

特別研究報告書

シングルビーム・マルチディテクター方式による リアルタイムトラッキング型 高速光無線通信システム

A high-speed optical wireless communication system
with a real-time tracking mechanism using a 'Single beam and Multi-detector model'

指導教員

野中弘二 助教授

報告者

学籍番号: 1055093

氏名: 濱田正典

平成 15 年 2 月 12 日

高知工科大学 電子・光システム工学コース

要 旨

シングルビーム・マルチディテクター方式による リアルタイムトラッキング型 高速光無線通信システム

濱田正典

Internet を代表とする通信情報伝達技術の普及によって、情報量が爆発的に増大し、伝達経路の更なる拡張、つまり Broadband 化が叫ばれている。現在、有線通信では Sub-Gbit/s 級の高速 Network の普及が始まっている。しかし、Backbone はもとより LAN Access 系においても、有線である以上、端末の移動や新規敷設時に起こる配線の煩わしさに悩まされるのは必至である。

一方、今世紀初めより、Carrier 周波数 2.4GHz、5GHz 帯を利用した電波無線通信市場が展開されている。これらはノート PC をはじめとするモバイル産業の後押しもあり、大きく発展しようとしている。だが、このような高周波の搬送波(Carrier)を用いても、伝達される情報量はわずか数 10Mbit/s であり、将来の情報社会において、十分なものではない。また、強力な電磁波を四散する電波無線には、情報漏洩の問題も付きまとう。Network Security の専門家からは「現在の認証では、情報を窓の外へ投げ捨てているようなものだ」と語られることもある[1]。

光はその直進性、融通性の欠如によって、電波ほど無線 Access 系として普及していないが、Point to Point 通信においては高速通信能力、Data の秘匿性、信号品質の良さなど高速 Access を担いうるポテンシャルを秘めている。(電波における Carrier 周波数、すなわち搬送波は光の振動周波数の数 100THz に相当する。)

本論文は、無線伝送手段として光を用いた、光無線に関する研究の成果をまとめたものである。無線の最大の課題である伝送速度の限界値を 1Gbit/s Class にまで向上させるということだけではない。従来の光無線の弱点は信号 Beam の制御にあった。ここに着目し、通信端末が移動したとしても接続状態を保持し続けるというように、無線モビリティという利点を損なわない新しい光無線通信方式の実現をもう一つの研究課題とした。この目標のもとに VCSEL と複数の受信部、機器制御信号を付加することによる光軸制御を用いた光無線 Access System を検討したので、その結果について述べる。

Keyword 光無線通信、赤外線 LD、モバイル、Gigabit 通信、追尾

Abstract

A high-speed optical wireless communication system with a real-time tracking mechanism using a 'Single beam and Multi-detector model'

Masanori Hamada

Due to expansion of recent information societies such as the Internet, any amount of information increased explosively. Therefore, Internet society required further extension of data transmission speed. At present, the spread of the high-speed cable-communication networks of Giga bits class started. However, because they need fixed cables, in movement of nodes or construction of new networks at backbones or LAN access systems, it is surely afflicted.

On the other hand, the radio wave wireless communication market using the carrier frequency 2.4GHz and 5GHz belt has been developed since the beginning of this century. These also are backed up mobile industry including the notebook PC, and start developing greatly. However, maximum amount of data which can be transmitted is 50Mbit/s even if it uses the carrier wave of such high frequency. It is insufficient to satisfy the information society of future.

Moreover, it has a strong electromagnetic radiation and to disperse, the radio wave wireless has the problem of the information leakage. The specialist of network security says, "In a present attestation means, information has been disclosed".

Because the control of the optical axis is difficult, an optical wireless is not so widespread. However, because a high-speed transmission rate, hiding secretly, and the signal quality are high, it has the ability of high-speed Access at the Point to Point communication. (The carrier frequency of radio wave communication, i.e. subcarrier frequency, is several 100THz on frequency in case of light-wave.)

This paper describes the study of the optical wireless communication system which light-beam is used for as the wireless transmission. A maximum data trans limit of wireless communication systems is transmission speed. In this research, transmission speed is rise up to over Giga bit/s class. This system also obtained the function that signal beam's control which was the weak point of conventional optical wireless communication. Even if a node of communication system is moved, it keeps holding connection condition.

As mentioned above, realization of a new optical wireless communication system which does not spoil advantages of the wireless Mobile-ability is a subject. The contents and results are described here.

Keyword

Optical Wireless Communication, Infrared LD, Mobile, Gigabit Transmission, Tracking

- 目次 -

要旨		-頁-
第1章	背景：無線方式	- 1-
1-1	無線通信方式	- 1-
1-1.1	電波を媒体とした Carrier 伝送方式	- 3-
1-1.2	光を媒体とした Sub-Carrier 伝送方式	- 7-
1-1.3	光を媒体とした Baseband 伝送方式	- 8-
1-2	現行の無線通信 Hardware System の課題	-10-
第2章	光無線通信システムの構成提案	-11-
2-1	次世代無線通信の要求事項	-11-
2-2	LD 収束光 Beam による高速 Data 通信	-11-
2-3	信号光 Beam 方向制御法	-14-
2-3.1	複数個の PD による捕捉	-15-
2-3.2	情報信号・制御信号重畳法	-16-
2-3.3	高周波と低周波の ADD/DROP による光軸修正	-18-
第3章	伝送媒体の検証	-19-
3-1	光無線通信可能距離	-19-
3-1.1	最大無線通信距離の確認実験	-21-
3-2	Beam の Spot Dancing	-27-
第4章	システム設計と周辺回路作製	-30-
4-1	提案する光無線システムの全体構成	-30-
4-2	低周波信号重畳の意義	-31-
4-2.1	Data 送受信体系	-31-
4-2.2	Pulse 合成の確認	-36-
4-3	Beam Control 制御部	-37-
4-3.1	複眼から得る光強度による Servo Actuator 制御	-37-
4-3.2	追尾指示の低周波制御信号発生メカニズム	-40-
4-4	動作確認用模型の作製	-45-

第5章	各種実験とその評価	-46-
5-1	高速 Digital 信号、低周波の信号 ADD/DROP	-46-
5-2	複眼による基本 Beam Control 動作 -捕捉動作-	-48-
5-3	対向端末に対する光軸方向制御要求 -追尾動作-	-50-
5-4	試作・実験系の性能の課題	-52-
5-5	総合性能評価	-55-
5-6	期待される効果と必要な動作	-56-
第6章	まとめ	-58-

参考文献

本論文に関する発表

謝辞

(付録) Source Code

第1章

背景：現在の無線通信

1-1 無線通信方式

近年、Internet は確実に普及しており、平成 14 年度の情報通信白書[2]によると、日本の Internet 利用者数は、5,593 万人(対前年度比 18.8%増、世帯普及率では 60.5%を突破)と推計されている。これに伴い、Access 系では、ISDN、ADSL、CATV での Internet 接続なども合わせて増加しており、Backbone Network における Traffic の爆発的増加をもたらしている。日本の Traffic ではすでに、半年で 2 倍に伸びる勢いである。また、流通 Contents の視点では、当初は文字と簡単な静止画像であったものが、音楽、動画像、Stream Media と充実とともに今後さらに Traffic の伸びが大きくなることが予想されている。近年の通信容量の伸びは、半導体産業の伸びを支配してきた Process 集積度の伸び率である「Moore の法則」を凌駕する勢いで成長を続けている。

このように爆発的に増加する Internet Traffic に対処するには、Network Node における Switching 処理がすべて電氣的に行われている従来の SDH や ATM 伝送技術だけではいずれ困難になるため、伝送容量を飛躍的に拡大し、その上で単位容量あたりの Cost を大きく削減出来る伝送技術が必要である。

これらの社会的要請にこたえて基幹網の高速広帯域通信技術として Photonic (Transport) Network が注目されている。Photonic Network は波長多重伝送技術と波長 Routing 技術を基礎技術として構成されており、多重する波長の高密度化により、既存の光 Fiber を用いて飛躍的に伝送容量・転送速度を拡大する可能性を秘めている。

一方、現状の加入者 Access 網においては、最近普及しつつある無線 Access では、Baseband・Carrier 電波変調処理によって送受信制御が行われている。Data Channel の高密度配置により高速広帯域化を試みたとしても、Carrier Band 変調動作の速度限界や通信処理 Node で Packet 処理、高密度 Data 送受信をスムーズに通過させることが出来ないため、End to End 通信全体の高速広帯域化が達成出来ていない。つまり無線 Access は、移動可能という利便性と引き替えに、せつかくの Broadband 網の Bottleneck となっているのが現状である。

従って、End to End 通信の全光化を達成し、Photonic Network を実現することが必要となる。しかし、光を無線通信に用いる場合、Network System 全体としては、Photonic Network という低位の Layer だけで通信が可能となるものではなく、上位 Layer Network や既存 Network System との相互 Link 接続技術の確立も必要となる。

そこで、次世代の基盤技術である「Photonic Network に関する光 Access 網高速広帯域通信技術」に着目した研究を行い、光 Fiber Backbone を基盤とする 21 世紀の Network の急拡大に伴って、爆発的に増加する Internet Traffic に柔軟に対処出来る無線 Access 技術を確立することにより、Cyber 社会において個人のみならず社会経済文化活動総体の活性化に資することを目的とする。

本研究では、LD を用いた高速光無線 Access システムに注目する。移動する相対端末を、通信 Link を切断することなく追尾・捕捉する機構を始め、従来は高速 Backbone に対し Bottleneck になっていた無線 Access 体系の伝送速度を改善させることにより、全体 Network の容量拡大や運用性向上を目指すこととする。

本章では、以上を前提とする研究を行うにあたり、現在市場に展開する無線 Access 方式の背景、特徴について述べる。

1-1.1 電波を媒体とした Carrier 伝送方式

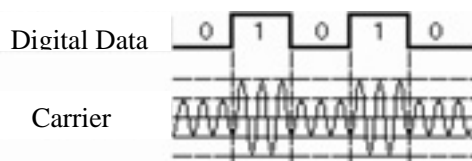
様々な無線通信システム群が市場に出回っているが、現在の Main Stream は、電波を媒体とした Carrier(搬送波)変調方式を使用する通信方式である。Carrier 伝送の変調方式には、基本的に 3 つの方式がある。これは、「振幅(Amplitude)」「周波数(Frequency)」「位相(Phase)」という、信号の 3 要素をそのまま利用したもので、これら搬送波の基本的な Parameter を変化させて、Analog 信号や Digital 信号の情報を乗せる。これらはそれぞれ振幅変調、周波数変調、位相変調(注 1)[3] と呼ばれる。

(注 1)

振幅変調 (AM ~ Amplitude Modulation)

Data の振幅に対し搬送波の振幅を変化させる変調方式。

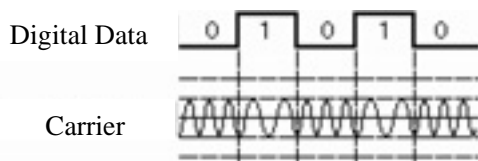
Digital Data の場合は ASK(Amplitude Shift Keying)という。



周波数変調 (FM ~ Frequency Modulation)

Data の振幅に対し搬送波の周波数を変化させる変調方式。

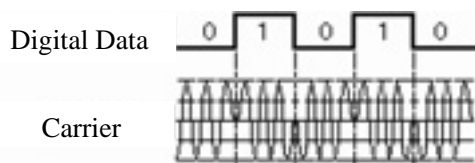
Digital Data の場合は FSK(Frequency Shift Keying)という。



位相変調 (PM ~ Phase Modulation)

Data の振幅に対し搬送波の位相を変化させる変調方式。

Digital Data の場合は PSK(Phase Shift Keying)という。



市場に出回る無線 LAN(Local Area Network)System には、IEEE(Institute of Electrical and Electronic Engineers ~ 米国電気電子技術者協会)標準勧告に定められる規格に則り、DS-SS 方式や OFDM 方式などの変調方式が用いられる。(表 1-1)にこれらの無線 LAN System の規格、特徴を挙げる。

表 1-1 IEEE802.11 勧告一覧

規格名称	媒体	波長/周波数	伝送速度	変調方式
IEEE802.11	赤外線	850nm ~ 950nm	最大 2Mbit/s	DS-SS
	電波	2.4GHz 帯		FH-SS
IEEE802.11a	電波	5GHz 帯	最大 54Mbit/s	OFDM
IEEE802.11b	電波	2.4GHz 帯	最大 11Mbit/s	DS-SS
IEEE802.11g	電波	2.4GHz 帯	最大 54Mbit/s	OFDM 他

IEEE802.11 とは、無線 LAN (WLAN ~ Wireless Local Area Network) の標準化を推進する、IEEE の委員会の名称、およびそこで標準化された規格である[4]。97 年に承認された IEEE802.11 では、赤外線を使用する方式と 2.4GHz 帯の電波を使用する方式が規定されている。伝送速度は最大 2Mbit/s である。

99 年に、IEEE802.11a と IEEE802.11b の 2 つの規格が承認された。IEEE802.11b は、従来の 2.4GHz 帯を使う DSSS 方式の無線 LAN に、最大 11Mbit/s の伝送 mode を追加した拡張規格で、現在無線 LAN に最も利用されている規格である。IEEE802.11b と互換性を持ち、高速化を図る IEEE802.11g の標準化も計画されているが、その展開の遅さより IEEE802.11a が次世代無線 LAN の標準となるだろう。IEEE802.11a の伝送速度は最大 54Mbit/s となっている。

このように、電波無線は 2.4GHz や 5GHz という高周波の Carrier を用いても、無線 LAN 用途に最も普及している IEEE802.11b の規格で 11Mbit/s、次期に展開するであろう追加仕様の IEEE802.11a においても 54Mbit/s という伝送速度となっている（しかも実効値はこれらの 1/3 程度にとどまる）。有線 LAN(IEEE802.3) では現在、100Mbit/s が主流であり、1000Mbit/s の伝送速度を持つ Gigabit Ethernet への移行も始まろうとしている現在では、決して満足できる速度ではない。さらに、5GHz 帯を利用した IEEE802.11a は、日本国内では気象 Radar に利用される帯域と重複するため、電波法の規定により空中線電力は 10mW 以下で屋内のみの使用に限定されているなど、電波、特に特定の周波数を利用する場合は、厳密に設定された法規定や混信を考慮しなくてはならない（表 1-2）。

表 1-2 日本国内で使用されている各種電波周波数帯[5]

無線通信機器	使用する周波数帯
Digital 携帯電話	800MHz
シティフォン	1.5GHz
PHS	1.9GHz
cdma2000/W-CDMA	2GHz
無線 LAN (IEEE 802.11b)	2.4GHz
Bluetooth	2.4GHz
電気通信業務用および公共業務用固定衛星、 特定小電力 Data 通信（屋内使用限定）	5.15G ~ 5.25GHz
無線 LAN (IEEE 802.11a)	5.2G/5.8GHz
地球探査衛星，気象レーダー	5.25G ~ 5.35GHz
高速道路の ETC	5.8GHz

そして、高負荷時や Burst 伝送時に伝送状態が不安定になる製品群を見ると、コンシューマ用途の域を脱しない無線通信システムであろう。また、IEEE802.11 に準拠していることを承認する団体 WECA が置かれているが、各ベンダーはユーザ取り囲みのため（相互接続確立の意志を持っていなかった）WECA 承認の製品だとしても、ベンダー相互接続の互換性を持たせないという泥沼の事態に陥っていた。WECA は、「我々の承認で保証されるのは単に Baseband での相互運用性に過ぎない」と認めていることからその惨状が理解できる[6]。

また、強力な電波を四散させる電波無線通信方式には、情報漏洩の可能性がある。そこで IEEE802.11 の Option として「ESS-ID」による認証方式や「WEP」(注2)という Data 暗号化技術が用意されているが、Security 強度を上げると、認証に用いる帯域が増加するため伝送速度が落ちるといった欠点を持っている。

(注2)

ESS-ID (Extended Service Set-Identifier)

ESS-ID 機能とは、無線 LAN 機器が通信する互いを識別する ID として Network 名(ESS-ID)を設定し、この Network 名(ESS-ID)が一致しないと通信が出来ない。しかし、「any」という ID key を用いることで、不特定(現在最も電波受信状態の良い Network)の無線 Network に接続することが可能なため、Security 技術とは言い難い。

Access 制限型

WEP (Wired Equivalent Privacy)

無線通信における暗号化技術。無線通信は傍受が極めて容易であるため、送信される Packet を暗号化して傍受者に内容を知られないようにすることで、有線通信と同様の安全性を持たせようとしている。40bit や 128bit の秘密鍵を利用して暗号化する方式があるが、WEP そのものに様々な脆弱性が発見・報告されており、暗号化技術としては既に低い信頼性しか持ち合わせていないと言われている。

盗聴防止型

1-1.2 光を媒体とした Sub-Carrier 伝送方式

次に赤外線 LED(Light Emitting Diode)などを使用した光による無線通信システム構成を述べる。光 Sub-Carrier 伝送方式とは、高周波変調された Data を副搬送波(Sub-Carrier)と見立て、更に主搬送波(Main Carrier)である光の周波数(数 100TeraHz)により変調された後に伝送する方式である。代表的な物として IrDA(The Infrared Data Association)、身近では TV など操作する Remote Controller で赤外線無線通信が行われている。(表 1-3)に IrDA の規格内容を示す。

表 1-3 IrDA 規格一覧[7]

物理 Layer version	通信 Ratio (Kbit/s)	Pulse 幅	変調方式	通信可能距離 (cm)
ver. 1.0	2.4 ~ 115.2	1.41 ~ 2.23us (115.2Kbit/s)	RZI	0 ~ 100
ver. 1.1 (ver1.0 に高速通信追加)	576 ~ 4000	115 ~ 135ns (Single Pulse)	RZI or 4 値 PPM	0 ~ 100
ver1.2 (ver1.1 に LowPowerMode 追加)	2.4 ~ 115.2	1.41 ~ 2.23us (115.2Kbit/s)	RZI	0 ~ 20(LowP) , 0 ~ 30(standard)
ver1.3 (ver1.2 に高速 LowPMode 追加)	576 ~ 4000	115 ~ 135ns (Single Pulse)	RZI or 4 値 PPM	同上

上記表に見られるように、IrDA の規格は伝送速度が最大 4Mbit/s (16Mbit/s Mode が策定中) と遅く、通信可能距離も非常に短い。しかし、前述したように送信器や受信 Module をコンパクトな形態に収めることが可能なため、携帯端末などに装備することで利用価値を得ている。

