第14回

光通信の最新動向(3)・ 光スイッチング技術

2010年2月1日(月)

FECの基礎

FEC研究の歴史

年	出来事
1948	通信路符号化定理(Shannon)
1950	ハミング符号(Hamming)
1955	畳込み符号(Elias)
1957	逐次復号(Wozencraft) 巡回符号(Prange)
1959	BCH符号(Bose – Chaudhuri - Hocquenghem)
1960	RS符号(Reed - Solomon) ← 第1世代
1962	LDPC付亏(Gallager) ~ 第0世代
1966	建按付方(Fomey) 和 第2世代
1967	ビタビ復号(Viterbi)
1993	ターボ符号(Berrou)
1994	ブロックターボ符号(Pyndiah) ← 第3世代

シャノンリミット

M. Nakazawa, Workshop on High Spectral Density Optical Communication for New Generation Network", 2009.



誤り訂正のコンセプト(1)



最小ハミング距離1とすると、受信符号110111は11111とのハミング距離1, 101010とのハミング距離4なので、111111に近いと推測される



(n, k)符号:情報ビット数k,符号長n





線形符号

● 任意の2つの符号語の線形和が符号語となる符号

(7,4)符号 (0001011)と(0010110)の和(0011101)も符号語

0001011 + 0010110

0011101

検査の方法(パリティ検査行列)



受信した信号列C'から最も確からしい元の符号を 推定



シンドローム

受信符号語に検査行列Hをかけて生成されるビット列。 誤りがなければOのはずなので、Oでなければ誤りの存在がわかる。



誤り訂正

- 符号語(情報ビット列にパリティチェックを追加したもの)間のハミング距離を 拡大し、誤りビットの数の2倍よりも大きくすることによって元の情報ビット列を 推定可能とする。
- 1例:ハミング符号

パリティチェックと元の情報ビットとの相関からパリティ検査行列を生成

(ハミング符号の例)

 $\underbrace{\left(m_{1} \ m_{2} \ m_{3} \ m_{4} \ p_{1} \ p_{2} \ p_{3}\right)}_{\text{情報ビット}} = c = (c_{1} \ c_{2} \ c_{3} \ c_{4} \ c_{5} \ c_{6} \ c_{7}) : (7,4) 符号$ $p_{1} = m_{1} + m_{2} + m_{3}$ $p_{2} = m_{2} + m_{3} + m_{4}$ $p_{3} = m_{1} + m_{2} + m_{4}$ $H = \begin{bmatrix} 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \\ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \end{bmatrix}$

mからcを生成する生成行列G



ハミング符号の生成

(0001011)に対する

									(0001011)にかりる
	0	0	0	0	0	0	0	5	ハミンソ LE AE 3
	0	0	0	1	0	1	1	J	
	0	0	1	0	1	1	0		3
	0	0	1	1	1	0	1		3 最小はミング距離
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	0	1	0	0	1	1	1		3 が3に拡大すれば
	0	1	0	1	1	0	0		4 1ビット誤りは訂正
	0	1	1	0	0	0	1		
		1	1	1	0	1	0		3
$c = mG = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} =$		0	1	1	1	1	1		Л
$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$		0	0	1	1	U 1	1		7
		U	U	l	l	1	U		3
	1	0	1	0	0	1	1		3
	1	0	1	1	0	0	1		3
	1	1	0	0	0	1	0		4
	1	1	0	1	0	0	1		3
	1	1	1	0	1	0	0		7
	1	1	1	1	1	1	1		4





誤り訂正の構成



ビット誤り率の比較(1)



kビットごとのブロックに区切って符号と見なした場合の符号誤り率(ワード誤り率): P_w (uncoded) = 1 – (1-BER)^k

ビット誤り率の比較(2)





符号化利得

符号化を用いない場合の所定の符号誤り率を与える ビット当たり信号エネルギー: E_{b1}

符号化を用いた場合の所定の符号誤り率を与える ビット当たり信号エネルギー: E_{b2}

符号化利得:E_{b1}/E_{b2}

- 漸近符号化利得:符号誤り率 \rightarrow 0のとき($N_0 \rightarrow$ 0のとき)の符号化利得
- 硬判定の(漸近)符号化利得:asymptotic coding gain ACG= rR_c
 Rc:符号化率

(例)

前出の(7,4)ハミング符号はd_{H, min} = 3 (r = 2), R_c = 4/7なので

$$ACG = rR_c = 10\log_{10}(2 \times \frac{4}{7}) = 0.58dB$$

ビット誤り率の比較(3)



