

光拡散符号を用いた可視光 CDMA通信について

ON VISIBLE-LIGHT CDMA COMMUNICATION
USING OPTICAL SPREAD CODES

松嶋 智子, 宮崎 真一郎, 大村 光徳, 山崎 彰一郎
(職業能力開発総合大学校)

研究の背景と目的

2

- MUI (多重ユーザ干渉) を効果的に除去する
光符号分割多元接続(O-CDMA)の検討
 - シグネチャ符号
 - 干渉除去方式
- 照明光(可視光)通信への応用
 - 反転系列の利用
- 計算機シミュレーションによる評価
- 実験装置の開発(ビデオ)

光CDMA通信(1)

3

- 同期・非同期による分類
 - 同期 : ユーザ間でフレーム同期がとれている
 - 非同期 : ユーザ間ではチップ同期のみ

- 情報変調方式による分類
 - 2値情報変調方式
 - OOK (On-Off Keying) 方式
 - EWO (Equal Weight Orthogonal) 方式
≡ CSK (Code Shift Keying) 方式
 - 多値情報変調方式
 - 多値 EWO (CSK) 方式

光CDMA通信(2)

- 光通信の拡散符号(シグネチャ符号)は**単極性**
 - 0 (スペース)または1 (マーク). 負の値(-1)をとらない
- 光CDMAで使用される拡散符号(シグネチャ符号)
 - OOC: Optical Orthogonal Code 光直交符号
 - PSC: Prime Sequence Code プライム系列符号
 - MPSC: Modified Prime Sequence Code 拡張プライム系列符号 (1991 W.C.Kwong)
 - GMPSC: Generalized MPSC 一般化MPSC (2005松嶋)
- **多重ユーザ干渉(MUI)に弱い**と考えられていた
 - 単極性符号は自己相関が小さいため

MPSC(拡張プライム系列符号)

5

- GF(q)から構成
($q=p^m$, p は素数,
 m は正整数)
- 符号長 q^2 ,
符号語数 q^2
- q 個の符号語からなる
 q 個のグループ
- 例: GF(4)
符号長 $4^2 = 16$
符号語数 $4^2 = 16$

group				MPS	MPSC			
i	X_i	j	Y_j	$C_{i,j}^*$	$C_{i,j}$			
0	0	0	0	(0,0,0,0)	1000	1000	1000	1000
		1	1	(1,1,1,1)	0100	0100	0100	0100
		2	α	($\alpha,\alpha,\alpha,\alpha$)	0010	0010	0010	0010
		3	α^2	($\alpha^2,\alpha^2,\alpha^2,\alpha^2$)	0001	0001	0001	0001
1	1	0	0	(0,1, α,α^2)	1000	0100	0010	0001
		1	1	(1,0, α^2,α)	0100	1000	0001	0010
		2	α	($\alpha,\alpha^2,0,1$)	0010	0001	1000	0100
		3	α^2	($\alpha^2,\alpha,1,0$)	0001	0010	0100	1000
2	α	0	0	(0, $\alpha,\alpha^2,1$)	1000	0010	0001	0100
		1	1	(1, $\alpha^2,\alpha,0$)	0100	0001	0010	1000
		2	α	($\alpha,0,1,\alpha^2$)	0010	1000	0100	0001
		3	α^2	($\alpha^2,1,0,\alpha$)	0001	0100	1000	0010
3	α^2	0	0	(0, $\alpha^2,1,\alpha$)	1000	0001	0100	0010
		1	1	(1, $\alpha,0,\alpha^2$)	0100	0010	1000	0001
		2	α	($\alpha,1,\alpha^2,0$)	0010	0100	0001	1000
		3	α^2	($\alpha^2,0,\alpha,1$)	0001	1000	0010	0100

MPSCの相関特性

- 同じグループ内の2つの符号語の相互相関は0
- 異なるグループの2つの符号語の相互相関は1

$$\Gamma(\mathbf{c}_{i_1, j_1}, \mathbf{c}_{i_2, j_2}) = \begin{cases} q, & \text{if } i_1 = i_2 \text{ and } j_1 = j_2 \\ 0, & \text{if } i_1 = i_2 \text{ and } j_1 \neq j_2 \\ 1, & \text{if } i_1 \neq i_2 \end{cases} \quad (1)$$

