

TR-O-0024

48

光衛星間通信実験用光変復調器の  
構成と特性

櫻木勘四郎 荒木賢一 安川交二

1990. 3. 30

ATR光電波通信研究所

## 概要

光衛星間通信システムにおける光変復調技術は、ファイバ通信システムにおける技術と基本的には同じであるが、より大きな変調光出力が必要となる。本レポートでは、高出力・高ビットレートの光変復調器実現に当たっての問題点について検討する為、ビットレートが360Mbpsで平均光出力100mW以上の半導体レーザーダイオードの駆動が可能な、強度変調/直接検波方式を適用した実験用光変復調器を試作したので、その構成と基本特性について述べている。変調特性についてはレーザーダイオード注入電流対光出力特性、スペクトル特性を、復調特性については復調信号波形(アイパターン)、ビット誤り率特性を示す。さらに、変調器の高速・高出力化、復調器の高感度化の今後の可能性等についても検討している。

なお、本レポートの内容は、1989年3月17日に開催された電子情報通信学会・光通信システム研究会に、「光衛星間通信実験用光変復調器の構成と特性」と題して投稿および発表を行った。

## 目次

1. まえがき	1
2. 装置構成と諸元	2
2.1 試作に関する検討概要	2
2.2 装置構成	10
2.3 装置諸元	15
3. 光変復調器の特性	16
3.1 変調特性	16
(a) 注入電流対光出力特性	16
(b) 発振波長スペクトル特性	17
3.2 復調特性	18
(a) 信号アイパターン特性	18
(b) 復調ビット誤り率特性	19
4. 今後の検討課題	22
4.1 光強度変調器の高出力・高速化	22
4.2 復調器の高感度化	22
4.3 光PPM変復調器	23
5. あとがき	24
謝辞	25
参考文献	26

## 1. まえがき

光衛星間通信(光ISL、ISL: Intersatellite Links)システムは<sup>[1]</sup>、ミリ波等の無線周波数帯を用いたシステムに比べて、小型・軽量の装置でより多くの情報量を長距離伝送することが可能であり、さらに、光ビーム幅を非常に狭くできるのでシステム間の干渉を殆ど無視できる程度に小さくできる。現在、固体素子に期待される優れた信頼性、小型・軽量性の点から、光源として半導体レーザダイオード、受光素子としてシリコンデバイスの基本とした光ISLシステムの研究開発が各国で進められている。

光ISLシステムを構成する主要技術として、光ビーム制御技術(捕捉/追尾/指向)<sup>[2]</sup>と光変復調技術がある。このうち光変復調技術は、光ファイバ通信システムにおける技術と基本的には同じであるが、光ISLシステムではビットレートが100Mbps~1Gbps程度であり昨今のファイバシステムでの開発例に比べるとそれ程高くないものの、より大きな光出力が必要となる。例えば、20cm直径の光アンテナを用いて距離4万kmの400Mbpsリンクを構成する場合(0.8 $\mu$ m帯)、要求されるレーザダイオードの光出力は200mW以上となる<sup>[3]</sup>。即ち、比較的高ビットレートでかつ高出力の変調器が必要となる。このような変調器の開発は試みられているが<sup>[4]</sup>、光出力、ビットレート共に、我々が現在想定しているシステムよりも低いものである。

本レポートでは、高出力の光変復調器実現に当たっての問題点について検討する為、ビットレートが360Mbpsで平均光出力が100mW以上の半導体レーザダイオードを駆動できる、強度変調/直接検波方式を適用した実験用光変復調器を開発したので、その構成と基本特性について述べる。変調特性についてはレーザダイオード注入電流対光出力特性、発振波長スペクトル特性を、復調特性については復調信号波形(アイパターン)、ビット誤り率特性を示す。最後に、試作結果を基に、変調器の高出力・高速化、復調器の高感度化等の今後の検討課題についても述べている。

## 2. 装置構成と諸元

### 2.1 試作に関する検討概要

#### (a) 試作目的

光ISL用通信装置の基本構成を図1に示す。大別して、光変復調部、光ビーム制御部とから成る。光変復調部は、レーザダイオード(LD)とその変調器、光検出器と信号復調器を含んでいる。一方、光ビーム制御部は、空間ビームの送受信を行う光アンテナ、ビーム方向検出器(センサ)と信号処理回路、ビーム方向制御・追尾機構などを含んでいる。

本レポートは光変復調部を検討対象としている。光信号の検出復調に関しては光ファイバシステムの場合と基本的に同じである。数万kmの空間を高速で信号伝送するためにはどの程度のレーザ出力が必要になるかを示す例として、光アンテナ直径20cmで、衛星間距離40,000kmの360Mbps光回線を想定したときの、強度変調/直接検波方式におけるビット誤り率と所要レーザ平均出力との関係の計算例を図2に示している。図から分かるように背景光が無い場合でも、十分なシステム動作余裕(マージン)を得るためには、レーザの平均出力としては20dBm(100mW)以上が必要となる。このような高ビットレート・高出力変調は、光ファイバシステムでは見られない技術である。また、宇宙における将来の画像伝送などの要求に対処し得る1Gbps以上の超高速の光ISL実現のための最重要課題の一つであると思われる。