1-1.3 光を媒体とした Baseband 伝送方式

Data伝送する信号を変調せずに、そのまま電気（電圧）や光(強度)などの伝送媒体に乗せて伝送する方式、これをBaseband（基底帯域）伝送方式、または受信側も含めた方式名でIM-DD(Intensity Modulation-Direct Detection ~強度変調-直接検出)方式という。厳密にいうと、光を伝送媒体とする場合、光の周波数（数100TeraHz）がCarrier(搬送波)となるということである。この方式は、光搬送波の秘める広帯域性を用いた超高速伝送の可能性を有することが最大の利点である。

構成回路が簡潔に住むなどの利点はあるが、雑音に弱く歪みが発生しやすい。利用例を挙げると Ethernet 規格の 10BASE-F や 100BASE-T 等があるが、BASEとはBasebandの事であり、これにPacket衝突を検知するCSMA/CDなどの規定を盛り込みIEEE802.3としている[8]。この規格では、伝送経路にあたるケーブル外皮内で、絶縁処理されたSignal・Ground線2本を結び合わせ、Twist-Pair(注3)とすることにより、外部雑音の混入に対する耐性を高めている。

(注3)

Twist-Pair

一般的にLoop(回路の輪)の中を通る磁界が変化すると、誘導起電力によって雑音が生じるが、ねじっておくとLoopと磁界の方向関係が交互に変化し、1ひねりごとに誘導起電力の向きが逆になり互いに打ち消し合う。これによって雑音が軽減される。

LEDを使用した高速光無線通信システムでは、LEDの限界応答特性を考慮し、このBaseband方式が採られる場合が多い。信号源に多数の赤外LEDを使用した光ステーション（無指向性直射方式）と、光ステーション検知機能を持つ子機（狭指向性直射方式）のHybrid方式で構成され、世界で初めてPoint to Multipoint型を100Mbit/sの伝送速度で実現した屋外型高速光無線通信システム「VIPSLAN-100」（図1-1）を開発したVICTORもこの方式を採用している。この製品では、子機端末が移動した場合に自動的に光軸を調整しLinkを持続させようとする機能を持っているが、Link切断後に再び通信可能になるまで10秒近くを要する。そして、Beam指向性の低いLEDの場合、光軸合わせの被要求度は多少低くなるものの光軸が大きく拡散する（光Powerの減衰大）ため通信距離も長くは取れない。「VIPSLAN-100」の場合も、通信可能距離は5m以内となっている[9]。

上記のように、光を媒体とする無線伝送システムは「送受信器間を常に対向させる必要があり、なおかつその間を遮るものがあるとはならない」（送受信器間には見通し内通信路を確保せず、壁や天井面における反射を利用する非直射方式があるが、電力効率が非常に低い）という特徴がある。これは光軸合わせの必要があると共に、狭指向性直射方式を用いた場合には信号を四散することが無いため、物理的にも秘匿性が高いとも言える。



図 1-1 VIPSLAN-100 (光 Station(左)と子機(右))

1-2 現行の無線通信 Hardware System の課題

これまでに無線通信システムの伝送方式について述べてきたが、これらの利点と欠点をまとめると以下ようになる。

利点

電波を利用した無線通信

- ・ 端末の移動に柔軟
- ・ 豊富な製品群と know-how の蓄積

光を利用した無線通信

- ・ 超高速伝送が可能
- ・ 高い秘匿性(狭指向性光 Beam) & Network 毎の隔離
- ・ 法的規制が電波無線に比べ緩い

欠点

電波を利用した無線通信

- ・ 伝送速度が低速 (< 54Mbit/s)
- ・ 厳しい法的規制
- ・ 情報漏洩の可能性

光 (LED) を利用した光無線

- ・ 伝送速度の頭打ち (100Mbit/s)
- ・ 通信可能距離が短い
- ・ 自由空間での光軸合わせが要求される

以上、光 Fiber Backbone を基盤とする 21 世紀の Network の高速性に対処出来る無線 Access 方式となるには、現行の無線通信システムに存在する欠点を補い、利点を活かした無線通信システムであることが望ましい。

第 2 章

光無線通信システムの構成提案

2-1 次世代無線通信の要求事項

本研究では、End User 直近に展開する屋内型無線 Access 体系の伝送速度を改善させることにより、全体 Network の Bottleneck 解消、無線 Network の帯域拡大や運用性向上を図るべく、その通信 Access System の新しい方式を提案する。具体的に本研究を開始するにあたり、無線通信システムが内包する課題を記す。

- ・ 無線伝送形態として、高速・広帯域性を実現させる手段
- ・ 信号伝送媒体に上記を使用する場合の課題
- ・ 上記媒体を利用した現行の無線 Access System に足りない要素

本章では、以上の課題を分析し、課題を解決する無線通信システムの構成手段を提案する。

2-2 LD 収束光 Beam による高速 Data 通信

まず無線伝送媒体に課せられた事項の中で、高速・広帯域性を実現させる手段として、本研究では信号送信源に赤外 VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser ~ 面発光型半導体 Laser Diode)(図 2-1)を用いる方法を提案する[10]。光を媒体とした Baseband 伝送方式を用いた屋内型光無線通信システムには一般的に LED が用いられているが、LED の変調速度(応答速度)限界のために、無線伝送速度は最大 100Mbit/s となっている。GHz Class の変調速度を持つ LD(Laser Diode)を使用するにより、その広帯域性を活かした高速通信が期待できる。

そして、LED に比べ狭指向性を有する LD(特に VCSEL)では、光強度の拡散が抑えられるため長距離無線伝送が可能である(狭指向性直射方式 採用時)。それは同時に隣接する無線 Network に影響を及ぼしにくく、秘匿性が高いということにつながる。また、VCSEL の照射 Beam の断面形状は、通常の導波路型 LD (WG-LD : Wave Guide LD) と比較して真円に近く照射範囲あたりの光強度が均一に得られる(図 2-1)ため、自由空間通信用途に使用する場合は VCSEL が有効である。

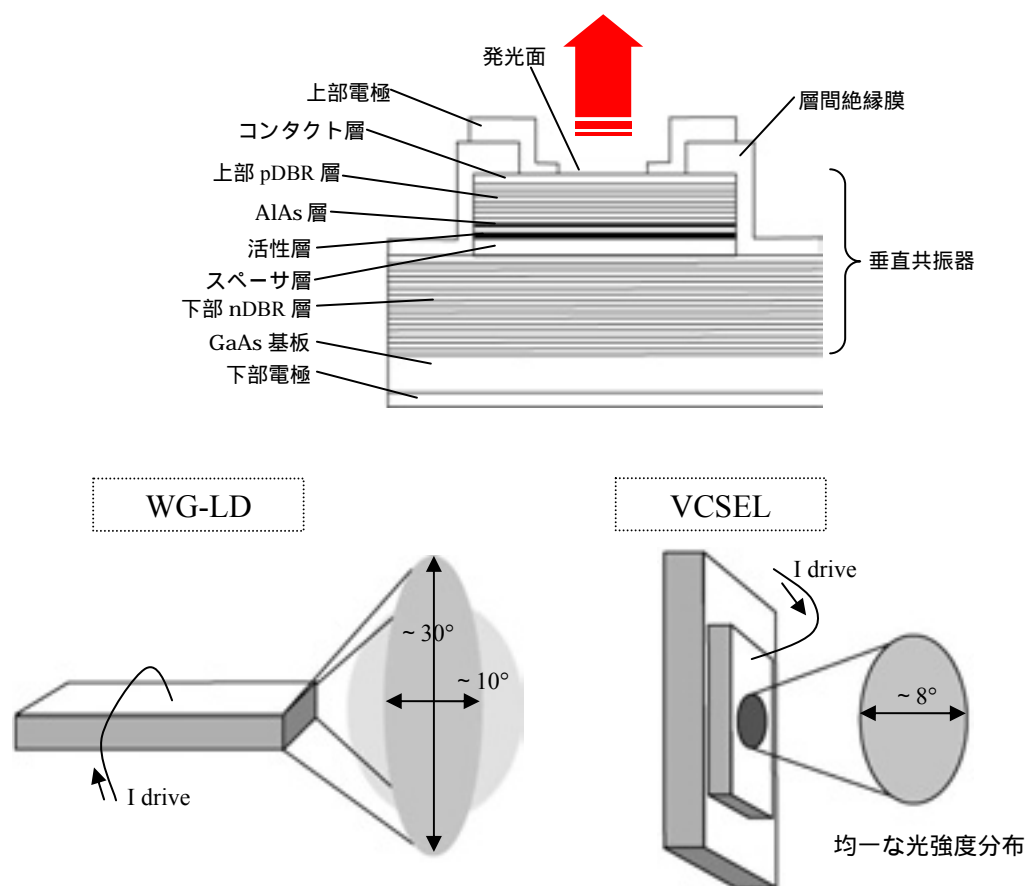


図 2-1 VCSEL の構造と照射 Beam 断面形状の比較

しかし、放出強度の高い Laser Diode を使用する場合には、それが人体に与える影響を算定した安全基準を考慮しなくてはならない。Laser 製品を正しく製造し使用するための基準 IEC(International Electro technical Commission ~ 国際電気標準会議)60825-1 Edition2 が定められている。また基準測定法を(図 2-2)に示す。

表 2-1 IEC60825-1 Editon2 (波長 850nm)[11]

Laser Class	出力 (mW)	開口部 Size (mm)	距離 (mm)	出力密度 (mW/cm ²)
Class 1	0.78	7	14	2.03
	0.78	50	2000	0.04
Class 1M	0.78	7	100	2.03
	500	7	14	1299.88
	500	50	2000	25.48
Class 3R	3.9	7	14	10.14

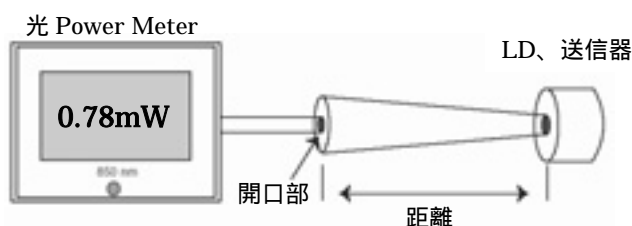


図 2-2 IEC Laser 安全基準測定法 (波長 850nm)

受信端末のみならず人間が生活する環境において Laser 機器を使用するためには、定められた安全基準に準拠させなければならない。本研究で用いる LD を用い、Laser 安全基準 Class1 とするためには上記表 4 に定められる数値内に収めなければならない。そのためには Beam 径を拡張した Collimation Beam とするか、拡がり角 0.6° の場合、82cm 以内に人間が覗き込めない機構を設定することで実現する。この制限要因の達成は、現実的システムサイズで十分達成可能と考えられる。尚、LD 出力が 2 倍に大きくなった場合、Collimation Beam 径、Beam 拡がり角、または制限領域距離を $\sqrt{2}$ 倍とすることで同様な基準を達成できる。

2-3 信号光 Beam 方向制御法

光無線 Access 系において、高速大容量化ならびに通信可能範囲の延長を図るためには、長距離にわたって高い受信信号光電力対背景光雑音電力比 (S/N 比) を確保すると共に、同一送信側から多経路を辿り位相ずれを起こした信号が重なって識別率を低下させる Multi Path の発生を抑える必要がある。このことより、本研究では、光強度の拡散が小さく長距離伝搬が可能な狭指向性直射方式を採用する(図 2-3)。

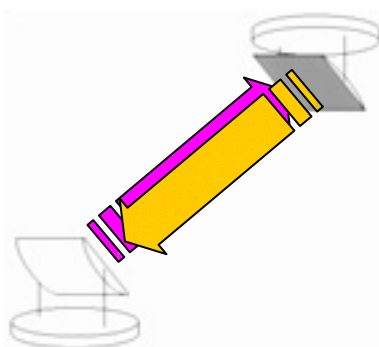


図 2-3 狭指向性直射方式

無線を利用する最大の利点である Access の柔軟性という観点から見ると、この狭指向性直射方式はそのままでは移動柔軟性に欠ける。相対端末の移動に対し光軸調整の要求される頻度が最も多い方式である。両端末間に Link の形成を保つためには、一方の端末から飛来する光 Beam のずれを検出し、おおまかな光軸方向修正を行う捕捉動作(Acquisition)、受光した光 Beam の方向と端末の軸方向との誤差を検出し、相対端末に対し光軸方向の修正を促す追尾動作(Tracking)の2つの機能を光無線端末に付与する必要がある。

しかし、現行の光無線通信システム製品には、信号系とは専用別系統で光軸補正動作を機能としてかろうじて盛り込まれているものが散見されるものの、Real-time 性に欠け、端末の移動時には数秒以上の Link 切断が容易に発生する。この移動に対する柔軟性の欠落が、光無線 Access 系統の一般化の足止めになっていると考察する。本提案では、相対端末の移動を、Real-time で捕捉・追尾し、Link が切断されるのを未然に防ぐ事に重点を置いた。以下に、相対端末の移動を Real-time に捕捉・追尾させる仕組み、動作一連以下を述べる。

2-3.1 複数個の PD による捕捉

受信部として上下左右 4 個の PD(Photo Diode)を発信部(LD)周囲に配置する。そこから得られる受信 Power の差異を端末の移動(光軸の移動)検出に利用した。光軸の移動を検出した場合、それを補正させる方向に Servo Actuator を動作させ光軸を修正する(図 2-4)。また、受信部を複数個用意することにより、端末の移動により 1 個の受信部が受信不可になった場合も、他受信部と中央の発信部によって継続した Link(通信)を維持したまま正しい位置への補正が可能となる。

また、光軸のずれを明確に PD に示し、正確な修正動作を行うために、上下左右の PD をそれぞれの範囲に隔離する障壁(Blocking Layer)を設置する。今回の検討では施工していないが、蛍光灯や太陽光などの外光をフィルタリングするだけでなく、機器そのものを保護するための硬質フードも実使用の場合には必要になるだろう。

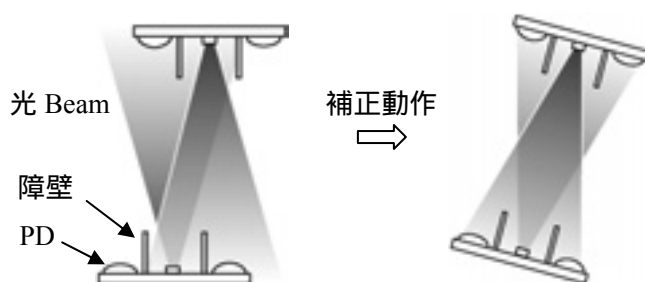


図 2-4 端末間の光軸移動時に行う捕捉

2-3.2 情報信号・制御信号重畳法

ここまで述べた光 Beam の方向、受信器の向きに関するずれ検出は、基本的に受信側の複数光受信器より得られる。信号強度の和、差、比の変動解析により、送受信端末間の位置関係を受信側は把握できるが、その結果を対向動作に直接反映出来るのは受信側のみである。ところが、信号品質の劣化が顕著になる原因は主として送信 Beam のずれにあることが多い。そこで受信時の状態検知を基に、何らかの制御信号を受信側から送信側に送って、Link 断となる前に良好な Beam 送信位置関係に復旧させる制御が必要となる。

このように、複数受信器と制御信号送信器を Client、Server 各端末が Beam 制御のためだけに保有し、別系統で超高速の光無線 Beam 系と受信系を双方向で保有することは端末の規模が大きくなり、せつかくの無線の手軽さが失われる。

そこで、本研究では伝送すべき Data 信号(高速変調された光信号)と、状態検知結果による機器制御信号(情報量が少ないため低速で良い)とを同一の光 Beam、同一の光受信器で相互にやりとりする送受信機構を提案し、端末光送受部の簡便化を目指す。

今、Digital 信号を制御する LSI の規模は、システムのサイズ占有率においては非常に小さく、一方、無線の場合は Analog 送受信高周波回路、光無線の場合は光送受信部の占有体積が多くを占めるため、この簡略化は機器のコンパクト化に大きく貢献する。

高速情報信号と制御信号を重畳する手法としては、情報信号を一旦 Buffer Memory に保存し、Data Rate を 1 Frame ごとに速度変換し、制御信号を Frame 前後に挿入する手法と、情報信号と制御信号が互いに干渉しない条件の下で、直接重畳・分離(ADD/DROP)する手法が考えられる。前者の手法は、高速になるほど多くの Buffer Memory が必要となり、しかも制御信号が情報信号に比べ、圧倒的に低速で Data 量も少ないにも関わらず、すべての信号を一旦 Cache、Store、読み出し分離する必要がある。また、情報 Bit rate の変化毎に Frame 化の変換の必要に迫られ、Protocol Free の対応は難しい。元来無線では FEC(Forward Error Correction)など雑音対策に同様の手法を Data Link 層で行っており、屋上屋を重ねる非効率さは避けられない[12]。

一方、後者の手法としては、互いの干渉が問題となるが、信号速度が圧倒的に異なるため、両信号は互いに雑音揺らぎとして認識され、S/N比は多少劣化するが、平均識別 Level を乱すことにはならない。これは Carrier 伝送方式において、高速 Carrier に載った信号が周波数分離により、原信号に十分再生可能であることと同じである。S/N比は Shannon (Claud Elwood Shannon : 1916 ~) の通信符号定理を用い、情報量と利用帯域から理論上の限界値を求めることが出来る。これを下式に示す[13]。

Shannon の通信路符号化定理によると、単位時間あたりの最大情報量を C [bit/s] は、伝送路の帯域幅を W [Hz]、平均信号電力 S (今回は高周波の Data 信号)、雑音電力 N (今回は低周波の制御信号)を用いて、

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) [\text{bit/s}]$$

で与えられる。

$$C = 100 \text{Mbit/s} = 1 \times 10^8$$

$$W = 100 \text{MHz} \times (\text{NRZ 符号における必要帯域 } 0.75 \text{ 倍}) = 75 \text{MHz} = 75 \times 10^6$$

$$100 = 75 \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

$$\frac{S}{N} = 2^{\frac{100}{75}} - 1 = 1.519\dots$$

S と N の比 1 : 0.65

dB 表示 $10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) = 1.8 \text{dB}$

よって、S/N比 1.8dB が、Shannon の通信路符号化定理により与えられる誤りなしに送信可能な伝送速度の理論上の限界(Shannon 限界)となる。これ以上の S/N比と帯域が得られれば、主信号 S (本案では Data 信号) に CDM (符号分割多重 : Code Division Multiplex) に代表される副次情報変動 N (本案では制御信号) を付与することが可能である。

