

GhostBanner システムにおける光信号の変調方式の研究

光藤雄一^{†1}

GhostBanner システムでは、同期反転させた光信号を用いて情報を伝送している。この送信方法では、矩形波を用いているが、変調周波数が高速になるにつれてノイズが発生する特性がある。そこで本研究では、矩形波の代わりに正弦波を用いてこの問題を解決できることを示す。また、正弦波を用いた場合の信号処理の方法について、シミュレーションを元に実例を示す。

A Research of Optical Signal Modulation Method For GhostBanner System

YUICHI MITSUDO^{†1}

GhostBanner system using Inverting Synchronous Modulation for transmitting data, in free space. This modulation method is using rectangular wave. In case of high-speed modulation, a shape of rectangular wave is changed, and it products a noise. In this paper, we present a modulation method using sine wave to avoid this problem, and show signal processing diagram using computer simulation.

1. はじめに

実世界での情報支援に、光信号を用いた情報配信を利用する研究は古くから研究されている分野である。昨今では LED 照明などが普及し始め、照明を利用して情報配信をする試みもなされている¹⁾。このうち、筆者らによって提案された RealEyeCommunicator-GhostTag システムでは、同期反転信号と呼ばれる光信号の変調方式を用いることで、空間分解能と高

速通信を両立させている^{2),3)}。同期反転信号とは、2つの発光器から互いに反転した矩形波を発生し、その内の一つが遮断された場合だけ変調成分(信号成分)が受信できるが、そうでない場合は DC 信号となり、信号成分が受信できないという特性を持つ信号である。

矩形波は反転信号を手軽に生成できるが、矩形波成分の中に変調周波数よりも高い成分を含むため、特に高周波での使用時に弊害が生じる。本稿では、そのようなケースへの対策をふまえて、ユーザが選んだ信号だけを増幅する変調方法を提案する。

2. 矩形波による変調とその弊害

同期反転信号は矩形波の使用を前提とした変調方式であった。反転した矩形波で変調された2つの光信号が、一つの受光器に入射すると、出力される信号は DC 信号となるので、受信器内のハイパスフィルタ (HPF) で除去されてしまい、受信することができなくなる。

RealEyeCommunicator では矩形波の片方を遮断することで²⁾、GhostBanner システムでは2つの信号をレンズ等で分解することで³⁾、それぞれ目標とする送信器からの信号のみを受信することができるようにしていた。送信器から受信器に至る空間光信号が通る空間は、一般的には非常に細いものになる。信号を遮断/分解する為には、この細い空間を遮断するか、2つの細い空間で仕切られた間に受信器を向けるか(図1)する必要があるということである。この行為に必要な空間的精度は、一般的に言うポインティングと同じくらいの精度であった。この仕組みを用いることで、両者のシステムとも、受光器が殆ど空間分解能を持たないフォトダイオードであるにも関わらず、信号を取りたい送信器を高い空間的精度で指定し、その信号だけを受信できることが特徴であった。

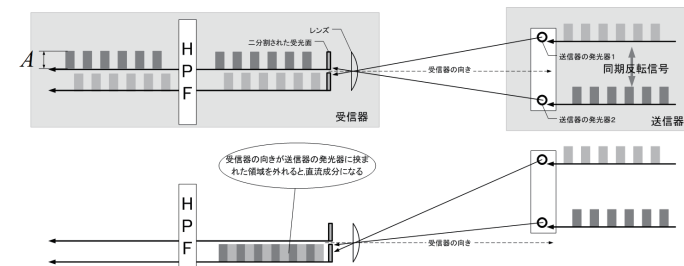


図1 GhostBanner システムのポインティングと信号処理の流れ

この機能を実現する上で、2つの信号が足し合わされたときにフラットな信号 (=DC 信

^{†1} 北九州市立大学 基盤教育センター
The University of Kitakyusyu Center for Fundamental Research

号)になるという、同期反転信号の仕組みが主要な役割を果たしている。これは、理論的には HI/LO を逆にした矩形波で実現することができる。理論的な矩形波では立ち上がり、立ち下がりに時間を要さず、矩形波の各辺が垂直になる。この形状の信号を互い違いに足し合わせれば、フラットな DC 信号になる。

ところが、実際には LED の点灯/消灯にはある程度の時間が必要である。また、立ち上がり、立ち下がり速度も同じではなく、立ち下がり時には LED 内のキャリア引き抜きに時間を要するため、電圧を切ってもなかなか消灯しない。つまり、現実には矩形ではなく台形を組み合わせて信号を生成しているということになり、立ち上がり/立ち下がり部分にノイズが生じる。

