

レーザ・コマンド装置

斎藤成文*・藤井陽一**・野村民也・安田靖彦**
林 一雄†・梶谷光男†・高橋健一†・原 宏徳†

1. 緒 言

わが国最初の第1号科学衛星のコマンド系の検討ならびにレーザの宇宙開発への応用を目的としてレーザ・コマンド装置を開発した[1].

本装置は東京大学鹿児島宇宙空間観測所の科学衛星テレメータセンタ（送信側）から北西に約6 km 離れた国見平のコリメーションタワー（受信側）に変調した Ne-He レーザ光を送ってコマンドを伝送するものである。またアンサバック系として受信側で受信光をさらに変調して送信側に反射して送り返し、コマンドによる動作の確認を送信側で行なうことができるものである。

この装置は昭和41年夏現地に設置し、機器の動作試験、伝ぱん実験、連続ランニング試験などを行ない、結果として送信のコマンド系として約40 dB (opt) のマージン、またアンサバック系として約30 dB (opt) のマージンが得られほとんど雨や霧により視程が悪く先方が確認できない程度でも機器が動作することが判明した。

ここにシステム概要、装置の諸元、各機器の概要、特性、伝ぱん試験の結果などについて述べる。

2. システム概要

レーザ・コマンド装置の計画、立案についての意図は

1) ロケットまたは人工衛星に適用する通信方式を高感度化する PCM-PSK 方式と通信情報の誤り率の最小を期待する PN コード方式の実用化実験

2) レーザの宇宙開発におけるテレ・コマンドへの応用

にあり、昭和40年6月から検討を開始した。

また、設置場所および目的としてほぼ水平の見通しで、適当な距離、離れた二地点間のレーザによる遠隔制御ということで、第1, 2図に示すように、送信側を科学衛星テレメータセンタに置き、約6 km 離れた国見平山頂に受信側を設け 18 m パラボラのコレリメーションテスト用の機器の遠隔制御を行なうことにした。このローカル回線は無線伝送によることも可能であるが、ロケットまたは人工衛星用コマンドの搬送波を使用することは観測所内における実験に支障を与えるおそれがあり、また新たな周波数の電波申請に問題であるため搬送波

* 併任教授（東大生産研）

** 東大生産技術研究所

† 日本電気株式会社

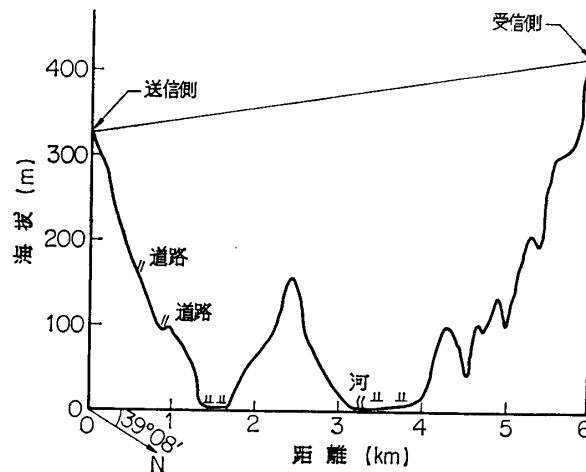


にレーザを用いることにした.

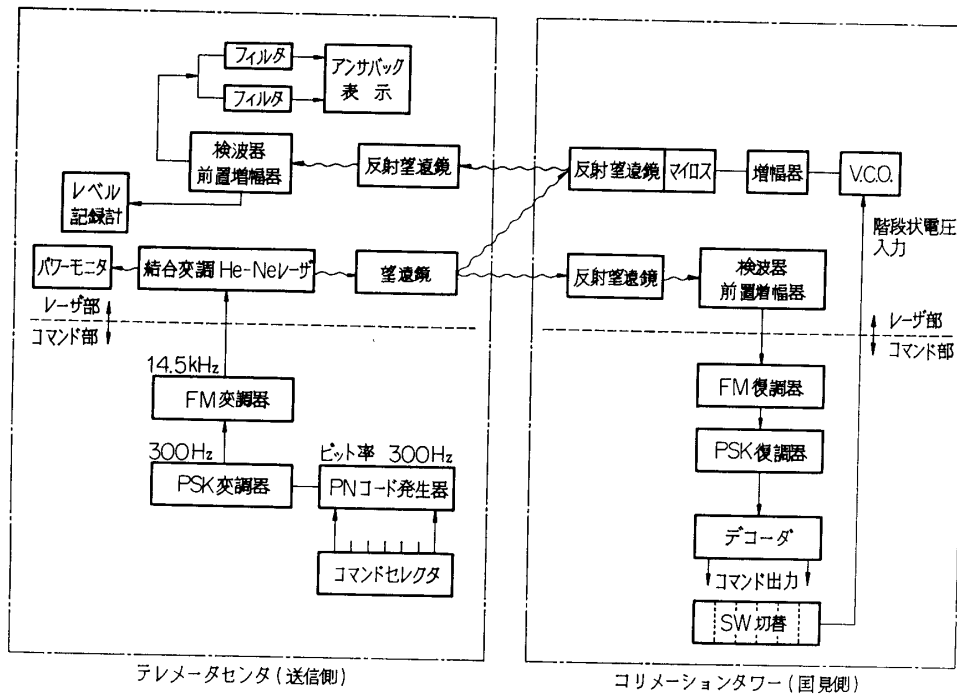
本装置のシステム系統図を第3図に示す。送信部はコマンド指令にしたがって15ビットのPNコードをPSK変調、FM変調を行ない、この出力を増幅してNe-Heガスレーザ管の電源電圧を変調してレーザ光出力に振幅変調を行なっている。

レーザ光は送信望遠鏡で広げて送信され、受信点では約 1.2~1.5 m に広がるように調整されている。受信点では受信望遠鏡によって光を Si フォトダイオードに導き、その検波出力を増幅、FM 復調、PSK 復調を行なったのち、PN コードを復号選別して、リレー駆動を行なって、コマンド指令に応じたスイッチの切り替え操作を行なう。

アンサバックシステムとしてはマイロス (MIROS: Modulation Inducing Retrodirective



第 2 図 伝ぱん路の断面



第 3 図 システム系統図

Optical System) と称する PZT を利用した干渉計によって入射光を振幅変調して送信点に反射光を送り返す方法をとっている。マイロスの機構は後述するが、コマンド出力に応じて決められた直流電圧を V. C. O. に印加し、V. C. O. の発振出力をマイロスの PZT に印加して入射光を振幅変調して送り返す。

マイロスからの反射光は送信側で望遠鏡により集光して光電子増倍管で検出する。受信信号はメカニカルフィルタで選択して表示装置に送られる。

3. 装置の諸元

第 1 表

コ マ ン ド 系	変調方式	PCM-PSK-FM-AM (レーザ光)
	PCM コマンド信号	15 bits からなる PN code (000100110101111)
	PCM ビット率	300 bits/sec (NRZ)
	PSK 搬送波	300 Hz
	FM 副搬送波	14.5 kHz (± 450 Hz)
	FM 副搬送波の変調度	1
	主搬送波	6328 Å (Ne-He レーザ光)
ア ッ ク サ 系 バ	主搬送波の変調度	35%
	変調方式	FSK-AM (レーザ光)
	FSK 周波数	6.85, 7.05, 7.25, 7.45, 7.65 7.85 kHz の 6 種類
	AM 方式	マイロスによる

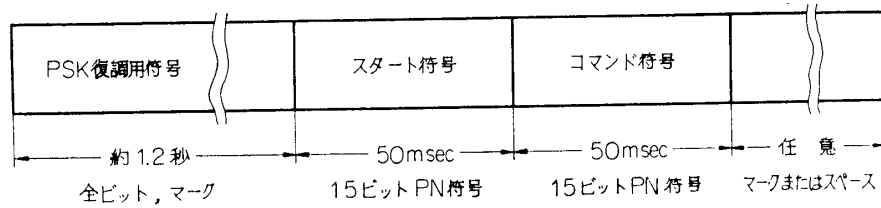
第 2 表

コ マ ン ド 系	レーザ送信機	レーザ管 送信出力 送信望遠鏡	対物レンズ有効径 倍 率 反射率	GLT-719 約 7 mW 78 mm ϕ 20 100% および 98%
		レーザ共振器用ミラー ビームの広がり 視準望遠鏡	対物レンズ有効径 倍 率 視 界	0.2 m rad 58 mm ϕ 25 1°30'
	レーザ受信機	検知器		Si フォトダイオード LSD-39
		受信望遠鏡	対物レンズ有効径 焦点距離	250 mm ϕ 400 mm
			視 野	5 m rad
		視準望遠鏡	対物レンズ有効径 倍 率	58 mm ϕ 25
			視 界	1°30'
		焦点監視用ファインダ	倍 率	14.4
		前置増幅器	入力インピーダンス 周波数帯域 入力最小レベル 出力電圧	約 200 K Ω 14.5 \pm 1 kHz 約 -100 dbm 約 1 V

アンサバック系	マイロス	マイロス変調器 マイロス 反射ビームの広がり	入力電圧 出力周波数 出力電圧 変調 変調度 PZT 凹面反射鏡有効径 " 焦点距離	2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 V の 6 種 上記電圧に対応し 6.85, 7.05, 7.25, 7.45, 7.65, 7.85 kHz 約 100V (P-P) PZT により AM 変調 50% VPZ-3A (5 枚組) 150 mm ϕ 400 mm 0.5 m rad
	マイロス受信機	検知器 受信望遠鏡 帯域幅 視準望遠鏡 マイロス復調器	対物レンズ有効径 焦点距離 視界 焦点距離 入力インピーダンス 最大感度 FSK 信号弁別方式 弁別用フィルタ帯域幅 アンサバック表示方式	光増倍管 RCA 8645 320 mm ϕ 1960 mm 全角 33' 17 \AA 55 mm 10 K Ω -115 dbm メカニカルフィルタによる 約 100 Hz ランプ点灯