2-3.3 高周波と低周波の ADD/DROP による光軸修正

上記 2-3.1 による動作は、相互端末は自発的な「捕捉」動作のみにとどまり、相対端末から届く光 Beam と端末の軸方向に誤差が生じた場合に修正することは不可能である。そこで別途、一方の端末に対し精密な光軸方向修正(追尾)を促す必要がある。下(図 2-5)に上方端末の光 Beam を、正常受信状態である下方端末が上方端末に対しその旨を含めた応答を返しているが、上方端末は下方端末からの光 Beam の誤差を検知しているため、修正を促すよう上方端末から下方端末に伝達し、下方端末が光軸修正する様子を示す。

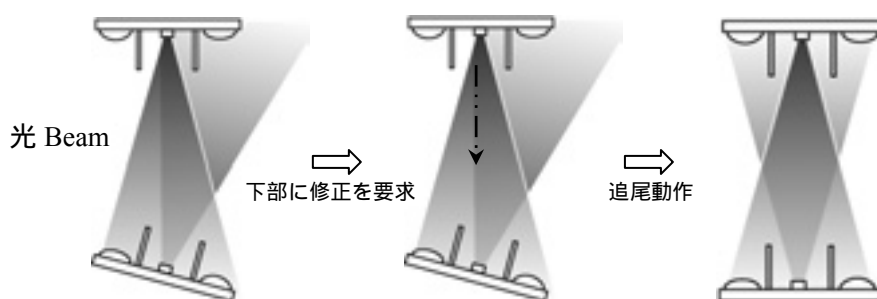


図 2-5 受光 Beam と端末の軸方向の誤差修正

今回の検討では、伝送すべき Data(高周波)に、追尾動作を命令する信号(低周波)を ADD し、送信器である LD から光 Pulse として相対端末に送出した。その光 Pulse を受信した端末では、Data 信号(高周波)から機器制御信号(低周波)を DROP する作業が行われる(図 2-6)。Data 信号は Ethernet Controller などへ向かい、DROP された機器制御信号は光軸修正 Servo Actuator 動作を司る Microcomputer に入力される。

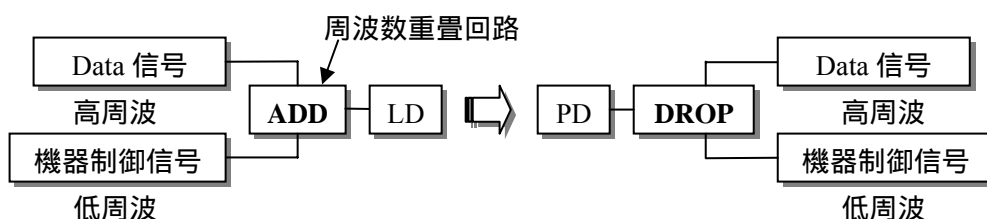


図 2-6 高周波と低周波の ADD/DROP

もちろん、Carrier 伝送方式で明らかのように、Data 信号の Clock 周波数や位相の僅かでゆっくりした変調(FM、PM)により制御信号を重疊することも有効で、この方式はより LSI 化が容易でコンパクト化の可能性は高い。

第3章 伝送媒体の検証

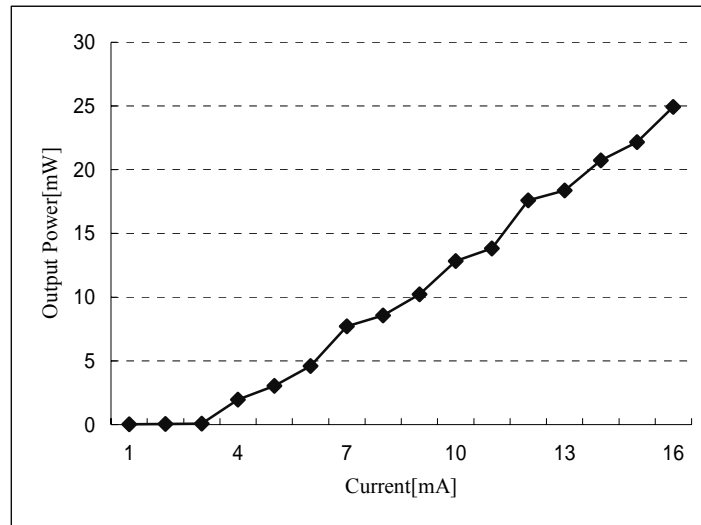
3-1 光無線通信可能距離

まずは、送受信器間に指向直射方式を採用するにあたり、受信端末の移動を考慮せず送受信器が相互に対向したシステム構成下において、距離毎の受信光子数に起因する信号出力電圧、つまり最大無線通信距離を計測する。

VCSEL から APD 間に光 Attenuator を敷設し、光 Power を減衰させることにより擬似的に LD から APD 間の距離を再現させる。光電変換した受信信号の Eye Pattern 波形を統計的に解析することにより、予想される bit 誤り率を計算する。拡がりを持つ Beam では、距離の 2 乗に反比例して信号強度が低下する。実験室では長距離での計測は困難なため、光 Attenuator によって信号光 Power を減衰させ、擬似的に VCSEL ~ APD 間の距離を再現した。その結果より当システムにおいて、どの程度の距離まで無線通信が可能かを導く。

また、この光 Attenuator による疑似空間距離を再現する測定法が、実際の空間通信と等価となるかは、本論文著者の学部卒業研究にて検証、確認済みである [14]。また、「近赤外 VCSEL と Si-APD を用いた高感度光無線 LAN システムの検討」という題目内で上記検討方法を用い、2001 年電子情報通信学会四国支部秋期大会にて報告した。

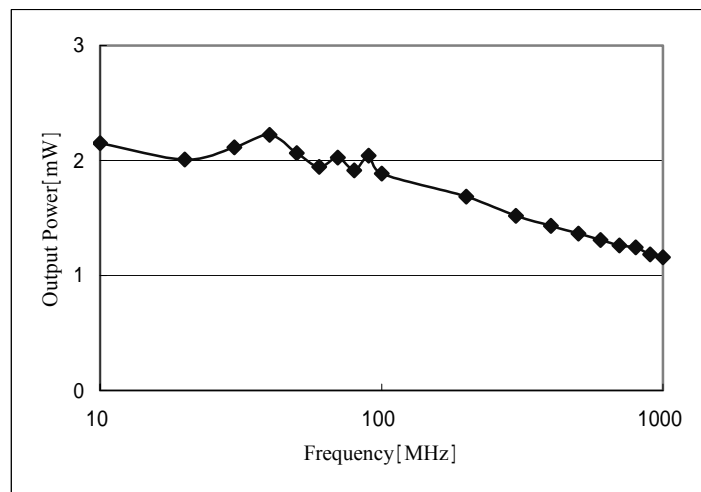
第3章 伝送媒体の検証



VCSEL 「MITEL VCSEL 1A440」

(波長 0.85 μ m 室温 25 $^{\circ}$ C)

図 3-1 I-L 特性



(DC-Current 7mA RF-Power +10dBm)

図 3-2 周波数応答特性

3-1.1 最大無線通信距離の確認実験

実験構成を示す。駆動電圧 1.5V で動作可能な 0.85 μ m 波長帯 VCSEL を光源とし、100Mbit/s の疑似 Random Pattern (2^{15} -1 PRBS) を Baseband 方式で変調させる。拡がりのある Beam の一部を受信側 Lens によって集光し、Si-APD 受信器で受信した。そして、前述したように光電変換した信号の Eye Pattern 波形を統計的に解析することにより、予想される bit 誤り率を計算し、そこから最大無線通信距離を算出する。

また、第 2 章に記述した IEC Laser 安全基準には、VCSEL 前方の Lens によって Beam 拡がり角を 0.6° とすることによって、最も安全な Laser 安全基準である Class1 が達成されることが確認出来た。

下に、以上をふまえた実験構成図と測定条件を示す。

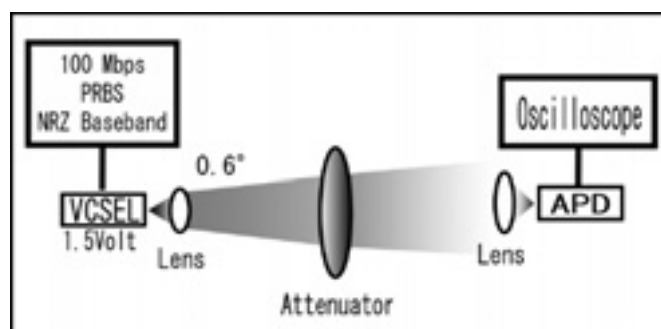


図 3-3 実験構成

表 3-1 測定条件

通信 Topology	Point to Point
通信速度	100Mbit/s
(帯域)	(送 2GHz ~ 100kHz) (受 100MHz ~ 4kHz)
変調方式	Unipolar 0.56Vp-p NRZ Baseband
Test Pattern	PRBS 2^{15} -1
Beam Spec	MITEL VCSEL 1A440 (VCSEL)
	0.85 μ m $\theta \sim 0.6^\circ$ 0.33mW/cm ² @距離 1m
受信 Module	HAMAMATSU C5331-03
駆動電源	1.5V (送 VCSEL) 5V (受 APD)
Error 計測方式	PRBS Eye Pattern の Mark, Space 分布による統計評価

第 3 章 伝送媒体の検証

出力結果として、Baseband の強度直接変調を行った LD 光出力信号の APD と Oscilloscope で計測された波形と、その信号 Level の分布状態を表す Histogram を示す。Histogram とは個々の Data を信号と全体の領域から定量する方法で、これから示す Histogram は任意時間内(今回は 10ns)における、Mark、Space 信号の「時間分布」を表したものである。

また、本実験の Data は受信器の増幅器が反転増幅であるため、波形表示の上部が信号の Space (0)、下部が Mark (1) となっている。

第3章 伝送媒体の検証

まずは、受信 Power 密度を 1/400 にし、無線通信距離を 20m とした場合の Oscilloscope に出力された Eye Pattern (図 3-4) と、その信号 Level の分布状態を表した Histogram (図 3-5) を示す。Mark と Space を識別するのに十分な信号精度を保っており、Error Free 無線通信が可能である。

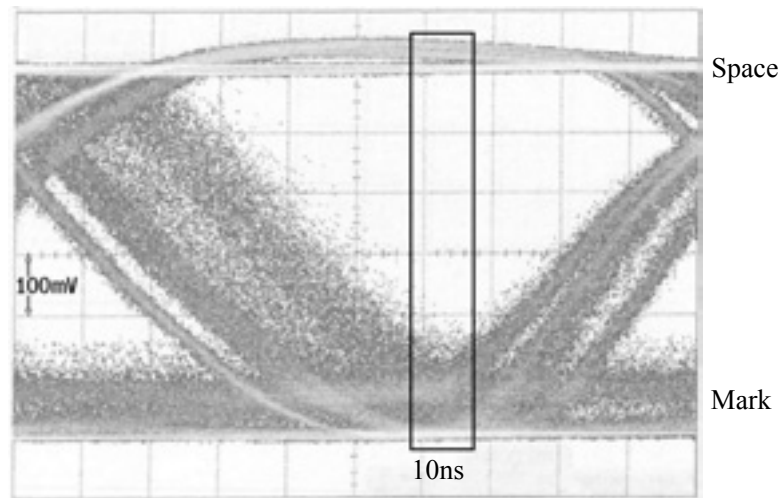


図 3-4 出力波形

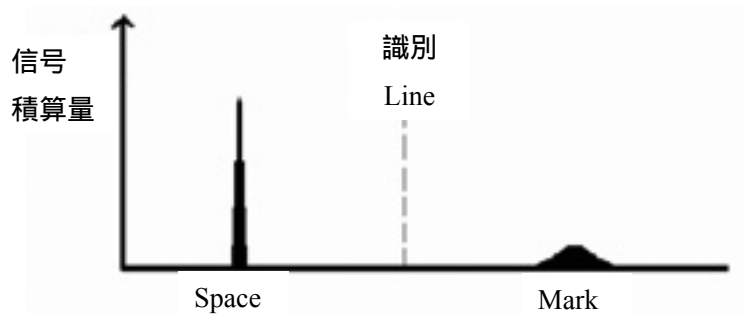


図 3-5 Histogram

続いて、無線通信距離を 350m とした場合を示す。波形が激しく劣化し（図 3-6） Histogram（図 3-7）からも Mark と Space が判別 Line をまたぎ、bit 誤りを多発していることが分かる。誤り率は、Histogram より Gauss 分布を仮定して、その拡がり分布を統計的に解析することによって、bit 誤り率を算出する。

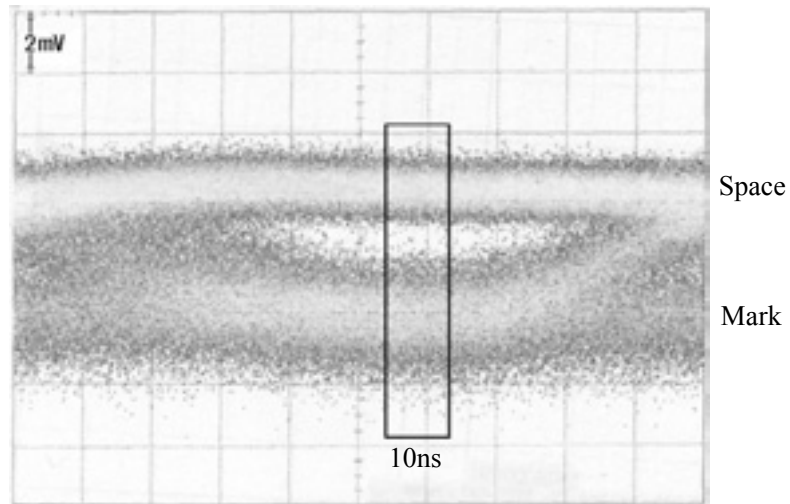


図 3-6 出力波形

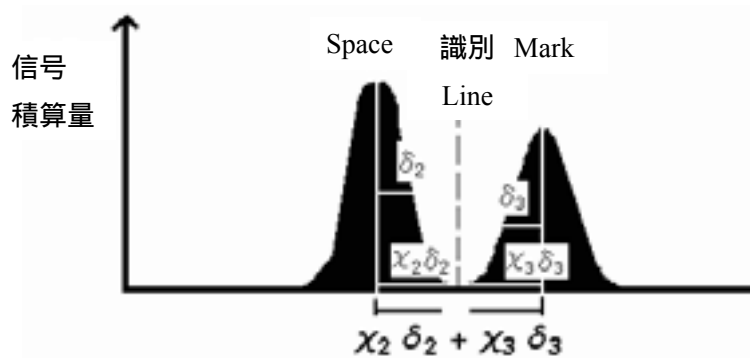


図 3-7 Histogram

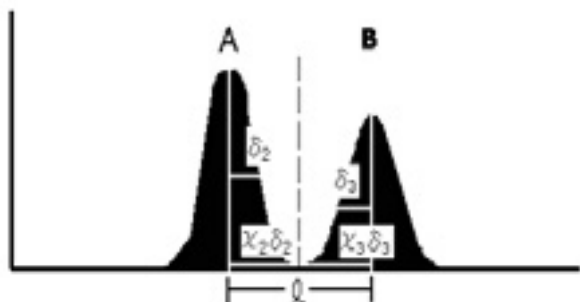
上記 Histogram より Error Rate を求める。

Pseudo Random Bit Sequence (PRBS:擬似 Random) Pattern の特性により、

1 (Mark) : 0 (Space) = 確率は 1 : 1

Mark 分布 = 0.5 (50%)

Space 分布 = 0.5 (50%)



$$A = 0.5 / \left(\int_{-\infty}^0 e^{-\frac{x^2}{2\delta_2^2}} dx + \int_0^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\delta_2^2}} dx \right) \quad B = 0.5 / \left(\int_{-\infty}^0 e^{-\frac{x^2}{2\delta_3^2}} dx + \int_0^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\delta_3^2}} dx \right)$$

Error 分岐点と、中心点との距離の σ_k に対する比を χ_k とするとき、

$$l = \chi_2 \delta_2 + \chi_3 \delta_3$$

$$A e^{-\frac{(\chi_2 \delta_2)^2}{2\delta_2^2}} = B e^{-\frac{(\chi_3 \delta_3)^2}{2\delta_3^2}}$$

以上より χ_2 、 χ_3 を求める。

χ_2 、 χ_3 を以下の式に当てはめる。

Mark、Space 領域において Error の起こる確率は、

$$\text{Mark} \left(A \int_{\chi_2 \delta_2}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\delta_2^2}} dx \right) / 0.5$$

$$\text{Space} \left(B \int_{-\infty}^{-\chi_3 \delta_3} e^{-\frac{x^2}{2\delta_3^2}} dx \right) / 0.5$$

両式を足しあわすと、Histogram より導きだされる Error Rate が求められる[15]。

以上より導き出された bit 誤り率と無線通信距離の関係を表した図を示す。無線通信における Error Free Rate は一般的に「 1×10^{-6} 」とされるが、この誤り率を達成する無線通信距離は 250m 以内ということが分かった。その場合の受信光 Power は 21pW であった。また、明光条件下でも同様に良好な信号品質が得られた。図内に示す 1° Line とは、Beam 拡がり角を 1° に設定した場合の、距離と誤り率の相互関係予測を表している。250m もの長距離通信が必要ない場合や、光軸制御要求頻度を低下させたい場合などに必要に応じて設定することで、設置環境への柔軟な対応が可能となる。