この問題は、変調速度が高くなるにつれてより顕著になる。矩形波の形のゆがみが大きくなると、2つの信号を足し合わせたときにフラットな部分すら生じなくなってしまう。このことは、選択されている信号以外は変調成分を持たないという、同期反転信号の重要な要件を満たすことができなくなるということである。

本稿では、このような問題を解消し、高速な信号を扱えるように変調手法を改良することを試みる。

3. 拡張された同期反転信号

3.1 正弦波の利用

理想的な矩形波の立ち上がり/立ち下がり部分は垂直になっており、無限に高い周波数を持つ。実際の回路でこの部分を実現することが不可能なので、ある程度の傾斜は必ず生じる。ところが、この部分が垂直でないと、2つの信号を組み合わせたときに信号がフラットにならない。特に通信周波数が LED の立ち上がり/立ち下がり速度の限界に近づくにつれて信号の変形の度合いも大きくなってゆき、生じるノイズも大きくなる。

この問題は、特に高出力の LED を使用したときに顕著に生じると考えられる。一般に LED の高出力化と高速変調能力はトレードオフの関係にあるとされているからである。光空間通信を実施するにあたり、ある程度までの高出力化は避けられない。したがって、矩形波の変形が原因で信号がフラットにならない問題は、使用する LED によっては比較的低い変調速度であっても生じ得る。

本稿では、この問題を正弦波を用いることで解決する。

この問題は、矩形波の持つ特性によって引き起こされていた。矩形波は変調速度に対して高周波の成分を含む。この成分に LED の立ち上がり/立ち下がり速度が追従できないから波形の変形が生じるのである。したがって、この問題をある程度回避する為には、変調速度に対

して高い周波数成分を含まない信号を使用すればよい。すると、もっとも単純には、正弦波を利用すればよいことになる。

3.2 正弦波を使用した場合の送信信号

同期反転信号の要件は、2つの信号を同時に受信すると DC 成分になるということである。正弦波を使用して変調したい場合、2つの送信源（発光器）から位相を (π) ずらした信号を発すれば良い。加えて、この正弦波を搬送波と考えることもできる。この場合、受信側ではバンドパスフィルタ (BPF) を使用して搬送波を検波する。搬送波の周波数を複数設定し、受光象限に複数の BPF を接続しておけば、複数チャンネルの通信も可能となる。

3.3 2象限への入射信号の統合と、ノイズの除去

GhostBanner システムにおいて、ユーザがポイントした送信器からの光信号は、それぞれ別の象限に入射する。ポイントされていない送信器からの光信号は、同期反転した2つの信号が1つの象限に入射するので DC 成分となり、ハイパスフィルタ (HPF) もしくは BPF によって阻止されるので、検波することができない。受信器が2象限の場合、それぞれの象限から反転した信号が得られる。この信号を1つの信号に統合し、以降の復調/復号化のプロセスに引き渡す。次節では、搬送波が正弦波であることを利用し、アナログ乗算を用いてこのプロセスを行う方法を提示する。

4. アナログ乗算を用いた復調方法

4.1 発光器から受信器までの放射束のモデル

はじめに、同期反転信号で通信を行う際のモデルを示す。受光素子の直前に円形のレンズを配置する。このレンズは、点光源である発光器から発し、レンズに入射した放射束を屈折させ、受光面上の一点に集中させることができる（結像させる）ように調整されているとする（図2）。このレンズの主点を受光面の境界線の中央部分に位置させる。レンズの前面に、レンズの主点と境界線の中央を結ぶ線を中心とした、半径 a の絞りを配置する。すると、ある点光源を発して受光面に入射する放射束 $\phi(W)$ は、光源を発して絞りに入射する放射束であるということになる。

発光器がこの光学系の正面、距離 d の場所に位置し、 $2\pi \text{str}^{*1}$ の範囲にわたって均一に放射強度 $I(W/\text{str})$ の放射束を出力しているとする。すると、受光面上に結像される放射束 $\Phi_{d,0}$ は $I \times \frac{\pi a^2}{d^2} (W)$ である。次に、受光器から距離 d の位置に壁面を設置し、その壁面にこの光