第 3 表

コ マ ン ド 系	コ マ ン ド 送 信 機	構	成	符号部, 変調部, 電源部
		主要性能	信号方式 符号形式 FM 搬送周波数 PSK 搬送周波数 クロック周波数 FM 変調指数 PSK 変調形式 コマンド項目数 項目選択形式 符号送出形式 符号構成	PCM-PSK-FM 15 ビット PN 符号 14.5 kHz 300 Hz 300 Hz 1 180° 2 相変調 6 6 連プッシュボタンスイッチ プッシュボタンスイッチ手動 第 4 図参照
	コ マ ン ド 受 信 機	構	成	復調部, 復号部, 電源部
		主要性能	受信波形式 PSK 搬送波帯域幅 PSK 同期引込み幅 PSK 同期引込み時間 VCO 等価雑音帯域幅 FM 改善限界時の不動作率 " 誤動作率 出力接点形式 接 点 数 接点容量	PCM-PSK-FM 520 Hz~540 Hz 300 Hz±10 Hz 0.5 sec 以下 95 Hz 1×10 ⁻¹² 以下 1×10 ⁻²⁰ 以下 トランスファー 3 AC 125V, 2A, DC28V, 2A (抵抗負荷)
ア ク サ バ ッ ク 系	変調 マイ ロ ス	主要性能	出力電圧 (項目 1~6 指令時) 出力インピーダンス 出力電圧持続時間	2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 V 約 1~3 kΩ 約 8 秒



第 4 図 符号構成

4. 各機器の概要および特性

4.1 レーザ部

4.1.1 レーザ送信機

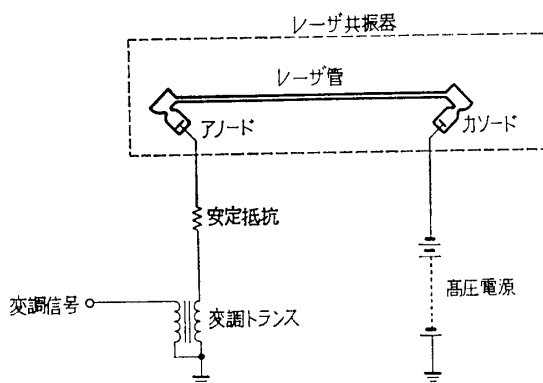
レーザ送信機はレーザ管 GLT-719 を使用したレーザ発振器、送信望遠鏡、視準望遠鏡、パワーモニタなどから構成されている。

レーザ発振器の出力は約 7 mW で、変調は電源変調により出力光を振幅変調する。出力光は送信望遠鏡により約 78 mm ϕ のビームに広げられて送信される。なおレーザ発振器の送信側の反対側に出る一部の光を Si 太陽電池で検出し送信光のパワーモニタとした。

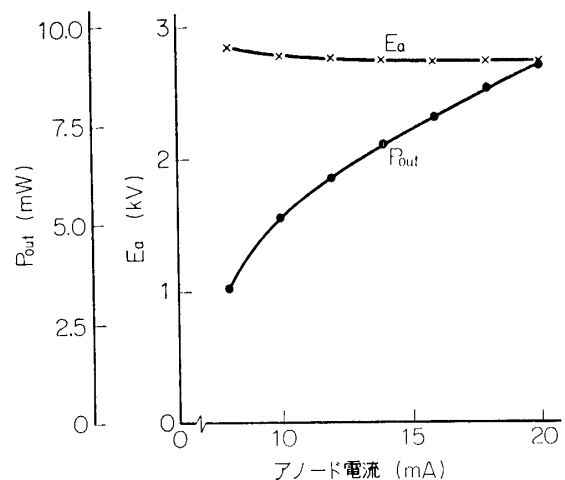
変調電源部の回路図、レーザ管 (GLT-719) の静特性、および変調特性をそれぞれ第 5, 6, 7 (a), (b) 図 に示す。

送信機はマイロス受信機とともに写真 1 (a) に示すように科学衛星テレメータセンタ内に幅 1.2 m, 奥行 1.9 m の鉄製架台の上に取りつけられている。この架台はコンクリートの床から強固なコンクリート脚で固定されている。

また送信ビームの方向調整は送信機全体を上下左右の位置調整 (6 km 先で 10 cm オーダ) を行なう微動機構の上にとりつけて行なった。

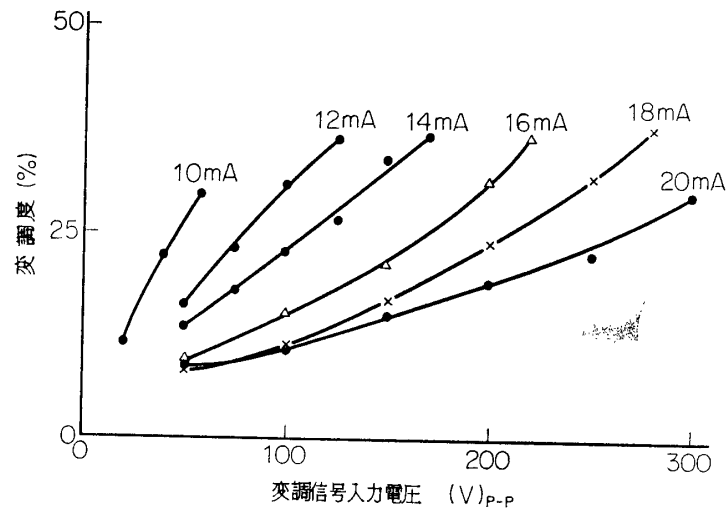


第 5 図 レーザ送信機の電氣的機能図



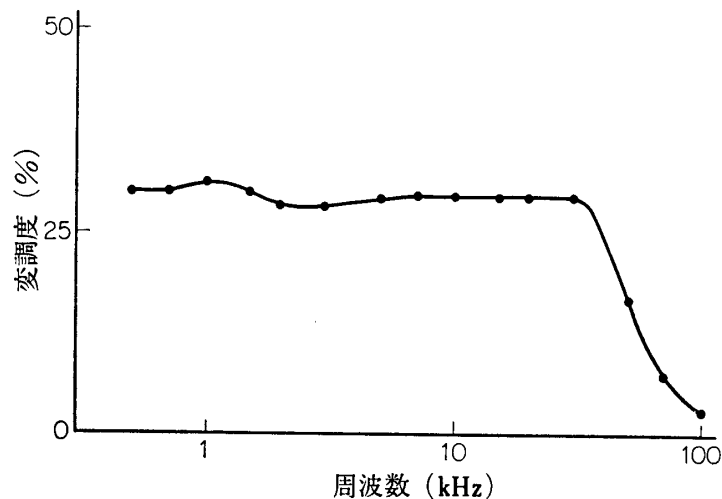
Ea : 管内電圧降下, Pout : レーザ出力

第 6 図 Ne-He ガスレーザ静特性



周波数: 14.5 KHz,
パラメータ: アノード電流

第 7 (a) 図 変調度対変調入力電圧特性



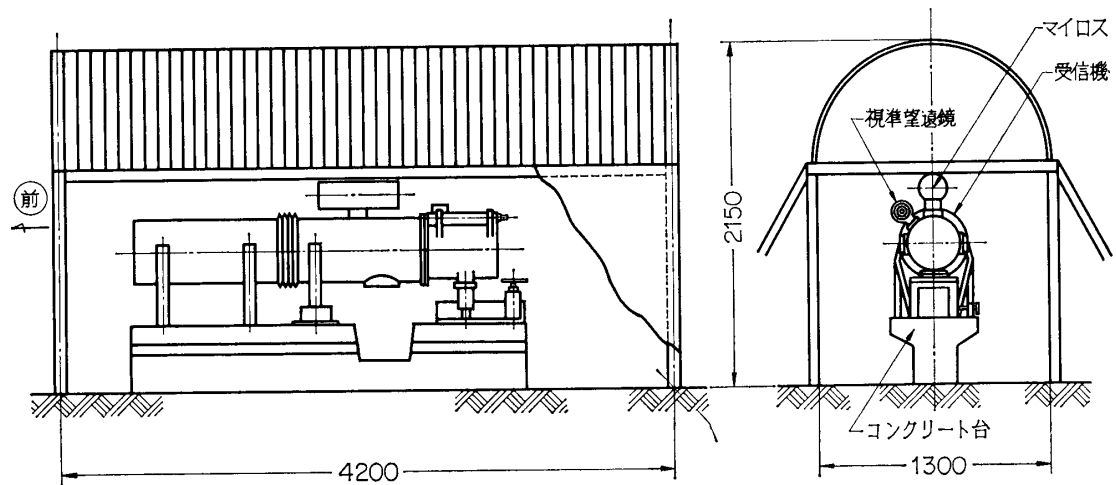
第 7 (b) 図 変調度対周波数特性

4.1.2 レーザ受信機

レーザ受信機は受信鏡, フォトダイオード出力を増幅する前置増幅器, 視準望遠鏡などから構成されている。

受信鏡の直径は 410 mmφ で入射光は外気とシャ断するブリュースター窓を通り, 凹面鏡および平面鏡で反射されシリコンフォトダイオード LSD-39 上に集光する。フォトダイオードの出力である 14.5 kHz の FM 波は増幅されて別項で述べるコマンド受信機に送られる。

受信鏡全体は送信機と同様に微動機構の上に設置されており, 受信機は次に述べるマイロ



第 8 図 レーザ受信装置 (国見平山頂)