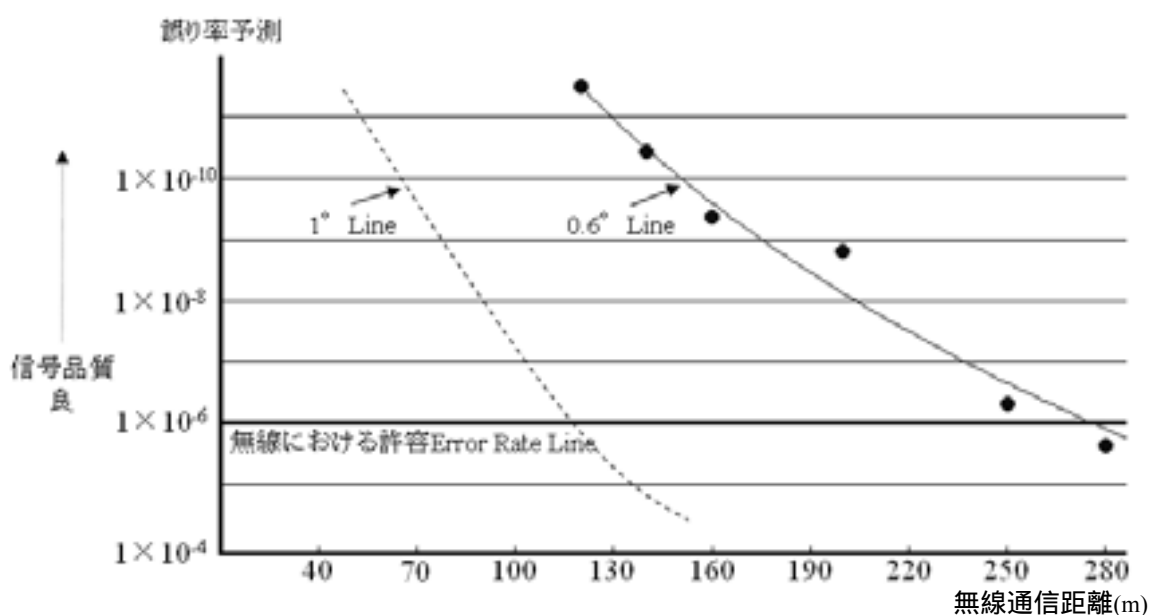


図 3-4 距離と誤り率の関係

実際のシステム環境では、光信号の駆動系や受信信号の識別増幅の過程で雑音が発生し、安定して 250m の無線通信が可能な信号精度が得られるとは限らない。しかし、今回の測定結果においては、250m という長距離でも低消費電力で、且つ、高速 Data 通信が VCSEL と Si-APD を用いた空間光無線で期待出来ることが確認された。

また今回は、実験系受信器側の都合により伝送速度を 100Mbit/s で行ったが、高速な応答性を持つ LD を伝送媒体に用いた本案では Gbit/s Class の Data 通信速度を目標とする。本案で用いた VCSEL は 2GHz(-3dB)までの変調が可能であり、多少出力光パワーの低下による無線通信可能距離の低下は見られるだろうが、短距離中距離の空間通信が可能な伝送媒体であることは間違いがない。

3-2 Beam の Spot Dancing

空間光通信では、大気中の気体分子や粉塵粒子による光の散乱（注4）や吸収によって光強度が低下するほか、気温の変化によって大気の屈折率分布が変わり、光 Beam の進行方向と光強度分布が変動する[16]。この大気の屈折率分布の変化が光 Beam の進行方向を変化させる現象を Spot Dancing（または Beam Vending）と呼ぶ。図 3-9 に Spot Dancing の概念図を示す。

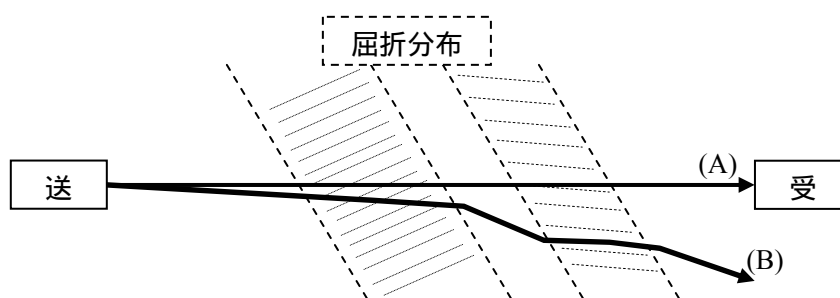


図 3-9 Spot Dancing

大気の屈折率分布の変化により、光 Beam の進行方向が(A)であったものが、ある瞬間は(B)のように変化する。伝送距離が数 km の場合、Beam 到達位置の変動は数 m にも及ぶことがあり、光 Beam 径が小さいと受信器と Beam の位置関係が、Beam 径以上にずれる状態が間欠的に発生し、安定した受信が不可能となる場合がある[17]。

(注 4)

Rayleigh 散乱 (Rayleigh scattering)

粒子の大きさが波長の約 1/10 の場合に発生する波長変化を伴わない光の散乱で、散乱の大きさは波長の 4 乗に反比例するため、伝搬する光の波長が長い（近赤外含む）ほど影響は小さくなる。

Mie 散乱 (Mie scattering)

波長と同程度から無視できない大きさの粒子中を、光が通過する場合に発生し進行方向が変化する。Rayleigh 散乱と共に光の波長と Energy は変化しない。低空では Mie 散乱が支配的である。

独立行政法人 通信総合研究所(<http://www.crl.go.jp/>)にて、「高速 Camera による Spot Dancing の周波数 Spectrum 測定」[18]方法の検証に参加した。その過程にて屋内外、中長距離における Pin Point に焦点を絞った空間光 Beam の Spot Dancing 現象を観察する機会があった。その時の環境条件と揺れ動く光 Beam 到達地点を撮影した画像を（図 3-10）に示す。

表 3-2 計測環境条件 (2002 年 3 月 22 日 CRL Tower 周辺)

距離	約 1km	
標高	射出地点	5m
	到達地点	25m
天気	曇天	花粉 多
風	射出地点	無風
	到達地点	強風

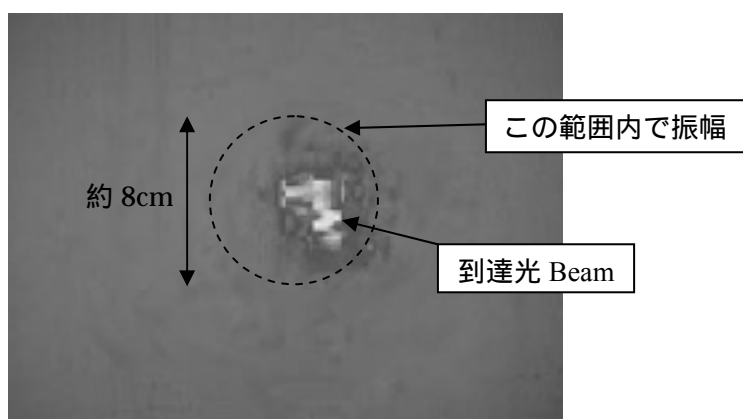


図 3-10 Spot Dancing

空間光伝送には悪条件と推測される環境条件(表 3-2)の中、空間伝達距離 1km にて約 8cm 振幅の Spot Dancing が観察された。光通信機器では、送信器の光射出方向調整を容易にすると共に、光 Beam の到達位置の変動に対するマージンを確保することで対策が可能である。そのため、受信器に到達する光 Beam の径は、受信面の径よりも通常大きく設定されている。

上記実験では、Beam 拡がり角 0.6° にて 250m の空間伝送が可能と確認されたが、上記観測結果より単純に考えると、250m 先の光 Beam 到達地点では約 2cm 振幅の Spot Dancing が起こると推測される。3-1.1 で検討した通信距離評価実験では、 0.6° の拡がり角を持つ光 Beam を、250m 先まで送信することを想定している。この際、到達地点での伝送 Beam 径は直径約 2.5m になり 2cm 振幅の Spot Dancing は無視出来る。このことより、本案における光伝送システムでは Spot Dancing による影響はほぼ無いと確認された。

また、光 Beam 内で大気の屈折率分布が変化すると、図 3-11 に示すように到達した光 Beam 内の光強度分布が不均一になり、時間的に変動する。この現象を Scintillation と呼ぶ[19]。Scintillation によって受光強度が変動する。

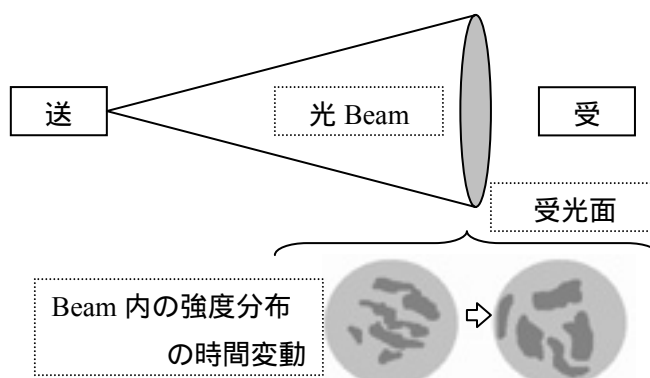


図 3-11 Scintillation

Scintillation 現象には、Lens による集光や、信号の変調によって対策がなされる。また、Digital 信号を空間光伝送する場合、Spot Dancing は Random 誤りを増加させ、Scintillation による光強度の変動は Burst 誤りを誘発させる。Scintillation に対する影響、対策については未検討である。

第 4 章

システム設計と周辺回路作製

4-1 提案する光無線システムの全体構成

第 2 章では、Real-time 追尾機能を有する光無線通信システムを構築する構成法を提案し、第 3 章では伝送媒体に採用した VCSEL が高速性・無線通信距離共に光無線通信用途に十分利用出来ることを確認した。ここでは、構成法の有効性を確認するために必要な System Module 構成を検討する。

- 本研究が目的とする光無線通信システムの Module 構成は、
- VCSEL を光源に持つ Gbit/s Class の情報伝送が可能な光送信部
- 受信部として複数(4 つ)の PD の複合回路で構成する
- 複数の PD からの信号の和算・差分による受光状態の検知
- PD の受光状態より光軸調整を司る Controller
- 追尾動作のための低周波信号の発生と要約
- Microcomputer より命令を受け光軸制御する Servo Actuator 部
- 高周波信号と低周波信号を ADD/DROP させる Bias-Tee 回路
- Ethernet Interface

以上が挙げられる(図 4-1)。理論確認、測定はこれらを機能別に分割し行った。

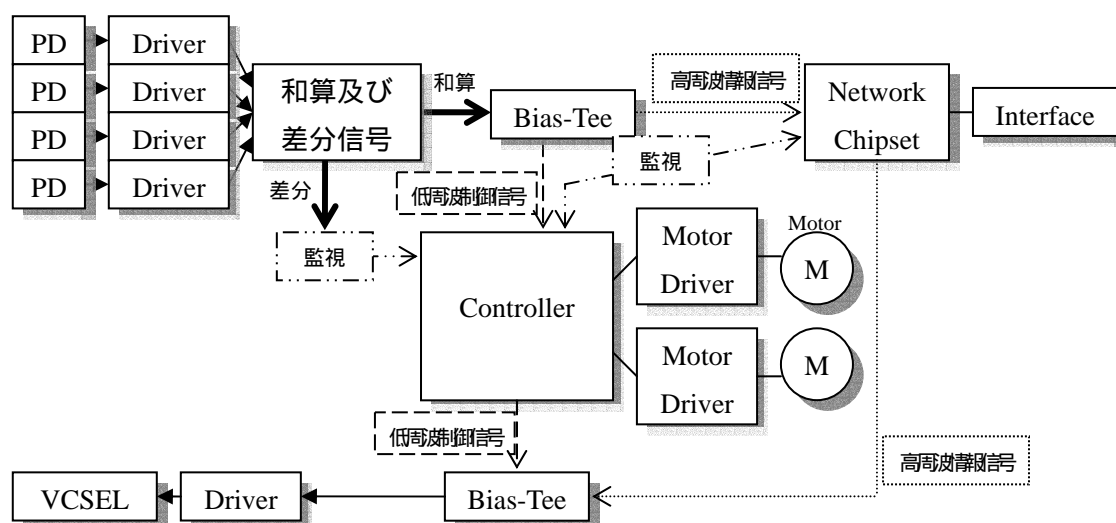


図 4-1 想定する光無線システムの全体構成

4-2 低周波信号重畳の意義

光通信で送受信する Digital Data の変調速度は Gbit/s Class であることに対して、Beam を機械的に制御するために必要となる命令信号速度は数 kbit/s 以下で十分である。2 種の信号は全く異なる周波数帯域を有するため、1 つの光源、受信系列に合波しても互いの干渉は非常に小さくなる。そこで、本研究では第 2 章で高速情報信号と制御信号を共通の光 Beam で送信・制御する方式を提案した。ここでは異なる信号を合成する手段として最も簡単な例である LCR 回路による低周波信号と高周波信号の強度振幅合成を例に取り、合波、分離の有効性を確認する実験を行ったので報告する。

4-2.1 Data 送受信体系

本案では、低周波信号は動作制御信号として Beam 光軸を調整する場合などの時のみに出力され、高周波信号と合波され光 Pulse となる。低周波信号が出力されていない場合は、高周波信号のみが光 Pulse として出力される。VCSEL の駆動には、低周波信号側の回路から Bias 電流を供給する。つまり機器制御の必要が無い時にも、低周波信号側の回路から Bias 電流が常時供給されている。

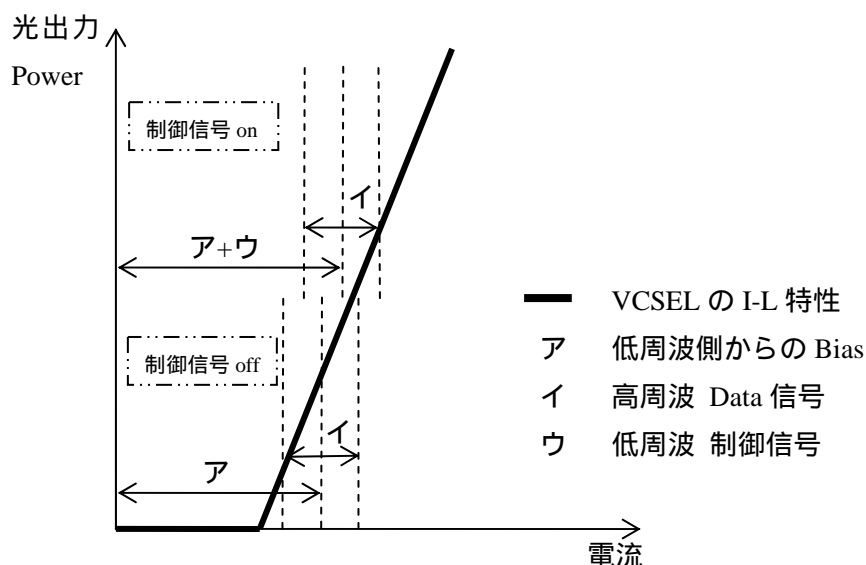


図 4-2 I-L 特性と駆動電流の関係

上記図 4-2 で説明すると、アは低周波信号側の回路から VCSEL に対し常時供給されており、VCSEL の Bias 値となる。そこに Ethernet の Data など高周波信号イが加えられ VCSEL が駆動する。これが定常状態である。そして、光軸調整などの機器制御の必要がある場合には、低周波信号側の Microcomputer より信号が発生され、それがウとして重畳される。

予備実験にて、今回使用する VCSEL を運用するためのア、イ、ウの最適値を求めた。その結果、Bias 値であるアの値は 1.48V、Ethernet 等の Data を想定した高周波信号の電圧振幅イの値は 720mVp-p ($\pm 360\text{mV}$)、そして機器制御信号ウは十分な信号電力差を得つつ、情報信号に悪影響のない振幅として 200mV と設定した(表 4-1)。

表 4-1 VCSEL 駆動最適電圧値

ア	1.48V
イ	720mVp-p (-360mV - 360mV)
ウ	200mV

以上の条件をふまえ制御信号の on/off それぞれの場合の、Data の流れと光 Pulse の状態を次頁(図 4-3)に示す。そして受信後、再度高周波信号と低周波信号に DROP すると、目的の Data を抜き出すことが出来る。

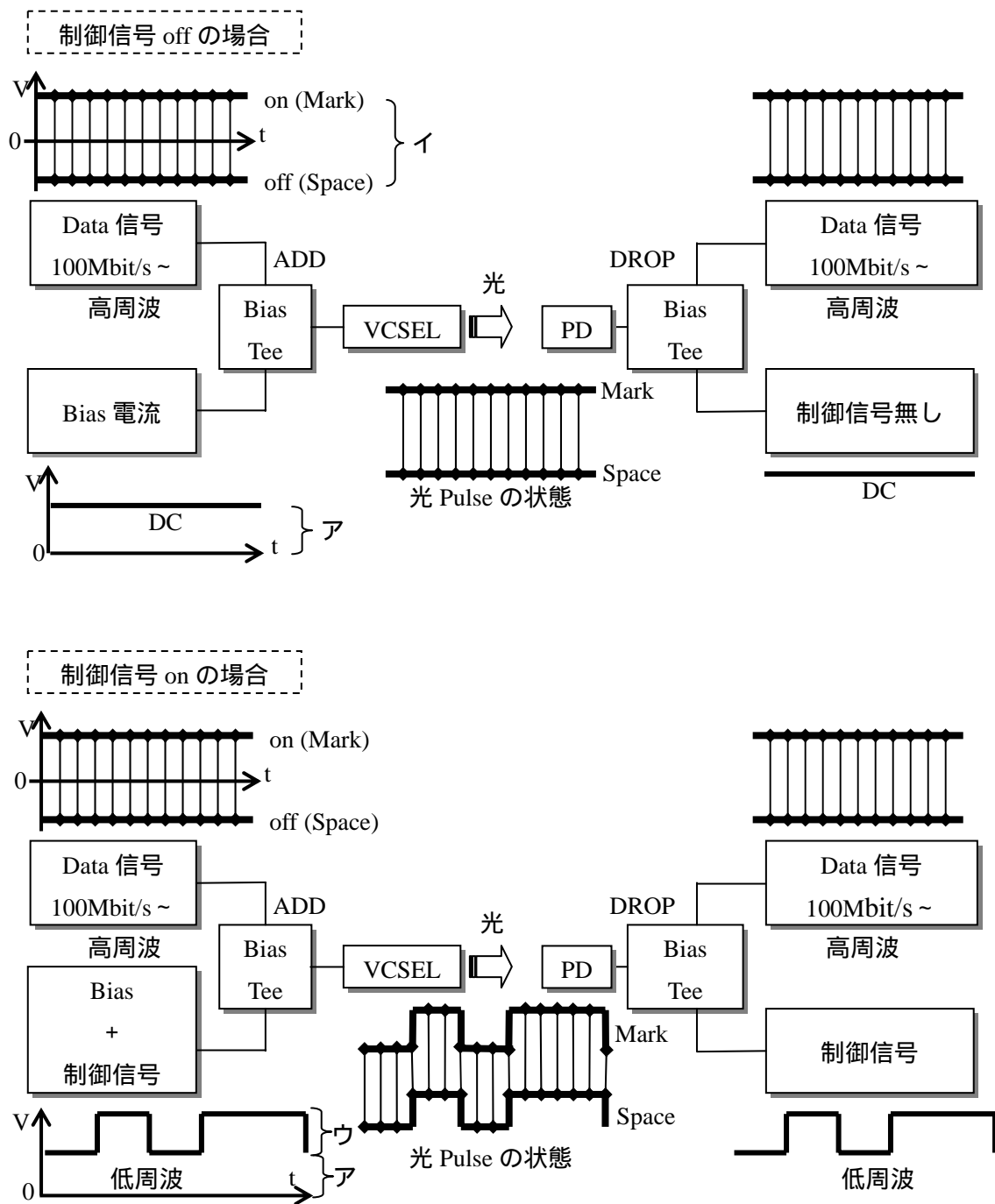


図 4-3 制御信号 on/off 時の Pulse

送受信系位置制御のための低周波制御信号は、PIC Microcomputer によって発生させた。今回は、米 Microchip Technology 社が開発した PIC(Peripheral Interface Controller)Microcomputer のミドルレンジシリーズ「PIC 16F84A」(図 4-4)(表 4-2)を使用した[20]。8bit Microcomputer の一種であり、Assembler や C 言語によって命令をプログラムすることが可能である。Memory 容量や命令数に制限はあるが、最小限の部品で構成出来、後はプログラムで動作させることが可能なため汎用性に富む。