*1 str は立体角

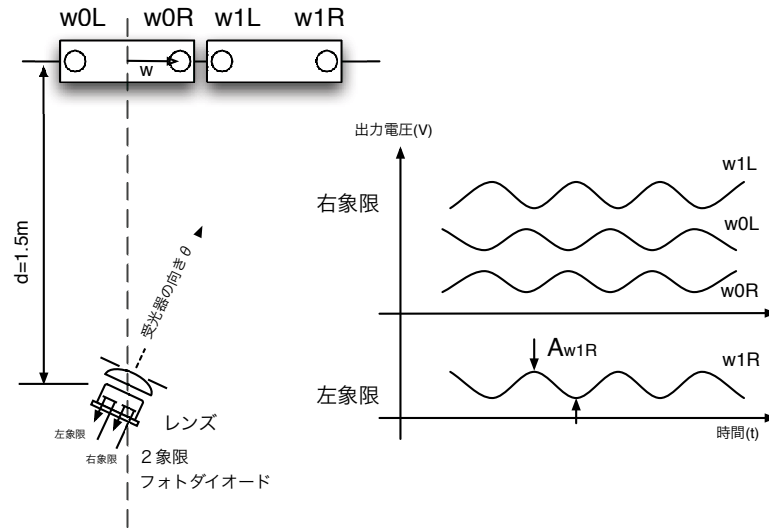


図2 幾何光学による信号電力の評価

源を配置する (図2). 受光器を θ rad 傾けた時, d, w で表わされる位置にある発光器から入射する放射束 $\Phi_{d,\theta,w}$ は

$$\Phi_{d,\theta,w} = I \times \frac{\pi a^2}{d^2 + w^2} \cos \left(\arctan \left(\frac{w}{d} \right) - \theta \right) \quad (1)$$

となる.

いま, 信号電圧の振幅を A とし, 信号電流を電圧信号に変換するための負荷抵抗を R_f とすると, この放射束によって生成される信号振幅は

$$A = R_f \times R \times \Phi_{d,\theta,w} = R_f \times R \times I \times \frac{\pi a^2}{d^2 + w^2} \cos \left(\arctan \left(\frac{w}{d} \right) - \theta \right) \quad (2)$$

となる.

4.1.1 目標信号と偽信号

次に, 目標信号と偽信号の波形を求める. 図2にモデルとなる光学状況を示す. 壁面にペアの発光素子を持つ送信器 (Transmitter0,1) が設置され, それぞれ発光素子 L,R を持つとする. 送信器 1 の向かって左側の発光素子の名前を 1L と書くようにする. いま, 壁面から距離 d の位置に受光器を設置し, 正面から角度 θ だけ傾けて設置し, ちょうど送信器 0 の発光素子間をポイントしているとする.

目標信号の振幅

このとき, 送信器の片方の発光器 ($w0L$) からの光信号が入射した場合の A_{w0L} は

$$A_{w0L} = R_f \times R \times I \times \frac{\pi a^2}{d^2 + w_{0L}^2} \cos \left(\arctan \left(\frac{w_{0L}}{d} \right) - \theta \right) \quad (3)$$

であらわされる. 光信号が正弦波で変調されていた場合, その振幅が A となる.

偽信号の振幅

一方で, 送信器の両方の発光器からの光信号が入射した場合, 二つの発光器は同期反転した信号を出力していることから, 受光器から見える信号は, w_{1L} と w_{1R} の正弦波を足し合わせたものとなる. (図2). 各送信器からの信号の正弦波部分を $y(t) = \sin(\omega t + \theta_s)$ とすれば, 受信される信号 $y_r(t)$ は,

$$y_r(t) = A_{w_{1L}} \sin(\omega t + \theta_s) + A_{w_{1R}} \sin(\omega t + \theta_s + \pi) \quad (4)$$

$$= A_{w_{1L}} \sin(\omega t + \theta_s) - A_{w_{1R}} \sin(\omega t + \theta_s) \quad (5)$$

$$(6)$$

のように書くことができる.

4.1.2 発光器の位置と受光象限

A の生じる象限は, θ によって決定される. 発光器の位置が, 「受光器の向き」のベクトル (図2) よりも左にあった場合は右象限に, 右にあった場合は左象限に入射する. A は入射した象限に生じる. 上のモデルであれば,

$$\arctan \frac{w}{d} - \theta < 0 \quad : \text{右象限} \quad (7)$$

$$> 0 \quad : \text{左象限} \quad (8)$$

となる.

4.2 各象限からの信号の乗算

ポイントされていない送信器からの信号は, 2つの発光器からの光路長と角度がやや異なることが原因となり, 完全に相殺し合う関係にはならない. 受信信号の大半は DC 成分となるが, AC 成分も生じる. 相殺しきれないで残った AC 成分は, ポイントされた送信器からの信号によく似た信号となる. この信号は, ポイントされた送信器の信号とは異なるものなので, 復調時に排除されなければならない.

