

# 空间光学通信

## 文 摘

本文首先提出属于空间通信的激光通信发展的暂短历史,然后,描述目前正在发展中的高信息率(高达 $1 \times 10^9$ 比特/秒)系统,再研究最有希望的空间激光通信技术。还将论及象激光器、调制器、探测器、高速电子装置那样的精密部件,和捕获及跟踪系统。

## 概 论

由于信息需要的增长并且世界变得比较小了,对遥远地方之间的更多数据和通信的要求迅速地增强。激光通信是连接从地球到卫星到另一颗向地球传递微波的卫星的微波多重输入的有前途的技术。而且在70年代以后开始的许多近地球轨道飞行任务中主要目的是将大量数据送回到地球。图1说明一种可能要求的数据线路。近轨道卫星和地球控制站在地球的对面,因此要求以下三条中继数据线路:

1. 近轨道卫星到同步卫星1号,
2. 同步卫星1号到同步卫星2号和
3. 同步卫星2号到地球控制站

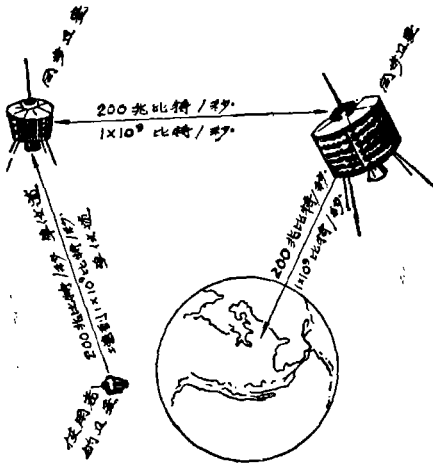


图1 空间线路示意图

靠这种数据中继线路的能力,美国一个单独的控制站就能实现整个地球的实时拍照。惯用的无线电频率技术对于中继地球卫星将收集的大量信息会变得有较小吸引力。70年代和80年代期间发射的若干卫星将把数据中继负载增到许多实时的电视信道。由于宇宙飞行器的重量和动力的问题,对大于 $10^8$ 比特/秒的信息率,甚至于象微波和固态电源那样的新的射频技术也愈加困难来完成。

空间激光通信对于其它技术,其优点是:(1)用短的“天线”可获得方向性,和(2)有效的并易采用的宽带宽。在电磁谱上还有其它对别的信号不干扰和保密的优点。然而,要真正具有这些优点的能存在的系统,即比它的射频对手小而轻,并且可靠和在空间胜任,它的研制是有困难的。现在主要的研制问题已有些基础,比较地只留下相对直接的激光通信子系统的工程设计和制造问题。

下段总结空间激光通信发展的历史和目前的发展方向。

人们可根据正在使用的激光器的类型研究空间通信的系统,因为在相当大的程度上,激光器可涉及很多的其它部件和子系统的设计。

四种激光器,即氦氖、二氧化碳、掺钕钇铝石榴石、砷化镓激光器已被积极地追求为空间通信的仪器。其中具有低信息率能力

的砷化镓激光器在60年代后期的Gemini试验中尝试过。这是从Gemini到地球的一个不太成功的受限制的快速试验。砷化镓激光器无论是对于高信息率还是对于远空间距离，由于受限制的占空因数和对空间相干性的限制而其应用有限。因为二氧化碳激光器具有高效率，所以它的发明和迅速发展导致了把它应用于空间通信的很大兴趣。系统的研究说明了，虽然可见光激光器的效率低，在可见或近红外区的脉冲激光系统颇有潜力。掺钕钇铝石榴石激光器采用低的占空因数，脉冲状态工作，由于系统部件问题比二氧化碳波段状态时容易解决问题，是很有吸引力的。氦氖激光器虽然是最发展的，但它简直没有作为高信息率、远距离通信的发展前途和特点。今后几年在氦氖、二氧化碳和掺钕钇铝石榴石三种激光器上都要做一些工作。氦氖激光器可利用其设计一个完整的卫星实验，以便实验除了高信息率外的情况，譬如，捕获和跟踪概念，其它组件，大气效应等激光通信的其它方面。美国宇航局对氦氖卫星实验做了一些努力，最近的一次是采用氦氖系统装载在于1975年要飞行的ATS-G上的5兆比特/秒的卫星对地球线路的卫星计划。然而1973年初ATS-G被取消了，这一计划也停止了。宇航局于69年还着手进行一次二氧化碳5兆比特/秒线路的实验，在73年把二氧化碳激光器装在ATS-F上飞行，然而由于技术上的困难而导致CO<sub>2</sub>激光器实验的早期终止。

