

# パンクチャリング付き誤り訂正符号による OCDMA 伝送特性の改善効果

M2012MM026 中野直史

指導教員：奥村康行

## 1 はじめに

近年、通信量の増大によって、通信速度の高速化、通信容量の増大化が求められている。そこで光ファイバーを用いた通信サービスである FTTH (Fiber To The Home) がある。このサービスは基地局から FTTH の加入者に伸びる光ファイバの途中に光スプリッタを用い、光信号の分岐を行う事により、1つの所から各ユーザに対して情報を送信ができるというものである。ここでユーザ数が増えると、ネットワークを快適に、安定させるためにネットワークの大容量化、高速化を行わなければならない。その技術の一つとして光符号分割多重アクセス (Optical Code Division Multiple Access: OCDMA) がある。OCDMA が注目されている理由として、通信容量が大きくとれる以外に、非同期性、低遅延アクセス、高拡張性、秘匿性が高いなどの特徴があるからである。OCDMA について様々な研究・報告が行われており先行研究では畳み込み符号を用いた方法を示した [1][2]。本研究では畳み込み符号より改善効果が高いとされる LDPC 符号による改善効果进行研究する。

## 2 FTTH の構成

FTTH は基地局と一般家庭を光ファイバーでつないだアクセスサービスである。そして ADSL に次ぐ次世代のアクセスサービスとして期待されている。ADSL と比較した際、通信速度が ADSL が最大 24Mbps であるのに対し FTTH は最大 100Mbps と大きく違う。FTTH の構成を図 1 に示す。

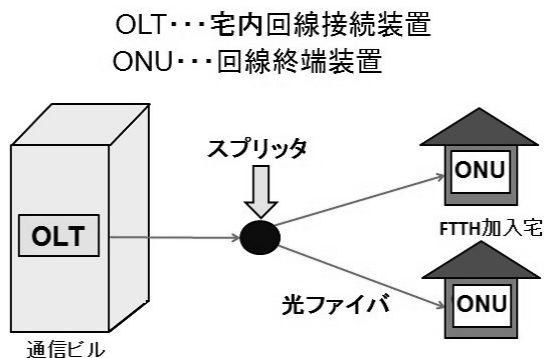


図 1 FTTH の構成

基地局と FTTH 加入者の間にスプリッタを用いた構成となっていて、この図の接続形態は PDS (Passive Double Star) と呼ばれている。局側から加入者側に伸びる光ファイバーの途中に光スプリッタを用いて光信号の分岐を行い、1つの局側装置 (OLT:Optical Line Terminal) を複

数の加入者側装置 (ONU:Ortical Network Unit) が共有することが可能となる。

## 3 OCDMA とは

OCDMA とは携帯電話などの無線通信で広く実用化されている CDMA という多重通信方法を光ファイバ上での技術である。送信機に符号化、受信機に複合化という機能を追加し、各ユーザごとに割り当てられた固有の拡散符号の相関性を用いることにより、複数のユーザ間での同一の周波数帯域内の同時使用を可能にする方式である。この方式には、符号化に強度変調方式を用いるインコヒーレント時間拡散方式と、2 相位相変調方式を用いるコヒーレント時間拡散方式があり、コヒーレント時間拡散 OCDMA は、直交性のある符号を用いると、高い閾値が得られる点で優れている。

しかしながらコヒーレント時間拡散 OCDMA では、多重数を増加させると、拡散符号間の相互相関に起因して生じる多元接続干渉 (Multiple Access Interference ; MAI) だけでなく、同一波長の光信号を合成することで発生する光ビート雑音 (Optical Beat Interference) により、ビット誤り率が劣化すると考えられる。本研究において使用する OCDMA の構造を図 2 に示す。1つの送信器が光スプリッタを介して複数の受信器と接続された形態である point-to-multipoint 型の接続形態を採用した。送信器は、2 値/多値変換回路、光多値変調器 (複数の MOD)、波長合波器から構成され、2 値/多値変換回路からの各多値データを光周波数成分をそれぞれが搬送する波長信号光を出力する。そして波長合波器により多値データの光周波数を合波させ送信する。その後スプリッタにより分波され、各 ONU がそれぞれを受信する。

