

蛍光灯通信における受信波形特性を考慮した復号方式の研究 — 転送速度とサンプリング周波数について —

小林 卓[†] 牧野 秀夫[‡] 劉 笑寒^{††} 吉田 洋[†] 前田 義信^{††}

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐二の町 8050

[‡] 新潟大学工学部情報工学科 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐二の町 8050

^{††} 新潟大学工学部福祉人間工学科 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐二の町 8050

E-mail: [†] suguru@gis.ie.niigata-u.ac.jp,

[‡] makino@ie.niigata-u.ac.jp

あらまし 屋外と同様に屋内における位置情報は歩行者誘導などの面から有用である。そこで、我々は蛍光灯を用いた可視光通信による屋内位置情報システムを検討し、これまでにFSK方式で発信された光信号の波形特性を考慮したデジタル信号処理方式を提案してきた。本稿では、システムの重要な要素である送信時の転送速度と受信器におけるサンプリング周波数について扱う。まず、対応可能な上限転送速度を算出し、信号抽出における処理単位の変更によるサンプリング周波数の低減法について述べる。そして、復号実験によりビットエラー率(BER)と処理の連続性を調査する。実験結果より、転送速度19.2kbps、サンプリング周波数1MHz、距離3mまで 10^{-6} 以下のBERを確保できることを確認した。

キーワード 蛍光灯通信, デジタル信号処理, 復号方式, 位置情報, 屋内位置案内

Fluorescent Light Communication: a Study of Waveform Characteristics and Decoding Methods — Transmission Speed and Sampling Frequency —

Suguru KOBAYASHI[†] Hideo MAKINO[‡] Xiaohan LIU^{††}

Hiroshi YOSHIDA[†] and Yoshinobu MAEDA^{††}

[†] Graduate School of Science and Technology, Niigata University

8050 Ikarashi-ninotyo, Nishi-ku, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

[‡] Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Niigata University

8050 Ikarashi-ninotyo, Nishi-ku, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

^{††} Department of Biocybernetics, Faculty of Engineering, Niigata University

8050 Ikarashi-ninotyo, Nishi-ku, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

Abstract Indoor pedestrian navigation systems using a location based service will become as useful as the better known 'GPS' outdoor systems. We have proposed a digital signal processing method for signals in a fluorescent light (FL) communication system. In this paper we investigate transmission speeds and sampling frequencies when using FL communication. The first step is to calculate the upper transmission speed and to propose how to reduce sampling frequency. Based on the analyses of their parameters we have used a decoding method with a transmission speed of 19.2kbps, and a sampling frequency of 1MHz, at a distance of 3.0m between a photo sensor and the FL, and we have checked the bit error rate associated with the digital signaling process. Our experiments have confirmed that the error rate of each decoded bit was less than 10^{-6} .

Keyword Fluorescent lights communication, Digital signal processing, Decoding method, Location information, Indoor positional guidance

1. はじめに

カーナビゲーションシステムの普及や次世代携帯電話への GPS(Global Positioning System)機能標準搭載のように、位置情報を用いたサービスが多くの人に利用されている。これらのサービスで利用される GPS は衛星電波を用いて必要な現在位置情報を取得し、屋外における位置の絶対測位が可能である[1],[2]。

位置情報に基づいた情報提供は建物施設の大型化、構造の複雑化に伴い、屋外のみならず屋内においても有用なものになっている。そこで、著者らは GPS 信号の届かない屋内において、一般照明装置である蛍光灯を用いた可視光通信[3],[4](以下、蛍光灯通信)による位置情報の提供方法を提案している[5],[6],[7]。

蛍光灯は、既に地下街や建物内において設置場所や供給電力が確保され、照度基準を満たすよう屋内の至る箇所に設置され全体をカバーしている[8],[9]。また、可視光通信の利点である情報受信可能範囲の視認性やセキュリティも備えている[10]。

著者らは、蛍光灯の光信号から情報を取得する方法として2通りのアプローチを検討している。アナログ復号回路を用いた情報取得[11],[12]とデジタル信号処理による情報取得[13]である。本稿では、後者のデジタル信号処理による情報取得を扱う。

先行研究[13]は、光信号を受信した波形(以下、受信波形)の特性を考慮した復号方式を提案し、転送速度 9.6kbps の送信情報をサンプリング周波数 2MHz で A/D 変換した受信波形から抽出している。この転送速度とサンプリング周波数は、蛍光灯通信システムとその受光装置を構築する上で重要なパラメータである。

本稿では、この 2 つのパラメータについて論じる。具体的には、まず蛍光灯通信の特徴を考慮して送信側の上限転送速度を算出する。次に、受信器側の信号抽出処理における抽出単位の変更によるサンプリング周波数の低減法について述べ、得られたパラメータを用いた復号実験を行う。実験は、8bit 全パターンを用いて 1 文字分の情報と連続情報に対するビット誤り率(以下, BER)を検証する。