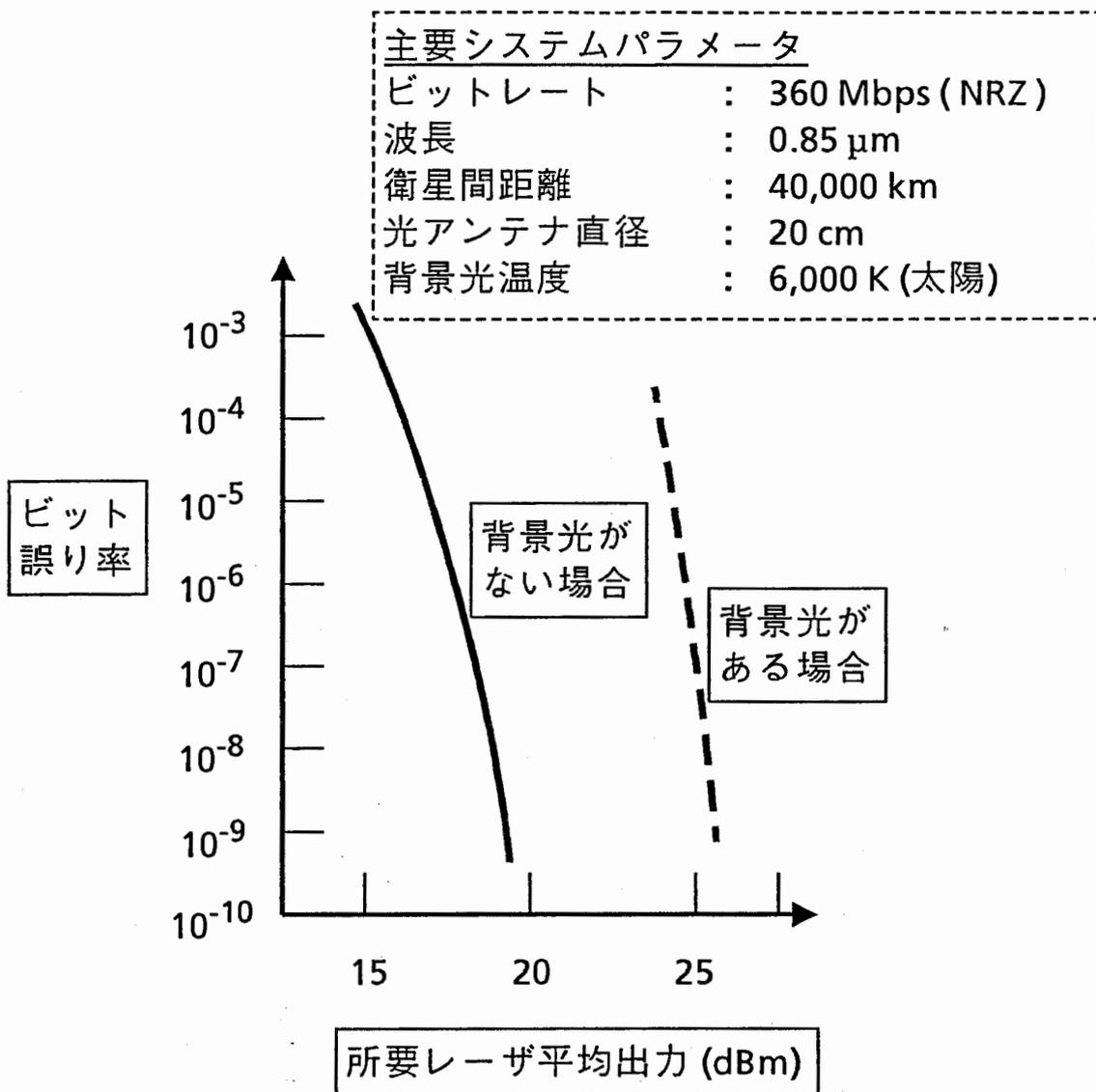


図2 強度変調/直接検波方式のビット誤り率と所要レーザー平均出力 (dBm)との関係

本光変復調装置試作の目的は、高出力・高ビットレート変調器実現に当たっての問題点の洗い出し、変調時のLDファーフールドパターン及びスペクトル特性測定、さらにアンテナ及び追尾装置と組合せた時の総合的な通信品質(ビット誤り率)特性実験・評価を行うことである。次節以降の検討を基にして、試作の目標諸元を表1のように設定した。

表1 光変復調器試作の目標諸元

平均光出力	: 100mW (200mWピーク)
ビットレート	: 360Mbps
符号化方式	: OOK (ON/OFF Keying)
波長	: 0.8 $\mu$ m帯

(b) 現状技術及び周囲状況

(b-1) ビットレート

(a) 衛星通信網とのインタフェースを考慮すると120Mbps(インテルサットTDMA信号)の整数倍が望ましい。候補として120Mbpsと360Mbpsが挙げられる。

(b) 他の研究機関で想定しているビットレートは以下の通り。

ESA : 120Mbps $\times$ 4ch (波長多重、LEO $\rightarrow$ GEO)  
1Gbps(GEO間、但し、研究開発は積極的には行われていない。)

インテルサット: 360Mbps (トランスポンダ3本分)

米空軍 : 55、110、220Mbps

(b-2) 符号化方式

光ISLシステムに適用可能な符号化方式として、OOKと4値PPM (pulse position modulation)が考えられる。両方式を比較すると、以下に示すように一長一短がある。

(a) ビット誤り率特性

平均受光パワーを同じにした場合、PPMの方が良好である(ESAの検討によれば1.0dB、コムサットの検討によれば2.5dB)。

一方、ピークパワーを同じにした場合には、OOKの方が良好である。

(b) 装置構成と問題点

(i) PPMの方が若干複雑。特に、PPMではワード同期が必要である。

(ii) OOKはファイバ通信に用いられているので、1.6Gbps程度までのモデム製作技術は成熟している。

一方、100Mbps程度のPPMモデムの開発実績は少ない。

(iii) 平均送出電力及びビットレートを等しくした場合、PPM方式の動作周波数及びピーク光電力(ピークLD駆動電流)はOOKの2倍となる。LDの高出力・高周波数変調時の諸特性についての検討例は殆んど無く、またLD駆動回路には高周波・大電流出力が要求されるが、そのような駆動回路の試作例は少ない。

従って、試作の際の問題点はPPMの方が大きいと考えられる。

(iv) 表2に示すように、現状ではOOKを適用した360Mbpsモデムの試作は可能であるが、PPMでは最大ビットレートは120Mbps程度である。

(v) OOKを適用した120Mbpsと360Mbpsモデムでは、回路の実装技術において最も大きな差が生じる可能性がある。即ち120Mbpsでは個別部品を用いてプリント基板上に組めるが、360MbpsではハイブリッドIC(駆動回路部分)を開発する必要がある。但し、ICの開発に大きな問題は無い。

(vi) 現在のモデム製造技術では、ピーク光出力に制限がある(LD及びLD駆動回路)。

なおESA、インテルサットではOOK、PPM両方共候補として挙げており、またインテルサットでは委託研究に基づいてPPMモデムの試作に関するコントラクトを発出している。

(b-3) 波長

0.8 $\mu$ m帯は、長波長帯(1.3、1.5 $\mu$ m)に比べて高出力LDの開発が進んでおり、さらにAPDの特性も良好である。

(b-4) 光出力

現在、日本で開発されている0.8 $\mu$ m帯LD(アレイを除く)の最大光出力は、表3に示すように200mW(CW)程度である。

(c) 試作仕様選定理由

以下の理由により、0.8 $\mu$ m帯を用いた100mW平均出力の360Mbps OOKモデムの試作を行う。

(c-1) ビットレート

以下の理由により、ビットレートは360Mbpsとする。

(a) インテルサットが想定するビットレートに一致する。

(b) ESAのLEO→GEOリンク(120Mbps×4ch)には一致しないが、360Mbpsモデムが実現可能となれば、120Mbpsモデム製造に問題は生じない。(但し、ESAではPPMとOOKのどちらを使うかは決定していない。)

