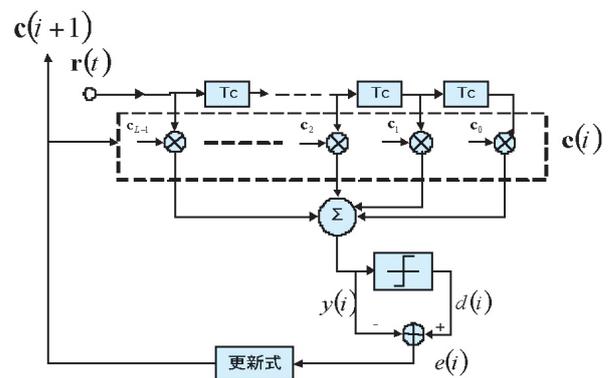


図4 直交化フィルタ

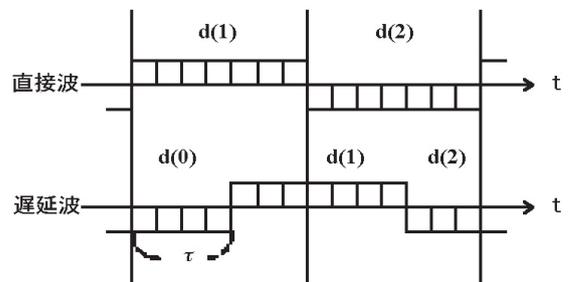


図5 先行波(直接波など)と遅延波

提案方式は、以上を繰り返し行う通信方式である。直交化フィルタで重み更新を行うことで、遅延波の干渉を軽減する系列に変化させることができる。直交化フィルタのタップ重み更新式には次式を用いる。

$$c(i+1) = c(i) + \mu e(i)r(i)$$

ここで、 $c(i)$ はタップ重みベクトル、 $r(i)$ は受信サンプルベクトル、 μ はステップサイズである。

受信側は、上式により逐一タップ重みを更新

し、更新したタップ重みを新たなPN系列として一定時間間隔で送信側に通知する。これにより、時間が経過するにつれてマルチパス干渉の影響を受けないPN系列に変化していく。

3.3 性能評価

性能評価のため、計算機シミュレーションによりビット誤り率(Bit Error Rate: BER)特性を求めてみた。このシミュレーションでは、通信初期のPN系列を3段シフトレジスタにより生成した系列長7のM系列とした。重み更新式のステップサイズは $\mu = 10^{-4}$ とした。遅延波のデータは先行波より4チップ分遅れて到着するものとした(図5)。通信路の雑音には白色ガウス雑音を仮定した。また、本研究では簡単のため、先行波1波、遅延波1波の2波等電力のマルチパス通信路を仮定し、フェージングはないものとした。変調方式にはBPSKを用いた。

以上の条件に加え、送信側への通知間隔 T_s [bits]を $T_s = 1$ (すなわち、情報1ビットごとに通知)として、 10^6 回のトレーニングを行った後の提案方式のBER特性をシミュレーションで確認した。比較のため、初期のM系列を更新せずそのまま使い続ける通常のDS方式で、反射波が有る場合と無い場合のBER特性も求めてみた。結果を図6に示す。

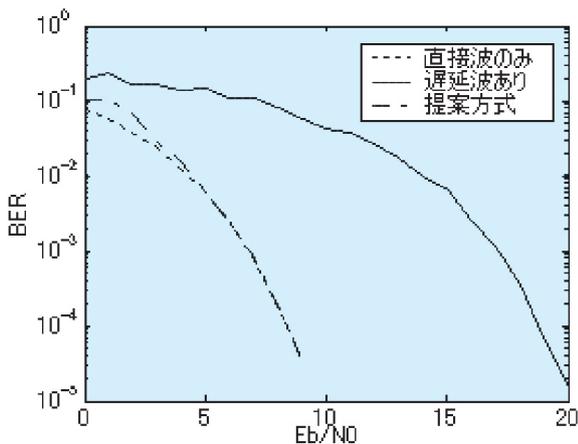


図6 PN系列の更新頻度 $T_s=1$ の場合のBER特性 (10^6 回のトレーニング終了後、従来のDS方式における遅延波ありの場合、無しの場合(理想)の特性と比較)