同じグループ内

異なるグループ

同じグループ内の符号語は、
どれも同じ量の干渉を受ける
→ この性質を利用したMUI除去

一般化MPSCの例($q=4, n=16$)

7

グループ	x_i	C^*	C
0	0	$(0, 0, 0, 0)$	1000 1000 1000 1000
		$(1, 1, 1, 1)$	0100 0100 0100 0100
		$(\alpha, \alpha, \alpha, \alpha)$	0010 0010 0010 0010
		$(\alpha^2, \alpha^2, \alpha^2, \alpha^2)$	0001 0001 0001 0001
1	1	$(0, 1, \alpha, \alpha^2)$	1000 0100 0010 0001
		$(1, 0, \alpha^2, \alpha)$	0100 1000 0001 0010
		$(\alpha, \alpha^2, 0, 1)$	0010 0001 1000 0100
		$(\alpha^2, \alpha, 1, 0)$	0001 0010 0100 1000
2	α	$(0, \alpha, \alpha^2, 1)$	1000 0010 0001 0100
		$(1, \alpha^2, \alpha, 0)$	0100 0001 0010 1000
		$(\alpha, 0, 1, \alpha^2)$	0010 1000 0100 0001
		$(\alpha^2, 1, 0, \alpha)$	0001 0100 1000 0010
3	α^2	$(0, \alpha^2, 1, \alpha)$	1000 0001 0100 0010
		$(1, \alpha, 0, \alpha^2)$	0100 0010 1000 0001
		$(\alpha, 1, \alpha^2, 0)$	0010 0100 0001 1000
		$(\alpha^2, 0, \alpha, 1)$	0001 1000 0010 0100

グループ

符号語数

16

MPSCの相関特性を利用する干渉除去

- Shalaby[4], 蒲池ら[5] (OOK)
 - グループ内の一つの符号語(参照信号)を多重化に使用せず、復号時に干渉の推定に用いる
- Liuら[6], 澤頭ら[7] (OOK)
 - グループを識別し、他グループの干渉符号語の数を調べるためのグループ情報を符号語に付加
- 落合ら(EWO)[8], 羽瀧ら(CSK)[9]
 - 各ユーザに、同一グループの複数の符号語を割り当て、伝送情報により選択して送信する
 - 判定距離が他方式の2倍 → より雑音に強い
 - 復号機におけるしきい値がゼロ → BERの劣化なし

Shalaby方式の符号語割り当て

user/reference word	assigned codewords				
reference λ_0	$c_{0,0}$	<u>1000 1000 1000 1000</u>			
u_0	$c_{0,1}$	0100 0100 0100 0100			
u_1	$c_{0,2}$	0010 0010 0010 0010			
u_2	$c_{0,3}$	0001 0001 0001 0001			
reference λ_1	$c_{1,0}$	<u>1000 0100 0010 0001</u>			
u_3	$c_{1,1}$	0100 1000 0001 0010			
u_4	$c_{1,2}$	0010 0001 1000 0100			
u_5	$c_{1,3}$	0001 0010 0100 1000			
reference λ_2	$c_{2,0}$	<u>1000 0010 0001 0100</u>			
u_6	$c_{2,1}$	0100 0001 0010 1000			
u_7	$c_{2,2}$	0010 1000 0100 0001			
u_8	$c_{2,3}$	0001 0100 1000 0010			
reference λ_3	$c_{3,0}$	<u>1000 0001 0100 0010</u>			
u_9	$c_{3,1}$	0100 0010 1000 0001			
u_{10}	$c_{3,2}$	0010 0100 0001 1000			
u_{11}	$c_{3,3}$	0001 1000 0010 0100			

