

長い干渉通信路に対する LDPC 符号を用いた 送信ダイバーシチシステム*

兼田一幸**, 中岡秀明***

**Transmit diversity scheme with low density parity check code
for long intersymbol interference channel**

Kazuyuki KANEDA and Hideaki NAKAOKA

1. はじめに

無線通信では、送信した信号は複数の伝送経路を通り受信者に到達する。これらの伝送経路はそれぞれ長さが異なるため、受信波の到着時間はある広がりを持つことになる。この無線通信路を用いてデジタル信号を送信すると、この複数の伝送経路の影響により、送信信号の前後の送信信号が受信信号に重畳して干渉が生じる。この干渉は符号間干渉と呼ばれ、無線通信における受信信号の品質劣化の要因の一つになっている。

この無線通信システムを利用して、現在既に、多くのデジタル信号が伝送されているが、今後は、より高画質のデジタル動画の伝送など、さらに多量のデジタル信号を高速に伝送することが求められる。このようなデジタル信号の高速伝送を行うためには、送信信号のシンボル区間長をさらに小さくする必要がある。シンボル区間長を小さくすれば、符号間干渉が長いシンボル区間に渡り出現するため、伝送品質は大きく劣化する。

ところで、無線通信における特性劣化の影響を少なくする技術の一つとして空間ダイバーシチが知られている¹⁾。この空間ダイバーシチは空間的に離れた複数のアンテナを用い、そのアンテナの出力を合成することにより伝送品質の改善を行う。この空間ダイバーシチは特性改善手法として非常に有効な技術であるが、複数のアンテナとそれに対応した処理システムを受信機に設ける必要があり、受信端末の規模が大きくなるという問題がある。受信端末は多数のユーザが用いるため、なるべく処理回路や装置

の規模を小さくして、重さや形状を小さくする必要がある。このため、無線通信の下り回線では、送信側に複数のアンテナを用い、受信側では一つのアンテナを用いる、送信ダイバーシチが検討され、多くのシステムで取り入れられている。中でも、Alamouti²⁾により提案された送信ダイバーシチシステムは、伝送速度を犠牲にすることなく、空間ダイバーシチ利得を得ることが出来るため非常に有効で、その応用システムが現在広く実用化している。

この Alamouti のシステムを符号間干渉通信路に拡張した提案が Lindskog と Paulraj³⁾により行われている。この提案システムは、符号間干渉路においてダイバーシチ利得を得ることが出来るもので有効である。しかしながら、このシステムでは、送信されたデータ系列を最尤系列推定器 (Maximum likelihood sequence estimator, 以下 MLSE と略す。) を想定して推定するため、今後の利用が予想されるデジタル動画などの高速データ伝送時のような、符号間干渉が長くなった場合には、その干渉の長さに応じ回路規模が指数関数的に大きくなるという問題がある。この問題に対し、turbo 符号を用いその得られた結果を判定補助等化器で用いて、符号間干渉を除去しながら送信信号の系列推定を行う手法が兼田、荻原⁴⁾により提案されている。このシステムでは最尤推定器の代わりに繰り返し等化器を用いるため、符号間干渉が長くなっても回路規模が線形関数的にしか大きくなり、回路規模を小さくできるため有効である。但し、この方式は繰り返し等化器を用いているため、一度復号結果に誤りが多く発生するとその誤りの影響により更なる誤りが生じ、誤り特性が改善できないという問題がある。

ところで、このような繰り返し復号としては、

* 原稿受付 平成 19 年 9 月 28 日

** 佐世保工業高等専門学校, 電子制御工学科

*** 日立国際電気, 通信システム事業部

turbo 符号の他に、低密度パリティチェック符号(low density parity check code, 以下 LDPC 符号と略す)が知られている。この LDPC 符号は, turbo 符号に匹敵する復号性能を持ち, 符号長が長い場合には turbo 符号を上回る復号性能を持つことが知られている。また, この符号は turbo 符号の復号特性に見られる, SNR を大きくしても復号後の誤り率特性が改善されない現象が, turbo 符号の場合より, 小さい誤り率の 10^{-12} 程度で生じる。従って, turbo 符号の代わりに, この LDPC 符号を用いて繰り返し等価を行えば復号後の誤り率特性の改善が期待できる。

本稿では, この改善効果を検討する。まず, 2. で Lindskog の送信ダイバーシチシステムを説明し, 3. で LDPC 符号について説明する。4. では LDPC 符号を用いた送信ダイバーシチシステムを提案し, 5. でその効果を示し, 6. でまとめる。