ここで, 各送信器からの正弦波の位相に着目する. 一つの送信器からの信号は, それぞれ位相が π 違う信号が出力されている. ところが, 違う送信器同士では正弦波の同期をすること

ができない。したがって、ポイントされていない送信器からの信号は、位相が互いにバラバラの状態を受信されている。

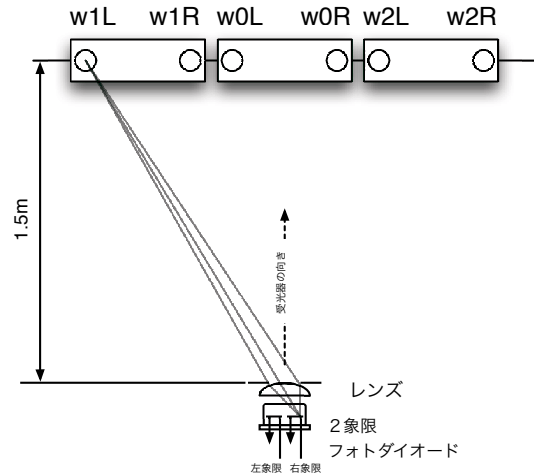


図3 送信器を3つ並べた例

例えば、図3のように3つの送信器を並べた場合、左側の送信器の位相と右側の送信器の位相、中央の送信器の送信する信号の位相は、それぞれ異なっているはずである。図3の例では、左右象限に入射する光信号は、それぞれ表1ようになる。

象限	入射信号
左	$w0R, w2L, w2R$
右	$w1L, w1R, w0L$

表1 各信号の入射象限

左右象限には反転した信号の他、位相のずれた偽信号も入射している。左右象限からの出力を掛け合わせた場合、同期反転した部分は、2倍の周波数成分を持つ波長に加え、マイナス方向の直流成分を生じる ($-\sin^2 \theta = \frac{\cos 2\theta - 1}{2}$)。それ以外の部分は、入射時に同期反転信号によって減衰させられている上、互いに位相のずれた信号同士が掛け合わされることになる。こうした信号は本信号の振幅よりも大きくなることはできない。つまり、左右象限からの出力

信号を乗算すると、ポイントされている信号だけが増幅される。以下に、実際の使用シーンを想定した物理的条件を設定し、その場合に得られるであろう波形パターンを算出してみる。

4.3 アナログ乗算による復調の例

実験例として、掲示板に貼付されたポスターに発光器を設置し、ユーザがこれらをポイントして情報を取得するというシーンを想定する。受光器から距離 $d = 1.5\text{m}$ にある壁面(掲示板)上に、1cm ずつ離して3枚のA4用紙(幅0.21m)を3枚、横方向に並べて貼付されているとする。用紙の向きは縦(用紙の短辺が天地方向)とし、この用紙の各角に発光器を設置した状況を考えて(図3)。

中央の用紙の中央を基点とし、受光器(ユーザ)は基点の正面に、壁面に正対して立っているとする。右方向を正にとると、 $w1L$ から $w2R$ の座標は、左から、それぞれ $-0.325, -0.115, -0.105, 0.0, 0.105, 0.115, 0.325(\text{m})$ となる。

受光器は直径5mmの入射瞳とレンズ(入射瞳に入った光を全て受光面上に結像するものとする)を備え、中央の用紙の正面に設置されているとする。また、受光器が中央の用紙の中央をポイントする角度を $0(\text{rad})$ とおき、受光器から見て右方向を $+\theta$ 、左方向を $-\theta$ として、受光器の向きを示すことにする。

各発光器から1MHzの正弦波を出力し、受光器の位置における振幅を式2によって求める。また、同じ送信器のペアの発光器は、それぞれ反転した(位相が π 違う)信号を発生し、また送信器毎の位相差として、送信器1($w1L, w1R$)には $\pi/10$ 、送信器2($w2L, w2R$)には $\pi/3$ を設定した。また、受光器の左右象限からの出力は、それぞれ正規化する(最大振幅を1にする)とする。したがって、式3における R_f, R やLEDの放射強度 I 等の定数は、今回のシミュレーションでは意味を持たない。図4に、 $\theta = 0$ であるとき、 $w0L$ と $w0R$ によって生じた信号成分と、偽信号によるノイズ成分を示す。信号成分に対してノイズ成分が小さくなり、また $0(\text{V})$ 付近に生じていることが分かる。