目前，美国空军计划于1978年进行一次1000兆比特/秒的掺钕钇铝石榴石激光器的通信卫星实验，其工程可实行性的样机由McDonnell Douglas东方宇航公司研制。这一计划是掺钕钇铝石榴石系统组件和系统整体并行发展的继续。以空军405B计划为名的这一计划于1971年开始。在这之前，空军航空电子学实验室为掺钕钇铝石榴石系统做了某些部件。最近结束的工作阶段制造了1000兆比特/秒的实验装置，它们成功地

明用于通信和捕获及跟踪的能实行的线路的所有关键特征。

宇航局和空军正在计划一个共同的试验，宇航局的CO<sub>2</sub>激光器的通信子系统装在携带的掺钕钇铝石榴石系统的空军卫星上，在卫星上能在空间估价掺钕钇铝石榴石和CO<sub>2</sub>系统。宇航局还一直追求掺钕钇铝石榴石，但不是以追求CO<sub>2</sub>系统那样的速度。宇航局的信息率范畴是200—400兆比特/秒。

本文将强调最有可能在1978年上天的和在其它任务中携带的这两种子系统。但若包括可与激光空间通信有关的过去的和现在的工作会超出篇幅的限度。可是包括的文献目录涉及利用激光进行空间通信的最恰当方面。省掉某些有关的工作是不可避免的，并且不当把文献目录看作是全部内容。

空间光学通信系统由两个特殊的子系统组成。发射器的子系统的由发射器的激光器和光学件及捕获和跟踪和接收指令用的信标接收器组成。接收器的子系统由接收光学件和探测器，其中采用外差探测的本机振荡器的激光器和信标（和指令）发射器组成、二向色元件的使用致使可以采用起通信和信标跟踪两种作用的通用光学器件。

发射器系统采用口径5"—8"为的受衍射限制的光学件，对于可见光学系统具有4毫弧度之小的光束发散，而对于红外系统，它们具有100毫弧度的光束发散。可见光学系统接收器的望远镜可具有光子吊桶型，比较大（某些情况下达到27吋的口径），并且不受衍射限制（典型的视场是300毫弧度）。在光学外差系统中，因信息必须是相干的，所以接收器的光学件一定是受衍射限制的。

以下部分我们首先讨论直接的探测系统，重点在于使用掺钕钇铝石榴石激光器的目前最庞大的激光空间通信计划，然后讨论外差系统，重点在于CO<sub>2</sub>激光器。

掺钕钇铝石榴石和氦氖激光器系统采用直接的探测。已经研究了直接探测系统中的各种调制格式的方法。主要的两类是基带和

副载波,每类又分各种小类。在基带中,有脉冲编码调制(PCM)(简单的接通—断开)。然后有若干格式为高脉冲率( $>200$ 兆脉冲/秒)和窄的脉冲( $<1$ 毫微秒)而采用锁模激光器。第三,存在低占空因数的M-元系统,在这些系统中例如用脉冲激光器作高效调制、脉冲间隔调制和脉冲位置调制那样的每脉冲可以输送许多比特。在副载波技术中,有相位位移键控(PS'K)和 $90^\circ$ 相位位移键控(QPSK),它们都需要一种调制频率它将被调制为与传递信息同相。下部分将重点讨论美国空军为在第一个光学通信空间试验中选择准备使用的方法。它就是 $1 \times 10^9$ 比特/秒信息线路用的锁模掺铋铝石榴石。

## 掺铋铝石榴石空间通信系统

为1978年正在拟定的计划里有一套向地球传递高信息率的 $1 \times 10^9$ 比特/秒掺铋铝石榴石激光器的发射部分。它将包括能瞄准到必须的1毫弧度精度的信标接收器。工程上可实行的样机正处于研制中,还有有达到任何结果阶段、但对于研究成功地满足一般通信、扑获和跟踪要求的实验装置发展的初步阶段是有用的。

研制、装配和实验了 $1 \times 10^9$ 比特/秒的锁模倍频的掺铋铝石榴石的选通脉冲二元调制(PGBM)的激光通信系统的实验装置。在通信实验装置上,以多通道的电视和 $1 \times 10^9$ 比特/秒无规数据,予以传输、远距同步和探测。电视信号转换为一连串的数字脉冲链并且探测后再现。

对无规数据测量了误差率。也测量了作为误差率函数的图象质量。获得了改变信号、背景和阈调定在不同情况下的系统误差率的性能。通信系统的性能非常好——获得了为卫星应用而设计的几个分贝内的通信效率。 $1 \times 10^9$ 比特/秒的非同步工作表明具有不同激光锁模率的多重高信息率非同步发射