各グループ
に一つの
参照信号

Liu方式の符号語割り当て

user	assigned codewords		
		GMPSC codeword	group information
u_0	$c_{0,0}$	1000 1000 1000 1000	1000
u_1	$c_{0,1}$	0100 0100 0100 0100	1000
u_2	$c_{0,2}$	0010 0010 0010 0010	1000
u_3	$c_{0,3}$	0001 0001 0001 0001	1000
u_4	$c_{1,0}$	1000 0100 0010 0001	0100
u_5	$c_{1,1}$	0100 1000 0001 0010	0100
u_6	$c_{1,2}$	0010 0001 1000 0100	0100
u_7	$c_{1,3}$	0001 0010 0100 1000	0100
u_8	$c_{2,0}$	1000 0010 0001 0100	0010
u_9	$c_{2,1}$	0100 0001 0010 1000	0010
u_{10}	$c_{2,2}$	0010 1000 0100 0001	0010
u_{11}	$c_{2,3}$	0001 0100 1000 0010	0010
u_{12}	$c_{3,0}$	1000 0001 0100 0010	0001
u_{13}	$c_{3,1}$	0100 0010 1000 0001	0001
u_{14}	$c_{3,2}$	0010 0100 0001 1000	0001
u_{15}	$c_{3,3}$	0001 1000 0010 0100	0001

qビットの
グループ情報を
付加

EWO(CSK)方式の符号語割り当て

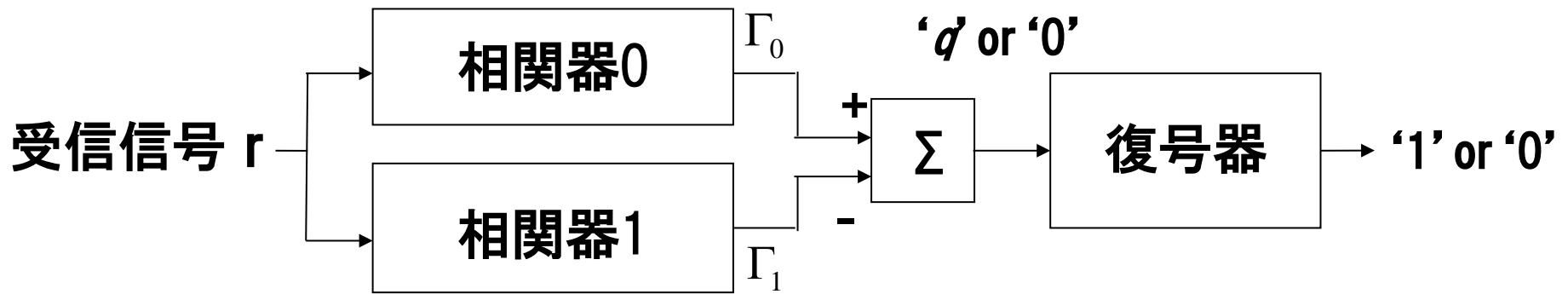
user	data	assigned codewords				
u_0	0	$c_{0,0}$	1000	1000	1000	1000
	1	$c_{0,1}$	0100	0100	0100	0100
u_1	0	$c_{0,2}$	0010	0010	0010	0010
	1	$c_{0,3}$	0001	0001	0001	0001
u_2	0	$c_{1,0}$	1000	0100	0010	0001
	1	$c_{1,1}$	0100	1000	0001	0010
u_3	0	$c_{1,2}$	0010	0001	1000	0100
	1	$c_{1,3}$	0001	0010	0100	1000
u_4	0	$c_{2,0}$	1000	0010	0001	0100
	1	$c_{2,1}$	0100	0001	0010	1000
u_5	0	$c_{2,2}$	0010	1000	0100	0001
	1	$c_{2,3}$	0001	0100	1000	0010
u_6	0	$c_{3,0}$	1000	0001	0100	0010
	1	$c_{3,1}$	0100	0010	1000	0001
u_7	0	$c_{3,2}$	0010	0100	0001	1000
	1	$c_{3,3}$	0001	1000	0010	0100

各ユーザに
2つの符号語
を割り当てる

EWO:
Equal Weight
Orthogonal

CSK:
Code Shift Keying

復号器の構成 (Shalaby方式の例)



$$\Gamma_0 = \Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{w}_k)$$

$$\Gamma_1 = \Gamma(\mathbf{r}, \lambda_i)$$

\mathbf{r} : 受信信号

\mathbf{w}_k : 割り当てられた符号語

λ_i : \mathbf{w}_k と同じグループの参照符号語

$\Gamma_0 - \Gamma_1$	$\geq q/2$...	復号情報	'1'
	$< q/2$...	復号情報	'0'

