MC-CDMA を用いた車車間通信に適したターボ等化の検討

平岩　士昌[†a)]（学生員）　坂田　篤則[†]（学生員）
山里　敬也[†]（正員）　片山　正昭[†]（正員）

Turbo Equalization for Inter-Vehicle Communication Based on MC-CDMA

Noriaki HIRAIWA[†a)], Atsunori SAKATA[†], *Student Members*, Takaya YAMAZATO[†], and Masaaki KATAYAMA[†], *Members*

[†] 名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻，名古屋市
Department of Electrical Engineering and Computer Science, Nagoya University, Nagoya-shi, 464–8603 Japan
a) E-mail: nhiraiwa@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし　本論文では MC-CDMA を用いた車車間通信に適した SC/MMSE ターボ等化を提案する．提案方式では各車両のチャネル伝達関数の違いによる電力差に着目し，SC/MMSE ターボ等化の MMSE フィルタを修正した，これにより受信可能台数が増加した．

キーワード　車車間通信，ターボ等化，MC-CDMA，多元接続干渉

1. まえがき

車車間通信の通信方式の一つとして，CSMA を用いないため隠れ端末問題が生じず，同時に複数車両と通信が可能な，MC-CDMA を用いた車車間通信方式が提案されている [1]．車車間通信では符号間干渉やドップラーシフトにより信号の直交性が崩れるため，等化が必要となる．ターボ等化は等化と復号の繰返し処理により，干渉の影響が大きい場合に MMSE 等化で問題となる残留干渉による影響を除去できる [2]〜[4]．また残留干渉を除去する手法として干渉除去による手法も提案されている [5]．

車車間通信では自律分散型の通信となるため電力制御を行うことが難しい．そのため，信号の受信電力の差が大きい．電力差が生じる状況では，従来方式のターボ等化や干渉除去を用いても多元接続干渉を抑えることができず，受信車両から離れた車両からの信号を得ることができない．

本論文では，MC-CDMA を用いた車車間通信で，受信電力に差が生じる状況でも適用可能なターボ等化を提案する．そして，提案するターボ等化の有効性をスループットにより示す．

2. SC/MMSE ターボ等化

図 1 に SC/MMSE ターボ等化の構造を示す．ターボ等化では等化器と復号器の間で送信シンボルに関する外部情報を交換する．そして外部情報を用いて等化と復号を繰り返し行うことで，より高精度に等化を行うことが可能となる [2]．図 1 に示す構造をもつ SC/MMSE ターボ等化の特徴は，等化部分にトレリス構図を用いないために，少ない計算量でターボ等化を行うことが可能という点である [3]．

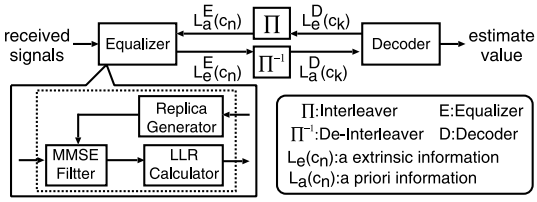

図 1　SC/MMSE ターボ等化の構造
Fig. 1　Structure of SC/MMSE turbo equalization.

表 1　SC/MMSE ターボ等化のアルゴリズム
Table 1　Algorithm of SC/MMSE turbo equalizer.