次に、受光器を右側の用紙の中央に向けた際 ($\theta = \arctan 0.22/1.5$ とした際) に生じた信号成分 ($w2L$ と $w2R$ によって生じる) と、それ以外の発光器によって生じたノイズ成分を図5に示す。この例では、ノイズ形状がやや変化したように見られるが、やはり信号成分の振幅の方が大幅に大きい。通常の光通信システムでは、送信器を隣接して設置させた場合、信号振幅が殆ど同じになることから、信号の特定が困難になる問題があるが、本システムでは、ポイントされていない信号は反転信号と同時に受信されるために変調成分が相殺し合い、結果的に振幅が小さくなる。この特性は、従来の通信システムが苦手だった、送信器がほぼ同じ距離にあるときに最も効率よく発揮されることが分かる。

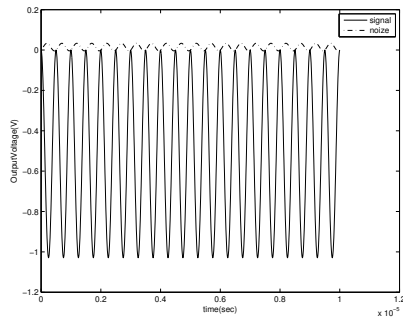


図 4 $\theta = 0$ の時の信号成分とノイズ成分

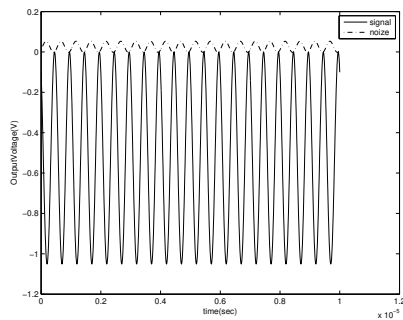


図 5 $\theta = \arctan 0.22/1.5$ の時の信号成分とノイズ成分

最後に、送信器 2 (w2L,w2R) を右方向に 6m 離して設置し、ポイントした際の信号を図 6 に示す。この例では、ユーザはほぼ壁面と平行な向きに立ち、掲示板の奥の方にあるポスターをポイントしている状況である。この場合、横にある送信器 1,0 からの信号がノイズ成分を形成し、6m 先にあるポスターからの信号を捉えるという条件になる。信号を拾いたい送信器よりも、ノイズ源の距離の方が近い場合、ノイズ成分の振幅が大きくなることが分かるが、依然として信号成分の振幅の方が大きいことが分かる。

5. 評価と検討

本稿では、GhostBanner システムの信号変調方法について、正弦波を用いる変調方法を提

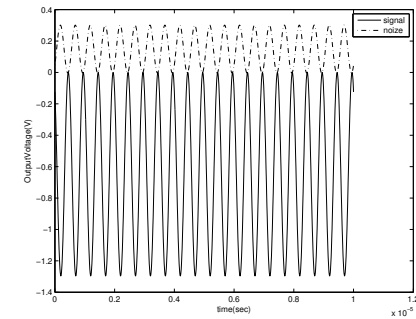


図 6 $\theta = \arctan 6.105/1.5$ の時の信号成分とノイズ成分

案し、各象限からの出力を正規化、乗算することで最終的な出力信号とする復調方法を示した。この復調方法は、多象限フォトダイオードの各象限に入る信号のうち、正確に同期している信号は、ポイントされた送信器からの信号だけということを使用し、掛け合わせて同相成分だけを増幅させることを期待している。この方法は、一般的にはロックインアンプなどの信号抽出機構でも用いられている。この方法を更に有効に用いるためには、異なる送信器の搬送波の相関関係をできるだけ低くすればよい。そこで、搬送波の位相、波長をランダムに変化させるなどの方法をとることで、さらに有効に信号抽出ができる可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 田中裕一, 小峯敏彦, 春山真一郎, 中川正雄: 白色 LED を用いた照明光通信における符号間干渉の影響に対する一検討, 電子情報通信学会技術研究報告. OCS, 光通信システム, Vol. 101, No. 394, pp. 31-36 (オンライン), 入手先(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110003286126/>) (2001-10-19).
- 2) 光藤雄一: ユーザが接触することで生成される実空間光信号の研究 (ユーザインタフェースとインタラクティブシステム, <特集> 情報洪水時代のネットワークサービス), 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 2, pp. 859-866 (オンライン), 入手先(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110006613077/>) (2008-02-15).
- 3) 光藤雄一: GhostBanner: 空間内に情報を添付する光タグシステムの研究, 情報処理学会研究報告. UBI, [ユビキタスコンピューティングシステム], Vol. 2010, No. 4, pp. 1-4 (オンライン), 入手先(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007995254/>) (2010-10-22).