MUI除去方式の比較

13

- Shalaby方式, Liu方式, EWO (CSK)方式とも、MUIを完全に除去する(雑音が無視できる理想的リンクでは、多重数によらずエラーフリー)
- 送信ユーザの光強度が一定でなくても良い

各MUIキャンセラを用いた光CDMAのパラメータ

	Shalaby	Liu	EWO (CSK)
拡散率	q^2	q^2+q	q^2
最大ユーザ数	q^2-q	q^2	$q \lfloor q/2 \rfloor$
判定距離	q	q	$2q$
復号器のしきい値	$q/2$	$q/2$	0

$$\lfloor x \rfloor = \text{floor}(x)$$

MUIキャンセラを用いた 照明光CDMA通信システム

照明光通信への応用

15

- **照明光通信：LED照明に通信機能を付加**
 - 電磁波を発生させないため，電子機器に影響がない
 - 光の届く範囲がわかりやすく，電波より通信範囲を限定しやすい

反転MPSC系列による多重化

16

- MPSCの "1" (mark) と "0" (space) を反転させた系列を利用
- 伝送しないユーザは常に "1" を伝送
- 復号器は、反転しない場合と同様に、二つの相関器を用いる

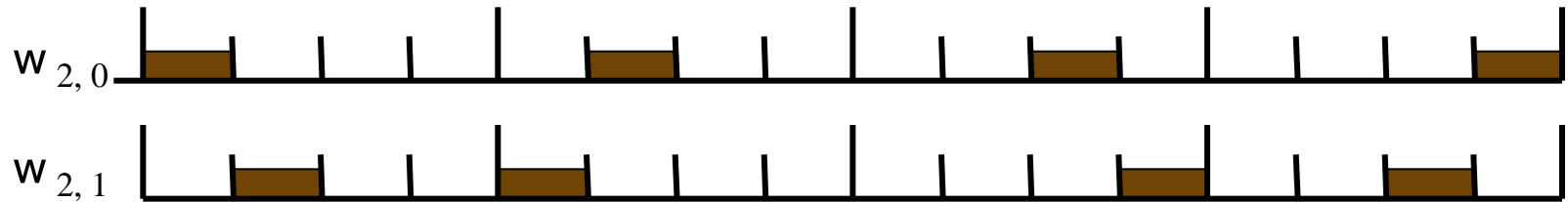
- MUIの除去能力はそのまま
- 平均光信号強度が高い
- 相対的な光強度の変動(揺らぎ)が小さい

反転MPSCの例 ($n=16, N_{max}=8$)