図 4-4 PIC 16F84A

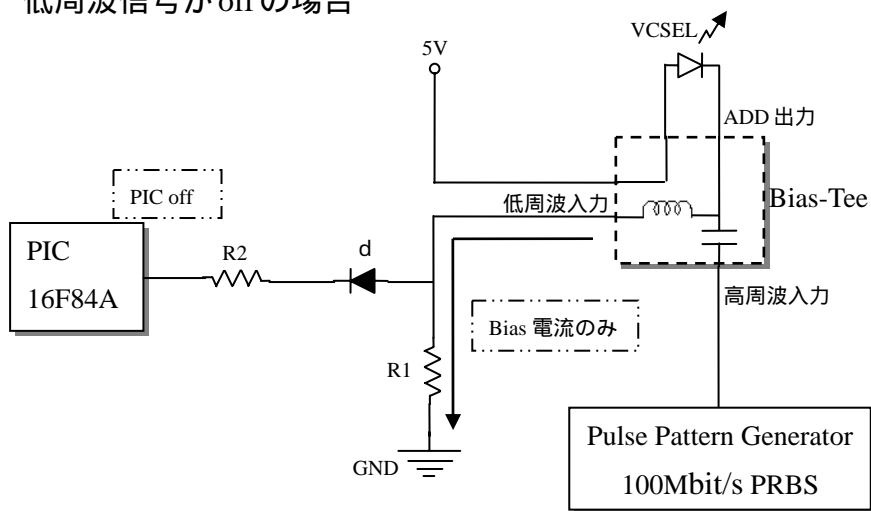
表 4-2 PIC 16F84A 基本 Specification

Program Memory	Data Memory	Flash Data Memory	入出力 Pin 数	Timer	動作電圧	最大動作周波数	命令数
1K word	68 byte	64 byte	13	1+WDT	2.5-5.5 V	20MHz	35

この PIC Microcomputer 「PIC 16F84A」は、0V または 5V の出力のみ可能なため、Bias 電流を出力し、使用する LD の I-L 特性に応じて Bias 値に重畳するのに妥当な制御電圧振幅(信号)を発生させる必要がある。このことを踏まえて電気回路を設計した。また、PIC Microcomputer は精度が求められる出力を行う場合には通常、電圧振幅揺らぎの雑音の影響を考慮し各出力 Port を off 時は 5V、on 時に 0V となるようにプログラム、回路設計をする[21]。また、複眼による捕捉動作制御にも 16F84A を用いた。

Ethernet 等の Data を想定した高周波信号に、PIC から発生される低周波信号が Bias-Tee によって ADD され、VCSEL を駆動させる回路を設計する(図 4-5)。ここで注意する事は、以下の回路では Bias-Tee 以降における GND は 5V となる。Bias-Tee の出力 Port に VCSEL を接続するが、5V を GND とし、それに対し、4-2.1 にて求めた Bias 値の負電圧(-1.45V)と低周波信号の on 時の電圧(-200mV)、そして高周波信号が on 時に 720mVp-p が供給されることになる。つまり、VCSEL の Anode/Cathode を通常とは逆に Bias-Tee に接続することで、Bias 値 1.45V、高周波信号 720mVp-p、低周波信号 200mV という電圧値にて VCSEL を駆動させる事が可能となる。また、各電圧要素を調整する場合には、Bias 値は R1 で決定され、R2 は低周波信号の on/off 比にて行う。

低周波信号が off の場合



低周波信号が on の場合

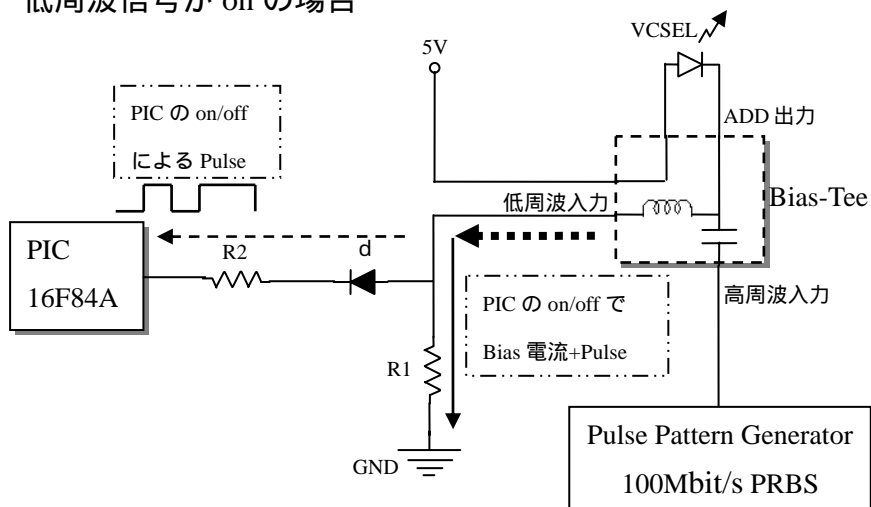


図 4-5 高低周波の ADD と VCSEL 接続

4-2.2 Pulse 合成の確認

上記図 4-5 の構成から、VCSEL への駆動信号 Pattern の妥当性を確認するために Oscilloscope に合波信号入力し、高周波信号に Trigger した場合と、低周波信号に Trigger した場合の出力 Pulse を観察した (図 4-6)。高周波信号として 100Mbit/s (PRBS 2^7-1 、-360mV - 360mV) の信号を Bias-Tee の高周波入力側に、低周波入力側には PIC により生成された 1-0 の繰り返し Pulse (1bit600 μ s、1.66kHz、0 - 200mV) を入力した。また、高周波、低周波信号を ADD する Bias-Tee には「Picosecond Pulse Labs 5550B」を使用した。[22]

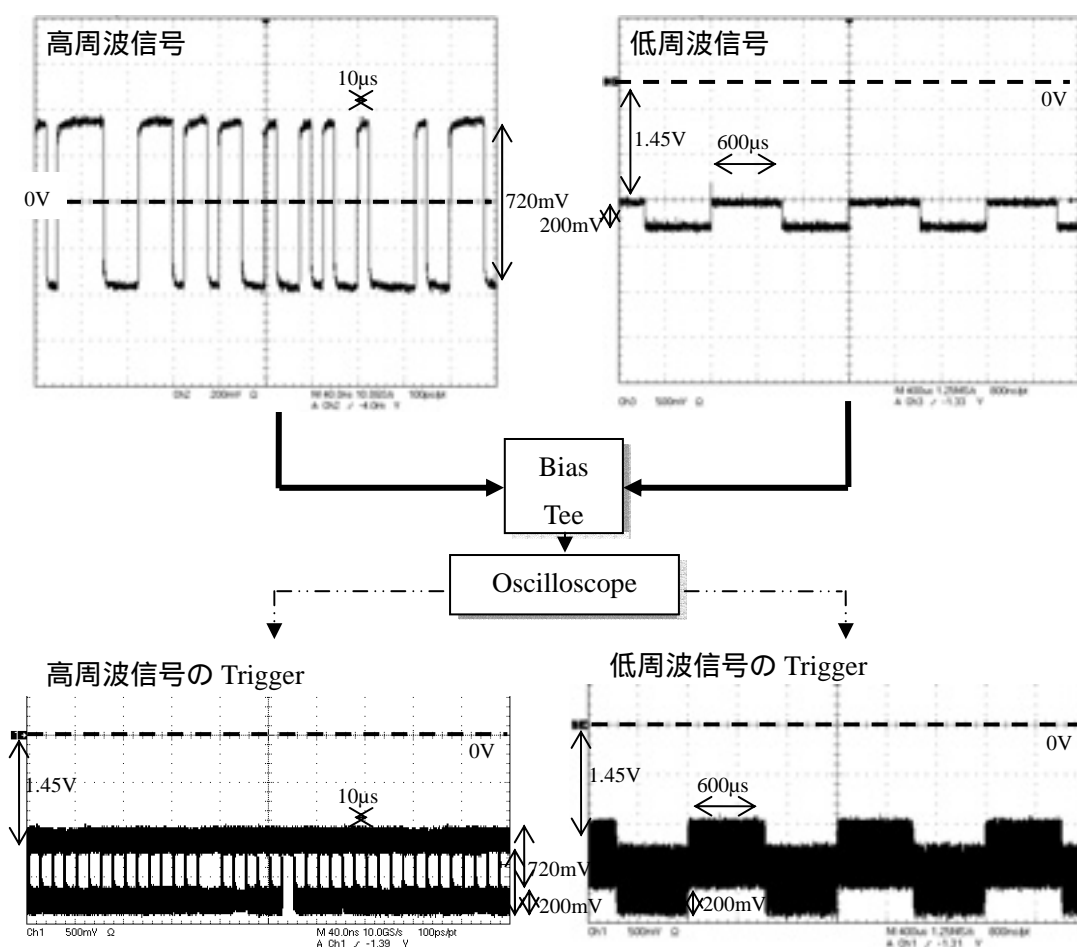


図 4-6 出力 Pulse 確認

上記のように、各 Source から出力された Pulse が、Bias-Tee 通過後に劣化や減衰もなく出力されることが確認出来た。これは、光無線通信実験を行う場合には VCSEL を出力先とするが、出力補正、つまり供給電圧補正の必要がないということである。

4-3 Beam Control 制御部

第 2 章にて、複数個の PD による Beam 捕捉動作と、低周波信号の ADD/DROP によって信号光軸修正を促す追尾動作の概念を説明した。ここでは、上記動作を実現する PIC Microcomputer プログラミングとそれに伴う電気回路を提示する。

4-3.1 複眼から得る光強度による Servo Actuator 制御

受信部として上下左右 4 個の PD を配置し、そこから得られる受光 Power の差異を端末の移動(光軸のずれ)検出に利用する。光軸のずれなどにより PD の一つに十分な受光 Power が得られなくなった場合、それを PIC Microcomputer が一つの Switch が off になったと判断し、ずれを補正させる方向に Servo Actuator を動作させるべく Motor Driver に対して命令を出力する。

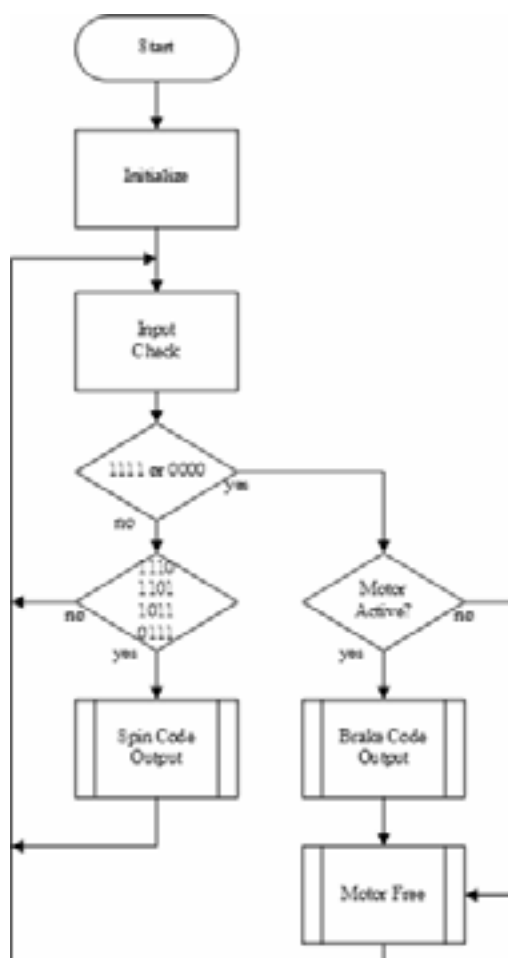


図 4-7 受光判定、Servo Actuator 動作 Program Flow

受光状態を監視、判定し、状態に応じた動作を Motor Driver に対し命令を出力する Microcomputer の動作を司る Program Flow を図 4-7 に示す。初期化を終えると受光状態の監視に入る。Switch の off(任意 PD の受光 Power が閾値を下回る)を検知(1110 等)すると、1111 に復帰させる方向に Servo Actuator を動作させる。再び 1111 を検知すると Servo Actuator 動作は停止するが、今回は Servo Actuator に小型 DC Motor を採用したため、動作後に惰性回転が起こってしまう。これでは光軸修正動作後に惰性回転のために、再び光軸のずれを発生させる可能性がある。解決法として、Motor 動作部の Gear Ratio の変更や、Stepping Motor による動作角度の指定などが挙げられるが、今回は修正動作後に一定時間だけ Motor を逆回転させることにより惰性回転を防止している。その後、Motor は Free の状態を指令され、再び監視の状態に戻る。

なお、何も入力がない(0000)時や 1PD のみ on(1000 等)、2 入力のみ on(1100 等)の場合は、本来ならずれを修正するよう動作するべきであるが、PIC Microcomputer にプログラム可能な User 領域の都合(容量不足)や消費電力節減のため、動作させないようにプログラムしている。

そして、Flow Chart を元に周辺回路(図 4-8)とプログラムを作製した。4 つの PD から出力される電流はそれぞれ電圧に変換、増幅され PIC に入力される。PIC Microcomputer はそれらの状態を監視、判定し、Motor Driver に対し任意の命令を与える。以上の Microcomputer の動作を司る Program Source を(付録 1)に示す。

また、Motor Driver 「Toshiba TA7291P」[23]と Motor 「マブチ FA-130」[24]で構成する、本 Servo Actuator Unit の Motor の回転速度は一定であるが、Motor Driver の Vref ピンに入力する電圧を変化させることで、回転速度が調整出来るようになっている。

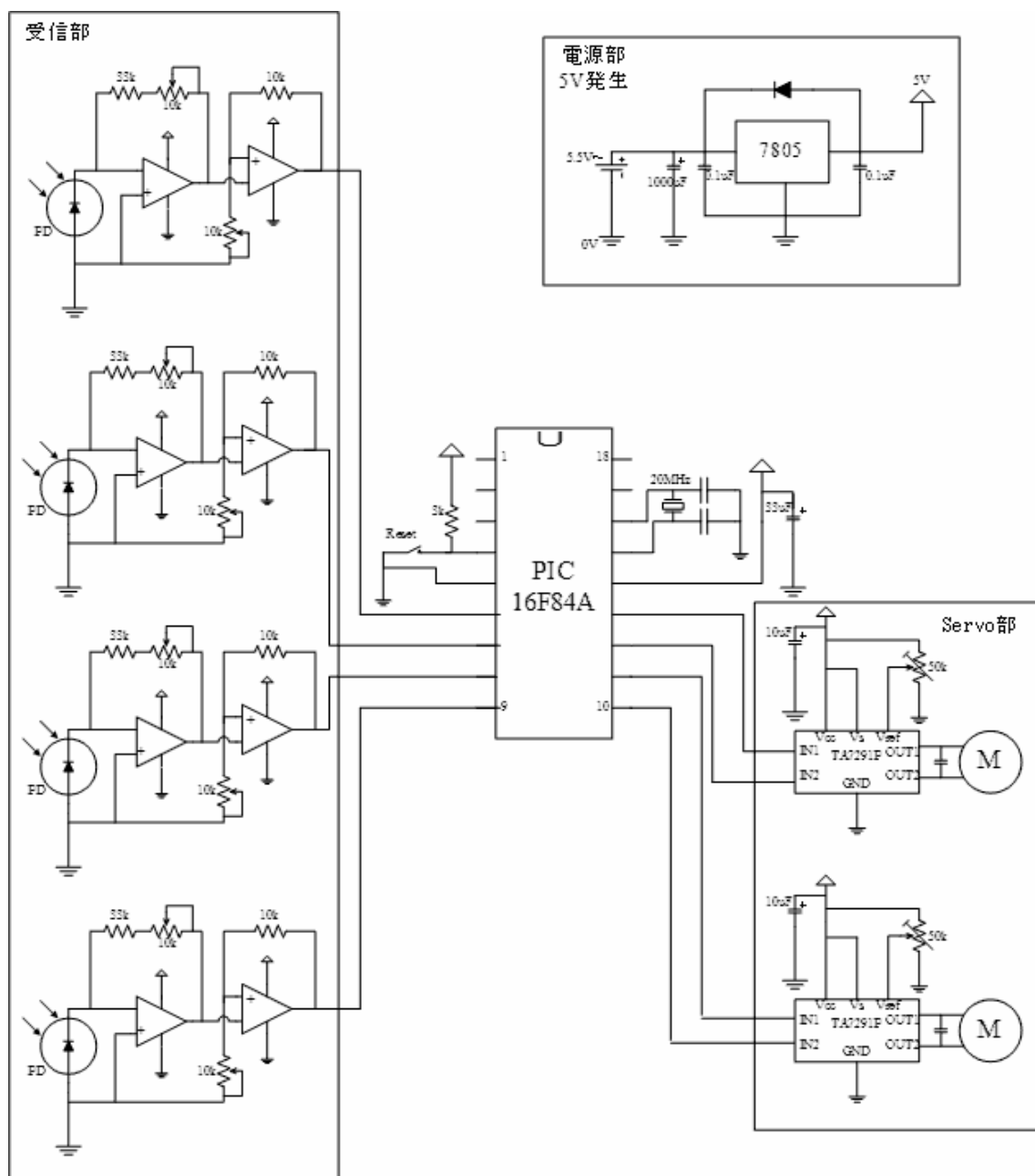


図 4-8 光強度による Servo Actuator 制御回路

4-3.2 追尾指示の低周波制御信号発生メカニズム

上記では修正することの出来ない、相対端末から届く光 Beam と端末の軸方向に生じた誤差を、一方の端末に対し光軸方向修正(追尾)を促し、捕捉と併せて精密な光軸合わせを狙う手法を基に回路やプログラムの作製を行った。