● 硬判定の(漸近)符号化利得:asymptotic coding gain ACG= $R_c d_{H,min}$ (例) 前出の(7,4)ハミング符号は $d_{H,min}$ = 3 (r = 2), R_c = 4/7なので $ACG = R_c d_{H,min} = 10 \log_{10}(\frac{4}{7} \times 3) = 2.34 dB$

誤り訂正能力の向上の方針

● 最小ハミング距離をなるべく大きく

情報ビット系列に対して符号語を冗長化すれば、誤り確率を 減らし、誤り訂正能力は向上できる。

● 符号化率はなるべく大きく

冗長化しすぎるとメリットが薄れる

しかしどのような符号が最適化は、理論的にわかっていない



符号化利得

特定のBERを実現するために必要なSNR(Q値)が何dB改善したか



^{2009年度} **FEC**冗長度と符号化利得の関係

● 40Gbps → 100Gbps:10log(100/40)=4dBのSNR劣化

● RS(255,239)=5.8dBより4dB良い9.8dBを得るには少なくとも20%以上の冗長度が必要 水落,2009年第1回PN新世代懇談会.



光通信用FECの進展

- 符号化利得NCG(リニア値)×ビットレート積:1.4倍/年
- 現時点の最高クラスは40Gbps用FEC:NCG 8dB =250Gbps
- 100Gbpsのシャノン限界は1660Gbps(符号化率0.8, 冗長度25%の場合)

水落,2009年第1回PN新世代懇談会.



軟判定の導入

- 2^N 1個の異なる閾値で判別し、硬判定出力と信頼度情報を取り出す
- 硬判定に比べて最大2dBの誤り訂正性能向上が期待できる

水落,2009年第1回PN新世代懇談会.

第10章

光スイッチング技術

1. (光)スイッチの意義 2. 光スイッチの使用用途 3. 光スイッチの種類と実例 4. ROADMと波長選択スイッチ

2009年度

光通信システム (光)ネットワークにおけるスイッチング機能の必要性

1対1通信から1対多、多対多通信への拡張

スイッチングによる配線・装置の経済的 配置が可能

ユーザ同志をスター配線した場合の通信路の必要数



2009年度

光通信システム 相互接続されたWDMネットワークの光パス・スイッチング



スイッチング機能の実現方法



基本スイッチエレメント

ゲートスイッチ	クロスバー型 スイッチ	多値スイッチ (ロータリスイッチ)
OFF状態 ON状態	バー状態 I_1 〇 〇 O_1 I_2 〇 〇 O_2	 1入力多出力型 〇 〇









多段スイッチ回路網

完全格子型マトリクススイッチを用いた多段スイッチ回路網



再ルーティング型バンヤン網



電気スイッチによる構成



光スイッチによる構成



光スイッチング技術の分類

種類	空間分割型	波長分割多重型	時分割多重型	フリースペース型
構成	空間的に分離された 入出力光路を物理的に 接続/切り替え m×nスイッチ	波長合波・分波による 光路選択 LD フィルタ → フィルタ → スターカプラ	時間軸上の 制御 多重 時間順序 入れ換え 分離 一 一 分離	波長板・偏向素子 を用いた光路 切り替え LD 光学系 PD
特徴	アナログ・デジタル・ 変調方式・変調速度に 無依存	光の広帯域性	超短光パルスに よる高速化	2次元アレイ化 による高密度化
課題	 ・スイッチ規模大の時 スイッチ数増大(N²) ・曲げ制限 	チャネル間クロストーク	メモリ・バッファ の実現	光学部品のサイズ アライメント
空間分割型光スイッチングの種類

種類	形態	制御要素
方向性結合器型		結合部の屈折率変化
マッハツェンダー 干渉計型	→ 3dBカプラ 3dBカプラ → 3dBカプラ → 3dBカプラ	結合していない導波路部 の屈折率変化
LDゲート型		ゲート部の利得・吸収
ᆺᆮᇊᆈᇑ		交差部の屈折率変化
		全反射ミラーの有無

2009年度

光通信システム

光スイッチの動作に用いられる物理現象

	動作原理	材料	動作速度
屈折率変化	熱光学(TO)効果	石英系 ポリマー系	msオーダー
	電気光学(EO)効果	誘電体:LiNbO3	psオーダー
	ポッケルス効果 : 1次 カー効果 : 2次		
	プラズマ効果	半導体: InGaAsP, AlGaAs	nsオーダ
	フランツ・ケルディッシュ 効果	半導体バルク: InGaAsP, AlGaAs	psオーダー
	量子閉じ込めシュタルク 効果(QCSE)	半導体MQW	psオーダー
吸収変化	フランツ・ケルディッシュ 効果	半導体バルク: InGaAsP, AlGaAs	10ps~ns
	量子閉じ込めシュタルク 効果(QCSE)	半導体MQW	10ps~ns
利得変化	誘導放出	半導体	nsオーダ
機械的位置変化	ミラー位置	金属・半導体・オイル	msオーダ