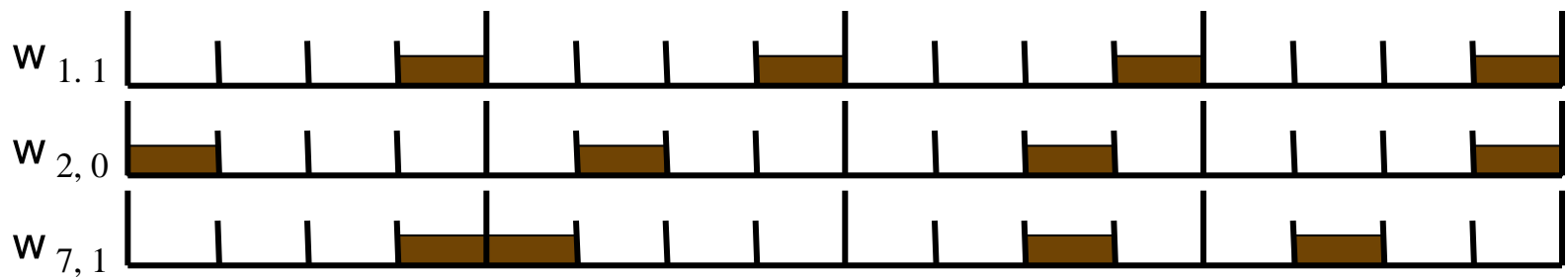
表 1: 拡大体 $GF(2^2)$ 上の拡張プライム系列符号 C

グループ	x_i	C^*	C	inverted C
0	0	(0, 0, 0, 0) (1, 1, 1, 1) ($\alpha, \alpha, \alpha, \alpha$) ($\alpha^2, \alpha^2, \alpha^2, \alpha^2$)	1000 1000 1000 1000 0100 0100 0100 0100 0010 0010 0010 0010 0001 0001 0001 0001	0111 0111 0111 0111 1011 1011 1011 1011 1101 1101 1101 1101 1110 1110 1110 1110
1	1	(0, 1, α, α^2) (1, 0, α^2, α) ($\alpha, \alpha^2, 0, 1$) ($\alpha^2, \alpha, 1, 0$)	1000 0100 0010 0001 0100 1000 0001 0010 0010 0001 1000 0100 0001 0010 0100 1000	0111 1011 1101 1110 1011 0111 1110 1101 1101 1110 0111 1011 1110 1101 1011 0111
2	α	(0, $\alpha, \alpha^2, 1$) (1, $\alpha^2, \alpha, 0$) ($\alpha, 0, 1, \alpha^2$) ($\alpha^2, 1, 0, \alpha$)	1000 0010 0001 0100 0100 0001 0010 1000 0010 1000 0100 0001 0001 0100 1000 0010	0111 1101 1110 1011 1011 1110 1101 0111 1101 0111 1011 1110 1110 1011 0111 1101
3	α^2	(0, $\alpha^2, 1, \alpha$) (1, $\alpha, 0, \alpha^2$) ($\alpha, 1, \alpha^2, 0$) ($\alpha^2, 0, \alpha, 1$)	1000 0001 0100 0010 0100 0010 1000 0001 0010 0100 0001 1000 0001 1000 0010 0100	0111 1110 1011 1101 1011 1101 0111 1110 1101 1011 1110 0111 1110 0111 1101 1011

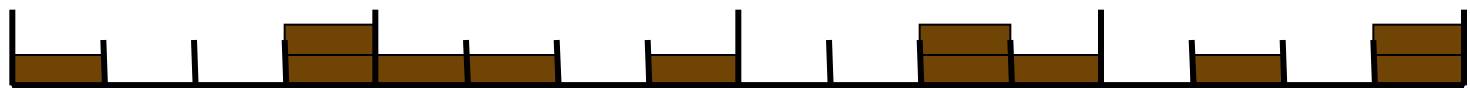
MPSCによる多重化 (EWO, $N_{max}=8$)