2. 蛍光灯通信

2.1. 蛍光灯通信システム

本システムは、屋内の一般照明装置である蛍光灯を位置情報の発信ソースとし、屋内の位置案内サービスを提供する(図 1)。LED 照明を用いた可視光通信では単一で転送速度 5Mbps の情報伝送も可能である[14]。しかし、本システムでは、サービスに必要な位置情報や蛍光灯の ID、あるいは施設の不備や緊急時に提示する情報等の伝送であるため、数 kbps 程度の転送速度で

十分である[6],[15]。本システムによる屋内位置案内サービスの実現に問題はない。

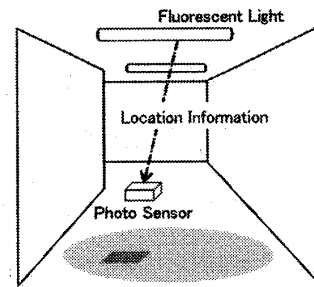


図 1 蛍光灯通信システム

Fig.1 The fluorescent light communication system

2.2. 情報の送受信

図 2 に 32W インバータ式蛍光灯を用いた情報送受信のブロック図を示す。

パーソナルコンピュータ 1(以下、PC1)において蛍光灯通信における情報の転送速度を設定し、送信情報を RS-232C(Recommended Standard 232 version C)を通して制御装置へ送信する[6]。RS-232C 通信は、スタートビット“0”、ストップビット“1”を用いる調歩同期方式であり、情報を下位 bit から送信する[16]。

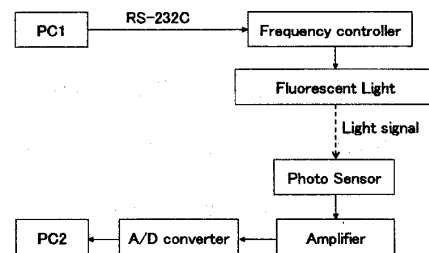


図2 情報送受信ブロック図

Fig.2 Flow diagram for transmission and reception of data

送信情報は、FSK(Frequency Shift Keying)方式により蛍光灯から発信される[17],[18]。蛍光灯の制御装置へ入力されたシリアル信号(以下、入力シリアル信号)に対し、信号“1”を基本周波数、信号“0”を信号周波数へ変調する。基本周波数 100kHz、信号周波数 130kHz を本稿では用いる。

実験用に試作された蛍光灯の光信号はフォトセンサ(東芝製 TPS601A)で受信される。そして、この受信された波形はバッファアンプ(MAX450,40dB)において増幅され、A/D変換器(大井電子製 AD7161-PCI ボード, 120MHz, 2MByte)により A/D 変換される(±1.0V, 12bit)。その時系列データをパーソナルコンピュータ 2(PC2)に保存し、後述の復号方式により情報を抽出する。

2.3. 受信波形特性

転送速度 9.6kbps を用いた場合の入力シリアル信号とフォトセンサにおける受信波形を図3に示す。復号処理で考慮する受信波形の特性(以下、受信波形特性)には波形変動と応答時間差がある[13].

波形変動は、蛍光灯の点灯周波数が切り替わる際に受信波形の基線が変動することである。この変動成分は約 60kHz 以下の周波数成分で構成されていることが確認されている[13].

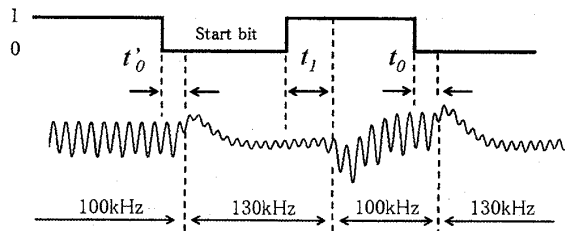


図3 蛍光灯特性

入力シリアル信号(上段)と受信波形(下段)

Fig.3 Waveform characteristics

Input signal (upper) and Received waveform(lower)

信号“0”と信号“1”では、入力シリアル信号が切り替わり実際に蛍光灯の周波数が変化するまでの時間(以下、応答時間)に差があり、この差を応答時間差としている。先行研究[13]では、3種類の応答時間が確認されている。信号“0”に対する応答時間 t_0 、信号“1”に対する応答時間 t_1 、送信間隔をあけて送信された情報の一文字目のスタートビット“0”(以下、第1スタートビット)に対する応答時間 t'_0 である。本稿の装置における各応答時間には、次の関係がある。

$$t_0 < t_1 \quad (1)$$

$$t_0 < t'_0 \quad (2)$$

制御装置の変更により、(1)式の大小関係が以前とは異なる。このため、隣接した信号“0”と“1”の各発信時間 T_0, T_1 は次のようになる。ここで、 T は 1bit の送信される時間(理論値)、 t_d は応答時間差である。

$$T_0 = T + t_d \quad (3)$$

$$T_1 = T - t_d \quad (4)$$

$$t_d = t_0 - t_1 \quad (5)$$

また、第1スタートビットの発信時間 T'_0 は、次のようになる。ここで、 t'_d は第1スタートビットの応答時間と他の信号“0”の応答時間との差である[13].