この動作には、自らの受光状態と同時に、相手側の受光状態の返答を受け判断し、相手側の端末に対し修正を促す機器制御信号を送信する必要がある。使用した PIC 16F84A では、上記のような若干高等な動作をプログラムするには User 領域が不足する。そこで今回は、光軸のずれ修正を促す命令信号を、対向端末より手動にて送信し、その命令信号に対し端末が修正動作を正しく行うことを検証した。

まず手動による Switch 操作を行い、操作された Switch の Channel を含んだ Data Pulse を構成し、任意の Port に出力する送信器側の Program Flow を示す(図 4-9)。また、Data の 600 μ s の「1」出力は、とある Format に基づき、38kHz で変調され送信される。この Format については後ほど述べる。

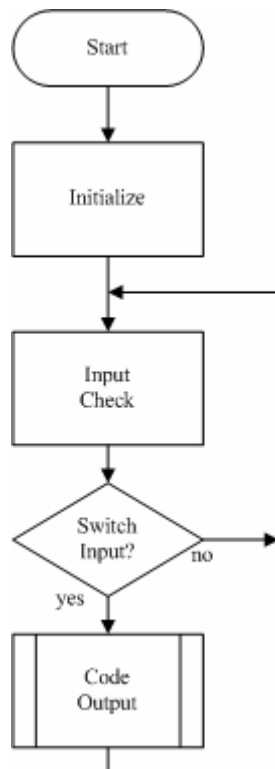


図 4-9 Switch 入力による送信 Program Flow

Flow Chart を基に、周辺回路(図 4-10)とプログラム(付録 2)を作製した。PIC 動作のための基本回路と四角で囲む回路らは、機能毎に Unit 化しており、実験目的に合わせ組み替え可能である。雑音による誤動作対策を考慮した Switch を 4 つ設け、Ch.1 ~ Ch.4 とする。Channel 毎に PIC にプログラムされた Remote control Format による Data Pulse の生成がなされ、赤外 LED 送信 Unit に向け出力される [25]。また別実験のために、送信部には SMA Connector を備えている。

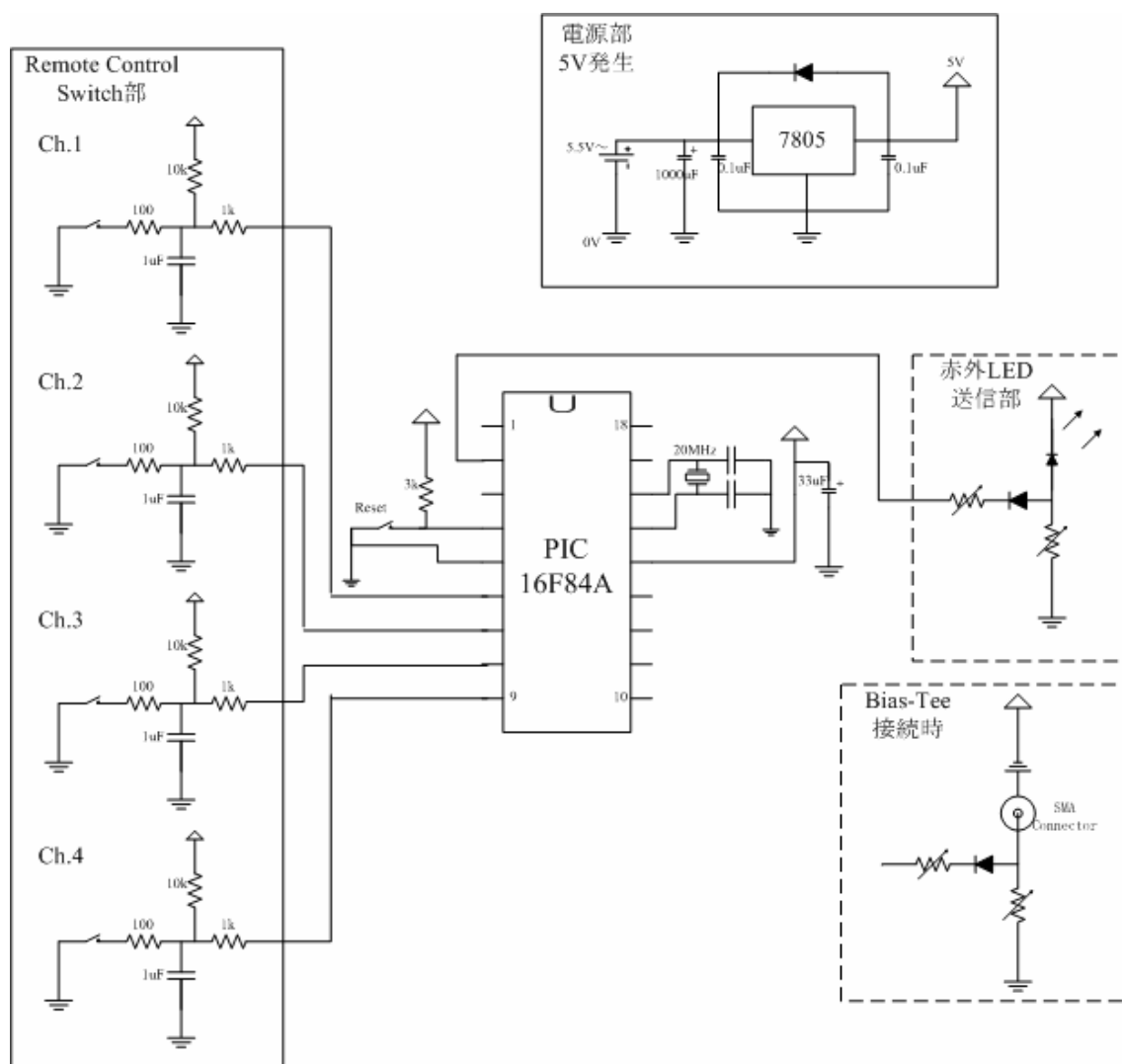


図 4-10 Switch 入力による Remote control Pulse 送信回路

上記送信器から出力された Data Pulse を受信し、判定、動作させるための Program Flow を示す(図 4-11)。PIC Microcomputer は初期化後に、送信器から射出された Data Pulse を受信するために待機を始める。外光による Start bit の「1」が入力される場合も考えられるので、まずは Data Check Routine を経る。正しい Data ならば、送受信器共に同値で固定される個体認識番号である Device Code を確認する。それを通過すると、先ほど確認した Data に内包される Channel 信号より、Servo Actuator に対し正転、逆転、Brake、Free など任意の命令を下す。プログラムは以上の繰り返しとなる。

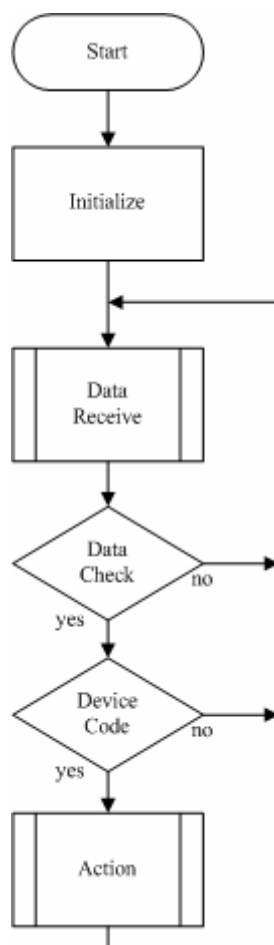


図 4-11 Remote control Format の受信と Servo Actuator 命令出力 Flow

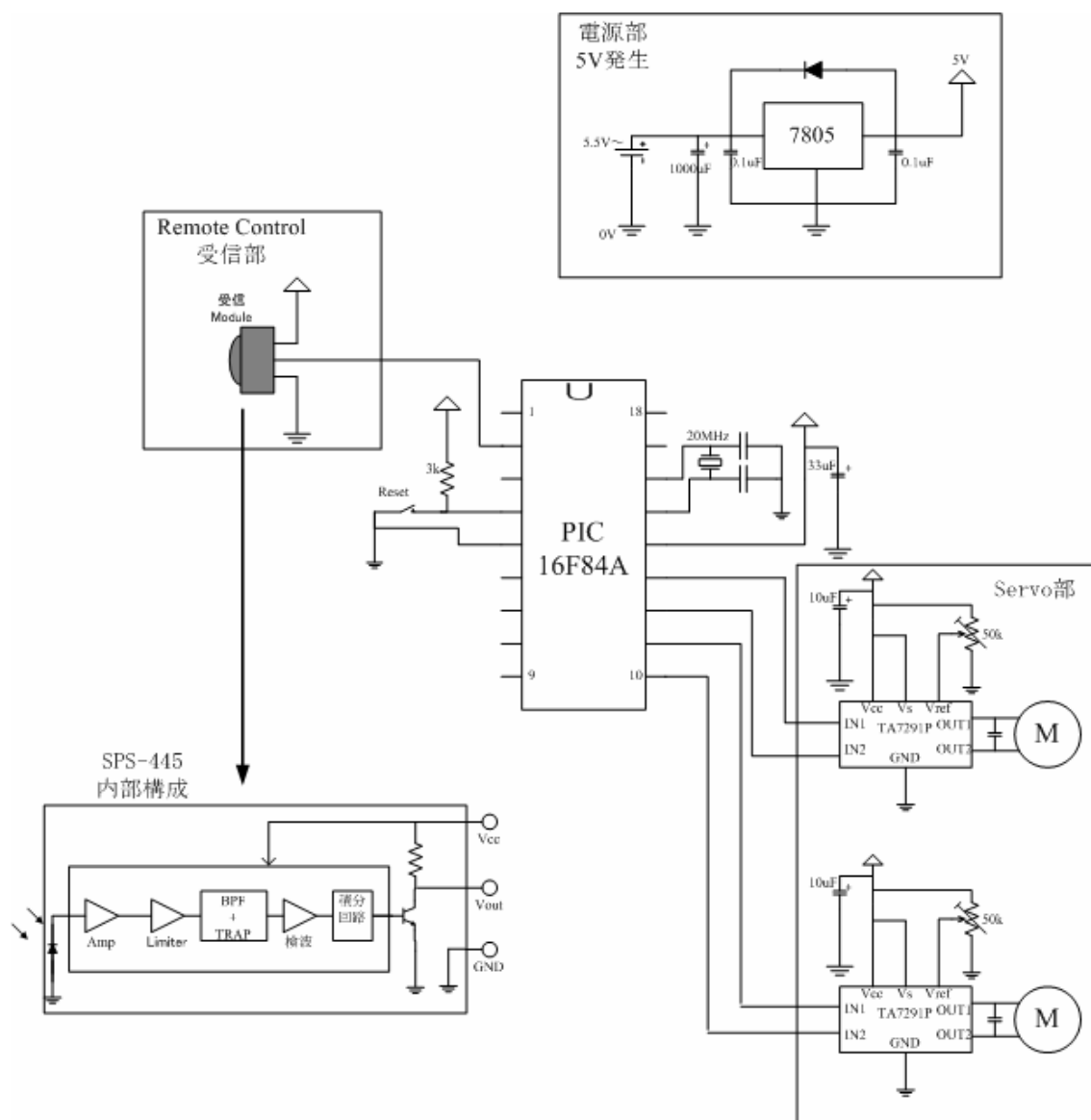


図 4-12 受信と Servo Actuator 操作を行う回路構成

Program Flow より周辺回路と PIC Assembler プログラムを組んだ。Program Source を(付録 3)に示す。周波数 38kHz の Pulse のみを通過させる Band Pass Filter を備えた Remote control 用受信 Module (SPS-445) により整形、出力された Data 信号は PIC に入力される。PIC にプログラムされた Remote control Format を判定する Routine より、Servo Actuator Unit に対して命令が下される。今後、目的に応じた受信 Module を作製する場合に、SPS-445[26]の内部構成が参考になると思われる。

今回採用した機器制御信号の Format は、家電などに利用されている赤外線式 Remote control 機器、つまり Remote control の Format を参考にプログラムした[25]。この Format は、Leader 部 8bit、Data 部 16bit、Data 部再送 16bit の計 40bit で構成される(図 4-13)。Leader 部は「0」を 8bit 分連続して送信し、連続して Data を送信する場合でも、一定時間だけ Data のない状態を確保し Data の受信判定誤りの対策としている。Device Code 部分は、 $001_2 \sim 111_2$ の 7 種類が利用出来る。また今回は 100 を使用した。Switch Code は $00000_2 \sim 11111_2$ の 32 種類である。今回の例では、入力 PortCh.1~Ch.4 の順に $00000_2 \sim 00011_2$ ($00 \sim 03_{10}$) を使用した。

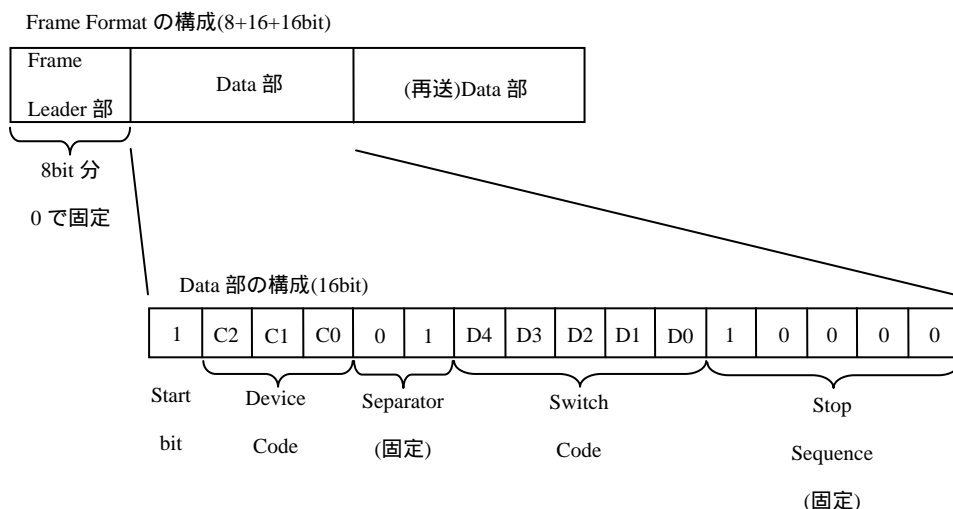


図 4-13 Remote control Data Format

Remote control Format では、「1」という $600\mu\text{s} / 1\text{bit}$ 間隔の Pulse は 38KHz で変調され、1 周期 $26\mu\text{s}$ の「1」「0」が 23 回繰り返され送信される。そして専用受光 Module によって、 $600\mu\text{s} / 1\text{bit}$ の Data Pulse への復調や Pulse 整形が施されて Microcomputer などに入力される(図 4-14)。これが外光等の雑音混入対策となる。

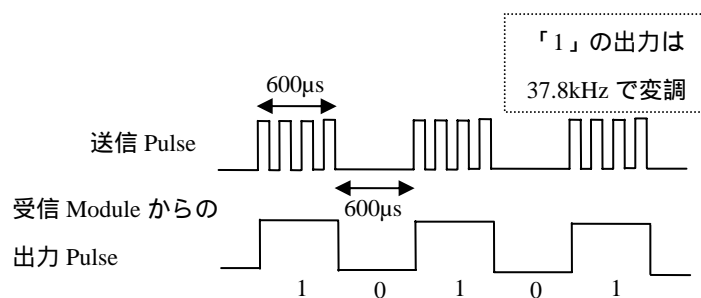


図 4-14 送受信部における Data の変調復調の様子

4-4 動作確認用模型の作製

以上のプログラムと構成回路、更には自らの位置情報把握の機能確認のために、模型を作製した。光軸のずれを修正する動作の確認を行うために、X 軸動作を担う Gear Box を備える Base 構造と、Y 軸動作を請け負う支えによって構成されている(図 4-15)。Base 材には、比較的加工が容易な 3mm 厚の亚克力板を用い、Gear Box には出力軸方向の変更が可能な「タミヤ Universal Gear Box」(マブチ FA-130Motor 用)を使用している。実験効率を考慮し、必要最低限の面積、体積を目標に作製した。頭部に受信 Unit を設けており、上記に挙げてきた各回路 Unit と接続し動作確認を行うことが出来る。また、第 2 章で提案したように、光軸のずれを明確に PD に示し、正確な修正動作を行うために、2-3.1 で説明した上下左右の PD をそれぞれの範囲に隔離する障壁(Blocking Layer)を施した。動作確認を繰り返し、障壁の高さは 2.5cm とした。