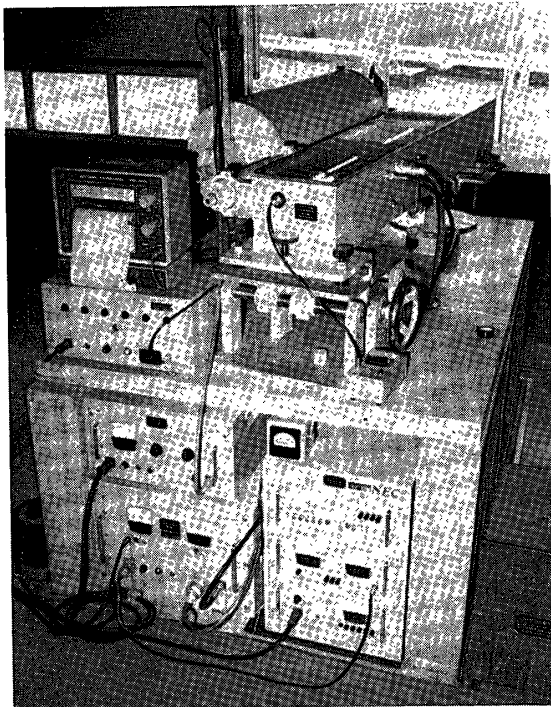


写真 1-(a) レーザ・コマンド送信部およびアンサバック受信部

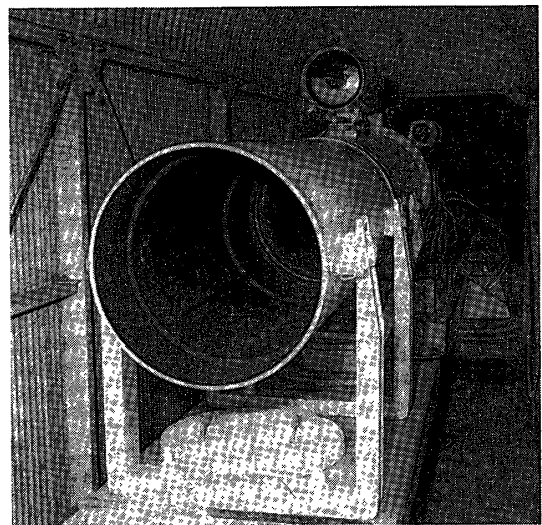
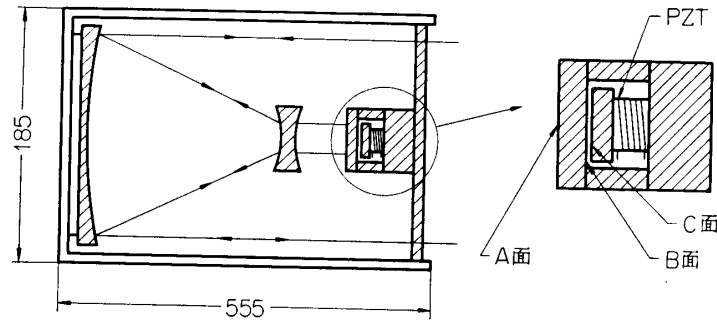


写真 1-(b) レーザ・コマンド受信部およびマイロス部

スとともに通常無人の国見平山頂の簡単な建屋内に收容されている。この模様を第 8 図に示すが、土台は強固なコンクリートでつくられ、建屋の屋根は吹き抜けのかまぼこ型で雨を防ぐ程度のものである。機器は防湿構造とする必要があり、必要か所はゴムパッキングを入れ気密構造とし、さらにシリカゲルを封入してある。写真 1 (b) にマイロス部まで含めたレーザー受信部の設置状況を示してある。



有効径 150 mm ϕ
 焦点距離 400 mm
 透過率 (at 6328Å) A面 100%
 B面 \approx 50%
 C面 \approx 50%

第 9 図 マイロスの構造

4.1.3 マイロス

マイロスは前述のレーザ受信鏡上に設置されており、送信光の一部はマイロスにも入射するようにセットされている。

マイロスは二つの平行な半透明鏡からなるファブリペロ共振器で反射率が二つの鏡の間隔によって変化することを利用して反射レーザ光に振幅変調をかけるものである。

構造を第 9 図に示すが C 面を含むエタロンはピエゾ (PZT) にはりつけられており、ピエゾに変調信号が印加される。ピエゾは 5 個の素子をつみかさね、各素子の偏移が加え合えられるように各電極を接続した。ピエゾの印加電圧は P-P 100 V で C 面が約 $\lambda/4$ (λ : レーザ光の波長) 移動する。

反射率 R は次式で与えられる

$$R = \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2})^2 - 4\sqrt{R_1 R_2}(\sin \phi)^2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2}(\sin \phi)^2} \quad (1)$$

ここで R_1, R_2 : それぞれ B 面, C 面の反射率

$$\phi = \beta L$$

β : 伝ぱん定数

L : 鏡 B 面, C 面の間隔

間隔 L を変化したとき反射率 R の変化幅が大きく (すなわち変調率が大きい), かつ変化が直線的であることが望ましいが計算結果 $R_1 = R_2 = 0.5$ ぐらいがもっともよく, この場合変調度約 80% 得られることが予想される。実測の結果 B 面, C 面の反射率約 50% の場合変調度はエタロンを 50 Hz で振動させた場合, 場所により多少異なるが 57~72% の値が得られた。

4.1.4 マイロス変調器

マイロスのピエゾに印加する信号を発生する部分で無安定マルチバイブレータ形電圧制御発振器 (V. C. O.), 低域濾波器および増幅器から構成されている。

6 項目のコマンドのうち送信側で, ある項目をコマンドし, 受信側で受信および処理が終

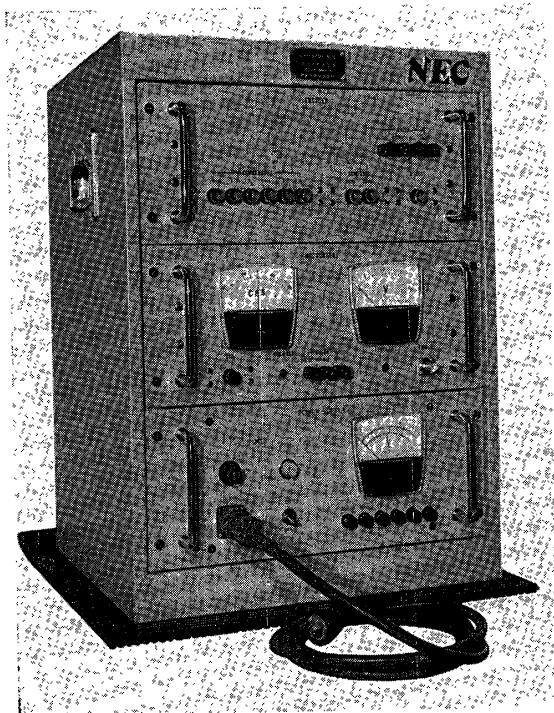


写真 2-(a) コマンド送信機

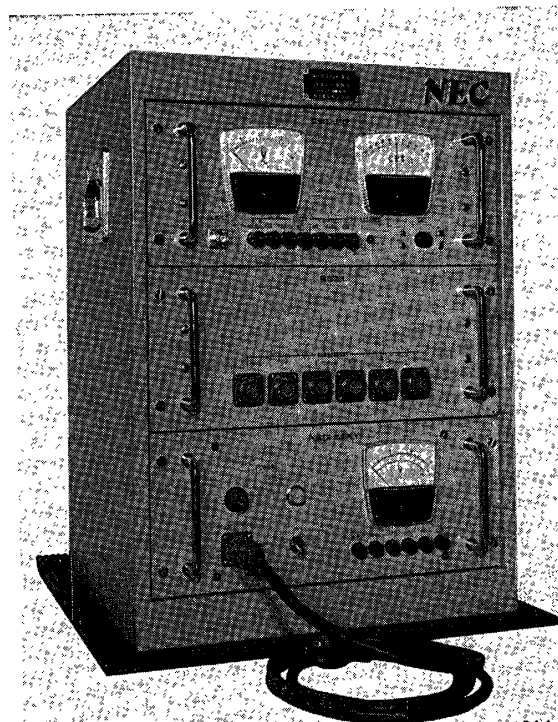


写真 2-(b) コマンド受信機

了すると、コマンド項目に対応して決められた直流電圧（2.0～4.5V の 6 種類）のうちコマンド項目に対応した電圧がコマンド受信機から送られ、このマイロス変調器の V. C. O. によって FSK 信号が得られ、この信号の周波数（6.85～7.85 kHz の 6 種類）はコマンドの項目を表わしていることになる。