$$T'_0 = T_0 - t'_d \quad (6)$$

$$t'_d = t'_0 - t_0 \quad (7)$$

2.4. 復号方式

2.4.1. ノイズ除去

フォトセンサにおける受信波形には、蛍光灯の基本周波数と信号周波数以外の周波数成分が含まれている。ここでは、復号処理に不要な周波数成分をノイズとし、デジタルフィルタを用いて除去する。

除去する周波数成分として、波形変動を構成している約 60kHz 以下の周波数成分と信号周波数以上の不要な高い周波数成分が挙げられる。そこで、バンドパス特性のデジタルフィルタを用いる(表1)。減衰量を維持するため、デジタルフィルタの次数は A/D 変換に用いるサンプリング周波数 f_s に応じて設定する。

表1 デジタルフィルタ特性

種類	FIR	遮断域 1	0~60 kHz
減衰量	40dB	通過域	90~150 kHz
次数	100/150	遮断域 2	180~ $f_s/2$ kHz

(次数: $f_s=1\text{MHz}$ 時/ $f_s=2\text{MHz}$ 時)

2.4.2. 信号抽出

信号抽出は、半周期を抽出単位とする。ここでは、波形データの振幅ピーク値の中間点を半周期とする。この半周期に含まれるデータ数と閾値を比較することにより、基本周波数 f_1 が信号周波数 f_0 であるかを判定する。閾値として、各周波数の半周期分の時間に費やされるデータ数 n_{f1}, n_{f0} の平均値を用いる[13].

$$\text{閾値} = \frac{n_{f1} + n_{f0}}{2} \quad (8)$$

$$\text{半周期} = \begin{cases} \text{基本周波数の半周期} & (n_i > \text{閾値}) \\ \text{信号周波数の半周期} & (n_i < \text{閾値}) \end{cases} \quad (9)$$

基本周波数 100kHz、信号周波数 130kHz であるため、半周期のデータ数 n_i が閾値より多ければ基本周波数、閾値より少なければ信号周波数として認識する。

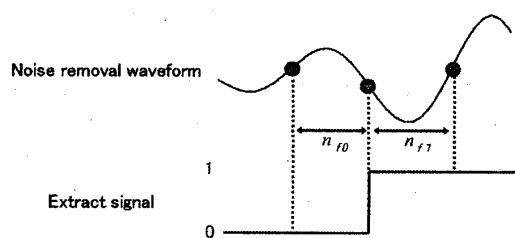


図4 半周期抽出

Fig.4 Signal extraction every half cycle

2.4.3. 信号弁別

信号抽出処理で得られる波形は、蛍光灯の応答時間差により、隣接した“0”と“1”とのパルス幅が異なる。そこで、1bit の送信時間分の区間(以下、ビット区間)を信号“0”もしくは信号“1”に再度弁別する[13].

ここで考慮する応答時間差は、各蛍光灯の個体差や経年変化により変動する可能性がある。そのため、複数の蛍光灯に対応するには応答時間差を動的に変化させることが望ましい。そこで、次のように処理を拡張する。

- 1) ビット区間が開始されてから抽出信号"0"と"1"をその区間の終了までカウントする
- 2) 抽出信号"0"から"1"への最初の変化点を弁別対象区間の最初とし、そのビット区間の終了まで抽出信号"0"と"1"をカウントする
- 3) ビット区間終了時、弁別対象区間内のデータ数がビット区間の4分の1以上の場合には弁別対象区間内の信号数を、4分の1未満の場合にはビット区間全体の信号数を比較数値として設定する
- 4) 比較数値の大きい信号でビット区間を弁別する

第1スタートビットの応答時間 t'_0 が他の応答時間 t_0 と異なるため、送信間隔 t_s が補正を加える必要のある送信間隔 T_s 以上のとき、スタートビットのビット区間に第1スタートビット応答時間差 t'_d に対する補正 t_{fsb} (以下、FSB補正)を加える。

$$\text{ビット区間の長さ} = \begin{cases} T & (t_s < T_s) \\ T - t_{fsb} & (t_s \geq T_s) \end{cases} \quad (10)$$

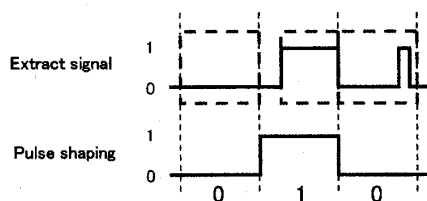


図 5 信号弁別

Fig.5 Pulse shaping

一般に、送信情報は複数個の文字で構成されている。そこで、ストップビットの弁別後、次のように処理を継続する。

- 最後の抽出信号が"0"の時、続く文字のスタートビット区間内とみなし弁別処理を継続する
- 最後の抽出信号が"1"の時、信号"0"の抽出があるまで待機し、最初の抽出信号"0"を処理の開始点とする
 - T_s 以上の待機であればスタートビット区間にFSB補正を実施
 - T_s 以下の待機であればFSB補正を中止