	従来方式 [3], [4]	提案方式
$\mathbf{r}$	$\sum_{u=1}^{U} \mathbf{H}_{(u)}\mathbf{s}_{(u)} + \nu$	
$\tilde{\mathbf{r}}$	$\mathbf{r} - \mathbf{H}_{(i)}\hat{\mathbf{s}}_{(i)}$	$\mathbf{r} - \sum_{u=1}^{U} \mathbf{H}_{(u)}\hat{\mathbf{s}}_{(u)}$
$\mathbf{z}$	$\mathbf{H}_{(i)}^H\mathbf{H}_{(i)}\,\hat{\mathbf{s}}_{(i)}/\Psi + \mathbf{H}_{(i)}\tilde{\mathbf{r}}/\Psi$	
Ψ	$\frac{U}{SF}\mathbf{H}_{(i)}\Omega\mathbf{H}_{(i)}^H + N_0\mathbf{I}$	$\frac{1}{SF}\sum_{u=1}^{U}\mathbf{H}_{(u)}\Omega\mathbf{H}_{(u)}^H + N_0\mathbf{I}$
Ω	$\mathrm{Cov}\{\mathbf{s}_{(i)} - \hat{\mathbf{s}}_{(i)}\}$	$\mathrm{Cov}\{\mathbf{s}_{(u)} - \hat{\mathbf{s}}_{(u)}\}$

SC/MMSE ターボ等化のアルゴリズムを表 1 に示す．表 1 のベクトル表現は k 番目のサブキャリヤにおける m シンボルの連続したシンボルの集合を表し，$\mathbf{s}_{(u)}$ は u 台目の車両の送信信号，$\mathbf{r}$ は受信信号を表す．また，行列表現の $\mathbf{H}_{(u)}$ は u 番目の車両のチャネル伝達関数，$\mathbf{I}$ は単位行列，$\mathrm{Cov}\{\cdot\}$ は共分散行列，$\cdot^H$ は複素共役転置を表す．更に，U は全送信車両台数，i は全送信車両の中で等化を行う着目車両，SF は拡散率，ν は平均 0，分散 $\sigma^2{=}N_0/2$（N_0 は片側雑音電力）の複素白色雑音を表す．

SC/MMSE ターボ等化は，まず復号器からの送信シンボル c_k に関する外部情報 $L_e^D(c_k)$ を用いて送信信号の推定値 $\hat{\mathbf{s}}$ を作成する．次に，この推定値 $\hat{\mathbf{s}}_{(u)}$ と $\mathbf{H}_{(u)}$ を用いて干渉のレプリカを作成する．そして干渉のレプリカを受信信号から減算することで，干渉を除去して $\tilde{\mathbf{r}}$ を得る．最後に，$\hat{\mathbf{s}}_{(u)}$ の推定誤りのため除去しきれない残留干渉の抑圧のために，MMSE 規範のフィルタを利用して，残留干渉の影響を抑圧する．結果として i 番目の車両のフィルタ出力は，$\mathbf{z}$ のようになる [3], [4]．

表 2　シミュレーション諸元
Table 2　Simulation parameter.

変調方式	MC-CDMA・QPSK
伝送レート	612 kbps
拡散率	16
サブキャリヤ数	64
符号化・復号	ターボ符号 (R=1/3)・Max-Log-Map
サービスエリア	100 m
チャネルモデル	マルチパスチャネル （平均パス数：16，電力：指数減衰） 距離減衰：3.5 乗則 正規化最大ドップラー周波数：0.002
等化方法	SC/MMSE ターボ等化（繰り返し：5 回）
チャネル推定	完全

車車間通信は自律分散型の通信となるため，送信電力を制御することが難しい．車車間通信の要求条件として，数百 m 離れた車両からの信号を受信する必要があるといわれている．そのため，受信車両では距離減衰のみでも 70 dB 近く電力差のある信号が受信される．

表 1 に従来方式と提案方式の SC/MMSE ターボ等化のアルゴリズムを示す．従来方式は着目車両以外のチャネル伝達関数を考慮していない．もし電力制御を行えるならば，各車両のチャネル伝達関数の絶対値が大きく変動しないため，等化を行うことは可能である．一方，車車間通信のように電力差が生じる状況では，チャネル伝達関数の絶対値は大きく変動する．そのため，受信車両に近い車両の信号を等化することは可能であるが，受信車両から離れた車両からの信号は，受信車両に近い車両からの信号が干渉（多元接続干渉）となり等化することができない．