4.1.5 マイロス用受信機

マイロスからの反射光を受信する受信機はカセグレイン型の受信鏡および光電子増倍管などから構成されている。

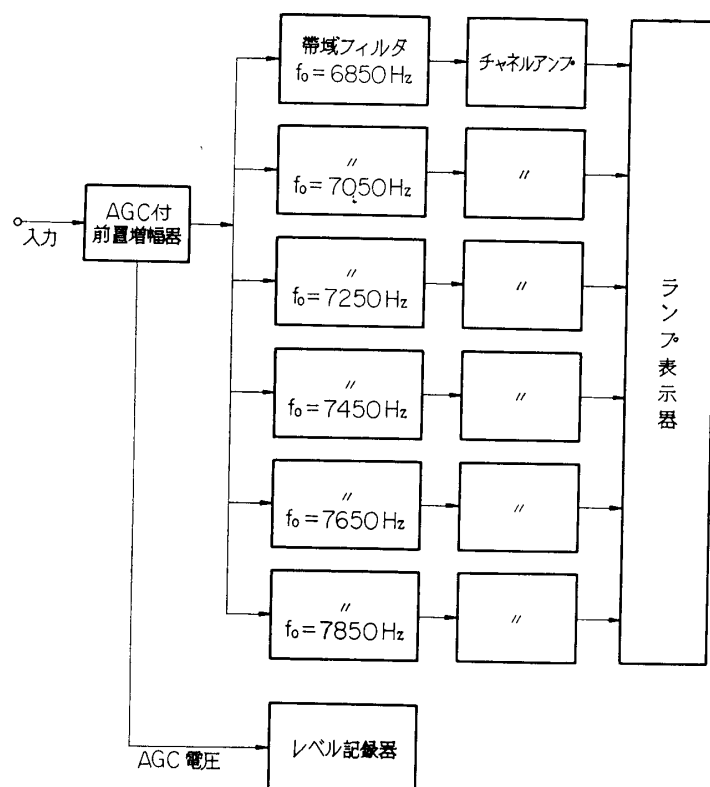
光電子増倍管の前に光学フィルタ（帯域幅 6328 \AA に対し 17 \AA ）をそう入し、とくにバックグラウンド雑音を低減する考慮を構造上払っている。また光電子増倍管に入射しない可視光は視準望遠鏡に入射して先方をとらえるような構造を有している。

4.1.6 マイロス復調器

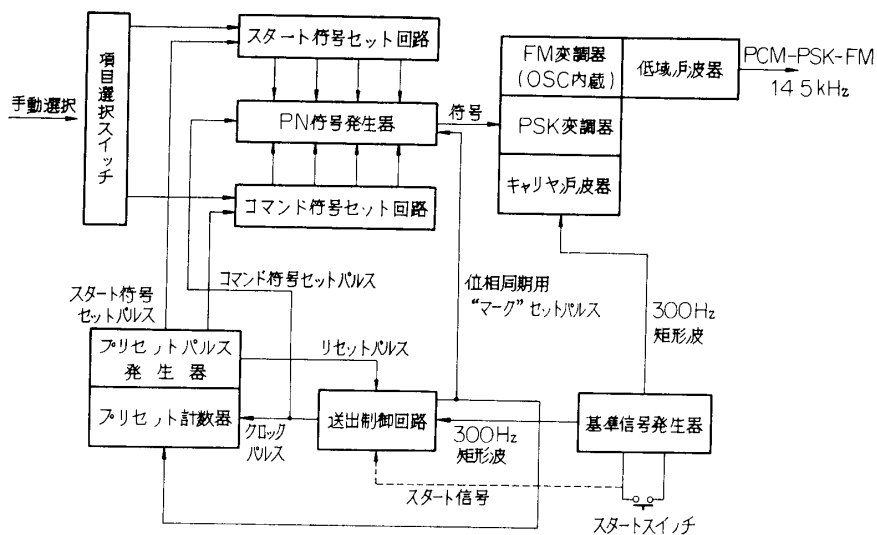
マイロスより返信された FSK 信号を光電子増倍管から受け増幅、復調、表示する部分で構成を第 10 図に示す。

AGC 付きの前置増幅器出力は FSK 信号の周波数を中心周波数とした 6 個のメカニカルフィルタに接続されており、ある周波数の信号が入力に与えられるとそれに対応したフィルタの出力に電圧が発生し、これを整流、積分したのち表示ランプを点灯し、送信したコマンド項目に対し正しく処理がなされたかどうかを送信側で確認することができる。

また、あとに述べるように伝ぱん特性を測定するため前置増幅器の AGC 電圧を外部的に取り出し、これをペンレコーダに記録するようになっている。



第 10 図 マイロス復調器の構成



第 11 図 コマンド送信機系統図

4.2 コマンド部

4.2.1 コマンド送信機

コマンド送信機は 15 ビットの PN 符号を所定の符号構成に組みこの符号で PSK-FM の変調を行なって出力とする機能を有する。この系統図を第 11 図に装置の外観を写真 2 (a) に

示す。この送信機は科学衛星テレメータセンタ内のレーザ送信機をのせた鉄製架台の下に置かれている。

送信機は符号を送らない場合には PSK 搬送波も出していないが、まずスタートスイッチを押すと、基準信号発生器から 300 Hz の矩形波がキャリア波器および送出制御回路に入る。

送出制御回路ではスタートスイッチで与えられるスタート信号から約 0.1 秒後に位相同期用“マーク”セットパルスが発生し、PN 符号発生器の出力を“マーク”にセットする。

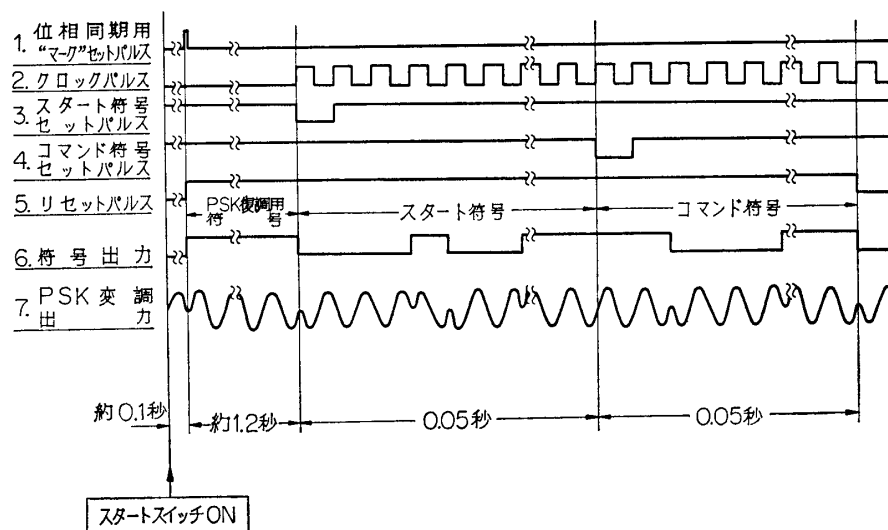
また同時にプリセットカウンタをリセットする。スタート信号から約 1.2 秒後には送出制御回路のゲードが開きクロックパルスがプリセットカウンタおよび PN コード発生器に与えられる。プリセットカウンタでクロックパルスを計数し、これをプリセットパルス発生器で 2 進 - 32 進の変換を行なう。プリセットパルス発生器はまず計数 1 でスタート符号セットパルスを発生し、計数 16 でコマンド符号セットパルスを発生する。なお、計数 31 でリセットパルスを出し送出制御回路のゲードを閉じることになる。

プリセットパルス発生器から出た各符号セットパルスはスタート符号セット回路ならびにコマンド符号セット回路にそれぞれ入り、あらかじめ設定された符号セットパターンに応じて PN 符号発生器をプリセットする。

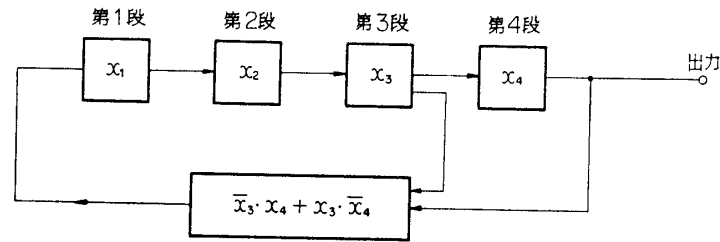
パタンの選択は項目選択スイッチで手動で選択でき、あらかじめ選択されているものとする。PN 符号発生器プリセットされた状態から動作を始め、出力に規定の PN 符号を発生する。

符号はさらに PSK 変調器に入り、キャリア波器で波された PSK 搬送波を変調する。PSK 変調のあとは電圧制御発振器で構成される FM 変調器で FM 変調を行ない、低域濾波器で高調波を除去し、出力としてレーザ変調電源に接続されている。

第 12 図に以上の動作をあらわすタイムチャートを示す。



第 12 図 コマンド送信機タイムチャート



第 13 図 PN 符号発生用シフトレジスタ原理構成図

次にコマンド送信機の主要構成回路とその特性について述べる。

(a) PN 符号発生器

PN 符号発生器は帰還ループを有する 4 段のシフトレジスタで構成され、シフトレジスタ各段の出力はおのの parity チェック関数で結合され入力に帰還されている。このレジスタの原理上の構成を第 13 図に示すが、これは PN 符号発生用として前記 parity チェック関数結合によるリニアレジスタのうち $2^4 - 1$ の最大周期を持つように設定されている。

(b) スタート符号セット回路およびコマンド符号セット回路。

前項で述べた PN 符号発生器を所定の時刻に強制的にセットするゲート回路およびセットパタンの組み合わせ回路で構成されている。

(c) プリセット計数器およびプリセットパルス発生器。

この回路は一般的な 5 段のバイナリカウンタとアンドゲートで構成されている。ここでもっとも重要なことはリセットが確実に行なわれることであり、これが誤ると符号の関係は完全に乱れ指令ができなくなる。したがってこの回路のリセットは計数器およびプリセットパルス発生器にはまったく関係なく行なわれるようになっている。

(d) 送出制御回路

この回路はスタートスイッチを操作した時刻から約 0.1 秒後に位相同期用の“マーク”セットパルス（プリセット計数器のリセットを兼用する）を発生し、約 1.2 秒後にクロックパルスのゲートを開き、クロックパルスを通し、符号が送出されたのち、リセットパルスによりクロックパルスのゲートを閉じる動作を行なう。