2. Lindskog の送信ダイバーシチシステム

図 1 に Lindskog の送信ダイバーシチシステムを示す。このシステムでは, まず, 入力信号系列 $S(t)$ を, 長さ N の $s_1(t)$ と $s_2(t)$ の 2 つの信号系列に分ける。これら分けられた系列は, 2 つのアンテナを用いて表 1 の順で送信される。この送信ではフレーム構成を用いる。フレーム r_1 では, 信号 $s_1(t)$ をアンテナ 1 から伝送すると同時に, アンテナ 2 から信号 $s_2(t)$ を送信する。同様に, フレーム r_2 では, 信号処理された信号 $-s_2^*(N-t)$ をアンテナ 1 から伝送すると同時に, 信号処理された信号 $s_1^*(N-t)$ をアンテナ 2 から送信する。但し, $*$ は複素共役を示す。

次に送信信号は符号間干渉通信路に入る。その通信路モデルを図 2 に示す。この図の $h_1(t)$ と $h_2(t)$ は, 長さ q のアンテナ 1 とアンテナ 2 の通信路のインパルス応答を示す。また, $n(t)$ は白色ガウス雑音を示す。

受信機側では送信側で用いたフレーム構成を用いて受信信号 $R(t)$ を取り扱う。 n フレームでは, 受信信号 $R_1(t)$ は次式となる。

$$R_1(t) = s_1(t) \otimes h_1(t) + s_2(t) \otimes h_2(t) + n_1(t), \quad (1)$$

但し, \otimes はたたみ込みの信号処理を示す。

一方, r_2 フレームでは, 受信信号 $R_2(t)$ は時間逆デバイスと複素共役を取るデバイスを通して, 次式として作成される。

表 1 伝送系列

Transmission order	0	1	2	3
Frame number	r_1	r_2	r_1	r_2
Antenna 1	$s_1(t)$	$-s_2^*(N-t)$	$s_1(t)$	$-s_2^*(N-t)$
Antenna 2	$s_2(t)$	$s_1^*(N-t)$	$s_2(t)$	$s_1^*(N-t)$

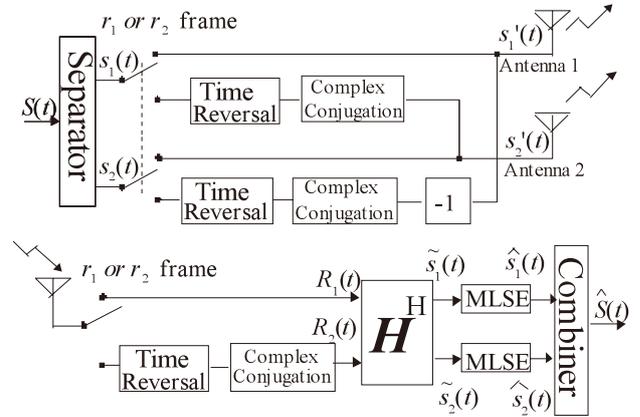


図 1. Lindskog の伝送モデル

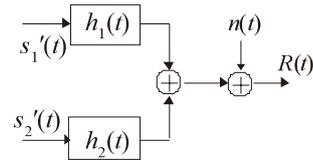


図 2. 通信路モデル

$R_2(t) = s_1(t) \otimes h_2^*(-t) - s_2(t) \otimes h_1^*(-t) + n_2(t). \quad (2)$
但し, この式の $h_1^*(-t)$ と $h_2^*(-t)$ は, 時間を逆にして, 複素共役を取ったインパルス応答を示す。ベクトル表現を用いて, 式 (1) と式 (2) の受信信号は, 以下のように表現することが出来る。

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{H} \otimes \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (3)$$

但し, 上式の $\mathbf{R}(t)$ と $\mathbf{s}(t)$ と $\mathbf{n}(t)$ の各ベクトルは

$$\mathbf{R}(t) = \begin{bmatrix} R_1(t) \\ R_2(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s}(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{n}(t) = \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

となり, 通信路行列 \mathbf{H} は次式となる。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1(t) & h_2(t) \\ h_2^*(-t) & -h_1^*(-t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

マッチドフィルタ \mathbf{H}^H は, 受信信号 $\mathbf{R}(t)$ から, 送信側の信号系列 $s_1(t)$ と $s_2(t)$ に対応した信号系列