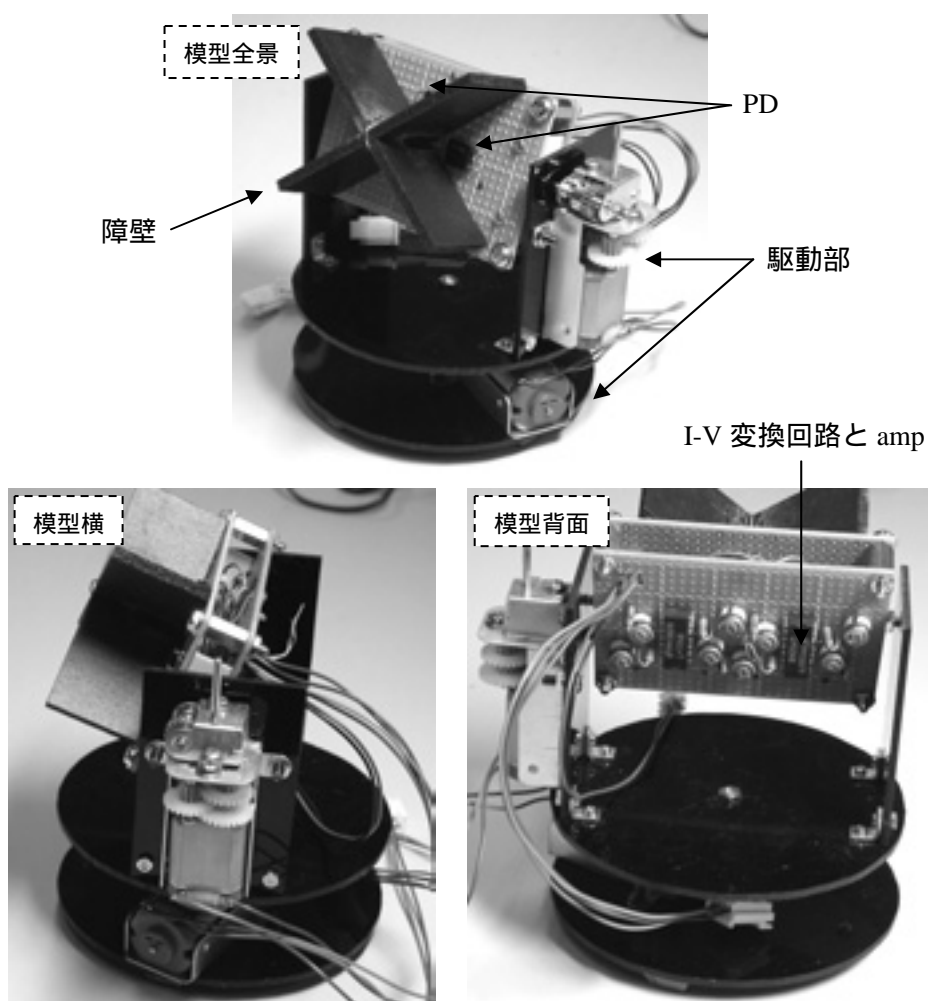


図 4-15 動作確認用に作製した模型

第 5 章 各種実験とその評価

5-1 高速 Digital 信号、低周波の信号 ADD/DROP

第 4 章では想定する光無線通信システムの全体構成を示し、その中で Ethernet 等の高周波信号に、機器制御用の低周波信号を重畳し同一の光 Pulse として対向端末に送出する送信体系を示した。ここでは実際に、高低周波が合波され VCSEL より光 Pulse として空間通信をした後、DROP 工程を経た場合の Pulse の状態や高低周波が互いに与え合う影響を観察する。実験構成を（図 5-1）に示す。

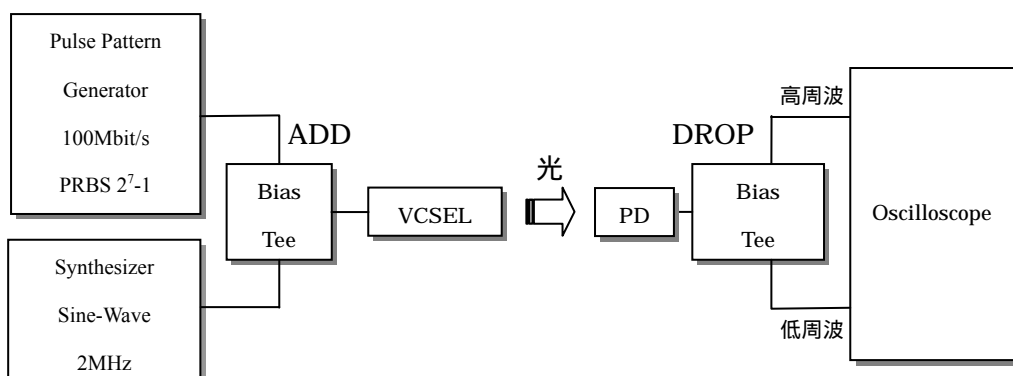


図 5-1 高低周波の ADD/DROP 実験構成

また、高周波信号と低周波信号の ADD/DROP 実験に関する、測定条件を以下に記す（表 5-1）。

表 5-1 ADD/DROP 実験の測定条件

高周波信号（Bias-Tee の AC 側に入力）		低周波信号（Bias-Tee の DC 側に入力）	
Translation Speed	100Mbit/s	Frequency	2 kHz
PRBS Pattern	2 ²³ -1	Offset	1.48V
Offset	360mV	Amplitude	200mV
Amplitude	720mV	Pulse	疑似 Sine-Wave

以上の構成にて Oscilloscope に出力された波形と、高周波信号と低周波信号の原信号を比較する（図 5-2）。

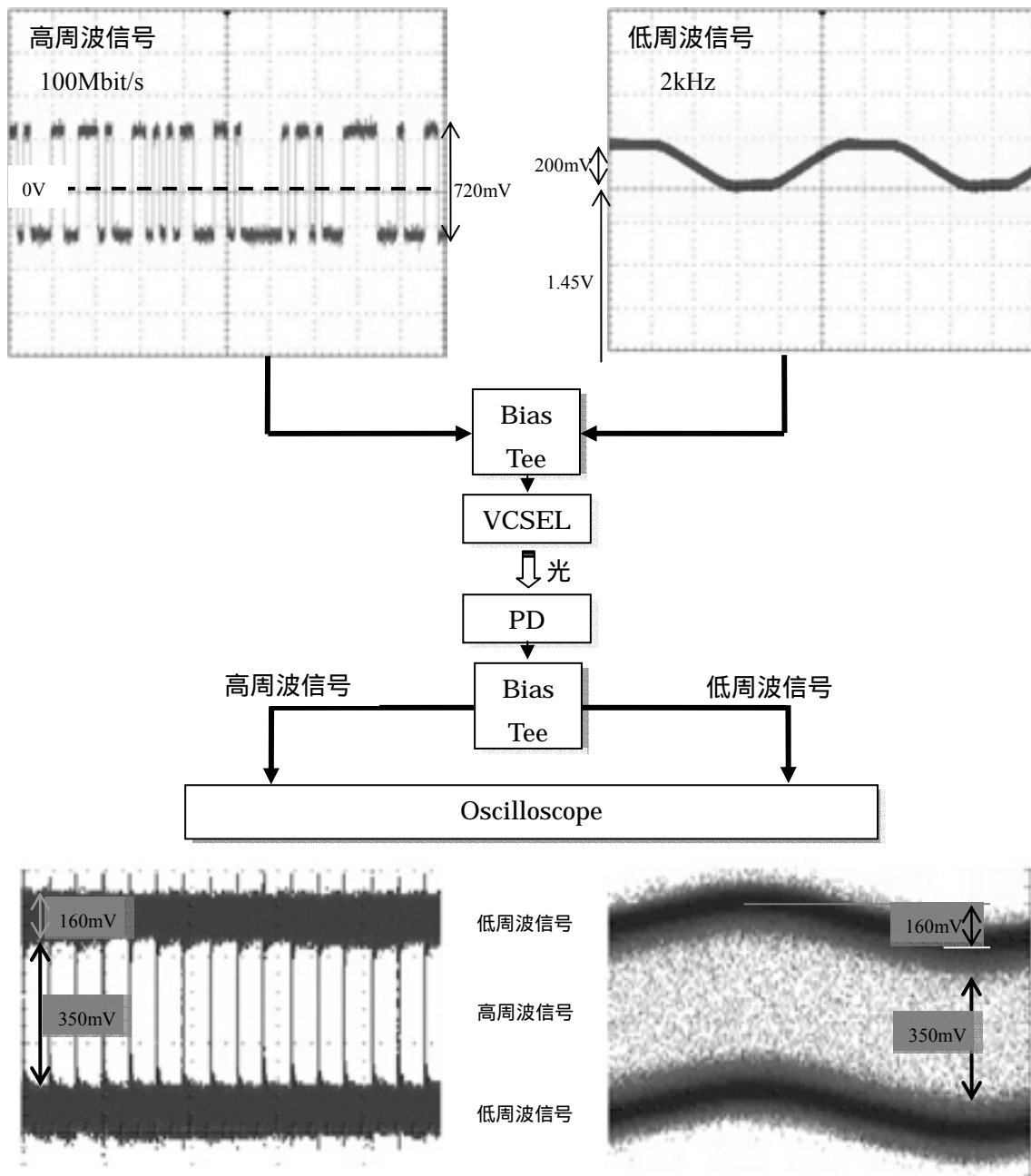


図 5-2 高低周波の ADD/DROP 実験

この重畳した制御信号振幅は、情報信号 (S) にとっては低周波強度ゆらぎ、つまり雑音 (N) となるが、この変動幅は 2-3.2 で見積もった誤りの発生する最悪雑音 S/N 比 1.8dB に比べ十分小さいので、多少の受信 Power Level の上昇は懸念されるが本質的に情報原信号を正しく伝えることが出来る。この測定によって、高周波信号と低周波信号の ADD/DROP 後も、十分に元の Data Pulse への復元が可能であることと共に、高周波成分と低周波成分が互いに及ぼす干渉も、非常に小さい事が実験的に確認された。

5-2 複眼による基本 Beam Control 動作 - 捕捉動作 -

第 4 章にて、受信部として上下左右 4 個の PD を配置し、そこから得られる受光 Power の差異を光軸のずれとし、ずれを補正する方向に補正動作を行う電気回路構成とプログラム、そして動作確認に用いる模型を作製した。ここでは、上記より構成された受信部に対し、対向端末からの信号光 Beam と仮定した赤外 LED より赤外光を投光し、その赤外 LED を移動させた (対向端末が移動した) 場合に、捕捉動作を行う手法の有効性を検証する。



図 5-3 基本 Beam 方向制御動作の検証

第 4 章で作製した各受信 Unit と動作確認模型を用い、本構成がどの程度の精度(角度差)まで捕捉動作を行うことが出来るかを確認した。また、Servo Actuator Unit に備える Motor Driver の、Vref ピンに入力する電圧値を操作することで、Motor の回転数を調整することが出来るよう設計している。

測定は 10 回行い光源の移動先と、それに対する受信部の捕捉動作先の角度差を計測した(図 5-4)。その結果、計測毎に誤差はあるものの、角度差異 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 、平均 1.5° という捕捉角度範囲に収まることが確認出来た(表 5-2)。

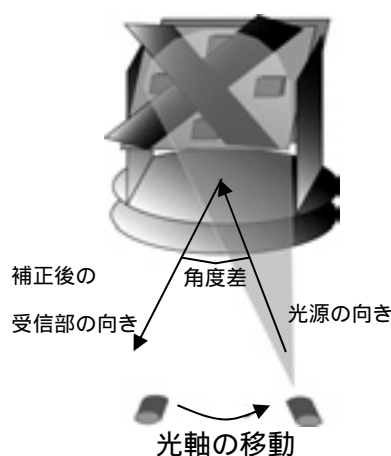


図 5-4 捕捉動作の精密さを求める実験

表 5-2 光軸移動と捕捉動作の角度差異 (10 回計測)

試験 (回)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
角度差 ($^{\circ}$)	1	3	0	5	3	1	0	0	1	1

しかし平均 1.5° の一定ではない誤差、最大 5° という角度差は、光軸のずれ、つまり受光 Power の低下が即、信号品質に関わるという特徴を持つ光無線通信システムとしては決して満足できる値ではない。特に信号光ビーム拡がり角が小さい場合に問題となる。このことから、より初期の「捕捉」動作後も精密且つ、応答の早くなめらかな「追尾」動作が、光軸合わせ動作過程には必要不可欠であると言える。

5-3 対向端末に対する光軸方向制御要求 - 追尾動作 -

追尾動作は、Ethernet 等の高周波 Data 信号に加え、追尾動作のための低周波制御信号を含んだ光 Beam を対向端末から受信して行われる。よって本実験では、低周波信号による受信部の Remote Control 光軸制御を確認するだけでなく、高周波 Data 信号が光 Beam に重畳された状態で、追尾動作の制御検証実験を行った。

4-3.2 末尾に説明するように $600\mu\text{s}/1\text{bit}$ の Mark 信号が、 38kHz という周波数によって強度変調された 1Frame40bit の Remote Control Format を用いた低周波制御信号と、Pulse Pattern Generator から発生される 100Mbit/s の信号を重畳する LCR 回路として Bias-Tee を利用した。また、 38kHz で変調された Remote Control 信号を受光し PIC に受け渡すために、Remote Control 用の受信 Unit を使用した。以上の構成にて、受信部を上・下・左・右・停止させる Channel を手動 Switch にて選択し、追尾動作制御信号にとっては雑音に当たる高周波 Data 信号が含まれる信号でも、対向端末の受信部方向操作が可能かどうかを検証した（図 5-5）。

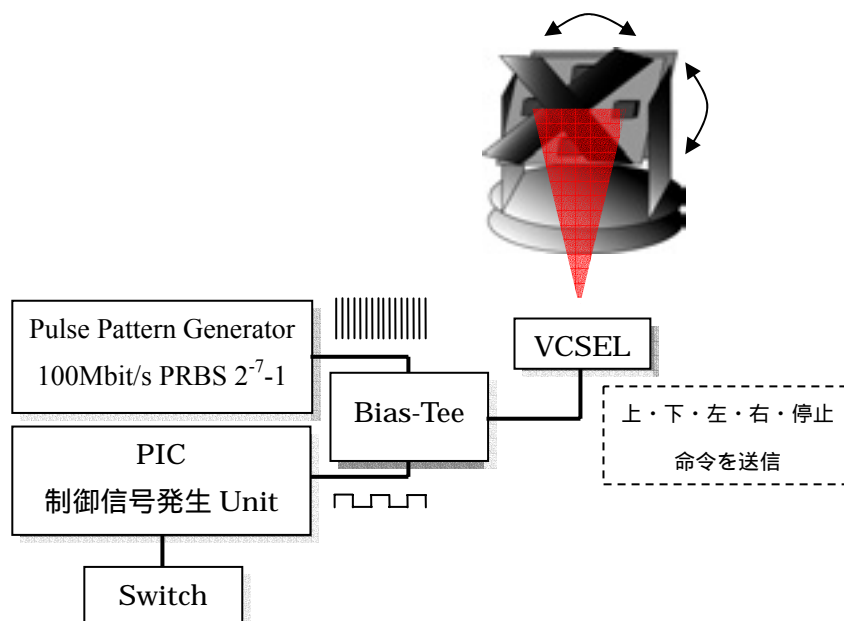


図 5-5 無線送信による光軸制御実験

その結果、誤動作もなく、送信した動作命令に応じた反応を受信端末の方位は示した。追尾動作の理論確認に、参考資料の豊富な Remote Control Format を採用したため、38kHz 変調された信号専用の受信 Unit を用いた。これは高低周波が合波された信号から、低周波の機器制御信号を抜き出すことと同義である。つまり、5-1 の測定にて確認が取れていたが、高周波信号と低周波信号の ADD/DROP が互いの干渉による誤り発生の影響は非常に小さく、十分適用可能な事を実証することが出来た。

また、今回は低周波信号の上に高周波信号を重畳させる方式を用いたが、制御信号を Data 信号の Clock 周波数や位相差を用いた変調(FM や PM)により重畳することも有効である。この方式は高価な Bias-Tee を用いる必要もなく、より LSI 化が容易でコンパクト化が期待出来る。

5-4 試作・実験系の性能の課題

本実験では、複数の PD が生じる受光 Power 差異を端末の移動(光軸のずれ)とし、受光 Power の差異の無くなるまで受信部方向を調整した。これは対向する端末の捕捉動作と対応する。この手法の実証に、PIC Microcomputer 16F84A を制御プログラムの実行に用い、受光状態の判定、そして DC Motor Driver への指示用に利用した。

16F84A は、受信部 I/F から出力される電圧より、2.5V を閾値として受光の on/off を判定している。つまり、受信部方向の調整動作がゆるやかな立ち上がりではなく、2 値的に突発的に行われる。さらに対向する端末との無線通信距離が離れ、4 つの PD それぞれから均一に受光 Power が低下した場合は、受信部 I/F から出力される電圧がそれぞれ 2.5V を下回り、受光 Power 差異の判定が不可能な状態に陥ってしまう。

このように制御が単純な故に、そのままでは Over Crash、認識誤りが間欠的に生じる場合もあり得る。解決方法としては、受信部 I/F から出力される電圧自体を監視し、それぞれの電圧差を光軸のずれとして受信部方向の調整を行う(図 5-6)。PIC Microcomputer シリーズで処理を行うのなら多値識別に対応する A/D 変換機能を持つ 12C671 [27]や 16C711 に置き換え、4 入力のうち、幾ばくか電圧 Data の低下した受信器(PD)より漸近的に徐々に光軸のずれを検出補正、アラーム発信する手法の導入が有効と考えている。

第5章 各種実験とその評価

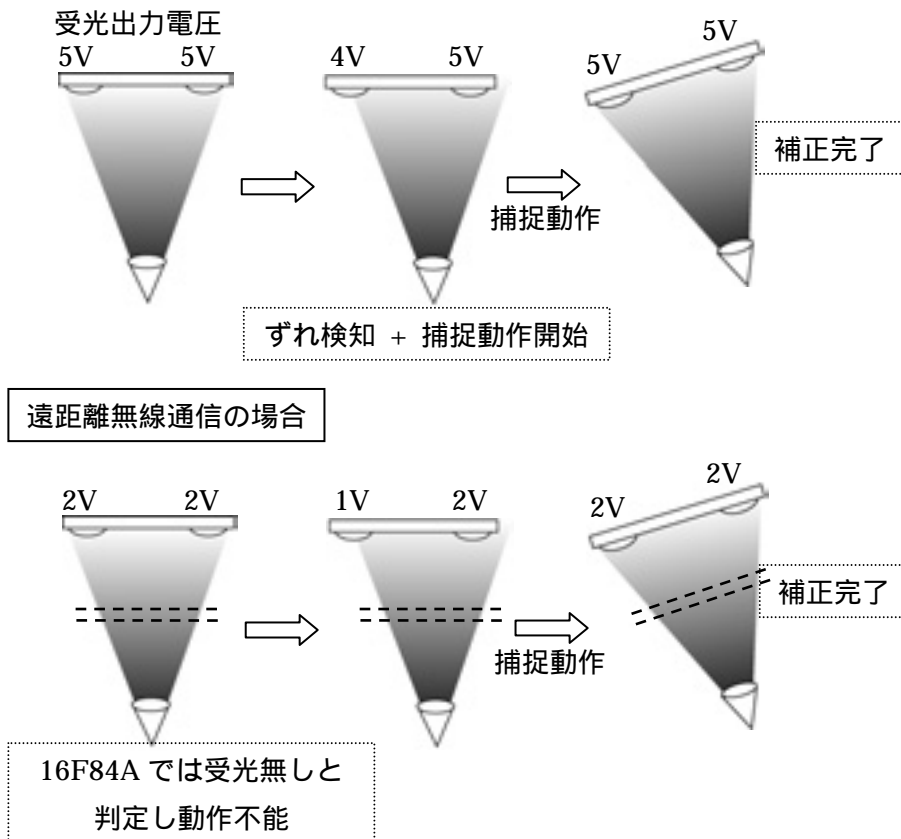


図 5-6 受信電圧の監視による光軸のずれ検知

この方式を利用することにより、2.5V を閾値に受光の on/off とする今回測定した方式と比較し、遠距離通信時にも受信部方向の調整を行うことが可能になる。光軸のずれ（受光 Power の低下）も早急に検知することが出来、さらに電圧差が無くなるまで受信部方向が調整されるため、より精密な「捕捉」動作が期待出来る。また、電圧の変化を任意時間においてサンプリングすることにより、相対末端の移動速度を導き、移動速度に応じた Servo 動作(速度調整に対応した Motor Driver と Gear 比に応じた Stepping Motor が必要)を行うことが可能である(図 5-7)。