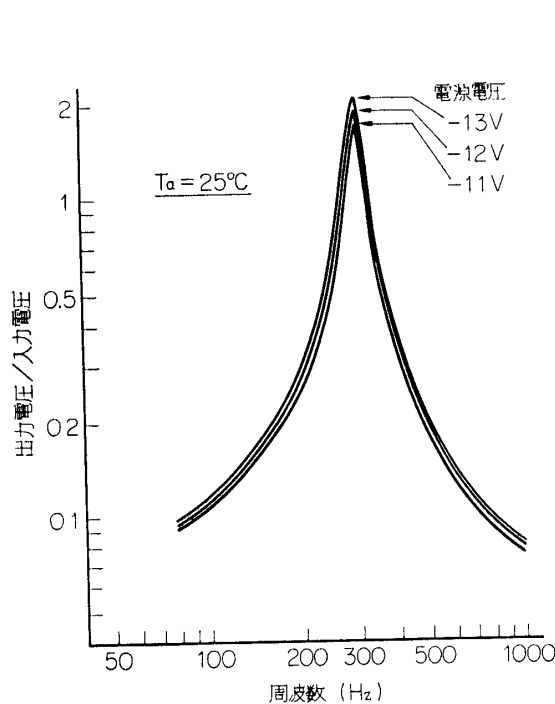
(e) キャリヤ濾波器

300 Hz 矩形波を濾波して正弦波とし、PSK 搬送波とするためにそう入されている。回路はツイン T 回路網を帰還ループにそう入した選択増幅回路を使用しており、周波数特性を第 14 図に示す。

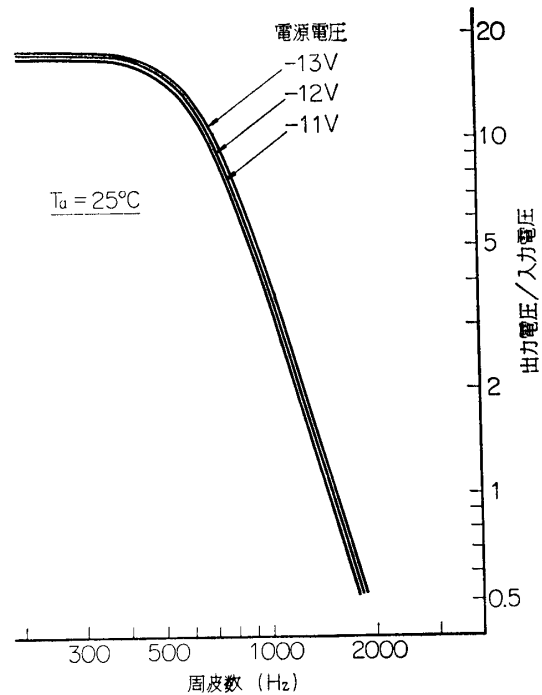
(f) PSK 変調器

PSK 変調器はこの種の変調に広く使用されている平衡変調形式で構成されている。なお、このあとにスペクトル制限の目的で低減濾波器がそう入されている。第 15 図に PSK と変調器の周波数特性を示す。

パラメータは電源電圧で $-12\text{ V} \pm 1\text{ V}$ の変動に対し、 $\pm 0.5\text{ dB}$ 以内の出力変動になっている。シャ断周波数は 600 Hz で PSK 変調のスペクトルを十分に通過させるようになっている。



第 14 図 キャリヤ濾波器周波数特性



第 15 図 PSK 変調器周波数特性

(g) FM 変調器および低域濾波器

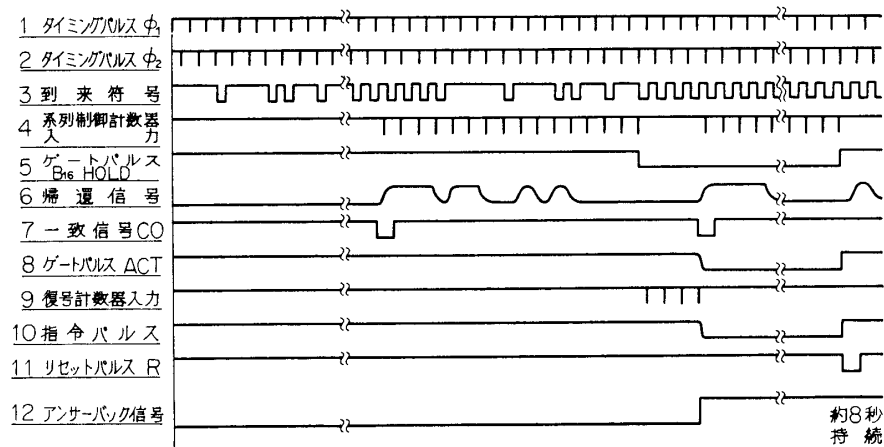
FM 変調器は電流制御形の電圧制御発振器で構成されている。この発振器は観測ロケット用の FM-FM テレメータ送信機の副搬送波発振器として多く用いられている回路を使用している。なお、14.5 kHz は前述の副搬送波帯における標準チャンネルの一つである。

4.2.2 コマンド受信機

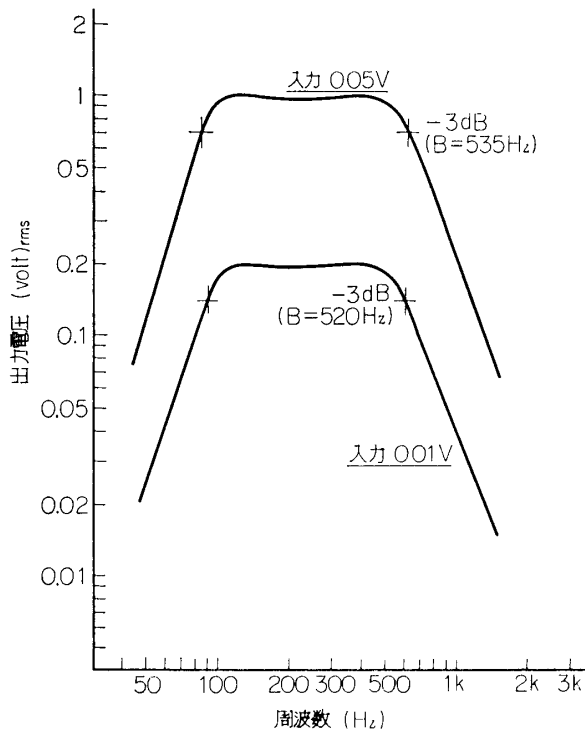
コマンド受信機は PSK-FM の復調を行なったのち、PN 符号を復号選別し、内蔵の自己保持形リレーを駆動して接点出力として出すと共に、選別した項目のコマンド出力をアンサバック系を通して送信側へ送り返すための信号を発生する機能を有する。この機能系統図を第 16 図に、装置の外観を写真 2 (b) に示す。この受信機は国見平のコリメーションタワーの下鉄箱の中に置かれ、レーザ受信鏡の収容されている近傍の建屋（第 8 図）との間はケーブルコードで接続されている。

コマンド受信機の入力は 14.5 kHz の PCM-PSK-FM 変調信号でまず FM 復調回路に入り振幅制限されたのち復調される。FM 復調後の出力信号は帯域濾波器で帯域幅制限されて 2 倍回路および符号検知回路に入る。2 倍回路、位相検波器、ループフィルタ、電圧制御発振器および 1/2 分周回路は PSK 搬送波の再生機能を果たすものである。

ここで得られた再生搬送波を符号検知回路に与えて PSK の復調を行ない符号を取り出す。送信機においては 1.2 秒間位相同期用として“マーク”を送っているのち、この間に復調された符号は“マーク”でなければならない。もし“マーク”でなく“スペース”があらわれ、これを長期間持続した場合は位相修正信号が 1/2 分周回路に与えられ再生搬送波の位相を逆転させる。復調された符号はレジスタ入力ゲードを通り 15 ビットシフトレジスタに



第 17 図 受信機復号動作タイムチャート



第 18 図 帯域濾波器周波数特性

は復号計数器, 15 ビットシフトレジスタおよびゲートパルス発生回路をリセットして全動作が終了する。

第 17 図に以上の復号動作をあらわすタイムチャートを示す。

次にコマンド受信機の主要構成回路とその特性について述べる。

(a) FM 復調回路

FM 復調回路はリミッタおよびディスクリミネータから構成されている。帯域幅制限はレーザに置かれているプリアンプでおこなわれ約 2 kHz の帯域幅である。

(b) 帯域濾波器

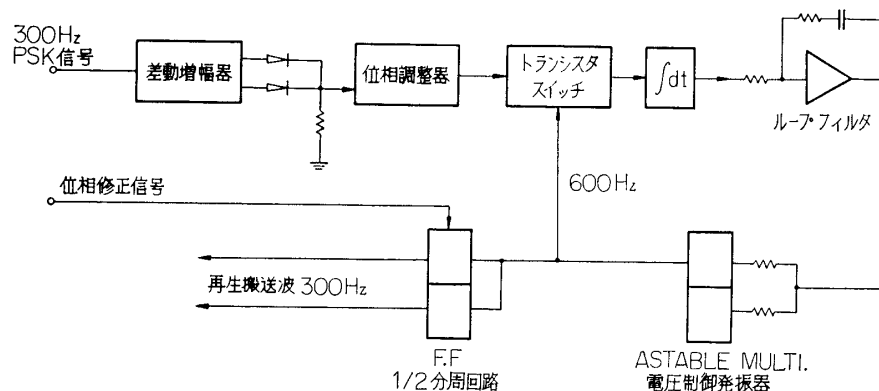
トランジスタエミッタフロー形 of 低域濾波器および高域濾波器を組み合わせて構成したものでその周波数特性を第 18 図に示す。