(c) ESAはGEO間では1Gbpsを想定しているが、現状技術ではLDを含んだ1Gbpsモデムの製作は不可能である。現実的な方法として360Mbpsの3ch波長多重が考えられる。

(d) 今後、光ISLシステムのビットレートは高くなっていくと考えられる。高出力モデムの達成可能な最大ビットレートについて検討するためには、適用するビットレートは高い方が望ましい。

なお、測定(データ及びクロックのモニタ、誤り率測定等)の難易度は120 Mbpsと360Mbpsでは大差ない。

(c-2) 符号化方式

適用するビットレートが360Mbpsの場合にはOOK方式のみ装置化できること、及び装置製造上ピーク電力制限がある時にはOOKの方が特性が良好であることを考慮して、符号化方式はOOKとする。

(c-3) 波長

3.3の理由により、0.8 $\mu$ m帯を適用する。

(c-4) 光出力

(b-4)に述べた最大LD出力、及び表2に示す最大LD駆動電流(400mAピーク電流の場合、LDのピーク光出力は200mW程度である。OOKの場合平均光出力は100mW程度となる。)の現状を考慮して、平均光出力は100mWとする。

表2 駆動回路の出力ピーク電流とモデム製作の予想価格

	A社	B社	C社
120Mbps OOK	50mA (将来200mA)  (500万円以上)	400mA  (2000~3000 万円)	50mA (将来200mA)  (2000万円 程度)
360Mbps OOK	50mA (将来200mA)  (1000万円 以上)	400mA  (3000~5000 万円)	50mA (将来200mA)  (2000万円 程度)
120Mbps PPM	試作は現状技 術では不可能	400mA  (3000~5000 万円)	試作不可能
360Mbps PPM	試作不可能	試作不可能	試作不可能

(注) 400mAピーク電流の場合、LDのピーク光出力は200mW程度。

(OOKでは平均光出力は100mW程度)

・B社は、500mAのピーク電流出力および360MbpsのPPMモデム  
試作は数年後には可能であると予想。

表3 日本で研究開発されている代表的な高出力0.8 $\mu$ m帯レーザダイオード

Structure	NAM- LOC- BTRS <sup>[5]</sup>	Broad Area <sup>[6]</sup>	GRIN- SCH <sup>[7]</sup>
Maximum Output Power	300mW	700mW	2.2W
Threshold Current	$\approx$ 40mA	$\approx$ 200mA	$\approx$ 200mA

NAM-LOC : Non Absorbing Mirror-Large Optical Cavity

BTRS : Buried Twin-Ridge Substrate

GRIN-SCH : Graded Index-Separate Confinement Heterostructure

## 2.2 装置構成

試作した光変復調器の概観図を図3に、機能ブロック図を図4に示す。

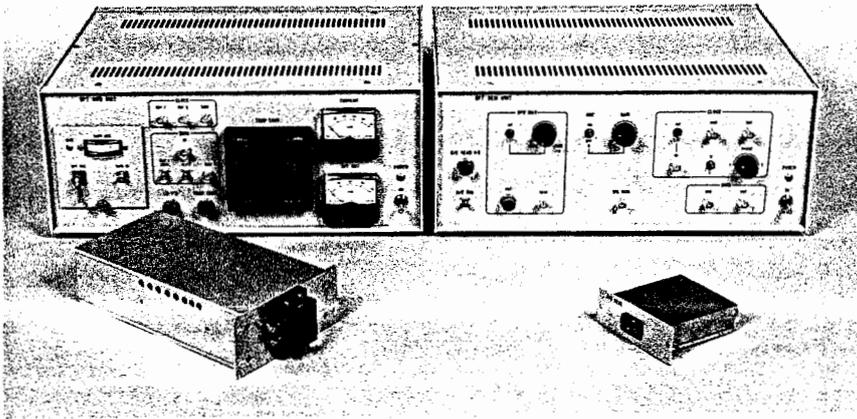


図3 試作した光変復調器の概観図

[向かって左側が変調器(本体+E/Oヘッド:温度制御機能なし)、右側が復調器(本体+O/Eヘッド)、E/Oヘッドの手前黒い部分がレーザダイオード(LD)モジュール]

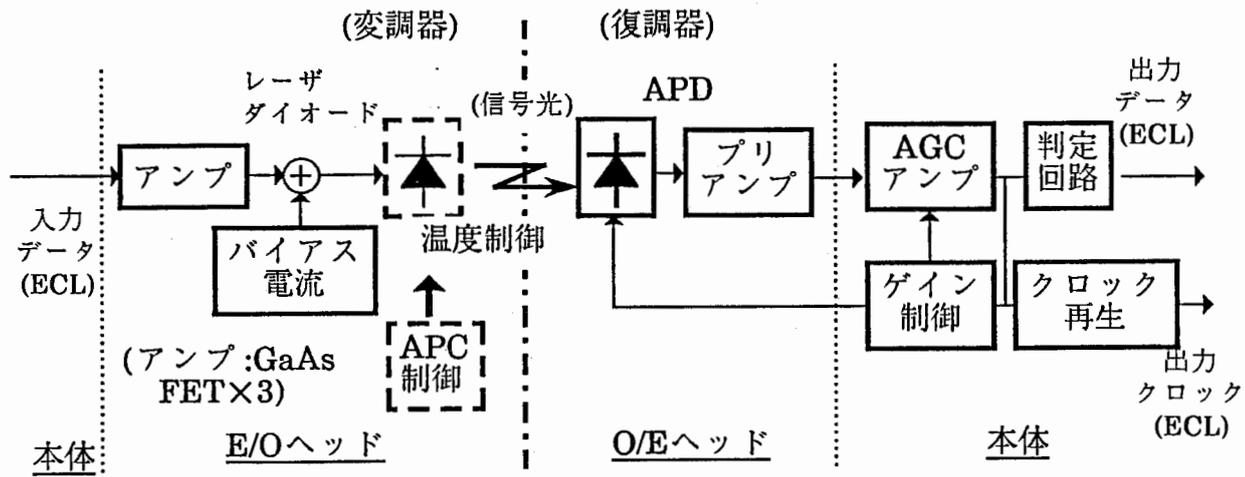


図4 光変復調器の機能ブロック図

変調器、復調器共にヘッド部分(E/O及びO/E)と本体部分に分かれており、ヘッドと本体は約1mのケーブルで接続されている。ヘッドは、(a)今後の光・電気

デバイス、特にE/Oヘッドに関係するレーザダイオード(以下、LDと略す)及びその駆動回路用デバイスの性能向上に対処できるように、(b)デバイスに関する種々の環境試験が行えるように、交換可能な構成となっている。ヘッドとアンテナは5mm径程度のコリメート光でインタフェースされる。