マトリクス光スイッチの特性比較(例)

	方式	機関	サイズ	挿入損失	ON/OFF比	備考
半導	半導体	UCSB	4×4	3dB	33dB	
		U. Bristol	4×4	14dB	50dB	SW 1ns
体	SOAゲート	NEC	4 × 4	9dB	40dB	SW 1ns, PDL 0.5dB
		Alcatel	4 × 4	0dB	60dB	
	石英TO型	NTT	16×16	6.6dB	55dB	
	ポリマーTO型	Akzo	8×8	10.7dB	30dB	PDL 0.5dB
誘		Berlin I.T.	4×4	12.8dB	29dB	
体	LiNbO ₃	NEC	8×8	11dB	20dB	PDL 1dB
	液晶	NTT	64 × 64	9.5dB	26dB	PDL 0.2dB
		CNET	8×8	9dB		SW 3ms, PDL<3dB
機械式	Si-MEMS	Lucent	112 × 112	7.5±2.5dB		Crosstalk 50dB SW < 10ms
バブル式	Si+オイル	Agilent	32 × 32	2.5-7.5dB		Crosstalk 50dB SW <10ms

光スイッチのクロストークの影響

2009年度

光通信システム



ct_i: 第i段の光SWのクロストークと出力光に対応する比例定数

波長スイッチのクロストークの影響

パワーペナルティ: $PP = 10\log \frac{P_s'}{P_s} = -5\log\{1 - 4(N-1)Q^2R_c\}$ [dB]

N: 波長チャネル数 Q: 信号のQ値 Rc:波長クロストーク $R_c = \frac{P_c}{P_c}$







16×16 TO型マトリクススイッチ

T. Goh, M. Yasu, K. Hattori, A. HImeno, M. Okuno and Y. Ohmori (NTT), J. Lightwave Technol., Vol.19, No.3, pp.371-389 (2001).





2009年度 反射/透過型光スイッチ ^{光通信システム}(MEMS: <u>Micro-ElectroMechanical System</u>)

IEEE Communication Magazine, vol.40, No.3 (2002) より

D. Hah, S. Huang, H. Nguyen, H. Chang, And M.C. Wu (UCLA), OFC2002, TuO3.

Lucent



MEMSスイッチによる光路切り替え

山本,山口,竹内,清水,日暮,澤田,上西,2003年信学会総合大会,C-3-127.





可動式ミラーによるスイッチ

『日経エレクトロニクス』(2001年1月29日号)より







バブル型光スイッチ

Agilentの光スイッチの構成図



日経エレクトロニクス 1-29 (2001)より

Agilent Technologies のバブル型光スイッチ

・スイッチング速度10ms程度 ・挿入損失0.07dB



^{2009年度} 光通信システム PLZTを用いた波面制御型光スイッチ

A. Sugama, M. Ishii, T. Akahoshi, K. Sato, M. Doi, T. Shiraishi, M. Kato, and H. Onaka, ECOC2004, Mo4.6.3.



2009年度 SOAゲートによるブロードキャスト・アンド・セレクト型 光通信システム 光スイッチ

N入力・N出力のN×Nスイッチ → N²個のSOAが必要



2009年度 光通信システム ハイブリッド集積4×4マトリクススイッチ

J. Sasaki, H. Hatakeyama, T. Tamanuki, S. Kitamura, M. Yamaguchi, N. Kitamura, T. Shimoda, M. Kitamura, T. Kato and M. Itoh (NEC), Electron. Lett., Vol.34, No.10, pp.986-987 (1998).



交差型全反射スイッチ



資料提供:横河電機様

波長スイッチング



アレイ導波路格子 (AWG) N×N アレイ導波路格子 (AWG)



N×N AWGによる波長ルーティング



2009年度

各種光スイッチの適応領域





- (1) 規模とスイッチ数
 - N×Nマトリクススイッチではスイッチ規模に対して

2×2スイッチ数がN²で増加

- (2) 素子サイズ
 - ・曲率半径による制約
 - ・屈折率差/吸収差を大きくするため導波路長増大

ROADMと波長選択スイッチ

参考文献:尾中(富士通),NGN時代の光技術・産業懇談会第1回公開討論会資料(2007.5.15)