(c) PSK 搬送波再生回路

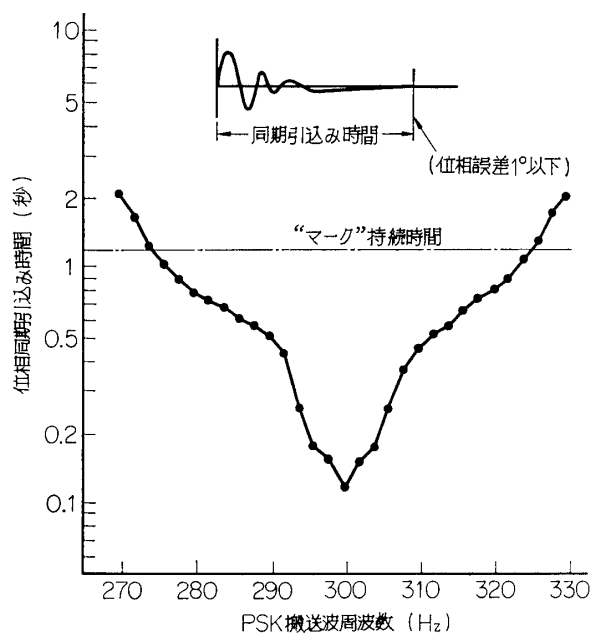
第 19 図に示すごとく 2 倍回路, 位相検波器, ループフィルタ, 電圧制御発振器および 1/2 分周回路で構成され, 符号の“マーク”が約 1.2 秒持続する間に PSK 搬送波を再生してその位相を“マーク”送信時の搬送波位相に一致させる。

符号の構成は最初に位相同期用の符号を置いているので検波方式はコヒーレント検波方式をとっている。

搬送波再生回路は符号の“マーク”が持続する間に搬送波の位相を正しくする必要があ



第 19 図 PSK 搬送波再生回路



第 20 図 位相同期引き込み時間
(電圧・制御発振器の自己発振周波数は 600 Hz)

る。第20図に搬送波が送られてから正しい位相の搬送波が再生されるまでの位相同期引き込み時間を示す。

(d) 符号検知回路

PSK 搬送波再生回路で再生した再生搬送波を用いて到来 PSK 信号を位相検波する回路，リセット積分器および符号整形回路で構成されている。

(e) タイミングパルス発生回路

2 個の単安定マルチバイブレータで構成され，再生搬送波の共役出力を使用して 16.7 m sec の間隔差をもつ 2 種のタイミングパルス ϕ_1 ϕ_2 を発生する。

(f) 復号器

復号器の動作は前に述べたが，これに使用されている論理回路は AND 回路，OR 回路，フリップフロップおよび 2 進

計数回路から構成されている。また PN パターン検知回路は第 21 図に示すごとく検知スレシヨルドを変えられるようにアナログ電圧比較回路が使用されている。

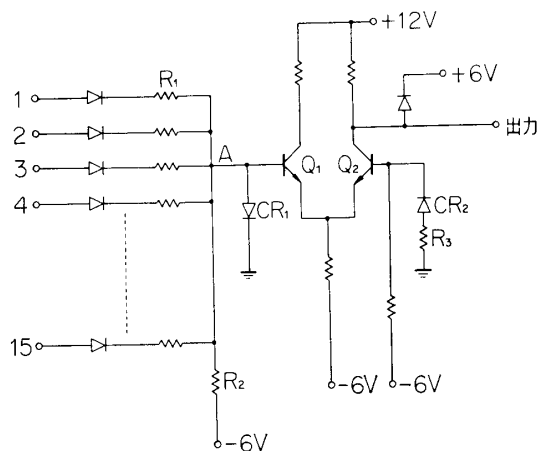
(g) アンサバック信号発生器

コマンド項目数 5 に対応して 6 種類の出力電圧を一定時間出すもので，この出力はマイクロ変調器の電圧制御発振器を駆動する。

5. 伝ぱん動作試験の結果および考察

5.1 伝ぱん試験

レーザ光によるコマンド系の場合，レーザ光の大気伝ぱんの状態がまず重要な問題とな

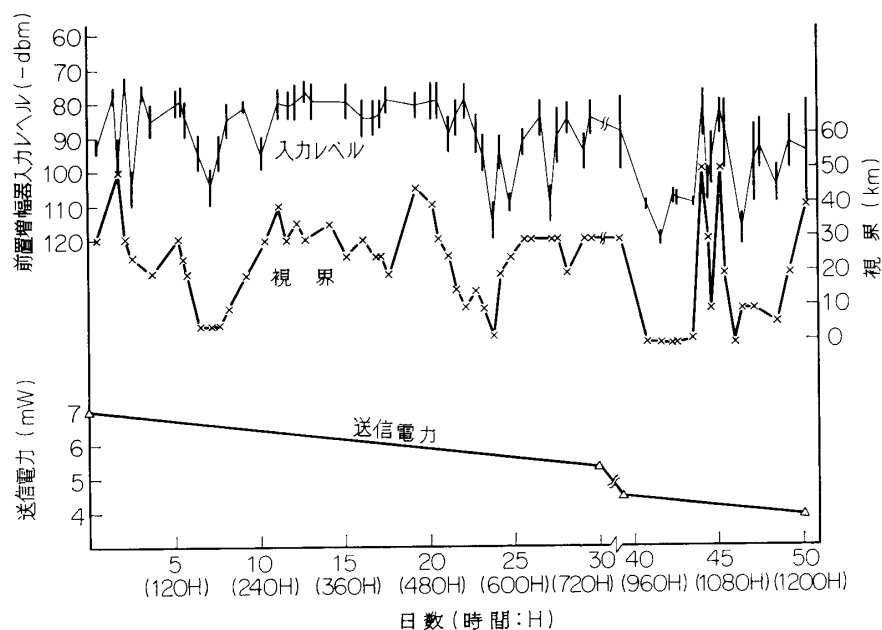


第 21 図 PN パターン検知回路

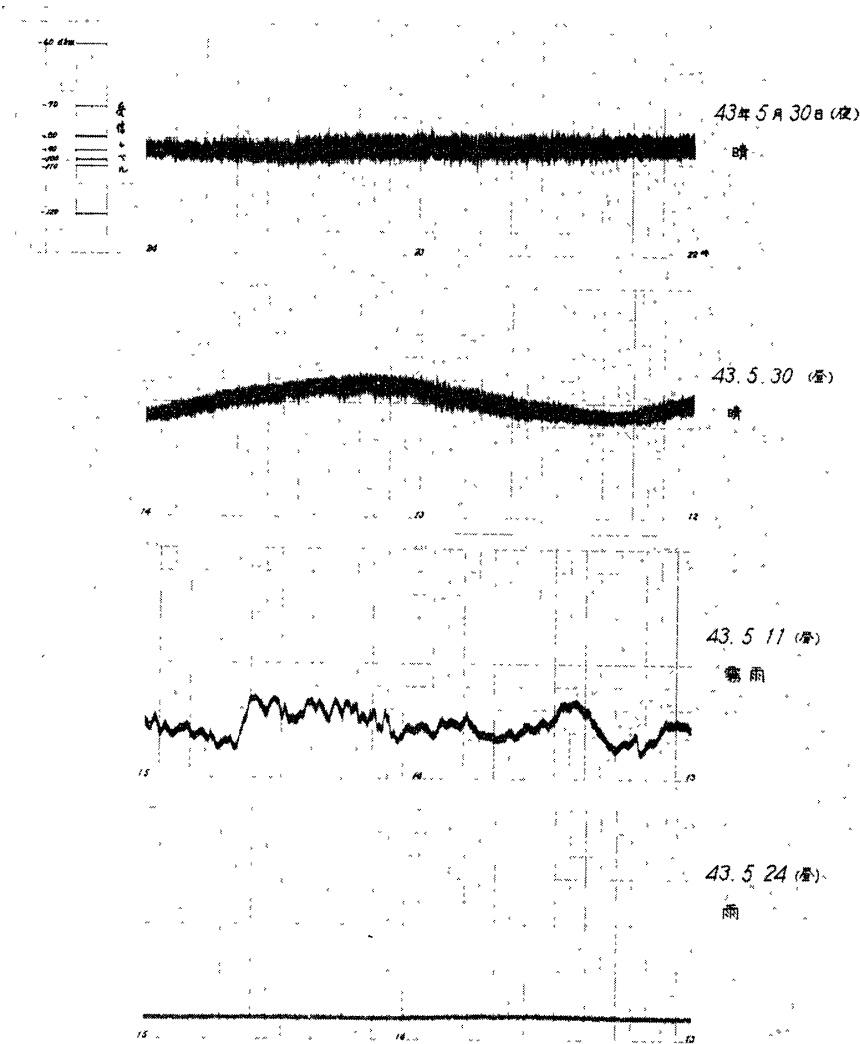
る。伝ぱんに大きく影響を与えるものに大気中に存在する粒子特に水滴による散乱，吸収による減衰，またガスによる吸収，さらに大気屈折率の乱れによるビームのゆらぎなどがある。

実際のレーザ光で減衰量 [3, 4]，ゆらぎによるビームのはずれ [5] などについてかなりの実験が報告されている。

本装置の伝ぱん路を第 2 図に示したが，ビームと大地が並行に走っていないため，日射による大地や建物の温度上昇による朝晩のビームに垂直な大気温度傾度は少なく，したがって朝晩ビームが動くことはほとんど観測されない。また大気屈折率の局所的な変動は 1 kHz 以下のところにあるので，本装置の変調方式として 300 Hz の PSK 信号で直接レーザ光を



第 22 図 入力レベル，視界，送信電力～連続動作時間



第 23 図 連続記録データ

変調しないで、14.5 kHz のサブキャリアに変換した後レーザ光を AM する方式とした。

伝ぱん特性については天候状態、視界、レーザ送信電力、受信入力レベルなどについて約 1200 時間昼夜連続して本装置は無調整のまま動作記録した、その結果を第 22 図に示す。受信入力レベルは第 3 図のシステム系統図における前置増幅器の入力を表わし送信光を受信側でマイロスで反射させ再び送信側に戻した折り返し伝ぱんの結果となる。これは 4.1.6 項で述べたマイロス復調器の前置増幅器 AGC 電圧を連続記録した。

視界と受信レベルの関係は正確には一致していないが、傾向はおおむね一致している。これは視界の正確な測定が困難なことや視界のみで伝ぱん損失が決らないことなどによると思われる。また時間の経過とともに受信レベルの減少する傾向は、送信出力の低下、光学系の光軸ずれなどによると思われる。

この試験により次項の検討とあわせて装置が通信不能となる状態は非常にまれであり、雨天時でしかも視界の悪いとき（約 2~3 km）以外は通信可能であることがわかった。なお、

記録計で連続記録した模様の一部を第 23 図に示す. この図に示す受信レベルは第 22 図と同じくマイロス復調器の前置増幅器入力における値 (dBm) である.