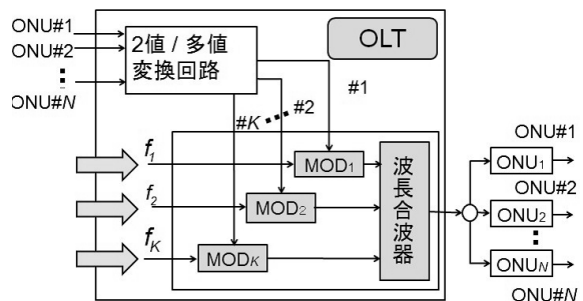


図 2 OCDMA の構造 [1]

この時 ONU は各ユーザ (回線終端装置)、OLT は宅内回線接続装置を示し、ONU#1~ONU#N は各ユーザに送信するデータである。

光変調する際、光ファイバの持つ非線形特性により、生成された光波形に歪みが生じてしまう。OCDMAの課題点として、その光波形に歪みが生じてしまう関係を図3に示す。

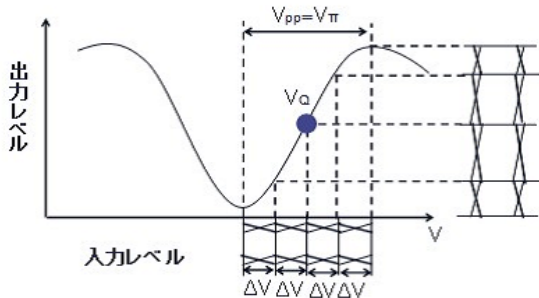


図3 MODの入出力特性 [2]

図5のように入力レベルが一定であることに對し出力レベルが変化し、符号に誤りが生じ受信機で元のデータ系列が復調されない。この問題を解決するために本研究では光多値変調器の改善を考えるのではなく、送信機と受信機に訂正能力の高い誤り訂正技術を導入する方法を提案する。送信するデータ系列にあらかじめ誤り訂正符号を付加しておけば、途中の伝送路で歪みが生じてしまっても、受信したデータの誤り訂正を基に復調を行えば元のデータを取り出す事が出来る。

#### 4 誤り訂正符号とパンクチャリング

誤り訂正符号とは受信機で復調された符号系列が雑音の影響を受け誤りが発生してしまっても、それに対応付けられたデータ系列を正しく特定する技術である。

そして、符号化率を制御し、データの冗長性を抑える技術として受信側で誤り訂正を期待し、定期的にデータを間引きする事をパンクチャリングという。図4のようにパンクチャリング前のデータが複数がパンクチャリング（間引き）され、パンクチャリング後のデータが出力される。この際、畳込み符号化データより少ない符号化データが出来るので送信の際にデータの冗長性を抑えられるのである。



図4 パンクチャリングの技術

表1に示すのが畳込み符号の符号化率と出力の関係である。1段目のRが符号化率を表し、2段目がパンクチャリング行列といい、1に対応する符号データ系列を出力し、0に対応する符号データ系列を間引する関係を示している。3段目が各パンクチャリング行列により生成された符号化データとなる。

図5に符号化率1/2の畳込み符号の符号データがパンクチャリングの符号化率3/4による変化を示す。

表1 符号化率と出力の関係

R=1/2	R=2/3	R=3/4	R=7/8
X:1 Y:1	X:1 1 Y:1 0	X:1 1 0 Y:1 0 1	X:1 1 1 1 0 1 0 Y:1 0 0 0 1 0 1
X0,Y0 ,X1,Y1	X0,Y0,X1 ,Y2 X3 ...	X0,Y0,X1, ,Y2, X3 ...	X0,Y0,X1,X2, X3,Y4,X5,Y6