2009年度 光通信システム リングネットワークに用いられるROADM

Interconnected Ring Network Topology $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ λ_n add $\lambda_{\mathbf{k}}$ drop $\lambda_5, \lambda_6, \dots$ **ROADM : Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer** IN OUT WSS WSS DROP ADD λ-**MUX** λ-DEMUX

WSS : Wavelength Selective Switch

NGNに向けたソリューション(1)

尾中,NGN時代の光技術・産業懇談会第1回公開討論会(2007)

効率的なネットワーク構成で設備投資額を1/3に



NGNに向けたソリューション(2)

■ GMPLS自律型ネットワーク構成で保守・運用費を1/5に



▶ 現状ネットワークでのサービス限界

・計画的なサービスに対応、突発的な需要対応はNG ・パスは個々のネットワークごとに設定(迅速化が課題) ・光ファイバの接続替えを局まで行って行う必要ありう



光ルーティング技術に対する期待

ネットワーク構築/再構築の自動化(OPEX削減・網構築期間短縮)

・光波長経路設定を自動化・遠隔制御化したい
局舎に行って手作業での膨大な数のファイバコード接続や送受信器の波長設定
をできるだけ避けたい

・ λ VPNなどの新サービスの提供

● 機器間ファイバコード接続数の削減

手作業でのファイバコード接続箇所を少なくしたい → 波長ごとに分離せず、WDMインタフェースが望ましい

● 再生中継無しでのマルチリング接続や多方向波長経路切替

トランスポンダを省き、λ直収とすることで機器コストを低減させたい

● 円滑なマイグレーションの実現

需要見合いで少数波長ROADMから大規模PXC(HUB)まで自由に拡張したい 共通ユニットで、すべてのノード構成をカバーしたい(在庫品種削減)



Reconfigurable OADM (ROADM)(第1世代)

2009年度



2009年度Reconfigurable OADM (ROADM)光通信システム(Broadcast & Select type) (第2世代)

固定波長選択/任意波長挿入





2009年度

光通信システム



2009年度	
光通信システム	4

Reconfigurable OADM (ROADM) (波長選択スイッチ型)(第3世代)

任意波長自動選択(カラーレス)



WSSの構成





WSSを用いたPXCの構成



● クロストーク特性が劣化



\varTheta 高コスト

- 任意波長の任意ポートへのスイッチング カラーレス動作、波長群単位での切替が可能
- 小型·低損失

「3D MEMSマトリクスSW+AWGと比較して、ノード損失とサイズを大幅に低減可能

信号光パワー調整機能(VOA機能)

WDM光増幅中継伝送に伴う波長間のパワー偏差を補償

● 高い拡張性

PXCの方路数のインサービス拡張が可能

広帯域かつ平坦な通過帯域

従来型光MUX/DEMUXに比べ、広帯域かつ平坦な通過帯域を持つため、 伝送可能ノード数の拡大が可能。

WSSベースOXCとマトリクスSWベースOXCの比較

2009年度



- モニタPDやVOAの集積化が容易
- 100GHz ch 32波長 × 4 AWG集積



- ① 導波路(PLC)型WSS利用
- (32 λ , 100GHz ch-AWG) × 4 : 51.5 × 56mm², Δ =1.5%
- $(4 \times 1 \text{ SW}, \text{VOA}, \text{WINC tap}) \times 32\lambda : 70.5 \times 27 \text{ mm}^2$
 - 291 MZI, 80mW/MZI, 5.3W total
- モジュール:220×135×14mm³
- 挿入損失:10.8dB(express path)

ROADMの実例(2)

液晶型WSS

G. Baxter, et al. (Engana(現Finisar)), OFC2006, OTuF2.

- LCOS (Liquid Crystal on Silicon)による高精度な波面制御
- 民生技術による低コスト化



LCOS型WSS: G. Baxter et al, OFC2006, OTuF2.


ROADMの実例(2-2)

液晶型WSS

- 解像度:WUXGAまでがLCOSにて可能
- ソフト制御でフィルタ特性可変

50GHz/100GHz Chの切替

G. Baxter, et al. (Engana), OTuF2.





2009年度 光通信システム

ROADMの実例(3-2)

③ MEMS型WSS





2009年度 光通信システム

③ MEMS型WSS

C.-H. Chi et al.(UC Berkeley), OFC2006, OTuF1.

- Fiber-to-Fiber 損失=24dB
- Xtalk < -25dB</p>
- 1460 1580nm
- 速度=0.5ms

2009年度 光通信システム

ROADMの実例(3-4)

③ MEMS型WSS

M.P. Earnshaw, A. Griffin, C. Bolle, and J.B.D. Soole, OFC2005, OTuD2.