2.4.4. 情報抽出

信号弁別処理により得られた符号列から送信情報を抽出する。この際、蛍光灯通信の送信フォーマットに従い符号列を処理する。

3. 転送速度の上限について

高速な転送速度を用いることは、蛍光灯下通過時における位置情報受信時間の短縮、取得可能な情報量の増加に繋がる。このため、蛍光灯システムの構築の際、設定可能な転送速度についての情報が必要となる。

3.1. 理論値

蛍光灯通信は、FSK方式を用いて情報を発信する。このため、上限転送速度は点灯周波数から算出される。受信波形から信号を復号するためには、1bit分の発信時間内に1周期以上の波を含む必要がある。そこで、各転送速度 v_T [kbps]における応答時間差を考慮した1bitの発信時間 T [μ Sec]と含まれる波の個数を表2に示す。

表 2 1bit 発信時間と波の個数

v_T	$T1$	個数	$T2$	個数	$T3$	個数
9.6	104.2	10.42	91.67	9.17	80.17	8.02
19.2	52.08	5.21	39.58	3.96	28.08	2.81
28.8	34.72	3.47	22.22	2.22	10.72	1.07
38.4	26.04	2.60	13.54	1.35	2.04	0.20

$T1$ ~ $T3$ は1bitの発信時間であり、それぞれ考慮した応答時間差 t_d との対応は次の通りである。表2より、理論値の上限転送速度は、28.8kbpsである。

表 3 発信時間と応答時間差の対応

T [μ Sec]	t_d [μ Sec]
$T1$	0
$T2$	12.5
$T3$	24

3.2. 現状の限界転送速度

送信情報 $33_H(=(01010101)_2)$ を用いた情報送信実験により得た受信波形を図6,7に示す。転送速度は、それぞれ19.2kbps, 28.8kbpsである。

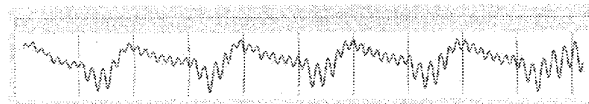


図 6 受信波形 (19.2kbps)

Fig.6 Received waveform (19.2kbps)

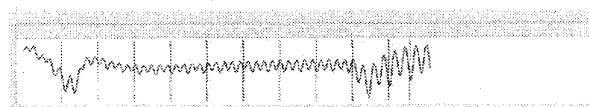


図 7 受信波形 (28.8kbps)

Fig.7 Received waveform (28.8kbps)

図6の受信波形から、変調の繰り返しが確認できる。図7では、28.8kbpsの信号に蛍光灯は応答していない。このため、現状の装置は転送速度19.2kbpsまで対応している。転送速度19.2kbpsでは、応答時間差が20 μ Sec以上の場合にも2つ以上の波が確保できる(表2)。復号処理の信頼性を考慮すると、この19.2kbpsが実際の利用に耐えうる上限転送速度と考えられる。

4. サンプリング周波数

低いサンプリング周波数を用いることは、装置構成の簡略化や処理量の軽減等に繋がる。ここでは、低いサンプリング周波数においても安定した復号処理を行うためのサンプリング周波数低減法について述べる。

4.1. サンプリング周波数条件

基本周波数 f_1 と信号周波数 f_0 の各成分を A/D 変換されたデータ数から正確に判別するため、サンプリング周波数 f_s に求められる条件(11)式を示した[13].

$$\lfloor n_{f_1} \rfloor - \lfloor n_{f_0} \rfloor \geq 3 \tag{11}$$

$$n_{f_1} = \frac{1}{2f_1} \div \frac{1}{f_s} = \frac{f_s}{2f_1} \tag{12}$$

$$n_{f_0} = \frac{1}{2f_0} \div \frac{1}{f_s} = \frac{f_s}{2f_0} \tag{13}$$

基本周波数 100kHz, 信号周波数 130kHz を用いる本システムではサンプリング周波数 2MHz が必要となる。

(11)式を満たさないサンプリング周波数を用いた場合、半周期の抽出精度が不安定になり定期的に誤抽出が生じる。このため、スタートビットの本来の開始点が発見できず、適切な復号処理の同期が困難になる。距離 2m で信号”1”を発信させた 1mSec 分の区間に対し抽出処理を行い誤抽出の発生する平均間隔を調査した(表 4)。この得られた平均間隔は、転送速度 9.6kbps の約 2bit 分に相当する。

表 4 後抽出の平均間隔

	平均間隔 [個 (μSec)]
ルーバーあり	42 (210)
ルーバーなし	34 (170)