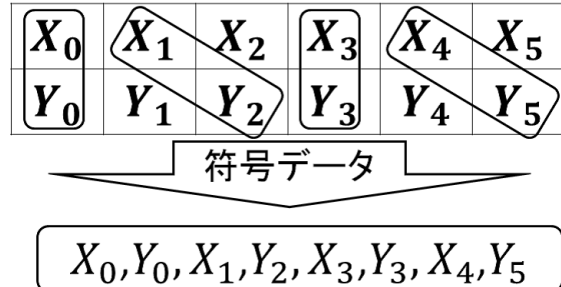


図5 パンクチャリングのイメージ

表1でのパンクチャリング行列により“0”に対応する所が間引きされ、符号データが出力される。

#### 5 LDPC 符号

LDPC符号とは、Gallagerによって提案された符号である。提案された当時は、リードソロモン符号などに比べ、目立った優位点がなく、符号長が大きいと計算量が莫大になるなどの理由で注目されなかった。しかしターボ符号が開発され、高い性能を上げたことにより、繰り返し処理を使う誤り訂正符号の研究が盛んになった。そして、現在LDPC符号は高い効率のデータ伝送手法として用いられている。LDPC符号とその復号法であるsum-product復号法の組み合わせは極めて強力である。

##### 5.1 LDPC 符号の構成

図4にLDPC符号の構成を示す。

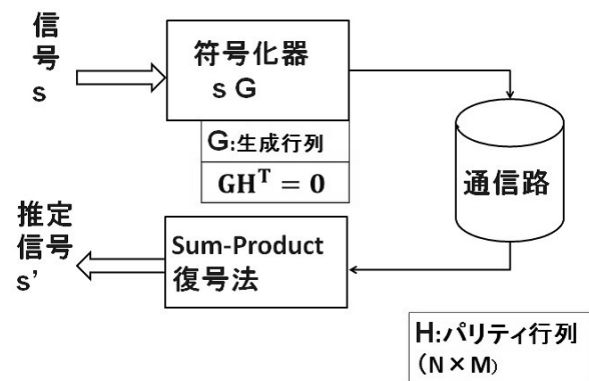


図6 LDPC符号の構成

生成行列Gは検査行列Hから予め求められているものとする。LDPC符号の符号語sGは信号sに生成行列Gかけることによって得られる。符号語は変調器を通して通信路へと送出される。そして受信側において受信信

号は復調器により復調された後、sum-product 復号法により復号される。最終的に復号器は送信信号情報ベクトル推定値  $s'$  を出力する。

### 5.2 タナーグラフと sum-product 復号法

LDPC 符号の復号法の sum-product 復号法の説明として、タナーグラフについて説明する。タナーグラフは線形符号を定義する検査行列から構成される 2 部グラフである。例えば  $M \times N$  行列である  $H$  が与えられているものとする。

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

この時の検査行列  $H$  に対応するタナーグラフは図 7 のようになる。検査行列  $H$  の行、列がそれぞれグラフのチェックノード、メッセージノードに対応しておりチェックノードの数は  $M$  メッセージノードは  $N$  である。検査行列  $H$  の  $i$  行  $j$  列目要素が 1 ならば、またその条件が満たされるときに限り  $j$  番目のメッセージノードと  $i$  番目のチェックノードが結ばれる。このように定義されたタナーグラフにおいては  $j$  番目のメッセージノードの次数は検査行列  $j$  列目の重みに等しく、 $i$  番目のチェックノードの次数は検査行列の  $i$  行目の重みに等しくなる。

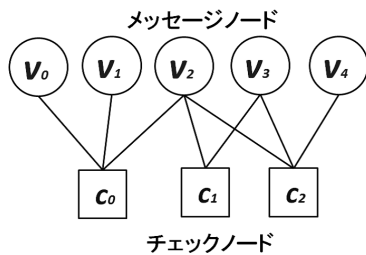


図 7 タナーグラフの例

次に sum-product 復号法の説明として図 8 を示す。送信符号が  $(0,0,0,0,0)$  であり、受信符号  $(e,e,e,0,0)$  を受け取った。この時の  $e$  は喪失信号とし、わからないものとする。分かっている符号から喪失した符号を推定し、その作業を繰り返し行うことで復号していく。