E/Oヘッドは、以下の3種類を試作しており、図3のE/Oヘッドは、(a)の“温度制御機能なし”である。

- (a) 温度制御機能なし、LD出力光は5mmφにコリメート
- (b) 温度制御機能あり、LD出力光は5mmφにコリメート
- (c) レーザダイオード駆動回路、APC制御等の電気回路部分のみ

温度制御は、レーザダイオード(以下、LDと略す)の発振波長・光出力の安定化、さらには温度特性を測定する為のものであり、ペルチェ素子を用いて行っている。また、APC制御も行える構造となっている。温度設定範囲は10~30°Cであり、精度は0.1°Cである。E/Oヘッドについては特に軽量化は図っておらず、重量は恒温槽部分が1.7kg、LD駆動回路部分が2.4kgである。恒温槽を除いたE/Oヘッドの消費電力は、100mW平均光出力時は約14Wである。この場合のLDの電気/光電力変換効率は約25%である。

高速(360Mbps)・大電流注入を行うレーザダイオード駆動回路(以下ドライバと略記する)はE/Oヘッドに納められている(図5)。ドライバはGaAs FETの3段直列

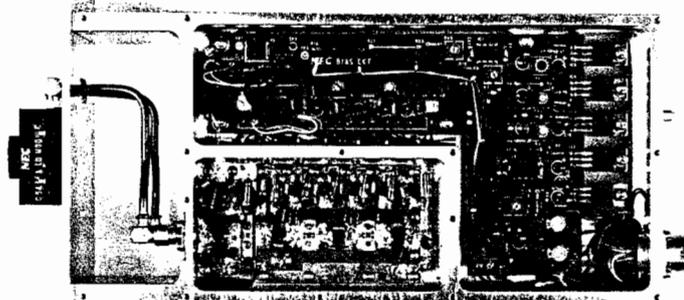
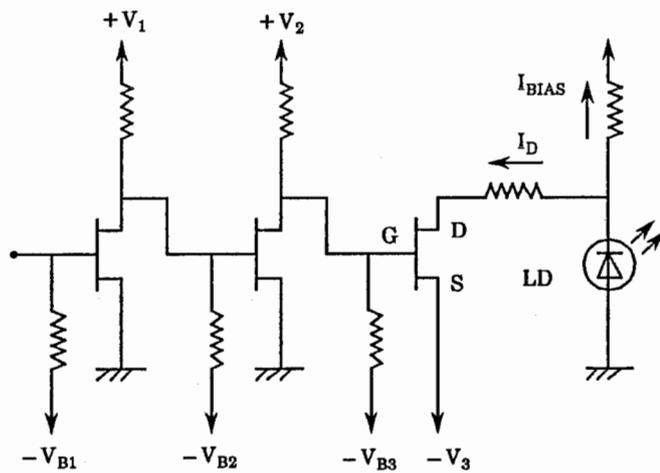


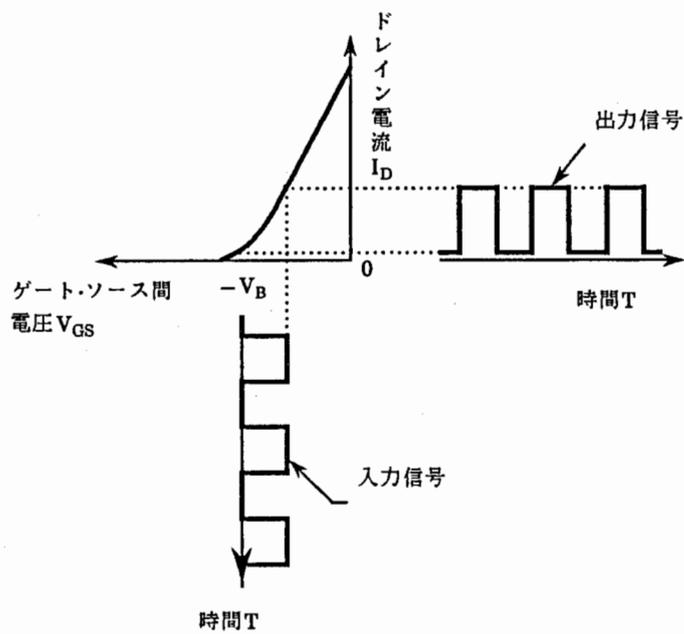
図5 E/Oヘッド内部  
[下部の中央部分がレーザダイオードドライバ、  
左端部分がLDモジュール]

接続構成であり、その回路図とFETの信号入出力関係を図6に示す。使用したFET(型名:NE900275)は、マイクロ波/準ミリ波帯を用いた衛星通信システム(周波数:2~18GHz)の最終段電力増幅器等に用いる為に開発されたデバイスである。

ドライバは、LD注入バイアス電流と変調信号(NRZ)のpeak-to-peak電流をそれぞれ独立に調節できる構成となっている。



(a) 回路図



(b) FETの信号入出力関係

図6 レーザダイオードドライバの回路図とFETの信号入出力関係

復調器のO/EヘッドにはSi-APDとプリアンプが納められており、APDの逆バイアス電圧は手動で制御でき、さらに復調ビット誤り率がほぼ最小になるような自動制御も行える構成となっている。O/E変換後の信号のAGC制御も自動/手動いずれでも行える。クロックの位相は可変でき、ビット誤り率が最小となるように設定する。

本モデムと外部装置とはECLでインタフェースされており、また変復調器本体は19インチラックに収納できる。O/E、E/Oヘッドは共に空間伝送およびファイバ接続どちらにおいても実験できる構造となっている。なお、変調器本体内部には低出力(約2dBm)のLDが含まれており、360Mbps光変調波がファイバ出力できる。このLDを用いると、復調器単体の特性試験を行うことができる(以下、“内部LD”と呼ぶ)。

## 2.3 装置諸元

光変復調器の諸元を表4に示す。伝送ビットレートは360Mbps、設定可能な最大LDバイアス電流は550mA、NRZ信号の最大peak-to-peak電流は300mAである。光出力は使用するLDに依存するが、現在市販されている高出力LDを用いると変調時には平均100mW以上の光出力が得られる。