後述の 5.2.2 項の第 25 図において往復の許容伝ぱん損失 35 dB (opt) を条件のよい晴天時の値約 3 dB (opt) としたとき, フォトマル(RCA-8654)の最大検知入力から求めた前置増幅器入力の値は理論的には -53 dBm (sig) となる. 一方第 22 図および第 23 図に示す前置増幅器入力レベルはコマンドを送信していない(すなわちアンサバック信号のない)ときのものであり, このときの返信周波数は前置増幅器の帯域フィルタの帯域外にあり, アンサバック信号があり規定の周波数が返信されたときに比べ約 7 dBm (sig) 程度低い値を示している. かかる状態での実測された最大入力レベルは -68 dBm (sig) 前後であり, 前述した帯域のずれを補正すると実際には約 -61 dBm (sig) 前後が最大入力レベルとなっていることが知られる. この値は理論的に予想される -53 dBm (sig) の値と比べ約 8 dBm (sig) 程度低い.

5.2 伝送系 (レーザ) のマージン

5.2.1 コマンド系

コマンド系の光検知器としてフォトダイオードを使用しているが, この場合雑音源として熱雑音のみを考えればよく, 最小検知入力 P_{\min} は次式で与えられる.

$$P_{\min} = \sqrt{\frac{B \cdot NF \cdot CN}{1.5 \eta^2 \cdot m^2 \cdot R}} \times 10^{-19} \quad (2)$$

($T=300^\circ K$ の時)

ここで B : 帯域幅 1800 Hz
 NF : 増幅器の総合雑音指数 15 dB (sig)*
 CN : 搬送波/雑音比 10 dB (sig)
 η : フォト・ダイオードの効率 0.5
 m : 変調度 0.35
 R : フォト・ダイオードの等価抵抗 $2 \times 10^4 \Omega$

(2) 式よりフォトダイオードの所要最小光入力値は約 -51 dBm (opt)* となる.

光学系(第 4 表)の損失を考慮して, 各部のレベルダイヤグラムは第 24 図のごとく示される. したがって伝ぱん損失としては 46—2 dB (opt) 程度までは許容することができる.

実際に晴天時送信側で光学ニュートラルフィルタをそう入してコマンド不能までのマージンを求めると約 40 dB (opt) の値が実測され, ほぼ理論的値と一致する.

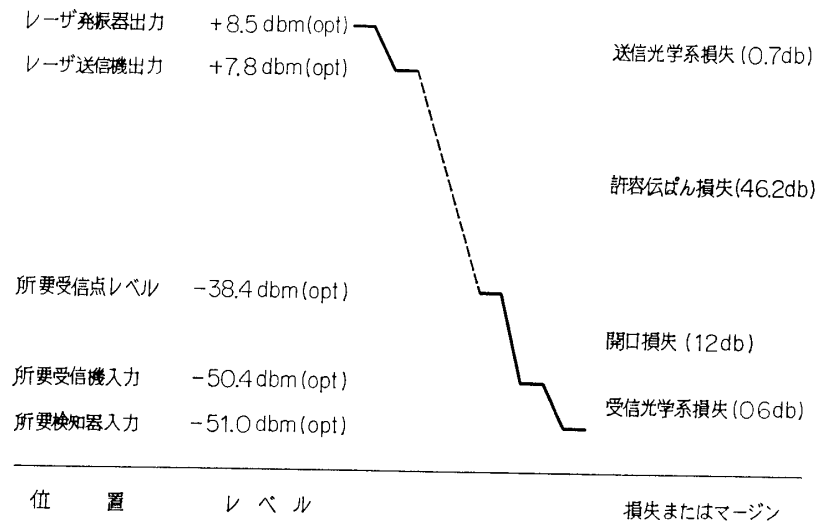
5.2.2 アンサバック系

アンサバック系 (マイロス系) の光検知器として光電子増倍管を使用しているが, この場合の雑音源としてショット雑音のみを考えれば, 信号電力 \bar{v}_c^2 と雑音電力 \bar{v}_n^2 の比は

$$\frac{\bar{v}_c^2}{\bar{v}_n^2} = \frac{m^2 \eta P_{so}^2}{8 \pi B f h^2 (P_{no} + P_{so})} \quad (3)$$

ここで P_{so} : レーザ光の入力電力
 P_{no} : バックグラウンドノイズの光入力電力

* 電気系における値に対しては (sig) を, また光学系における値は (opt) を付加することにより表わす.



第 24 図 コマンド系のレベルダイアグラム

第 4 表

	コマンド系	アンサーバック系
送信側の光学系損失	0.7 dB (opt)	0.7 dB (opt)
受信側の光学系損失	0.6	2.5
晴天時伝ぱん損失(送り)	1.5	1.5
” (帰り)		1.5
受信鏡の開口損失	12	19
マイロスの光学系損失		6
マイロスの開口損失		16.5
光軸はずれによる損失		3
合 計	14.8 dB (opt)	50.7 dB (opt)

B : 帯域幅

f : レーザ光の周波数

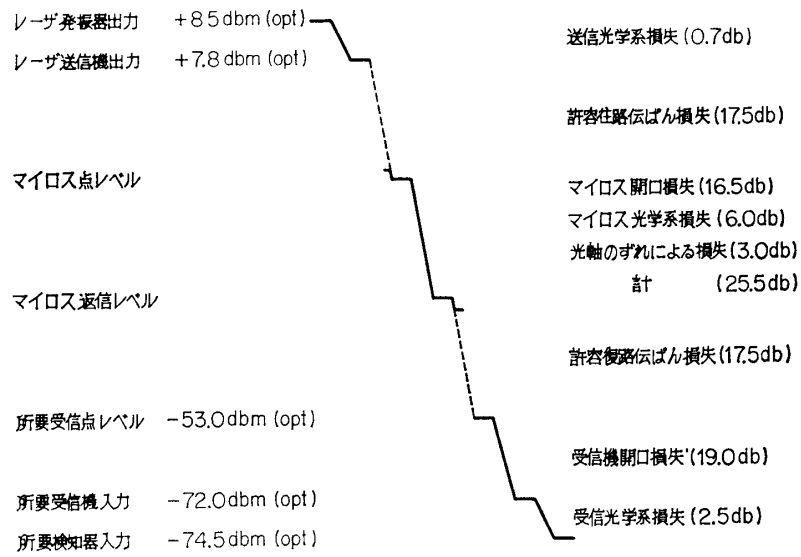
h : プランクの定数

レーザ発振器から光電子増倍管までの固定損失は第 4 表のごとく示されるので、光電子増倍管への最大入力電力として -42.2 dbm (opt) となり、 $m=0.5$, $\eta=0.05$, $B=100 \text{ Hz}$, $f=4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$, $h=10^{-34}$ とすれば (3) 式より

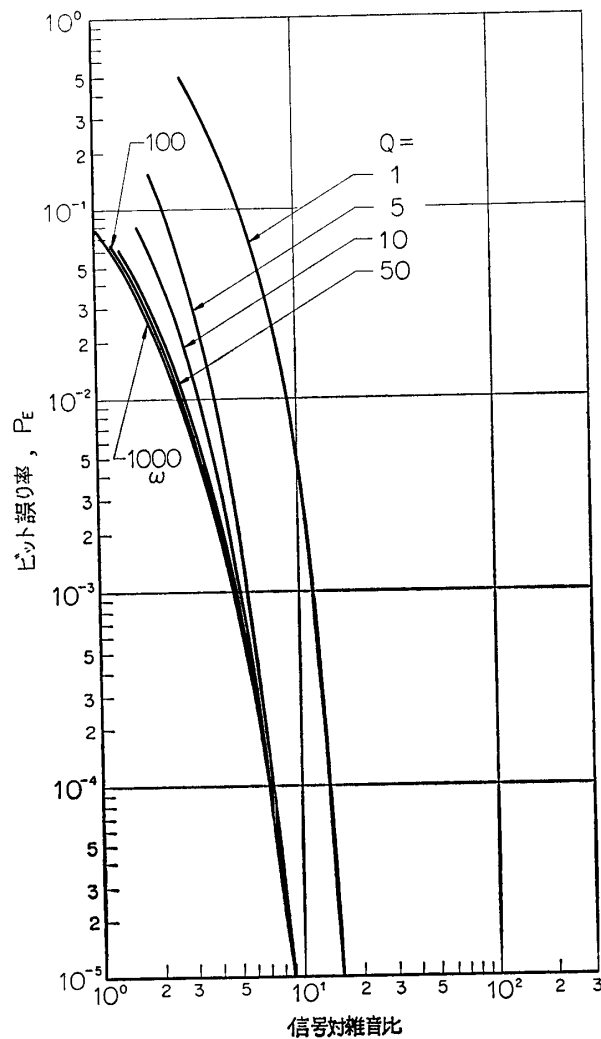
$$\frac{\bar{v}_c^2}{\bar{v}_n^2} = 68 \text{ dB (opt)}$$

$$34 \text{ dB (sig)}$$

ここで 2 乗検波のため (opt) は (sig) の 1/2 の値となる。一方所要 S/N を 4 dB (sig) とするとマージンは約 64 dB (sig), すなわち光学系部のマージは 32 dB (opt) が得られる (第 25 図参照)。この値は実測結果のマージン 30 dB (opt) とほぼ近い値を示している。