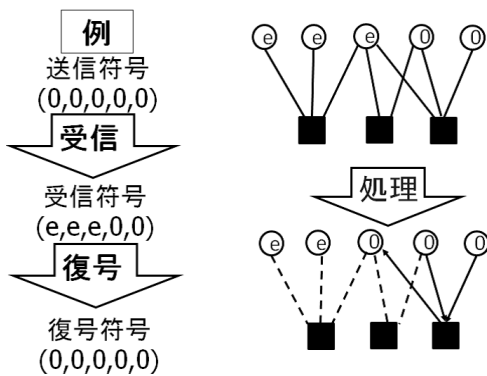


図 8 Sum-Product 復号法

## 6 シミュレーション

本研究では MATLAB を用いて OCDMA 通信のプログラムを作成し、シミュレーション条件を表 3 に示す。今回は、ユーザ数が 3 の OCDMA 通信を想定して行った。各ユーザに割り当てる直交符号は、アダマール符号を用いる。付加する雑音は AWGN、誤り訂正符号には、LDPC 符号を使用し復号方式は sum-product アルゴリズムを使用した。シミュレーションは、誤り訂正技術における OCDMA 伝送特性の改善効果を比較するために、2 種類の測定を行った。その条件を表 2 に示す。

### 6.1 畳み込み符号との比較

先行研究で用いられていた畳み込み符号と今回用いる LDPC 符号の比較を OCDMA 伝送路ではない通信路でシミュレーションを行う。条件を以下のように設定する。

表 2 シミュレーション条件

誤り訂正符号	LDPC 符号 パリティ行列 (200 × 400)	畳み込み符号 拘束長 3 符号化率 1/2
符号長	100000	
雑音	AWGN	
SN 比	0~4	
符号化率	1/2	

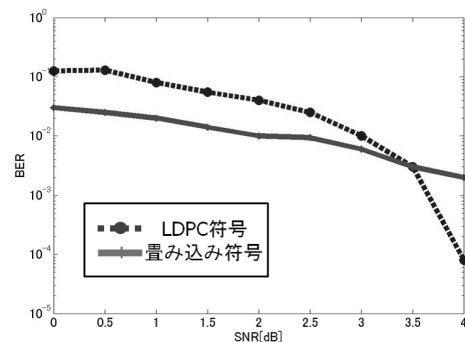


図 9 畳み込み符号と LDPC 符号の比較

図 9 を見ると LDPC 符号は SNR が低い時は畳み込み符号と比べ通信品質は悪いが 3.5dB を超えたあたりで畳み込み符号を超える通信品質を得ることが分かる。

図 10 は自作した LDPC プログラムが正しいかどうかを確認するため他の [5] の論文と比較したものである。Iteration は sum-product 法による計算の繰り返し回数の中で繰り返し回数が 1 回の場合、この論文と傾向がほぼ一致した。

次に LDPC 符号の符号化率を変え、どのように通信品質が変化するかをシミュレーションする。

図 11 を見てわかるように符号化率が低い物の方が通信品質が良いことが分かる。本研究のテーマである OCDMA 伝送路でのシミュレーションでは符号化率 1/2 で行う。