表4 試作した光変復調器の諸元

	変調器	復調器
電 気 的 仕 様	平均光出力 : 100mW以上	受光素子 : Si-APD
	波長 : 0.8 $\mu$ m帯	量子効率 : 83%
	伝送ビットレート : 360 Mbps	暗電流 : 0.16nA
	最大バイアス電流 : 550mA	過剰雑音指数 : 0.25
	最大信号電流 : 300mA(p-p)	プリアンプの入力 : 5.4pA/Hz <sup>1/2</sup>
そ の 他	符号 : NRZ	換算雑音電流密度 (at 180MHz)
	E/Oヘッド消費電力 : 14W (温度制御なし、平均100mW出力時)	バンド幅 : 200MHz O/Eヘッド消費電力 : 2W
そ の 他	E/Oヘッド重量 : 2.3kg (温度制御なし)	O/Eヘッド重量 : 0.36kg
	温度設定範囲 : 10~30°C	

復調器で使用したSi-APD(型名: NDL1202)の電気的特性は表4に示す通りである。ビット誤り率が最小となる最適な逆バイアス電圧は-185V程度である。受信フロントエンドアンプはトランスインピーダンス型で入力換算雑音電流密度は5.4pA/(Hz)<sup>1/2</sup>(実測値)である。

### 3. 光変復調器の特性

#### 3.1 変調特性

##### (a) 注入電流対光出力特性

図7は、2種類の市販のLD(ソニー社製ブロードエリア型とスペクトラ・ダイオード社製アレイ型、以下A-type, B-typeと記す)を用いた時の注入電流対光出力特性(I-L特性)を、CW時及び変調時に対して示したものである。変調時は、光出力、注入電流共に平均値を示している。CW時の最大光出力は200mWであり、変調時には、LDの破壊を防ぐ為に平均光出力は最大100mWまで測定した。バイアス電流は、LDのスレシヨルド電流近傍に設定してある。なお、本稿で示す実験結果においては、変調時のPN信号の周期は $2^{10}-1$ としている。さらにLDモジュール(図5の左端部分)とドライバとの間のケーブルの長さは2cm程度と図5の構成(同図の左側に見られるセミリジットケーブル)よりは短くしてある。

図7において同じ注入電流で比較すると、変調時の方が光出力が若干大きくなっているが、その原因としてLDのキャリア蓄積効果<sup>[8]</sup>が考えられる。

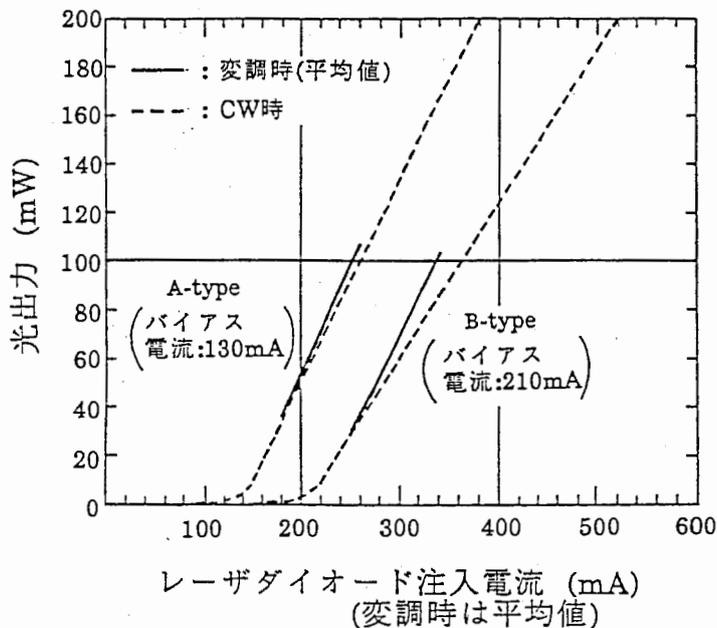
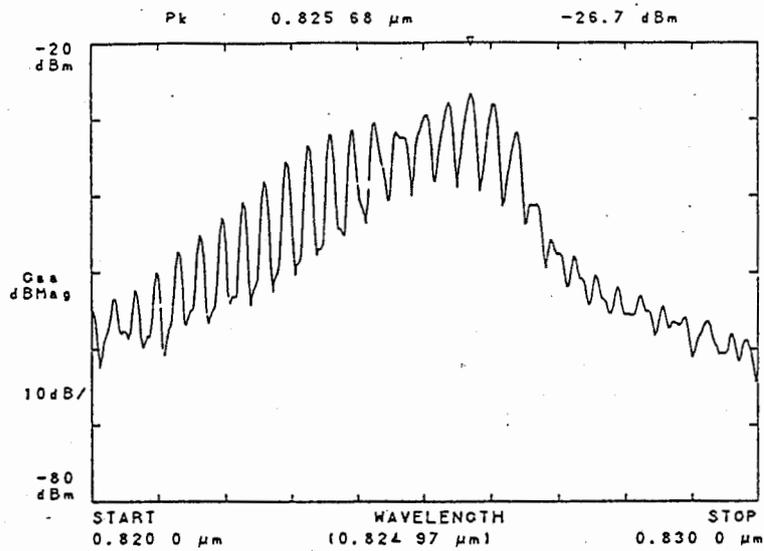


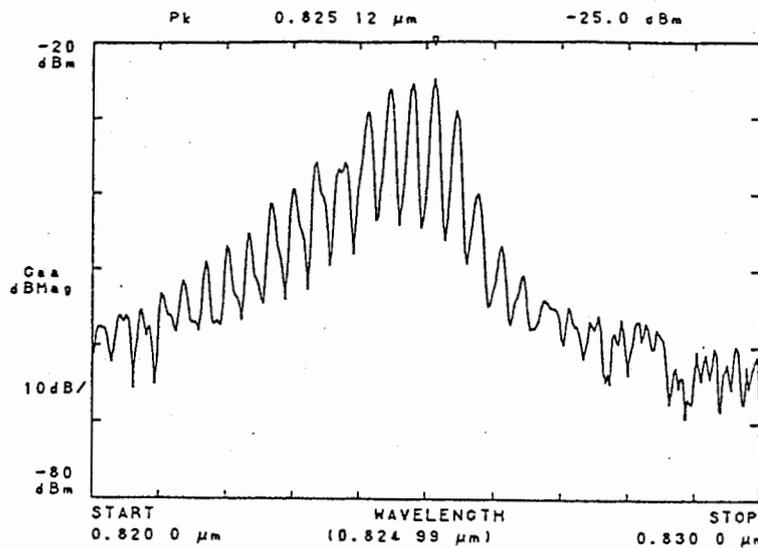
図7 市販のレーザーダイオードを用いた時の光出力対注入電流特性(変調時は平均値)

(b) 発振波長スペクトル特性

図8にB-type LDのCW時(200mW)及び変調時(100mW平均)の発振波長スペクトル特性を示す。この特性は、空間放射されたコリメート光をレンズにより集光し、ファイバ内に入力した後に測定している。両者共にマルチモード発振を行っている