(a) Two codewords assigned to the user u_4

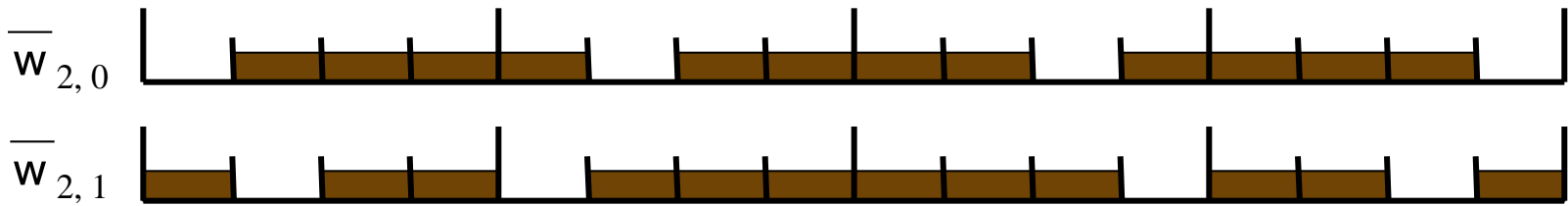


(b) Codewords transmitted simultaneously

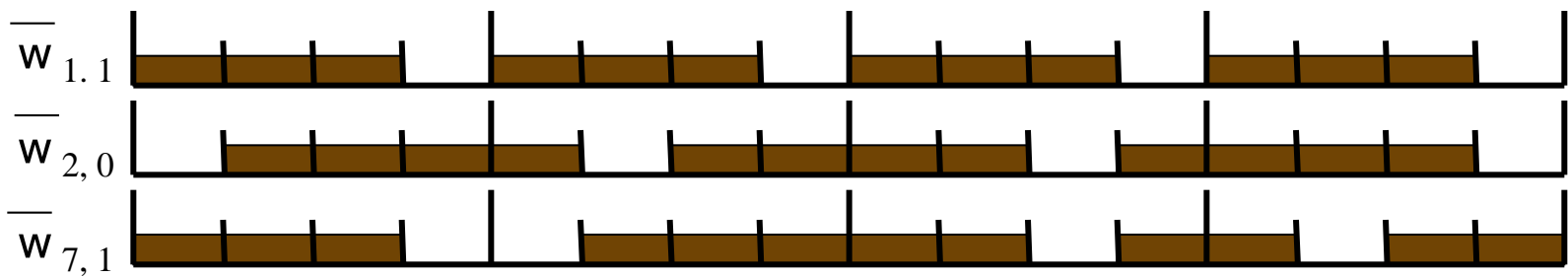


(c) Multiplexed optical signal

反転MPSCによる多重化 (EWO, $N_{max}=8$)



(a) Two codewords assigned to the user u_4



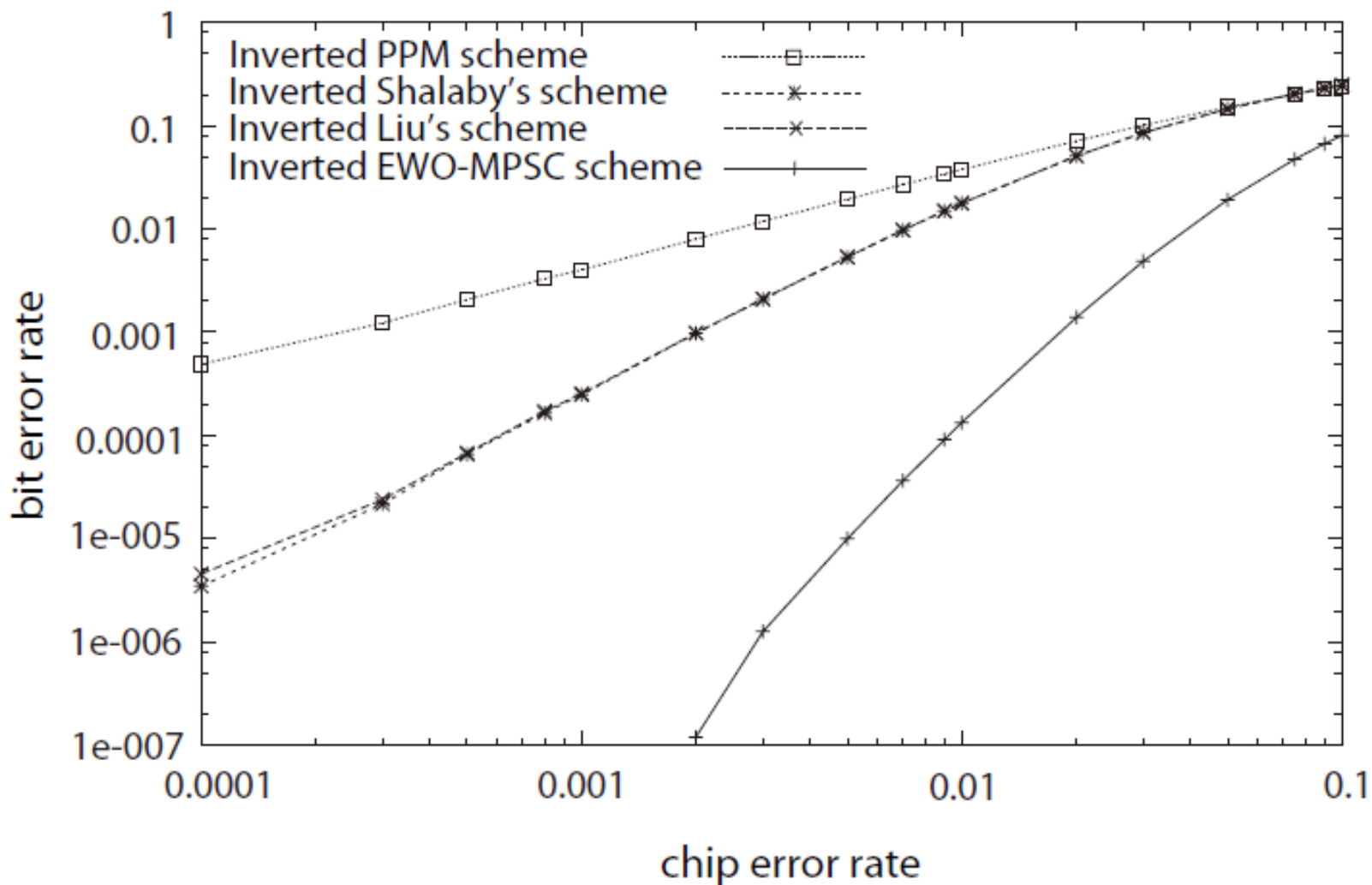
(b) Codewords transmitted simultaneously