第 25 図 アンサバック系のレベルタイアグラム



第 26 図 2 乗ループをビットおよび搬送波同期に使用したときのビット誤り率

5.2.3 コマンド系の制御動作

(a) PCM-PSK-FM の SN 比とビット誤り率

本装置は PCM-PSK-FM 変調を行っており、SN 比とビット誤り率の関係は PCM-PSK に対するビット誤り率と FM 方式の改善限界を考える必要がある。

SN 比限界値を求めるに当り、PSK 方式についてフェーズ、ロック、ループによる搬送波再生を行なった場合の SN 比と誤り率の関係は第 26 図[8]で表わされる。

PSK 搬送波の SN 比は次式で求められる。

$$SN_{\text{PSK}} = 3m_f^2 \left(\frac{B_{\text{FM}}}{2B_{\text{PSK}}} \right) SN_{\text{FM}} \quad (4)$$

ここで SN_{FM} : FM 波の SN , 10 dB

B_{FM} : FM 波の帯域幅 , 2 kHz

B_{PSK} : PSK 波の帯域幅 , 520 Hz

m_f : 変調指数 , 1

とすれば $SN_{\text{PSK}} = 17.6 \text{ dB}$ となる。図 25 の基準化された SN 比に換算するために

$B_{\text{PSK}}/B_{\text{BIT}} = 520/300 = 1.73 (2.4 \text{ dB})$ を乗ずれば、入力 SN 比に相当する SN 比限界値は約 20 dB となり、したがって SN 比限界値におけるビット誤り率は通常考えられる $10^{-5} \sim 10^{-6}$ の値をはるかに下まわるものとなる。

(b) SN 比限界の設定とコマンド誤り率

ビット誤り率から PN 符号方式コマンドの不動作率および誤動作率を求める。

符号 A, B の距離をビットごとの比較における不一致の数として定義すれば、PN コードのサイクリックシフトからできた符号群にはつぎの関係が成立する。

$$d(A_i, A_j) = \begin{cases} 2^{m-1} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, P \quad (5)$$

ただし n はリニアレジスタの段数に相当する
すなわち符号間の距離は一定である。

また $f(t)$ を PN 系列とすれば $f(t)$ の相関関数 $\phi(t)$ は

$$\phi(nP) = 1, \quad \phi(2) = -\frac{1}{P}, \quad 2 \neq nP, \quad n = 0, 1, \dots$$

となる。このような性質から PN 系列は疑似ランダム系列と呼ばれる。

したがって受信時のビット誤り率とコマンド誤り率との関係はスタート符号が受信確認されたのちを考えると、対象とする符号は 15 ビットの PN コードである。このとき PN パタン認識回路のスレシヨールドを 15 ビット中 2 個のところにおく。 $n=4$ のとき符号間の距離は 8 であるから、スレシヨールド値 γ は次の式を満足する必要がある。

$$r < \frac{d}{2} = 4 \quad (6)$$

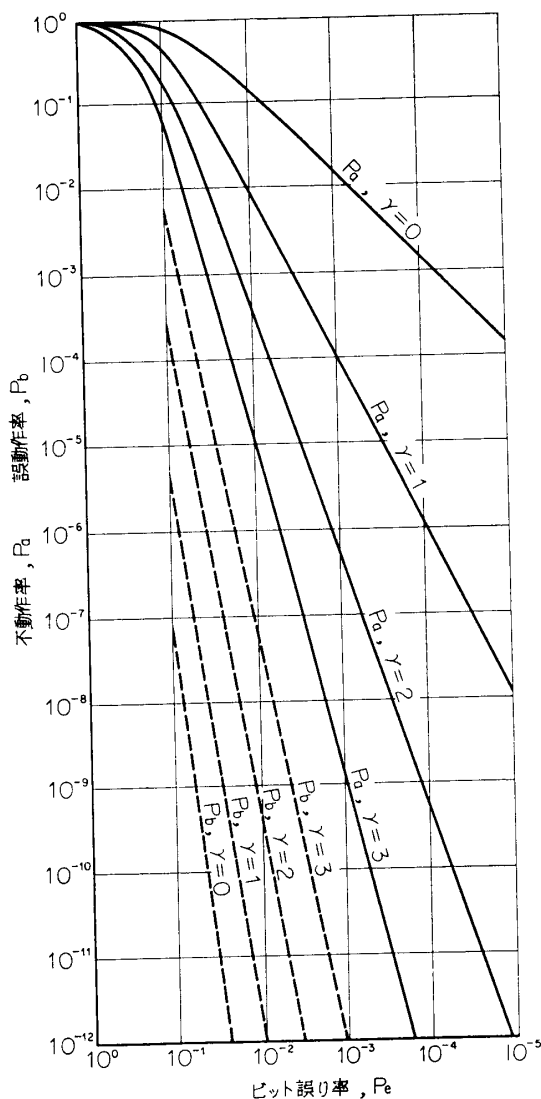
ある PN 符号が送られたとき、受信側でその符号として受けとることができない確率 P_a は、ビット誤り率 P_e に対して次式で表わされる。

$$P_b = 1 - \sum_{K=0}^{\gamma} \left(\frac{15}{\gamma} \right) P_e^K (1 - P_e)^{15-K} \quad (7)$$

また、送信された特定の符号が他の符号に誤って復号される確率 P_b は次式のようになる。

$$P_b = 14 \sum_{K=0}^{\gamma} \sum_{\lambda=0}^K \left(\frac{7}{\lambda} \right) \left(\frac{8}{8+\lambda-K} \right) P_e^{8+2\lambda-K} (1 - P_e)^{k-2\lambda+K} \quad (8)$$

これらの関係を第 27 図に示す、図より明らかなように、ビット誤り率が 10^{-5} 程度であっても送った指令がとどかない確率としての不動作率は、パターン検出限界 $\gamma=2$ のときで 10^{-12} 程度となり、送った指令とは異なった指令が与えられる誤動作率は 10^{-20} 以下となる。SN 比限界値 20 db におけるビット誤り率は 10^{-5} をはるかに下まわる値であるから、不動作率および誤動作率は回線雑音に関する限り FM 改善限界以上での値は問題にならない。



第 27 図 コマンド誤り率

現地での伝はん動作試験の結果の一例を表 5 に示す。指令回数 30 回に対して表の n_2 が不動作、 n_3 が誤動作をあらわすが、異なる SN 比に対して不動作はフィルタ 33.5 db の点で 1 回生じている。

これはすでにアンサーバック回線のマージンがない状態であり、レーザ光の受信レベルが動作限界付近にあるときと見られるため、伝はん上のゆらぎそのほかによりコマンドの限界をこえた状態がときとして現出するためと判断される。

このほかに長期間放置したときに問題となるのは電源の瞬断による誤りの発生である。この場合論理回路に直接影響が及ぶので誤りの確率は増加する。これに対しては、コマンド指令時だけデコーダが有効に働くようにする方法が一つの解決策となる。

第 5 表 伝はん動作試験結果

減衰フィルタ	n_1	n_2	n_3	n_4
11.4 dB (opt)	30	0	0	30
22.1 dB	30	0	0	30
33.5 dB	29	1	0	0

試験方法および条件

レーザ送信機に光学フィルタをそう入しコマンドを指令する。指令は原則として各フィルタそう入ごとに 30 回行ない、次の量を測定する。

- n_1 : 指令した項目が動作した回数
- n_2 : " が動作しなかった回数
- n_3 : " 以外の項目が動作した回数
- n_4 : " のアンサバックがとれた回数

6. 結 言

以上鹿児島に設置したレーザ・コマンド装置についてシステム概要, 装置の諸元, レーザ部およびコマンド部についてそれぞれ各機器の概要および特性, 伝ばん試験の結果, レーザコマンド系およびアンサーバック系のマージン, コマンド系制御動作のビット誤り率から不動作率および誤動作率などについて述べた.

マージンについてコマンド系およびアンサバック系について, それぞれ約 40 dB (opt) および約 30 dB (opt) の値が実測されたが, これは理論的予測とほぼ一致した. また長時間の連続伝ばん試験の結果, 受信レベルより見てコマンド不能になる機会はきわめて少ないことが判明した.

さらにコマンドについてビット誤り率が 10^{-5} 程度の場合でも不動作率, 誤動作率はきわめてひくく, 回線雑音に関する限り FM 改善限界以上での値は問題にならないことがわかった.

1969 年 1 月 13 日 宇宙工学

参 考 文 献

- [1] 斎藤ほか: 昭. 41, 信学全大
- [2] H. H. Plotkin: Private Communication, NASA
- [3] M. ITO: NEC R&D, NO. 8, P. 84 (Oct 1966)
- [4] T. S. Chn: 1967 IEEE Conference on Lazer Eng. and Applicationz, Washington, D. C. (June 1967)
- [5] A. L. Buck: Appl. Opt., 6, 4, P. 703 (April 1967)
- [6] 安田ほか: 昭. 40 信学全大
- [7] 安田ほか: 昭. 41 信学全大
- [8] J. J. Stiffler: National Telemeter Conf., 5-1, (1964)