(a) CW時(光出力: 200 mW)



(b) 変調時(平均光出力: 100 mW)

図8 高出力LDの波長スペクトル特性  
(B-type LD)

ている。ここには示していないが、出力を増加させるにつれて波長が高くなる傾向が見られ、例えば変調時において、ピークパワーの波長は、出力50、75、100mWに対してそれぞれ、0.82501、0.82507、0.82512 $\mu\text{m}$ である。なお、A-type LDの発振中心波長は約0.795 $\mu\text{m}$ であり、B-typeと同様にマルチモード発振を行っている。

### 3.2 復調特性

#### (a) 信号アイパターン特性

図9に、復調器O/Eヘッド出力及び変調器LDドライバ最終段の信号アイパターン

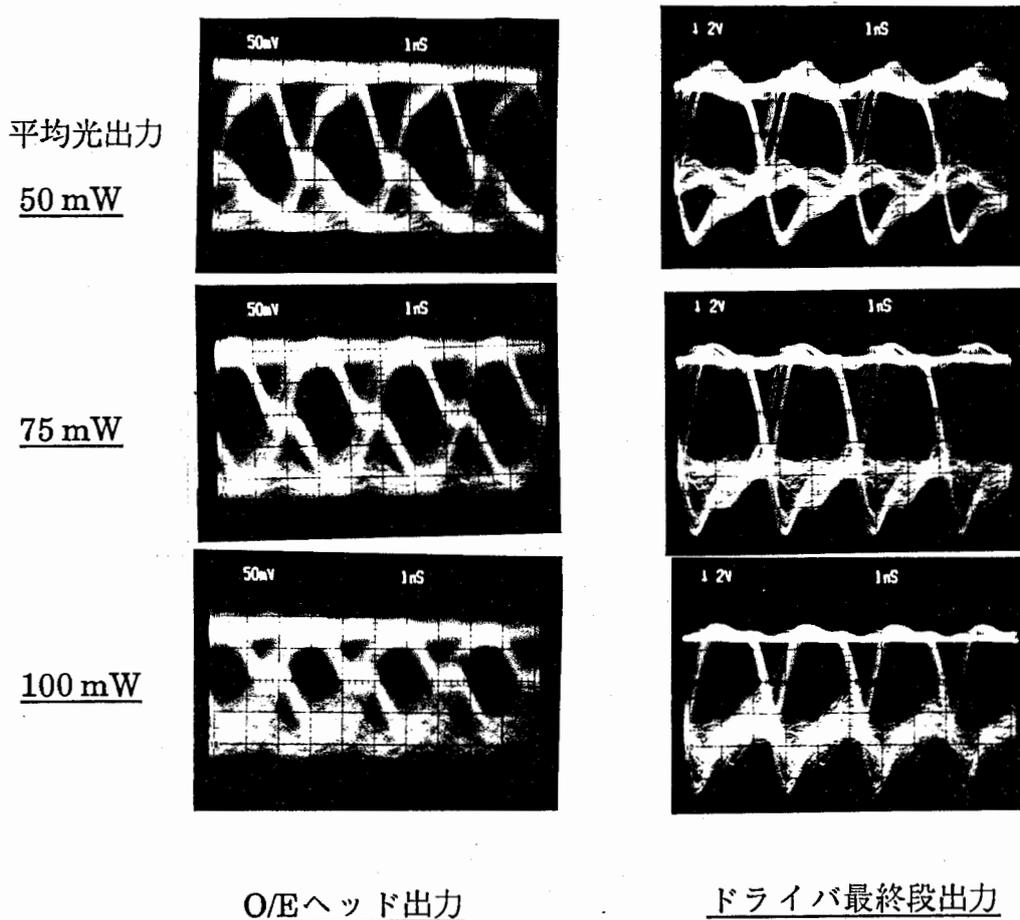


図9 信号アイパターン特性  
(APD入力電力：-30dBm、B-type LD)

ンを示す(注:オシロスコープによる測定の為、電流波形ではなく電圧波形)。また、参考の為、内部LDに対するO/Eヘッド出力波形を図10に示す。

図9より明らかなように、出力を増加させるにつれて、O/Eヘッド、ドライバ出力共に波形が歪み、アイの開きが小さくなる。特に、図9のO/Eヘッド出力の立ち下がり部分では、低出力では比較的真っ直ぐに下がっているが、高出力では一度一定値になった後に下がる現象が見られる。その理由の1つとして、ケーブルのインダクタンス成分とLDのキャパシタンス成分により、インピーダンス不整合が生じていることが考えられる。特にケーブルが長くなるとその影響が顕著になる。従って、LDとドライバを直結すれば、アイパターンはここに示した特性よりも改善されることが考えられる。

#### (b) 復調ビット誤り率特性

図11に高出力LD(A-, B-type)及び内部LDを用いた時の復調ビット誤り率(BER)特性を示す。高出力LDの特性は空間放射のコリメート光をレンズで集光した後にファイバ内に入力し、次にO/Eヘッドにファイバ接続して測定を行っている。図11において、(a)はLD注入バイアス電流とLDの発振スレシヨルド電流とをほぼ

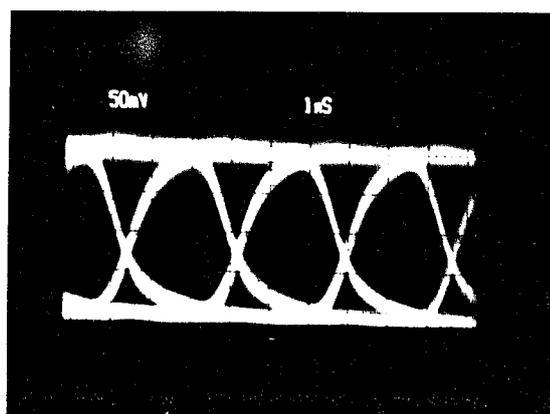


図10 内部LDを用いた時のO/Eヘッド出力信号アイパターン (APD入力電力:約-30dBm)