4.2. サンプリング周波数の低減法

(11)式を満たさないサンプリング周波数では、半周期の認識範囲が重複するため、一方の周波数で誤抽出となり精度が不安定になる。そこで、(11)式を満たすよう信号抽出処理の抽出単位を増加させる(表 5)。

表 5 抽出単位とデータ数(理論値)

サンプリング周波数		2MHz	1MHz	0.5 MHz
0.5 周期	100kHz	10.00	5.00	2.50
	閾値	8.85	4.42	2.21
	130kHz	7.69	3.85	1.92
1 周期	100kHz	20.00	10.00	5.00
	閾値	17.69	8.85	4.42
	130kHz	15.38	7.69	3.85
2 周期	100kHz	40.00	20.00	10.00
	閾値	35.38	17.69	8.85
	130kHz	30.77	15.38	7.69

サンプリング周波数 1MHz では、抽出単位を 1 周期へ変更することで(11)式を満たす。同様に、抽出単位を 2 周期とすることでサンプリング周波数 0.5MHz においても(11)式を満たすことができる。

しかし、抽出単位を増加させることは、従来の抽出対象を複数個まとめて処理することになる。このため、周波数の切り替え部分において誤抽出の可能性がある。図 8 のように、周波数の切り替わり点で隣接した信号周波数の半周期 n_{f_0} と基本周波数の半周期 n_{f_1} を 1 周期として処理する場合、2 つの和 $n_{f_0} + n_{f_1}$ を用いて信号”1”あるいは信号”0”にまとめて抽出する。このため、片方の信号で半周期分の誤抽出が生じる。

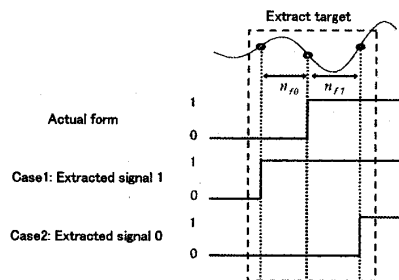


図 8 1 周期単位の信号抽出

Fig.8 Signal extraction every cycle

1 周期単位の抽出処理の場合、周波数の変調区間の開始と終了部分で半周期ずつ誤抽出された際に、1 周期分のデータ数が次の信号弁別に影響する。2 周期単位の処理では、2 周期分以上になる可能性もある。

転送速度を上げた場合、1bit の発信時間が短くなることで含まれる波の数も減少するため、より高い信号抽出精度が必要となる。一部の誤抽出を生むこの低減法は、転送速度を上げる障害となる。表 2 に示した転送速度別の 1bit 区間に含まれる波の数を考慮すると、9.6kbps 以上の転送速度を用いる際には、サンプリング周波数を 1MHz まで下げた場合でも信頼性を確保できると考えられる。

5. 復号実験

5.1. 実験環境

蛍光灯を用いた復号実験を暗室において実施する。受光器と蛍光灯までの距離を l とし、蛍光灯を床と垂直に設置することで実際の天井までの高さを横方向の距離として扱う。本実験室では距離 5m までの検証が可能である。受光器の高さは、蛍光灯の中央の高さに設置する(図 9)。

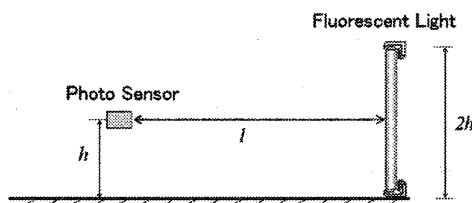


図 9 実験環境

Fig.9 Basic setup for experiment

5.2. 実験方法

5.2.1. 復号実験 1

転送速度 v_T とサンプリング周波数 f_s の組み合わせを変化させた各項目について実験を行う (表 6)。サンプリング周波数 2MHz, 1MHz に対し, 信号抽出処理における抽出単位はそれぞれ半周期, 1 周期とする。また, 各実験項目において, 信号弁別処理で設定する FSB 補正 t_{fsb} に 0 μ Sec (補正なし), 6 μ Sec, 12 μ Sec を用いた 3 通りの復号処理を行なう。

表 6 実験項目のパラメータ

	v_T [kbps]	f_s [MHz]	t_{fsb} [μ Sec]
実験項目 1	19.2	2	0, 6, 12
実験項目 2	9.6	1	0, 6, 12
実験項目 3	19.2	1	0, 6, 12

復号処理する実験データの取得は以下の条件で行う。

- ・ ユニット(ルーバー)の有無
- ・ 距離 2m, 2.5m, 3m で実施
- ・ 送信情報は 8bit データ(00_H~FF_H)を使用
- ・ 各情報に対し 2.5 秒分のデータを取得 (0.5 秒 \times 5)
- ・ 情報の送信間隔は約 10mSec (FSB 補正は必要)

送信情報 8bit データの全パターンについて復号実験を行う。復号処理により得られたスタート/ストップビットを含む符号列と蛍光灯への入力シリアル信号の比較によりビットエラー数を調べ, BER を算出する。