$\tilde{s}_1(t)$ と $\tilde{s}_2(t)$ を作成する。ベクトル表記を用いると、

このマッチドフィルタの動作は以下となる。

$$\begin{aligned}\tilde{s}(t) &= \mathbf{H}^H \mathbf{R}(t) = \mathbf{H}^H \mathbf{H} \otimes \mathbf{s}(t) + \mathbf{H}^H \mathbf{n}(t) \\ &= [h_1(t) \ h_1^*(-t) + h_2(t) \ h_2^*(-t)] \mathbf{I} \otimes \mathbf{s}(t) + \mathbf{v}(t),\end{aligned}\quad (6)$$

但し、上式の $\tilde{s}(t)$ と \mathbf{H}^H と $\mathbf{v}(t)$ は以下で与える。

$$\begin{aligned}\tilde{s}(t) &= \begin{bmatrix} \tilde{s}_1(t) \\ \tilde{s}_2(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}^H = \begin{bmatrix} h_1^*(-t) & h_2(t) \\ h_2^*(-t) & -h_1(t) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{v}(t) &= \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (7)$$

次に、得られた信号系列 $\tilde{s}_1(t)$ と $\tilde{s}_2(t)$ は、

MLSE 推定器に入り、ここで希望する信号系列 $\hat{s}_1(t)$

と $\hat{s}_2(t)$ に代わる。推定された信号はコンバイナーに

入り、ここで送信信号 $S(t)$ に対応した信号系列 $\hat{S}(t)$ として合成される。

3. LDPC 符号⁵⁾

LDPC 符号は、非常に疎な検査行列 \mathbf{H} により定義される線形符号である。疎な行列とは行列内の要素において零の要素が非常に多く、また、非零の要素が非常に少ない行列のことである。本稿では、 M 行 N 列の各行、各列の重み (1 の数) が、それぞれ同じ値を持つ正則 LDPC 符号を使用する。図 3 に、行重みが 4 で、列重みが 2 の検査行列 \mathbf{H} の例を示す。

LDPC 符号は線形符号であるので、その符号化は検査行列を左下三角が全て零の行列に置き換え、この行列に与えられた情報シンボルを代入し、未知の検査シンボルを求めることにより実現できる。

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

図 3 検査行列の例

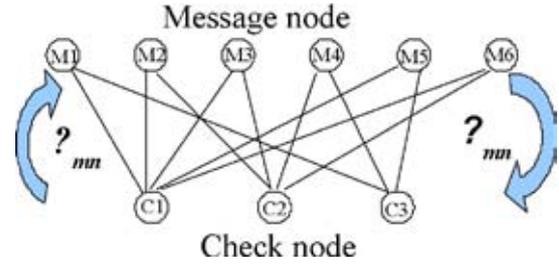


図 4 タナーグラフ

一方、LDPC 符号の復号は Sum-product 復号法を用いて行う。Sum-product 復号法は検査行列のタナーグラフを用いると理解しやすい。図 4 に図 3 の検査行列のタナーグラフを示す。上部の丸をメッセージノード M_m と呼び、下部の丸をチェックノード C_n と呼ぶ。メッセージノードはその検査行列 \mathbf{H} の列に対応し、チェックノードは行に対応する。また、グラフの連結結線は検査行列の 1 の部分に対応する。この復号法では、まず、メッセージノードに受信信号から計算した対数尤度の初期値を事前値として与える。この初期値を基にチェックノード C_n からメッセージノード M_m へ向かう結線に対応した外部値 α_{mn} を計算する。次に、この外部値をもとに、メッセージノード M_m からチェックノード C_n に向かう結線に対応した事前値 β_{mn} を算出する。そして、これらの値を各ノード間で相互に繰り返して計算することにより、信頼度を向上させ、最終的な事後確率を計算する。

4. 提案システム

Lindskog の送信ダイバーシチシステムに用いられている MLSE 推定器の代わりに、LDPC 符号を用いた系列推定を行う提案システムを図 5 に示す。まず、入力情報 $m(k)$ は LDPC 符号器に入り、ここで 3. の方法で符号化される。符号化された伝送ビット $c(k)$ は、そのビットに応じて 2PSK 変調され、送信信号 $S(k)$ となる。送信信号は Lindskog の送信ダイバーシチシステムに入る。ここで、干渉通信路に対する空間的ダイバーシチ効果を得るための信号処理を受けた後、2 本のアンテナで送信される。送信された信号は、図 2 の通信路モデルを通過し、一つのアンテナで受信される。この通信路のインパルス応答は、