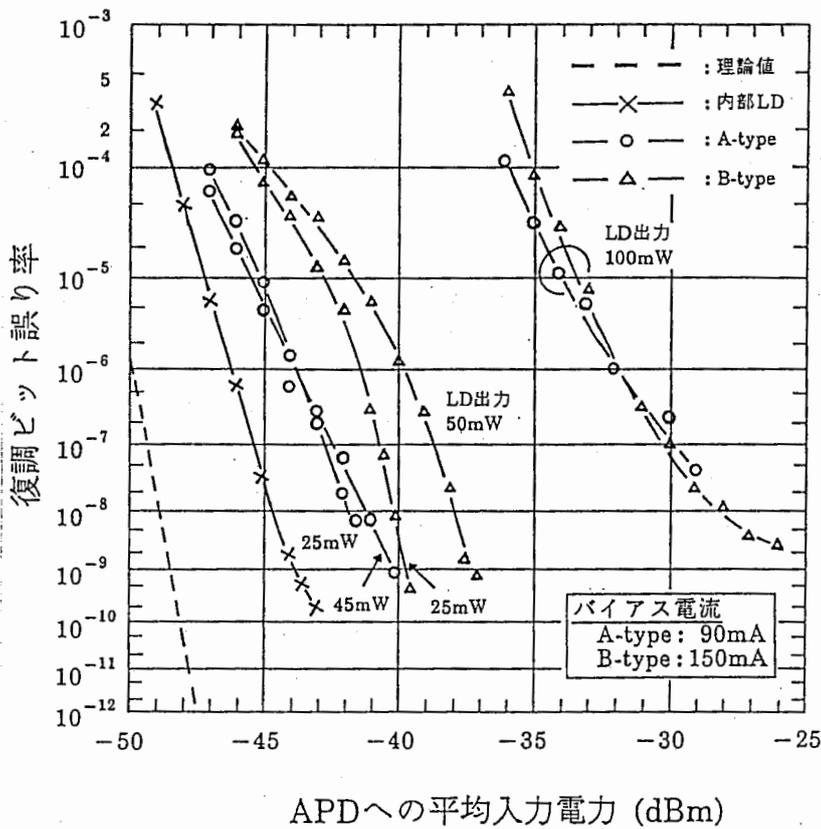
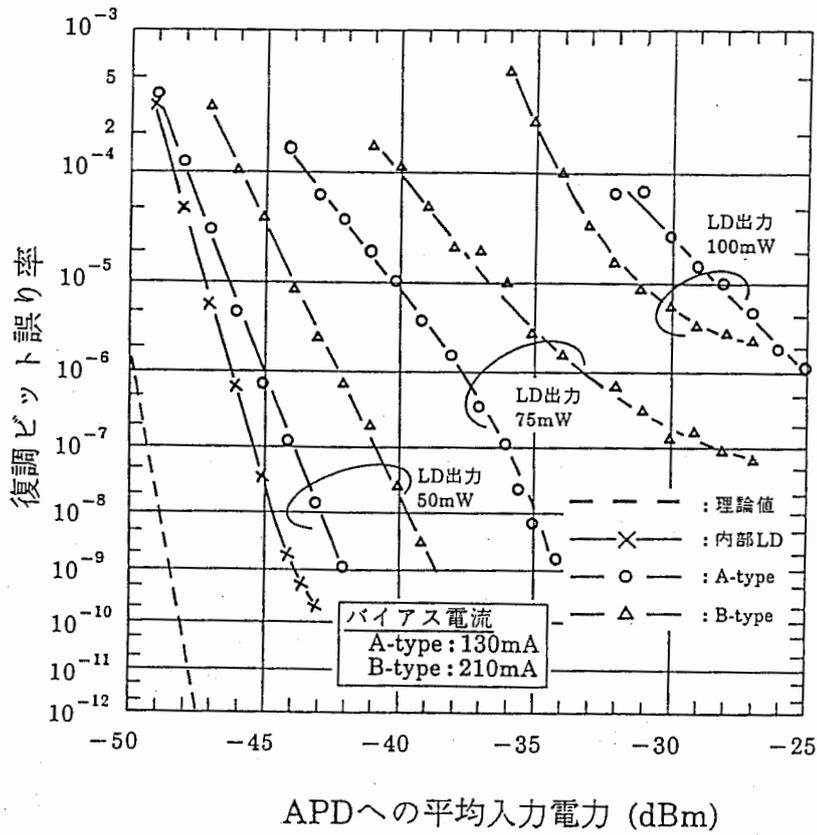


図11 復調ビット誤り率特性

一致させた場合、(b)はバイアス電流がスレシヨルド電流より低い場合である。横軸はAPD受光面への入射電力である(ファイバ出射端とAPD受光面との間で1.1dBのパワーロスがある)。これらの特性は全て、BERが最も小さくなるようにAPDの増倍率、AGCアンプのゲイン、判定の為のクロック位相を調整した場合の測定値である。

表4に示すAPDのパラメータに対するBERの理論計算値を、破線で示す(増倍率は100)。BERとして $10^{-9}$ を得る為のAPD入力電力は、計算値では $-48.4\text{dBm}$ である。内部LDを用いた場合、BER  $10^{-9}$ を得る為に必要なAPD入力電力の実験値は $-44\text{dBm}$ であり、理論値との差は4.5dB程度である。

図11において、高出力LDに対する特性について以下の特徴が見られる。

- ① LD出力が大きくなると、BER特性は劣化する。アイパターンのアイの開きが小さくなる為である。
- ② バイアス電流とスレシヨルド電流を等しくした場合[図11(a)]、高出力動作時にはBERの飽和現象(一定値に漸近する現象)が見られる。
- ③ 図11(a)のA-typeにおいてLD出力50mWの場合、内部LDの特性に比べた時の劣化は、BER  $10^{-9}$ において2dB程度である。
- ④ BER特性はバイアス電流の設定に依存する。50mW出力時では、(b)よりも(a)の設定のほうがBER特性は良好である。

LD出力が100mWの場合、例えばBER  $10^{-7}$ を得る為に必要なAPD入力電力は内部LDに対する電力よりも15dB以上も高くする必要があり、劣化が大きい。ドライバとLDを直結させ、またLDバイアス電流の最適化を行えば特性は改善される可能性があり、検討を進めていく必要がある。

## 4. 今後の検討課題

本節では試作結果を基に、光強度変調器の高出力・高速化、復調器の高感度化等の今後の見通しと検討課題について述べる。

### 4.1 光強度変調器の高出力・高速化

本レーザダイオード駆動回路に用いたFETの飽和ドレイン電流は約450mAである。図6の回路を基本として、駆動回路最終段を平行構成とすると大電流化が可能となる。平行にできるFETの個数は最大3個までと考えられるので、変調信号のpeak-to-peak電流は1000mA程度までは大きくすることができると考えられる。例えば、A-typeのLDのI-L特性(図7)が200mWを越えてそのまま高出力まで直線的に伸びると仮定した場合、この電流値は平均光出力400mW程度に相当する。この場合、放熱対策が重要になると考えられる。

高速化に関しては、本装置で用いているGaAs FETではさらに高くすることができ、2Gbpsまでは可能と考えられる。但し、高速化を行うにつれてLDとドライバとの間のインピーダンス不整合の影響が顕著になる為、その対策も同時に検討していく必要がある。