提案方式は，従来方式のソフトキャンセラ $\tilde{\mathbf{r}}$ やフィルタ Ψ を変更し，各車両からのチャネル伝達関数の違いを考慮している．そのため，提案方式は電力差によるチャネル伝達関数の違いに対処することができるため，離れた車両からの信号に対しても等化可能である．

3. 数　値　例

シミュレーション諸元を表 2 に示す．それぞれのパスにおける遅延広がりは，ガードインターバル長内とする．また，車両ごとにチャネル伝達関数は異なるものとする．チャネル推定は完全にできているとする．

シミュレーションのネットワークは，交差点のモデルを考えている．受信車両は交差点の中心に配置してその周りにポアソン分布に従い送信車両が配置されているものとする．受信車両に近い車両から順番に No.1，No.2,··· と番号付けを行う．受信電力は 70 m 離れた車両からの受信端 E_b/N_0 を 20 dB に固定して，これを基準にそれぞれのパケットの電力は距離の 3.5 乗に比例して減衰するものとする [1]．

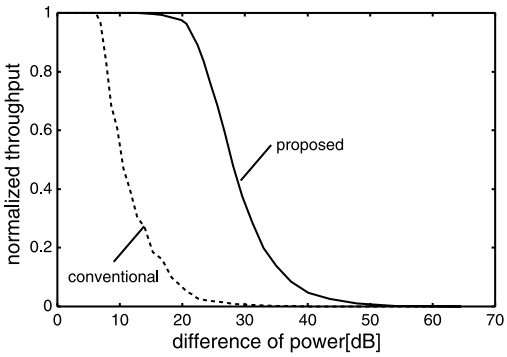

図 2　電力差による等化可能範囲
Fig. 2　The equalizable range by power difference.

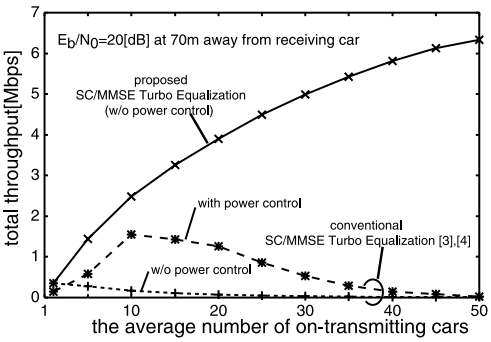

図 3　平均送信車両に対する全車両からのスループット
Fig. 3　The number of on-transmitting cars versus total throughput.

まず，絶対値の違いが従来方式と提案方式の特性に与える影響について示す．図 2 は従来方式と提案方式の電力差による等化可能範囲の違いを表している．ここでは，2 台の車両が信号を送信していて，離れている車両からのスループットを示している．図 2 より，従来方式なら 10dB 程度の電力差まで，提案方式なら 25dB 程度の電力差まで等化可能である．従来方式でも仮に電力制限を行うことができ，電力差による干渉の影響が 10dB 程度の電力差に収まっていれば，十分なスループットを得ることは可能である．また，提案方式は従来方式に比べて電力差による影響に耐性があることが分かる．

図 3 に提案方式と従来方式を用いた場合の平均送信車両台数に対する全車両合計のスループットを示す．

従来方式（w/o power control）は着目車両以外の

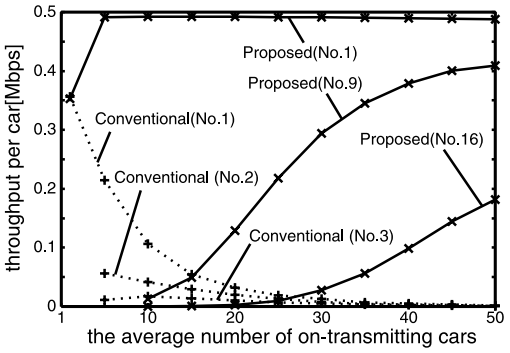

図 4　平均送信車両に対する各車両からのスループット
Fig. 4　The average number of on-transmitting cars versus throughput per car.