5.2.2. 復号実験 2

復号実験 2 として連続文字列への対応を確認する。蛍光灯からの送信情報は '\$x' ('x' は 8bit データ) とする。8bit データの全パターンを用いて実験を行い, 全体の BER を算出する。BER の算出法は復号実験 1 と同様である。測定条件は距離 2m において, 表 7 に示す転送速度 v_T とサンプリング周波数 f_s の組み合わせとする。サンプリング周波数 2MHz では半周期単位の信号抽出, 1MHz では 1 周期単位の信号抽出を行う。

表 7 組み合わせ (復号実験 2)

	v_T [kbps]	f_s [MHz]	抽出単位
P1	9.6	2	半周期
P2	9.6	1	1 周期
P3	19.2	2	半周期
P4	19.2	1	1 周期

FSB 補正 t_{fsb} は, 12 μ Sec とする。ユニットの有無, 取得データ数等の条件は, 復号実験 1 と同様である。

5.3. 実験結果

各距離における復号ビット数と算出した BER を表 8~13 に示す。また, 各距離における FSB 補正時間別の BER を対数目盛りのグラフで図 10~13 に示す。この

グラフにおいて, ビットエラーが生じず, BER が算出できない項目では, 便宜上, ビットエラー数 1 として算出した BER を仮の数値として表示している。

5.3.1. 復号実験 1 - 実験項目 1 -

転送速度 19.2kbps で情報を送信した場合, FSB 補正値を変更することで BER も変化するという結果が得られた。ルーバーの有無に関わらず, 6 μ Sec の FSB 補正で復号精度は最も高く, ルーバーのある状態では 10^{-6} 程度の値を確保した。また, ルーバーのない状態では, ビットエラーは生じなかった。

表 8 BER (実験項目 1/ルーバーあり)

距離	2.0m	2.5m	3.0m	
復号ビット数	419270	422060	418180	
BER	0 μ Sec	8.59×10^{-5}	1.28×10^{-4}	1.27×10^{-4}
	6 μ Sec	9.54×10^{-6}	2.37×10^{-5}	4.78×10^{-6}
	12 μ Sec	1.36×10^{-2}	1.39×10^{-2}	1.43×10^{-2}

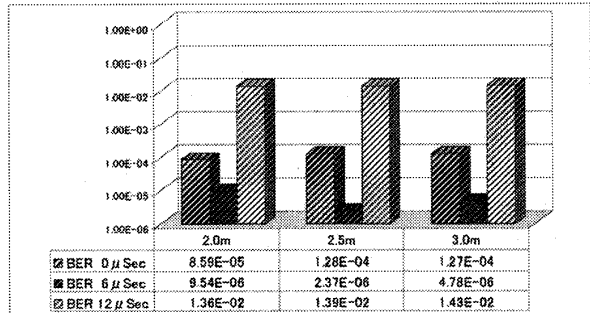


図 10 実験項目 1 の BER (ルーバーあり)

Fig.10 BER Experimental item1 (louver attached)

表 9 BER (実験項目 1/ルーバーなし)

距離	2.0m	2.5m	3.0m	
復号ビット数	422000	419290	421960	
BER	0 μ Sec	5.69×10^{-5}	2.22×10^{-4}	1.75×10^{-4}
	6 μ Sec	No Error	No Error	No Error
	12 μ Sec	9.47×10^{-3}	9.38×10^{-3}	9.37×10^{-3}

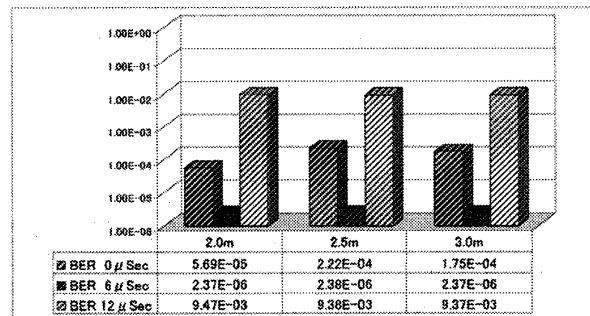


図 11 実験項目 1 の BER (ルーバーなし)

Fig.11 BER Experimental item1 (louver detached)

5.3.2. 復号実験 1 - 実験項目 2-

表 10 に各距離において復号したビット数を示す。サンプリング周波数 1MHz を用いた場合、転送速度 9.6kbps の送信情報の復号は全て成功した。FSB 補正値を 3 通りに変化させが、どの補正値においてもビットエラーは生じなかった。このため、BER は算出されなかったが、復号ビット数から 10^{-6} オーダー以下の BER が得られている。

表 10 復号ビット数 (実験項目 2)

距離	2.0m	2.5m	3.0m
ルーバーあり	419910	419770	422260
ルーバーなし	421950	421690	418160

5.3.3. 復号実験 1 - 実験項目 3-

転送速度 19.2kbps で情報を送信し、サンプリング周波数 1MHz を用いた場合、実験項目 1 の結果と同様に、FSB 補正値を変更することで BER も変化した。