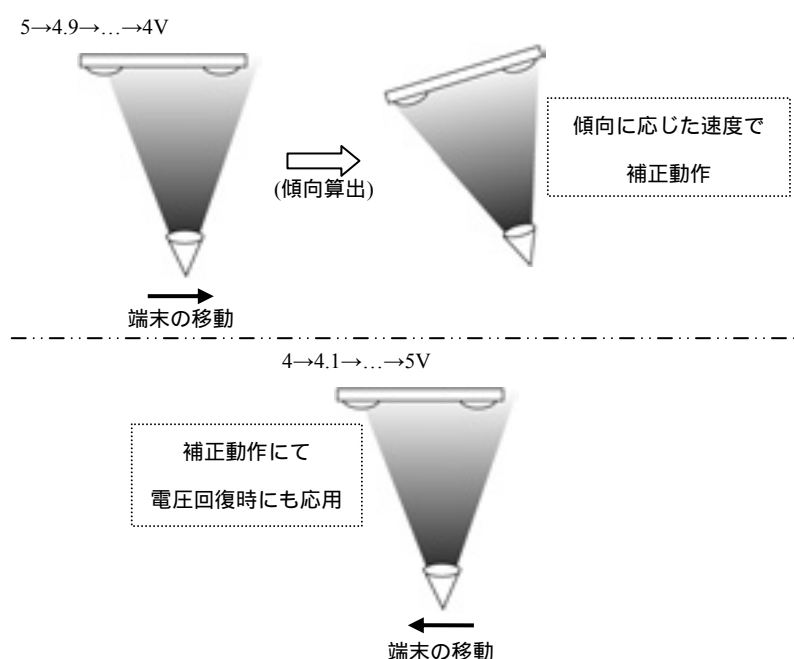


図 5-7 電圧の変化傾向による補正動作速度の制御

閾値として設定された電圧まで低下するまでの時間から、速度等の移動傾向を算出し、その傾向に応じた反応速度で補正動作を行う。そして、補正動作により電圧低下を見せていた PD の電圧が、他 PD からの出力近くまで回復していく時にも、移動傾向に応じて補正動作速度を落とし、慣性回転による再度の光軸ずれを防ぐことにも活用可能である。また、補正動作を開始する電圧にある程度の余裕を持たせることで、過敏な補正動作を防止すると共に、省電力化にも貢献する。

5-5 総合性能評価

以上の測定によって、まずは高周波信号と低周波信号の ADD/DROP による互いの干渉は非常に小さい事を確認出来た。今後は誤り率測定で詳細な検証を行う。「捕捉」動作に関しては平均 1.5°という一定ではない補正角度誤差はあるものの、複眼による受光 Power の差異を光軸のずれと認識し、移動する端末を追尾することが可能と原理確認は出来た。また、「追尾」動作では、高周波信号と低周波制御信号が合波された光 Pulse によって、対向端末の光軸補正動作を Remote Control にて行うことが出来た。このことより、高周波信号と低周波信号の ADD/DROP が互いの干渉による誤り発生の影響は非常に小さいという事も実験的に証明出来た。PIC 16F84A の基本スペックを要因とする追尾の滑らかな補正動作が出来ないという課題はあるが、受光電圧値の監視を多値識別可能な Microcomputer で行うことにより解決可能であると共に、更なる性能向上に繋がる。実験題目とその結果、そして生まれた課題をまとめ、表に記す(表 5-3)。

表 5-3 総合性能評価

実験	結果	課題
高速 Digital 信号、 低周波の信号 ADD/DROP	高周波信号と低周波信号の ADD/DROP による互いの干渉 は非常に小さい事を確認	高周波信号において、統計 的な誤り発生率判断だけで はなく精密な観測するべき
複眼による 移動端末の「捕捉」動作	複眼によって移動する端末 を追尾することを確認	一定ではない補正角度誤差 が見られるが解決策を提案
対向端末への光軸制御要求 による「追尾」動作	高周波信号に影響されず 対向端末の光軸制御 動作が可能	Bias-Tee は高価。低周波信 号の重畳に FM や PM 方式を 用い、LSI 化つまり小型化 を目指す

5-6 期待される効果と必要な動作

さらに 4 つの PD、つまり最大 4 入力、信号受信時の識明処理の信頼向上にも貢献する。各入力の識別結果を合算することは、独立事象の試行を繰り返すことと同値となり、信号の統計的期待値への収束を助ける。これにより 4 入力信号の信号比較より、明光等の Random 雑音の低減にも有効で、信号品質の改善効果があることが統計的に期待できる(図 5-8)。

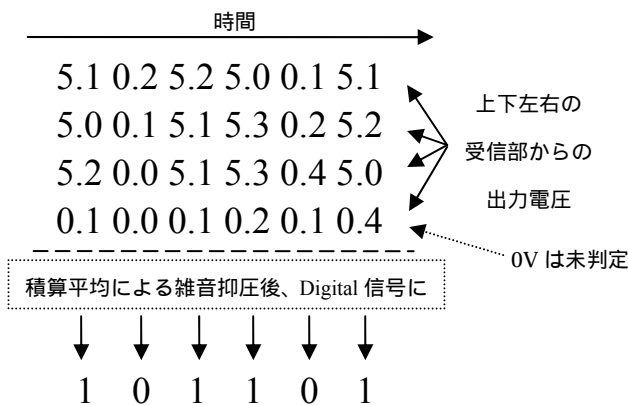
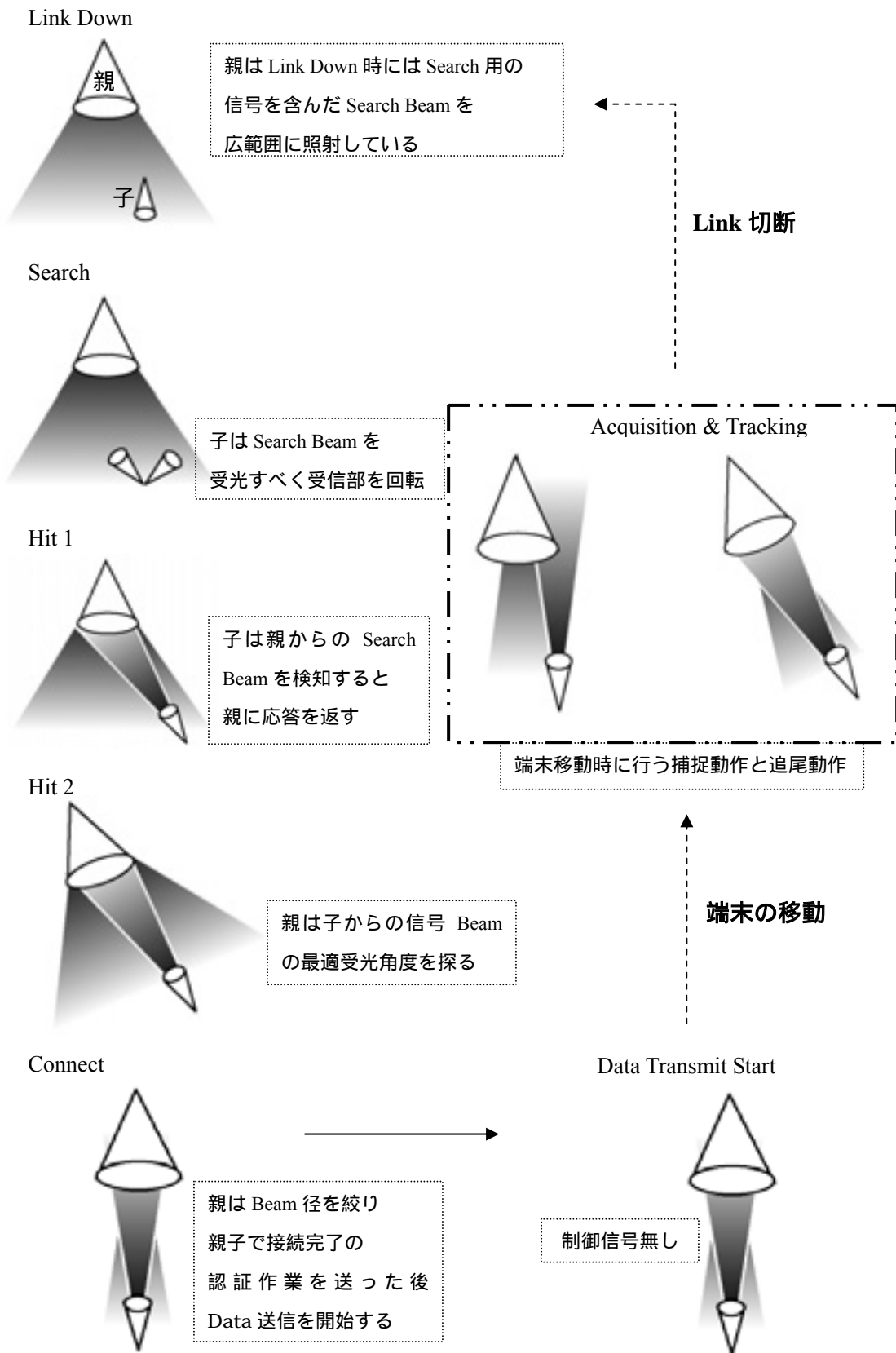


図 5-8 信号積算による雑音の抑圧

また、今回は机上検討のみであるが、光無線システムには実使用の際に必要な要素として、切断状態からの Link up 動作がある。一方端末を親、移動が予想される端末を子として、互いに Link されていない状態から、Data 送信を行うまでの一連の動作を表す工程表を示す(表 5-4)。

表 5-4 Link Up 工程



第6章 まとめ

現在の Network(LAN)環境は、高速 Backbone を背後に控えながらも、最終 Access 経路での高速性と利便性の両立が Bottleneck となっていた。本研究では、無線 Access 体系の伝送速度を改善させることにより、無線 Network の帯域拡大や運用性向上を図るべく光無線に着目し、その通信 Access System の構想を提案した。

特に、従来提案されてきた光無線通信システムに見られる「伝送速度の広帯域化」は維持しながらも速度追求のみに偏らず、光軸合わせの要求度が高いという光無線通信の課題を克服し、端末の移動にも柔軟に対応出来るよう実使用の場合の利便性も重視した。そして、無線システムの基本動作確認にとどまらず、本システムの信号伝送経路である大気中に存在する、光 Beam の進行方向の変化(Spot Dancing)に対する影響を含めた実環境での動作可能条件にも検討を加えた。CRL(独立行政法人 通信総合研究所)にて実際に測定した結果と照合し利用指針を示した。

以下に、結論を示す。

- ✓ 着目した VCSEL は GHz Class の高速変調で均一な Beam 光発生が可能であることを確認した。ただし伝送実験では、実験系受信器側の都合により最大伝送速度は 100Mbit/s で行った。
- ✓ 送受信器が対向した見通し距離における交信可能時における通信実験では、最大 250m(Beam 拡がり角 0.6° 、100Mbit/s 2^{15} -1 PRBS)の長距離無線通信が可能であると確認した。長距離無線通信を必要としない場合や、光軸合わせの要求度を下げたい場合などは、Beam 拡がり角と受信感度の関係を調整することにより、様々な環境に対応することが可能である。
- ✓ 複数の受信器による光 Beam 受信状態の認知、制御システムは、基本的な送受新端末の自らの位置状態把握の手段として有効であることが確認出来た。また、送出する高速 Digital 信号に低周波を ADD し、対向する受信器に光軸合わせを要求する方法は、高精度の Beam 送出角度 Control が可能であると確認した。

実用フィールドを考えた場合には、Gigabit Ethernet Interface の実装やシステム全体のコンパクト化、制御情報による効率的な端末接続・駆動プログラム周りの最適化などの課題が残されているが、以上に述べたように、光無線通信システムの提案作製し、機能の有効性を確認し、実際の Point to Point 無線 Access 手段として用いることが出来ることを実験的に示した。本研究により示された光無線通信システムの有効性によって、背後に広がる高速・広帯域 Backbone の恩恵を、煩雑な Fiber 接続を経ずとも、滞りなく End User まで送り届ける可能性・手段を提示出来た。

参考文献・参照

- [1] 高橋睦美. ZDNet/JAPAN. 入手先 (http://www.zdnet.co.jp/enterprise/0208/21/nw_03.html)
- [2] 総務省情報通信白書. 入手先 (<http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/whitepaper/ja/cover/index.htm>)
- [3] 堤坂秀樹・大庭秀雄. “テキストブック無線通信機器”. 第 9 版. 日本理工出版会,2000,485p. (ISBN4-89019-136-4)
- [4] IEEE802.11 The Working Group for Wireless LANs. (<http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>)
- [5] ZDNet/JAPAN. 入手先 (<http://www.zdnet.co.jp/internet/runner/0201/sp3/04.html>)
- [6] Wi-Fi Alliance. (<http://www.weca.net/>)
- [7] IrDA Standards. (<http://www.irda.org/>)
- [8] IEEE802.3. (<http://grouper.ieee.org/groups/802/3/>)
- [9] Victor VIPSLAN-100. (<http://www.jvc-victor.co.jp/products/pro/OA-C301.html>)
- [10] MITEL SEMICONDUCTOR 1A440 DataSheet. 入手先 (<http://www.gaw.ru/doc/Mitel/1A440.PDF>)
- [11] IEC. (<http://www.iec.ch/>)
- [12] 泉谷健司. “LAN 技術解説 Ethernet と FDDI”. 第 3 刷. ソフトリサーチセンター,1994,370p. (ISBN4-915778-24-X)
- [13] 植松友彦. “よくわかる通信工学”. 初版第 3 刷. オーム社出版局, 1999,164p. (ISBN 4-274-13041-X)
- [14] 濱田正典. 短距離型無線光通信システム. 高知工科大学, 2001. 学士論文.
- [15] N.S.Bergano et al., IEEE Photonics Tech. Lett., 5,3,p304,1993
- [16] 伊藤猷顕ほか. “ヘリウムネオンレーザー光によるテレビジョン信号の屋外伝送特性”. テレビジョン学会誌 Vol.22,No.1,pp.15 ~ 22, 1968.
千葉孝雄ほか. “大気中を伝搬するレーザービームの Spot Dancing”. 電子通信学会論文誌 Vol.54-B,No.2,pp.77 ~ 84,1971.
千葉孝雄. “大気中を伝搬するレーザービームの散らばり”. 電子通信学会論文誌 Vol.54-B,No.10,pp676 ~ 681,1972
横田知治ほか. “屋外光無線回線品質向上に関する研究”. ICOSA 光無線通信システム推進協議会, 入手先 (http://www.icsa.gr.jp/topics/2002/index_02018.htm)
- [17] 真島恵吾. “デジタル光 FPU の信号処理～空間光伝送にデジタル VTR の信号処理技術が使える～”. NHK 放送技術研究所, 入手先 (<http://www.nhk.or.jp/strl/publica/dayori/dayori9611/spot1-j.html>)
- [18] 中村守里也ほか. “高速カメラによるスポットダンシングの周波数スペクトル測定”. 電子情報通信学会信学技法 OCS2002-70,pp51 ~ 56,2002
- [19] 有本好徳ほか. “High speed optical feeder link system 高速光通信システム”. 第 3 回成層圏プラットフォームワークショップ予稿誌,pp149 ~ 156,2001
- [20] Microchip Technology 16Family. (<http://www.microchip.com/1010/pline/picmicro/family/pic16/index.htm>)
- [21] 電子工作の実験室. 入手先 (<http://www.picfun.com/>)

- [22] Picosecond Pulse Lab Bias-Tee 5550B. (http://www.picosecond.com/products/product.asp?prod_id=12)
- [23] Toshiba TA7291P Data Sheet. 入手先 (http://www.semicon.toshiba.co.jp/ja/bucat_6/bucat_3/bucat_0/td_5/TD.pdf)
- [24] マブチモーター. (http://www.mabuchi-motor.co.jp/motorize/catalog/cat_03.html)
- [25] 後閑哲也. “電子工作のための PIC 活用ガイドブック”. 初版第 5 刷. 技術評論社, 2002,423p. (ISBN 4-7741-0921-5)
- [26] IEEE Sensors Journal. (http://www.ewh.ieee.org/tc/sensors/info_for_authors.htm)
- [27] Microchip Technology 12Family. (<http://www.microchip.com/1010/pline/picmicro/family/pic12/index.htm>)

本論文に関する発表

濱田正典、野中弘二

「近赤外 VCSEL と Si-APD を用いた高感度光無線 LAN システム」

平成 13 年度電気関係学会四国支部連合大会 (2001/9/29)

謝辞

本論文をまとめるにあたり、懇切なるご指導を賜り、御討論いただきました野中弘二助教授に謹んで深謝の意を表します。また、貴重なる御助言を賜りました橘昌良助教授に厚く御礼申し上げます。

本研究の場を与えていただき、御指導、御鞭撻を賜りました神戸宏教授に心から感謝いたします。

研究に必要な加工機械を貸与していただいた八田章光助教授と武田光由先生に感謝いたします。

本論文の一部は、著者が独立行政法人「通信総合研究所」にて行った測定をまとめたものであり、本論文をまとめる機会を与えていただいたことと共に、深夜遅くまで有益な助言と測定を共にして頂いた中村守里也様には、深く感謝いたします。また、大谷直毅グループリーダーをはじめとする基礎先端部門 光エレクトロニクスグループの皆様にも心から感謝いたします。

電子・光システム工学科修士二年の大橋健二さんには数多くの助言を、三年生の礒部善之さんには実験の助力を頂きました。心から感謝の意を表します。