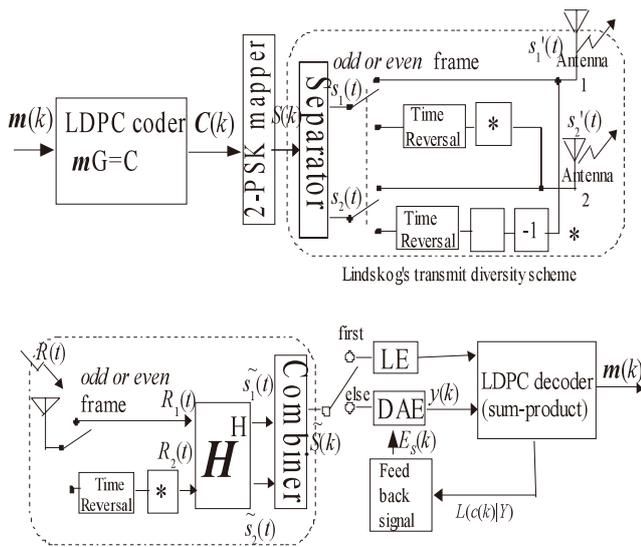


図 5 提案システム

独立したガウス変数を想定し、その分散は等しく、1 送信ブロック内のインパルス応答は変動しないものを想定する。この受信された信号は Lindskog の受信システムに入り、送信信号 $S(t)$ と対応した受信信号 $\tilde{S}(t)$ に成形された後、LDPC 符号を用いた系列推定復号器に入る。この受信信号 $\tilde{S}(t)$ にはダイバーシチ効果は得られているもの、まだ干渉が含まれているので、干渉を除いた後に LDPC 符号の繰り返し復号器に入力する。初回の繰り返しでは、復号結果がまだ得られていないので、まず、線形等価器 (Linear equalizer: 以下 LE と略す。) を用い、この等価器で符号間干渉を減少させた後に LDPC 復号器を動作させる。ここでは、線形等価器は RLS アルゴリズムを用いると仮定した。一方、繰り返し 2 回目以後は、図 5 のように、判定補助等価器 (Decision aided equalizer: 以下 DAE と略す。) を用いる。DAE は、復号器の復号結果を利用して符号間干渉のレプリカを作成し、このレプリカを用いて干渉分を除去する。そして、その干渉の減少した受信信号を再度 LDPC 復号器に入力することにより、干渉を除去しながら、繰り返し復号を行い、送信された系列を推定する。

4. 1 DAE

図 6 に提案システムで用いた DAE のシステムを示す。このシステムは、復号結果に基づいて、遅延器 D とシステムのインパルス応答 $h'(k)$ を用いて、

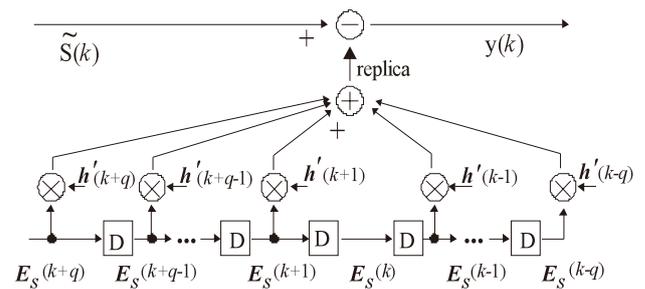


図 6 DAE のシステム構成

伝送システムに重畳する符号間干渉のレプリカを受信側で作成し、その干渉レプリカを、符号間干渉分を含む受信信号 $\tilde{S}(t)$ から引き去ることにより、干渉の無い受信信号 $y(k)$ を作成する。LDPC 復号器出力に誤りが無ければ、完全なレプリカが出来るため、全く干渉の無い信号を作成することができる。