図6から明らかなように、提案方式により遅延波の影響をほぼ完全に抑圧できることがわかる。しかし、以上のシミュレーションのように、PN系列を情報1ビットごとに受信側から送信側に通知するのは非効率的である。そこで、PN系列の通知間隔を $T_s = 10^m$ ($m = 0 \sim 5$)として、通信初期から 10^6 回のトレーニング終了後までの時間平均ビット誤り率を求めてみた。その結果を図7に示す。図7より、 $m = 4$ 以上となるとBER特性に大きな劣化が見られるものの、 $m = 3$ 程度以下であれば、それほど大きな品質低下とならず、高品質な通信が可能になることがわかる。

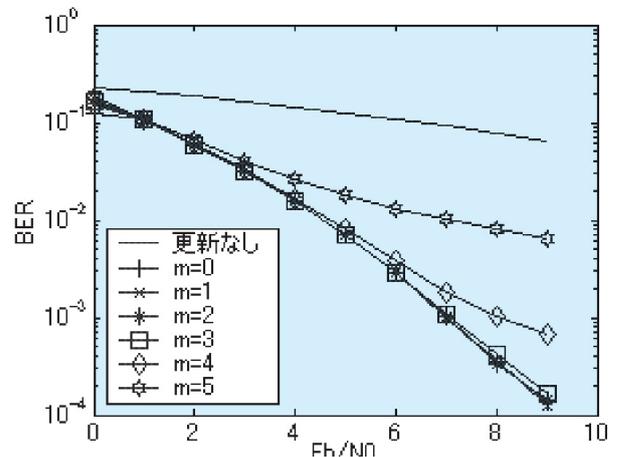


図7 PN系列の更新頻度 T_s とBERの関係 ($T_s = 10^m$ ($m=0 \sim 5$), 通信初期から 10^6 回のトレーニング終了後までの時間平均ビット誤り率)

4. むすび

本稿では、外部基地局と車両内中継局の間の通信性能の改善法、ならびに、車両内中継局とユーザの間の通信性能の改善法について、著者らの研究成果を紹介した。

前者に関しては、高速移動体に適用したVSR-AAの重み更新にCMA及びMMSEアルゴリズムを切り替えて使用する方式の性能評価例を示した。この方式により、直接波及び反射波の到来角が極めて近い場合を除き、電力の強い直接波を分離・捕捉できることを述べた。

後者に関しては、マルチパス通信路に耐性を

持つ DS 方式を提案し、性能評価例を示した。提案方式を用いることで、系列長の短い PN 系列を拡散処理に使用しても、パス間干渉を受けずに通信できることを述べた。

本研究の一部は、文部科学省 私立大学学術研究高度化推進事業 ハイテク・リサーチ・センター整備事業の助成による。記して謝意を表す。

文献

- (1) 浜村昌則, “車速感応型適応アンテナによる高速車両内インターネット接続のための微弱電波通信方式,” 平成 14 年度科学研究費補助金申請書 (若手研究 B 研究計画調書), Nov. 2001.
- (2) 浜村昌則, 太刀川信一, “車速感応型適

応アンテナ,” 信学論 A, vol.J84-A, no.7, pp.959-968, July 2001.

- (3) J. R. Treichler and B. G. Agee, "A new approach to multipath correction of constant modulus signals," IEEE Transactions, vol. ASSP-31, no.2, April 1983.
- (4) 菊間信良, “アレーアンテナによる適応信号処理,” 科学技術出版, 1998.
- (5) 吉田尚正, 後川彰久, 柳修三, 古谷之綱, “高速フェージング伝送路に適した遅延検波型 DS/CDMA 適応干渉キャンセラ,” 信学論, vol.J77-B-II, no.11, pp.618-627, Nov. 1994.
- (6) 府川和彦, 鈴木博, “直交化整合フィルタ受信方式 DS/CDMA 移動通信における線形干渉キャンセラ,” 信学技報, SST96-37, pp.7-12, July 1996.