源的适应。同时还表明不同发射源的空间多普勒频移效应的适应。

为各自详细实验,分别操作扑获和跟踪装置。这个实验装置自动地表示粗略扑获,精确扑获和精确跟踪。它满足或胜过卫星应用的全部设计要求。它获得了0.13毫弧度(方均根)之底的精确跟踪。实验计划中包括了卫星的振动,极限周期和弯曲效应,这个系统都能很满意地处理它们。

### 线路分析

对系统功能的研究指出了:在低高度卫星上具有一个7.5吋的受衍射限制的望远镜的激光器的30毫瓦的输出将能进行 $1 \times 10^9$ 比特/秒之大的通信,低高度卫星与使用一个24吋的不受衍射限制的卡塞格伦望远镜的同步卫星上的接收器一起工作。在接收器里它转变为68光电子/比特的信号强度,它为规定的 $10^{-6}$ 比特误差率的17光电子/比特提供一个6分贝的容限。

由于称作脉冲四元调制(PQM)的先进的调制格式大约是6分贝的更加敏感,而需要比选通脉冲二元调制小6分贝的激光功率,因此可获得如此结果。PQM对于每个激光脉冲采用4种可能的状态——两种偏振和延迟的或非延迟的脉冲。用接收器里的两个偏振敏感探测器的其中一个总可探测激光脉冲的能量。早先的实验装置已证实了PQM的灵敏度。它是空军405B计划中 $1 \times 10^9$ 比特/秒子系统的目前基础。

### 通信实验装置

图2表示选通脉冲二元调制(PGBM)的一般方框图。在这部分我们只讨论系统的通信部分、激光发射器由用一铷钾灯抽运的一个锁模倍频掺铋铝石榴石激光器组成。称作锁模元件的声光晶体使掺铋铝石榴石激光器的1.06微米的能量聚束为以典型的200兆脉冲/秒到 $1 \times 10^9$ 脉冲/秒的速率发射的脉冲持续期为300微微秒的脉冲链。正确的速率取决于激光器空腔的长度。称作倍频器的另

个光学元件把大部分的1.06微米能量转换成波长为0.5或0.53微米,鲜绿色。之所以要倍频是为了较好地匹配在通信线路的接收器末端典型应用的光电倍增管探测器的光谱灵敏度。最后使用电光晶体把信息施加在激光脉冲流上。通过发射表示二进制的1的脉冲和阻塞表示二进制的零的脉冲来完成数字调制。图3表示选通脉冲二元调制(PGBM)激光发射器和调制器的波形图。激光调制器只不过相当于窄脉冲要被发射时打开的一个门。因此,应该使用升起时间和间歇时间为相同数量级的调制器,而不是与脉冲持续时间同数量级(对于500兆比特/秒是2毫微秒)。如此缓慢的升起时间的要求使得用低的调制驱动功率获得高速调制。

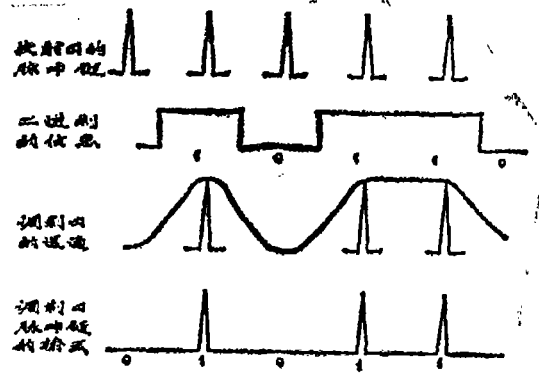


图3 发射器,调制器的波形

在此种状态下工作的动态交叉场光电倍增管(DCFP)为提供必要的灵敏度、速度、增益、自动增益控制和内选通而把光电倍增管的工艺和微波管的工艺相结合。

我们用一高速静态交叉场光电倍增管(SCFP)还成功地实验了这个系统。其灵敏度在无背景时几乎相等,但在这个点的SCFP不具备自动增益控制能力并且无内部选通。

为了实验通信系统的元件和线路,设计并制造了一个实验系统装置。图4是这一系统的方块图图解。我们估价的组态是其中输入的数据之间和对激光器都是非同步的非同步组态。电视信号用比从噪音信号发射源有较宽范围的占空因数和“1”,“0”的组合来提供真正的信号。对于所有组态使用相同的光学系统。