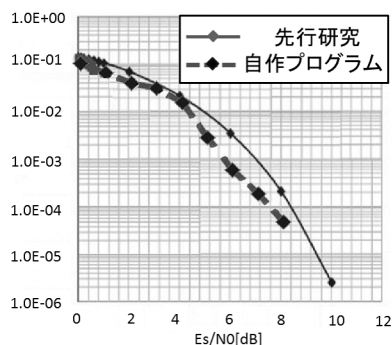


図 10 先行研究との比較

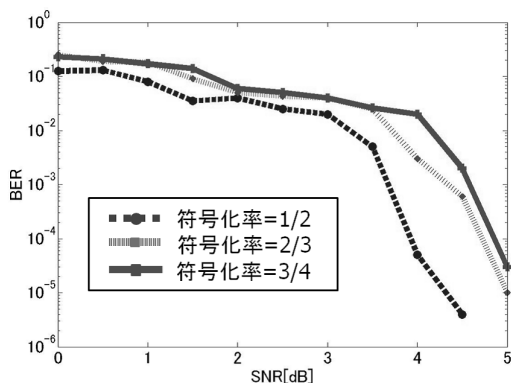


図 11 LDPC 符号の符号化率の比較

## 6.2 OCDMA 伝送路での比較

本研究のテーマである OCDMA 伝送路で畳み込み符号との比較を行う。パラメータを以下のように設定する。ユーザ数は先行研究と同じ 3 つで設定した。sum-product 復号法による繰り返し回数は先程のシミュレーション結果から 1 回に設定し行った。

表 3 シミュレーション条件 2

符号長	10000
雑音	熱雑音
SN 比	0~14
ユーザ数 (ONU 数)	3
直交符号	アダマール符号
ユーザ 1	[1 1 0 0]
ユーザ 2	[1 0 1 0]
ユーザ 3	[1 0 0 1]
符号化率	1/2

図 12 を見ると SNR が低い場合は違いがあまり見ることができない。OCDMA 伝送路ではない場合とは少し違い SNR が低い場合でも畳み込み符号の方が通信品質が良いという傾向はみられなかった。また、SNR が 8dB を超えたあたりから LDPC 符号の方が通信品質が改善されていることが分かる。

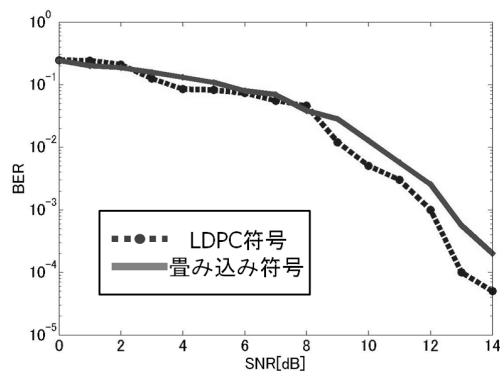


図 12 OCDMA 伝送路での比較

## 7 まとめと今後の課題

シミュレーションから SNR が低い場合は畳み込み符号、LDPC 符号に違いがあまり見られないが高くなるにつれて、違いが顕著になり、LDPC 符号の方が効率が良いことが分かる。SNR が高い場合は LDPC 符号を用い、低い場合は畳み込み符号が実用的である。

本研究では、OCDMA 通信上での非線形性による誤り率を LDPC 符号によってどの程度改善できるかを検証した。[5] の論文によると繰り返し回数が 30 以上になると通信品質が劇的に改善されるので、繰り返し回数を 30 を超えるプログラムを作成する。また今回のシミュレーションでは、処理容量の関係上、ユーザ数を 3 で行ったため、他ユーザ間での干渉が弱く、OCDMA 自体の干渉による誤り率があまり見られなかった。そのため誤り率の改善効果は多少は確かめられたものの、明確なシミュレーション結果が得られたとは言い難い。今後の課題としては、ユーザ数を増加してシミュレーションを行い、ユーザ間の干渉が強い環境でも改善効果が見られるかどうか確かめていきたい。

## 参考文献

- [1] 内藤和貴, 中嶋悠太, “誤り訂正符号による OCDMA 伝送路特性の改善効果,” 2011 年度南山大学数理工学部情報通信学科卒業論文, 2012.
- [2] 金子慎, 三鬼準基, 木村秀明, 葉玉寿弥, “電気段空間符号拡散に基づく周波数領域 O-CDM,” 電子情報通信学会, 信学技報, OCS2012-42, pp.37-40, Aug.2010.
- [3] 神谷 幸宏, “MATLAB によるデジタル通信技術,” コロナ社, 2008.
- [4] 河内 健, “低密度パリティ検査符号とその復号法,” 株式会社トリケップス, 2002.
- [5] 城山 裕希, “LDPC 誤り訂正符号による多値変調波非線形歪劣化の改善効果について,” 日本大学生産工学部第 45 回学術講演会講演概要, 2012.