従って、光強度変調器の高出力化と高速化を図ろうとした場合、実装上の問題点は多くあろうが、2Gbps、平均光出力400mW程度に対するハードウェアは、現状技術の延長で実現できると考えられる。

### 4.2 復調器の高感度化

高感度の受信回路を実現するためには、(a)低雑音のフロントエンドアンプの開発、(b)低雑音APDの開発、等が必要である。ここでは、ビットレートは360Mbpsに固定し、高感度化の可能性について述べる。

現在、フロントエンドアンプの低雑音化は長波長帯を用いたファイバシステムにおいて検討されている。それらの結果を見ると、周波数200MHz程度の比較的低い周波数ならば、入力換算雑音電流密度( $i_{eff}$ )として $3\text{pA}/(\text{Hz})^{1/2}$ 程度の特性が得られている。本モデムの $i_{eff}$ は $5.4\text{pA}/(\text{Hz})^{1/2}$ であるから、長波長帯と短波長帯とで

は使用するAPDが異なるものの、2dB程度の感度改善が期待できる(熱雑音が支配的と仮定)。

なお、Si-APDの技術はすでに成熟しており、ビットレート360Mbps程度では、APDのデバイス技術の改善による受信感度の向上は殆ど望めず、それよりも低入力容量のAPDやFETの選別、ハイブリッド実装技術の改善等が今後の課題であると考えられる。

### 4.3 光PPM変復調器

試作した光変復調器は、NRZのオン・オフ・キーイング(OOK)を採用している。欧州宇宙機関(ESA: European Space Agency)では、光ISLに適用する変復調方式として4値PPM(Pulse Position Modulation)を候補として挙げている。ここでは、我々の試作した装置を参考にして、4値PPMモデムでどの程度の特徴が得られるか検討する。

試作したモデムの信号帯域幅とピーク光電力をPPMモデムに置き換えると、200Mbps、50mW平均光出力の装置化は可能であると考えられる。文献[9]の検討結果によれば、OOKとPPMの平均電力を同じにした場合(ピーク電力については、PPMがOOKの2倍)、PPMの方が1dB程度ビット誤り率特性において優れている。360MbpsのOOKではBER  $10^{-6}$ を得る為の光電力は $-46.3\text{dBm}$ であるから(図9参照、内部LDを用いた場合を想定)、PPMでは $-47.3\text{dBm}$ となる。従って、120Mbps PPMでは帯域縮小効果を単純に入れると $-52\text{dBm}$ 程度となる。文献[9]では所要光電力を $-56\text{dBm}$ (BER:  $10^{-6}$ )と推定しているので、若干楽観的な計算を行っているように思われる。なお、PPMの特性がOOKを上回るのは、OOKの2倍のピーク光電力がPPMにおいて実際に得られるという条件のもとであり、この点については実験により実証していく必要がある。

## 5. あとがき

本レポートでは、光衛星間通信実験用に試作したビットレート360Mbpsの光変復調器について装置構成と諸元、変復調特性、変調器の高出力・高速化及び復調器の高感度化について述べた。本装置の最も重要な部分であるレーザダイオード駆動回路については、GaAs FETを用いて100mW平均光出力相当の電流駆動が行えることが明らかとなった。

現在市販の高出力レーザダイオードを用いた本試作装置の変復調特性は、我々の要求特性を十分に満足するものではない。しかし、現在のレーザダイオードの開発状況を考慮すると、要求を満足するデバイスの開発はそれ程遠くはないと考えられる。

本レポートは、昭和62、63年度に実施した試作・実験結果をまとめたものである。その後、高出力レーザダイオードを駆動回路に直結させた場合の変復調特性が調べられ、光ファイバシステムで使われる10 mW程度の出力の通信用レーザダイオードを用いた場合に比べ1~2 dBのシステム劣化に抑えられることが分かっている。即ち、高出力レーザダイオードを用いた高ビットレートシステムの光ISL適用性が明らかになっている。空間伝送特性を加味した検討が今後重要になると思われ、各種レーザダイオードを用いた変復調実験とともに、LDと光アンテナとの光学的インタフェース等についても検討を進めていくことが望まれる。

## 謝辞

本研究は、将来のインフラ・ストラクチャとして必要となると考えられる光衛星間通信システム実現を目指して行ったものである。本研究の機会を与えて頂き、また極めて重要かつ熱心な討論を行って頂いたATR光電波通信研究所社長古濱洋治博士に感謝する。また、貴重なご意見を頂いた無線通信第一研究室の諸氏に感謝する。特に、ビット誤り率特性の理論計算をして頂いた後藤光司研究員に深謝する。

## 参考文献

- [1] 安川、“光衛星間通信”、信学誌、Vol.71, No.5, pp.468-470 (1988年5月).
- [2] 荒木、樫木、稲垣、安川、古濱、“光ISL追尾・指向システムの2局間相互作用”、信学技報、SANE 87-23 (1987年9月).
- [3] Y.Furuhama, K.Yasukawa, K.Kashiki and Y.Hirata, “Present status of optical ISL studies in Japan”, SPIE Proceedings of Topical Meeting, 810, Hague, March, 1987.
- [4] E.L.Coffelt and T.H.Ebben, “Optical transceiver platform for laser communication experiments”, SPIE, Vol.616, pp.22-28, Jan., 1986.
- [5] H. Naito, M. Kume, M. Yuri, K. Hamada and H. Shimizu, “Non absorbing mirror-large optical cavity-BTRS high power laser diodes II,” Extended Abstracts, the 35-th Spring Meeting, 30p-ZQ-7, The Japan Society of Applied Physics and Related Societies, 1988.
- [6] M. Sakamoto and Y. Kato, “High-power (710 mW CW) single-lobe operation of broad area AlGaAs double heterostructure lasers grown by metalorganic chemical vapor deposition,” Appl. Phys. Lett. 50, 14, 6 April, pp. 869-870, 1987.
- [7] M. Kondo, T. Suyama, M. Hosoda, K. Takahashi, T. Hayakawa, K. Sasaki, S. Yamamoto, and T. Hijikata, “2.2 W CW operation in (111)-oriented quantum well lasers,” Extended Abstracts, the 35-th Spring Meeting, 30p-ZQ-11, The Japan Society of Applied Physics and Related Societies, 1988.
- [8] 末松、伊賀、“光ファイバ通信入門”、第6章、オーム社.
- [9] L.Frecon, J.C.Boutemy and E.Sein, “The use of optical intersatellite links for the European relay system”, SPIE, Vol.616, pp.49-68, Jan., 1986.