実験項目 1 とは異なり、12 μ Sec の FSB 補正値で最も復号精度が高く、ルーバーの有無に関わらずビットエラーは生じなかった。

表 11 BER (実験項目 3/ルーバーあり)

距離	2.0m	2.5m	3.0m	
復号ビット数	420180	419400	422170	
BER	0 μ Sec	1.69×10^{-3}	1.72×10^{-3}	1.76×10^{-3}
	6 μ Sec	4.76×10^{-6}	2.62×10^{-5}	2.13×10^{-5}
	12 μ Sec	No Error	No Error	No Error

表 12 BER (実験項目 3/ルーバーなし)

距離	2.0m	2.5m	3.0m	
復号ビット数	418420	420350	421690	
BER	0 μ Sec	3.40×10^{-3}	3.00×10^{-3}	3.19×10^{-3}
	6 μ Sec	1.12×10^{-4}	1.55×10^{-4}	1.47×10^{-4}
	12 μ Sec	No Error	No Error	No Error

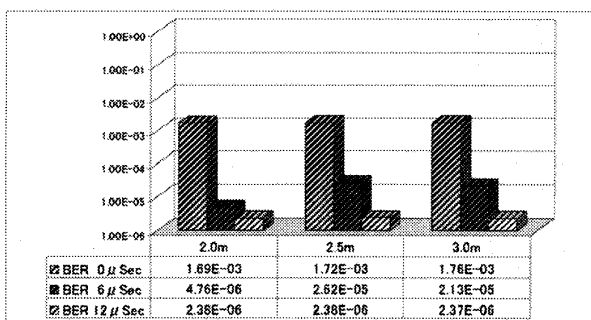


図 12 実験項目 3 の BER (ルーバーあり)

Fig.12 BER Experimental item3 (louver attached)

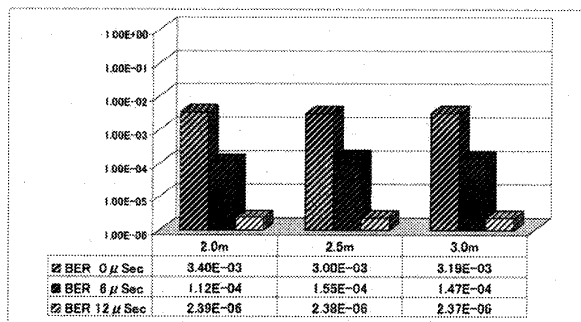


図 13 実験項目 3 の BER (ルーバーなし)

Fig.13 BER Experimental item3 (louver detached)

5.3.4. 復号実験 2

表 13 に各距離における復号ビット数を示す。転送速度とサンプリング周波数を変化させた 4 組において、全ての復号は成功した。このため、ビットエラーは生じず、BER は算出されなかったが、復号ビット数から 10^{-6} オーダー以下の BER が得られている。

表 13 復号ビット数 (復号実験 2)

組み合わせ	P1	P2	P3	P4
ルーバーあり	854200	849340	856140	844440
ルーバーなし	852900	850480	855200	847760

6. 考察

まず、復号実験 1 の各実験項目で得られた結果について考察する。次に、連続文字列を用いた復号実験 2 について考察する。そして最後に、本復号方式の他の送信フォーマットへの対応について考察する。

各復号実験において、 10^{-6} オーダーの BER を得た。このことから、従来の転送速度 9.6kbps, サンプリング周波数 2MHz からそれぞれ 19.2kbps, 1MHz へ変更した場合においても高精度な復号が可能である。

転送速度 19.2kbps を用いた実験項目 1,3 では、FSB 補正値により BER が変化した。一方、転送速度 9.6kbps を用いた実験項目 2 では、どの FSB 補正値においてもビットエラーは生じなかった。これは、転送速度の向上により、1bit の発信時間が短くなることで μ Sec オーダーの補正値の違いが許容できなかったためである。この実験結果から、転送速度 9.6kbps では FSB 補正への許容範囲があり信頼性の維持が容易である。そして、転送速度 19.2kbps の場合においても高い復号精度を得ることは可能であるが、そのためには適切な FSB 補正が必要である。

また、同じ転送速度 19.2kbps を用いた実験項目 1,3 の結果では、最も BER の低い FSB 補正値が異なる。サンプリング周波数を低減した実験項目 3 は信号抽出の処理単位を実験項目 1 の 2 倍にしている。このため、第 1 スタートビット応答時間差の影響する部分も増え、

高い復号精度を得るために必要な FSB 補正值も増加したと考えられる。サンプリング周波数の低減のため信号抽出単位を増やした復号では、FSB 補正值も増やす必要がある。