図 5 の提案システムでは、DAE にその推定信号を入力するため、DAE 入力の前に、LDPC 復号器出力の後値 $L(d(k)|Y)$ から推定送信信号 $E_s(k)$ を計算する回路を接続している。また、DAE で用いるインパルス応答 $h'(k)$ は、パイロットトーン等の何らかの手法で通信路のインパルス応答 h_1, h_2 は分かっているものと仮定しており、次式の計算を行ってシステム全体のインパルス応答を計算する。

$$h'(k) = [h_1(k) h_1^*(-k) + h_2(k) h_2^*(-k)]. \quad (9)$$

5. シミュレーション結果⁶⁾

提案システムを用いて、復号後の誤り率特性を求め、その有効性を評価した。図 7 にそのシミュレーション結果を実線で示す。また、比較のために、線形等化器のみで符号間干渉を除去した場合について、同様に、復号後の誤り率特性を求めた。結果を同図に点線で示す。

シミュレーション条件として、長い干渉を考え、直接波が 1 で干渉波が 9 の場合を想定し、各アンテナの干渉の長さは同じにした。LDPC 符号の符号長は 981 シンボルとし、符号化率を 2 分の 1 とした。また、LDPC 符号のパリティ検査行列の列重みは 3、行重みは 6 とし、正則 LDPC 符号を使用した。また、線形等価器で用いる RLS アルゴリズムのトレーニング

長い干渉通信路に対する LDPC 符号を用いた送信ダイバーシチシステム

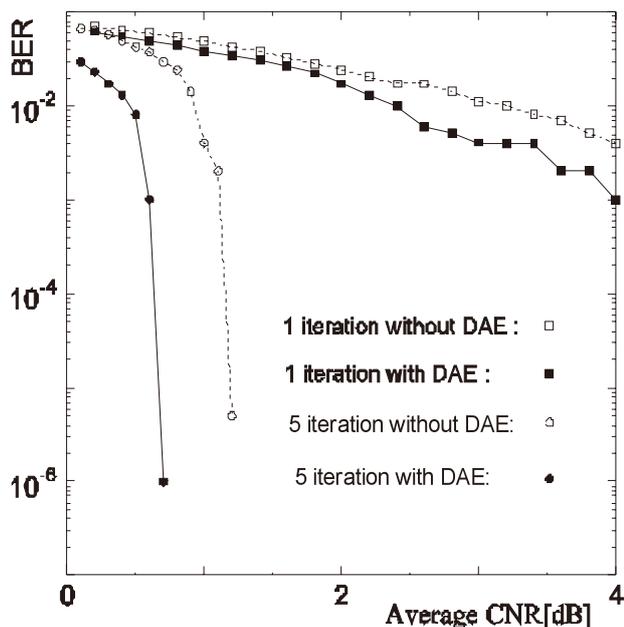


図7 提案システムの誤り率特性

グ長は200で、タップ数は22とした。

この図より、繰り返しの回数を増やすことにより誤り率特性は改善されることが分かる。また、この繰り返し等化を行った場合のシミュレーション結果と、線形等価器のみの場合の誤り率との比較から、提案システムを用いることにより、より大きな特性改善効果が得られていることが分かる。

6. まとめ

本研究では、長い干渉通信路に対する、LDPC 符号を用いた送信ダイバーシチシステムを提案した。本方式では、LDPC 符号を用いて繰り返し復号を行いながら、同時に、DAE を用いて符号間干渉を除去する繰り返し等化を実現することで、長い符号間干渉通信路に対しても、提案方式を用いて大きな特性改善効果が得られることを示した。

今後の課題として、今回使用した LDPC 符号以外の条件の LDPC 符号での特性の検討や、他の変調方式や多値変調方式への拡張、送受信アンテナの数を増加した場合の検討が挙げられる。

参考文献

- 1) 三瓶政一, デジタルワイヤレス伝送技術, ピアソン・エデュケーション, 2002.
- 2) S. B. Alamouti, A simple transmit diversity technique for wireless communications, IEEE Journal on Select Areas in Communication, vol. 16, No. 8, pp. 1451–1458, 1998.
- 3) E. Lindskog, A. Paulraj, A transmit diversity scheme for channels with intersymbol interference, in IEEE Int. Conf. commun. (ICC2000), No. 1, pp.307-311, 2000.
- 4) 兼田一幸, 荻原春生, 長い符号間干渉通信路に対する時空間符号化 Turbo-TCM システム, 電子情報通信学会九州支部大会, pp.388, 2005.
- 5) 和田山正; 低密度パリティ検査符号とその復号法, トリケップス, 2002.
- 6) 中岡秀明, 兼田一幸, LDPC 符号を用いた長い干渉通信路に対する送信ダイバーシチシステムの研究, 平成 18 年度電子情報通信学会九州支部学生会講演会・講演論文集 pp.27, 2006.