(c) Multiplexed optical signal

復号誤り率の比較 ($n=16, \bar{N}=7$)

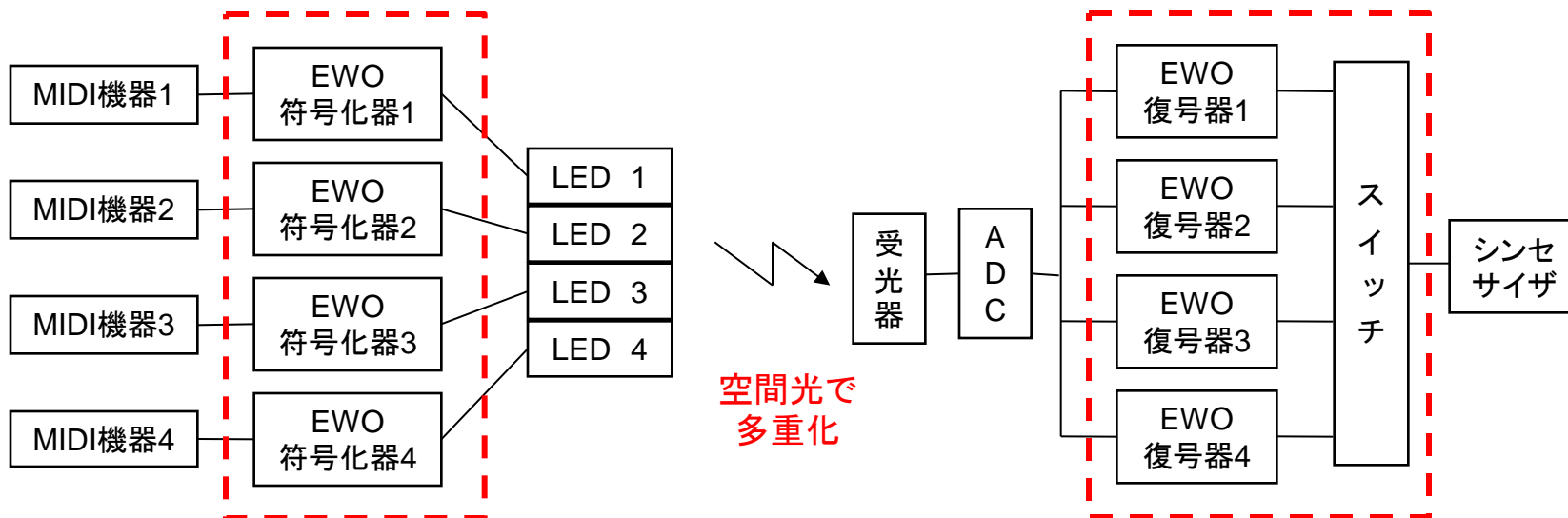
20



開発した実験システムの概要

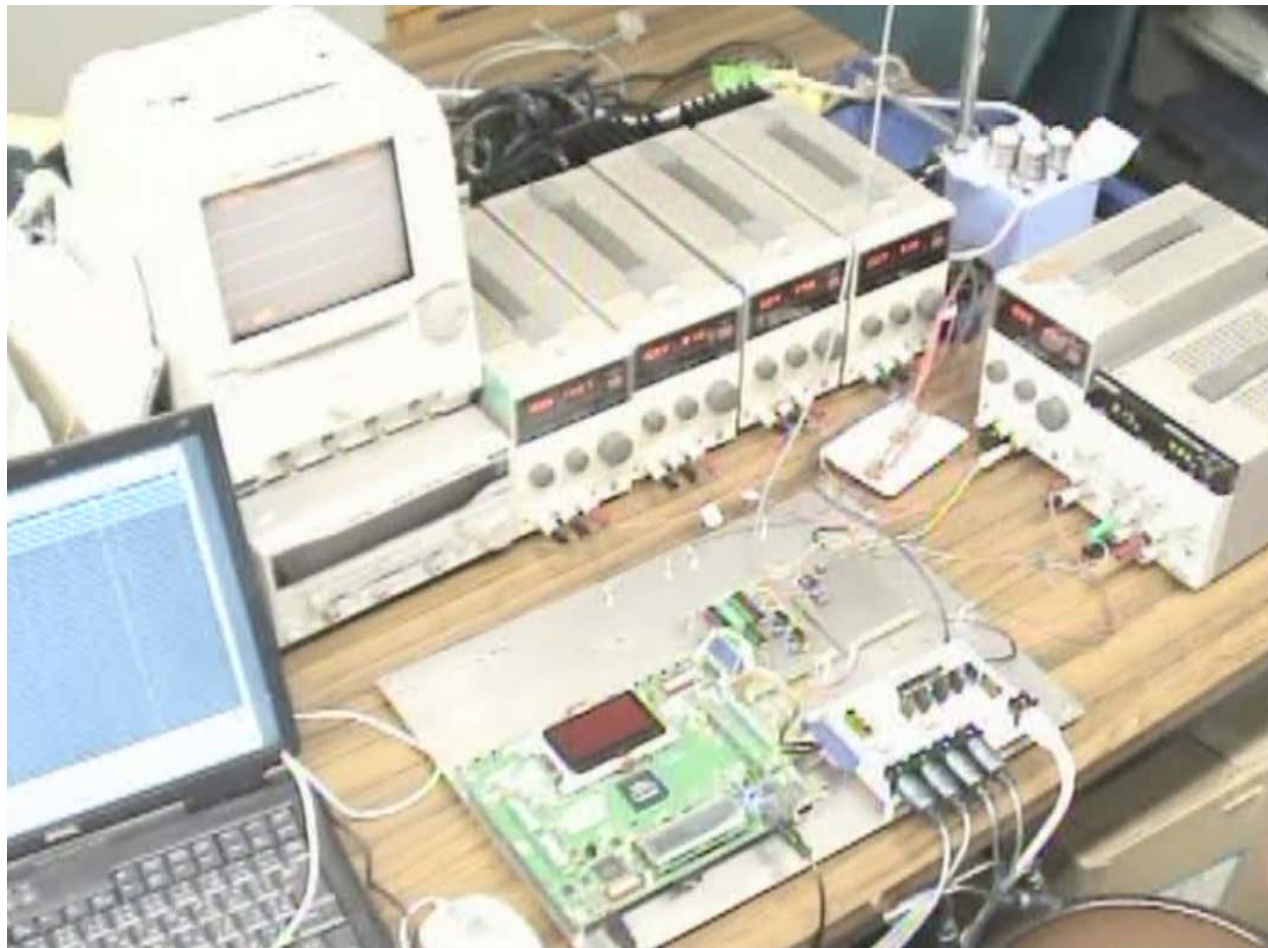
21

- 実験装置： EWO(CSK)方式を採用→受信機が簡単
デジタル処理部はFPGAで実現
- ブロック図



伝送実験

22



まとめ

- MPSCとMUIキャンセラを用いた同期CDMA方式
- 照明光通信には、反転MPSC系列を用いる
 - ▣ 平均光信号強度が大きく、相対的な分散が小さい
- 計算機シミュレーションによる誤り率の評価
 - ▣ EWO(CSK)が最も低い誤り率を達成する
- 実験システムの開発
 - ▣ 白色LEDとFPGAを利用
 - ▣ 31.25KbpsのMIDI信号(チップレート500Kcps)
 - ▣ 符号長16のMPSCで5ユーザまでの多重化伝送