これまで、送信情報に 8bit の全パターンを用いて検証していることから連続情報への対応も問題ない[13]としてきた。本稿では、復号実験 2 として実際に連続処理の検証を行なった。1 文字目の文字 '\$' の復号も含め各組み合わせにおいて約 85000 回の復号処理を行いビットエラーは生じなかったことから、本復号方式の連続文字列への応用も可能である。

JEITA(電子情報技術産業協会)により規格化された可視光通信システムに可視光 ID システムがある[19]。これは、LED 照明から転送速度 4.8kbps で 4 値パルス位置変調(4PPM)方式を用いている。光の発信法や受光方法等の違いにより、蛍光灯通信システムと応用方法は異なるが、転送速度の面で同等なシステムである。本稿の蛍光灯通信システムの符号列は、RS-232C 通信に準拠しているが、今後は 4PPM 方式の導入も検討されている。本復号方式は、受信波形から符号列を復号する部分が主要部分であり、復号された符号列の意味づけは情報抽出処理としてシステム構築時に定義される。そのため、FSK 方式等の基礎部分の変更がない限り、どちらの送信フォーマットにも対応可能である。

7. まとめ

蛍光灯から FSK 方式により送信される情報に対するデジタル信号処理方式において、対応可能な上限転送速度を蛍光灯の点灯周波数から検討した。さらに、信号抽出法の変更によるサンプリング周波数の低減法について述べ、上限転送速度、低減したサンプリング周波数を用いた復号実験を行った。実験では、蛍光灯にルーバーを取り付けた状態とはずした状態のそれぞれに対して距離を 2~3m まで変化させて BER を調べた。転送速度 19.2kbps、サンプリング周波数 1MHz の条件において 10^{-6} オーダーの BER が確保できることを確認した。

8. 今後の展望

これまでに用いた送信情報は復号方式の信頼性を検証するためのものであり、実際に利用される情報と異なる。今後、実際に使用される蛍光灯通信システム規格のフォーマットに準拠した送信情報による検証や、実際の環境下における実証が必要である。

また、DSP や FPGA 等を用いた受光装置実現に向け、蛍光灯通信システム規格を考慮した処理の最適化や FSB 補正等のハードウェア依存特性に対する自動取得法を確立する予定である。

謝辞

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度の研究助成を受けた。

参考文献

- [1] P. Misra and P. Enge, “精説 GPS 基本概念・測理原理・信号と受信機”, 日本航海学会 GPS 研究会 (訳), 正陽文庫, 2004
- [2] 土屋淳, 辻弘道, “やさしい GPS 測量”, 日本測量協会, 1994
- [3] “公開特許広報 S260-32443 光によるデータ伝送方式”, キヤノン株式会社
- [4] Steven Leeb, “Talking Lights”, <http://www.talking-lights.com>, 2001, US patent
- [5] 牧野秀夫他, “一般照明器具を用いた新しい位置情報伝送方式”, 生体医工学第 41 巻特別号, p.490, 2003
- [6] 山内弘章他, “分散処理を用いた屋内位置案内システム-蛍光灯ネットワークを利用した案内方法-”, 電子情報通信学会 2005 年総合大会講演論文集 CD-ROM, pp.340, 2005
- [7] 鷹見亮他, “歩行者向け位置案内装置における屋内外データベース作成ソフトウェアの開発”, 情報処理学会研究報告 2006-UBI-12, pp.109-116, 2007
- [8] 河野匡志他, “新・照明教室 照明の基礎知識 (中級編)”, (社)照明学会, 2005
- [9] 片山就志他, “新・照明教室 光源”, (社)照明学会, 2005
- [10] 山本雄治他, “可視光通信技術の施設への応用”, http://www.shimz.co.jp/corporate_information/sit/report/vol185/070406.pdf, 清水建設研究報告 第 85 号, 2007
- [11] 松坂典広他, “照明機器を用いた視覚障害者用屋内位置案内システム -受光特性の改善方法について-”, 信学技報 MBE2004-71, pp.17-20, 2004
- [12] 吉田洋他, “蛍光灯通信における受光特性改善に関する基礎検討”, 信学技報 USN2007-22~35, pp.75-80, 2007
- [13] 小林卓他, “蛍光灯通信における受信波形特性を考慮した復号方式の研究”, 情報処理学会研究報告 2006-UBI-12, pp.101-108, 2007
- [14] 石田正徳他, “並列可視光無線通信方式における通信速度限界の検討”, 信学技報 CS2006-76, pp.37-41, 2007
- [15] 中川正雄, “ユビキタス可視光通信”, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J88-B No.2 pp.351-359, 2005
- [16] 池田克夫, “データ通信”昭晃社, 1993
- [17] 関清三, “わかりやすいデジタル変復調の基礎”, オーム社, 2002
- [18] 三上直樹, “C 言語によるデジタル信号処理入門”, CQ 出版社, 2003
- [19] 上野秀樹他, “可視光 ID システム”, 東芝レビュー Vol.62 No.5, pp.44-47, 2007