チャネル伝達関数の絶対値の違いを考慮していないため，図 2 に示したように干渉の影響を十分に抑えることができない．そのため，車両台数が増加するにつれスループットは低下する．一方，提案方式では着目車両以外のチャネル伝達関数の絶対値の違いを考慮しているため，干渉の影響を除去することができる．そのため，ほぼ線形にスループットは増加している．

ところで，提案方式では平均送信車両台数が拡散符号数 (16) 以上の車両からの信号を受信できている．これは拡散符号が重複する信号を受信できていることを意味している．通常，このような状況では信号を受信することはできない．しかし，車車間通信では電力制御が困難であるため，受信電力が大きくばらつく．これにより拡散符号が重複する信号を同時に受信したとしても，電力の大きい信号のみが受信されることになる．そのため，スループットの低下につながらず，図 3 の提案方式のような特性を示す．

また参考として，従来方式を用いて電力制御を行った場合の全車両からのスループットも図 3 に示している．先に述べたように，従来方式でも電力制御を行うことが可能であれば，各車両からまんべんなくスループットを得ることができる．したがって，図 3 に示すように，平均送信車両台数が 10 台までは線形にスループットが増加していることが分かる．そして，平均送信車両台数が増加するにつれスループットは低下する．これは，トラヒックが増加することで多元接続干渉が増加することによる影響もあるが，拡散符号の重複した信号が衝突するためである．したがって，平均送信車両台数が拡散符号数 (16) 以上になる領域からスループットは低下する．以上より，従来方式でも電力制御が可能であり，拡散符号数以内の車両台数であれば，等化可能であることが分かる．

図 4 に提案方式と従来方式を用いた場合の平均送信車両台数に対する各車両ごとのスループットを示す．

従来方式は，平均送信車両台数が増加するにつれて多元接続干渉の影響を受け，スループットが低下する．また，受信車両に近い車両からのスループットが支配的で，離れた車両からのスループットを得ることができない．一方，提案方式では，平均送信車両台数が増加しても多元接続干渉の影響を除去することができるためスループットが低下しない．また，受信可能な台数も増加していることが分かる．

4. む す び

本論文では，自律分散型の通信により電力差が生じるような車車間通信の環境に適した，SC/MMSE ターボ等化を提案した．提案した SC/MMSE ターボ等化を用いることで，チャネル伝達関数の絶対値が異なり，電力差が生じる状況でも多元接続干渉の影響を抑えることができ，高いスループットを得られることを示した．また，一度に通信が可能な車両台数が増加することを示した．

今後の課題としてチャネル推定，チャネル追従の検討（特にドップラーシフトによる影響）がある．

文　　献

[1] A. Sakata, T. Yamazato, H. Okada, and M. Katayama, “Throughput comparison of CSMA and CDMA slotted ALOHA in inter-vehicle communication,” 7th Conf. on ITST, pp.52–57, Sophia Antipolis, France, June 2007.

[2] R. Koetter, A.C. Singer, and M. Tüchler, “Turbo equalization,” IEEE. Signal Process. Mag., vol.21, no.1, pp.67–80, 2004.

[3] 松本　正，衣斐信介，“ターボ等化の基礎，及び情報理論的考察，” 信学論（B），vol.J90-B, no.1, pp.1–16, Jan. 2007.

[4] T. Abe and T. Matsumoto, “Space-time turbo equalization in frequency selective MIMO channels,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.52, no.3, pp.469–475, May 2003.

[5] K. Ishihara, K. Takeda, and F. Adachi, “Iterative frequency-domain soft interference cancellation for multicode DS- and MC-CDMA transmissions and performance comparison,” IEICE Trans. Commun., vol.E89-B no.12, pp.3344–3355, Dec. 2006.

（平成 20 年 5 月 7 日受付，8 月 22 日再受付）