用光学方法使500兆脉冲/秒的脉冲链倍增为 $2 \times 500$ 兆脉冲/秒的链,其中一条脉冲链离另一条延迟1毫微秒(噪音抑制)于是就实现 $1 \times 10^9$ 比特/秒的调制器、这些光学脉冲链分别被调制,然后重新结合以产生 $1 \times 10^9$ 比特/秒调制了的光学信息。信息离开调制器之后,被衰减,于是进入光学接收器,在这的光学接收器里使用一个动态交叉场光电倍增管作为探测器用。把该接收器设计得能提供光学信息和探测器,选通信息之间的自动同步。接收器的输出进入 $1 \times 10^9$ 比特/秒的电子器件。这种信息被分裂,于是进入

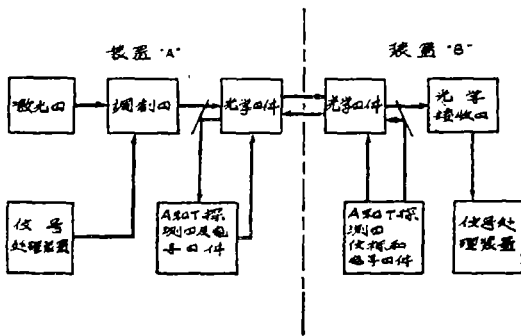
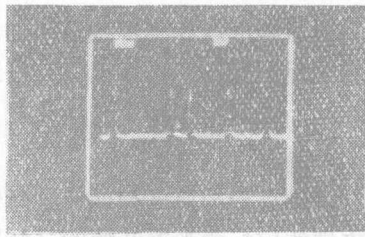


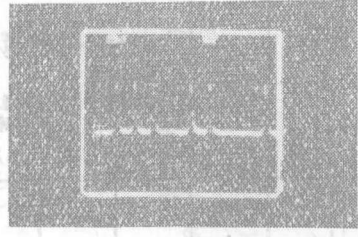
图2 激光通信系统一般的方块图

在接收器处,信号光子一定在与来自云彩、天空或地球的背景光相竞争的情况时被集聚和探测。由于采用直接探测就能取消对干涉探测需要的天文质量的光学器件的要求,于是就可使用不受衍射限制的光学器件。这种应用的理想探测器必须具有在后面线路中消除噪音的高增益。另外为了灵敏,它必须是宽带的,以便响应数据流中 $1 \times 10^9$ 比特/秒的变化。它有助于具有内选通的能力,也就是它只能在预定的简短的激光脉冲时才被接通。并且在脉冲间隔期间断掉,使对背景光平的响应为最小。它还有助于使探测器中具有自动增益控制(AGC)能力以便把输出电流限制到探测器中的安全极限并为信号处理电子器件提供一个不变的信号级。

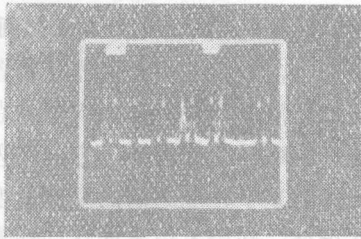




A. 500兆比特/秒的调制了的输出 1



B. 500兆比特/秒的调制了的输出 2



C.  $10^9$  比特/秒的调制多路的输出



D. 被探测和放大的 $10^9$  比特/秒的脉冲链

图 5 系统的脉冲链

误差率的电子装置去。

### 系统测量

比特误差率作为光学信息输入的函数的测量是规定系统性能质量的主要测量。图 6 表示对于最后系统实验为最佳时的实验室子系统的比特误差率性能的图表。实验装置的比特误差率级 $10^{-8}$ 达到了52个光电子/脉冲。线路的分析表示：我们应获得具有35个光电子/脉冲的 $10^{-6}$ 的比特误差率。我们的实验装置的性能在获得这个目的的2分贝之内，误差率的曲线斜率约为线性的，并且紧密地跟随理论误差率的曲线直达 $10^{-7}$ 的比特误差率。 $10^{-7}$ 以下误差率的曲线斜率改变了，而且不陡了。与信息统计学导出的偏离理论曲线的偏差大概是由于象激光器的功率起伏，探测器的噪音和码间影响的若干硬件因素造成的。我们还用较高的信号级进行实验以确定有无渐近线存在。若在15分钟内无被记录下来的误差，就停止实验。这相当于比特误差率小于 $2 \times 10^{-11}$ 。

以 $10^9$ 比特/秒用MDAC和空军的设备研究之后，在最近的宇航局计划中以400兆

比特/秒的速率完成探测了比特误差率和脉冲四元调制的评价，图7表示其结果。在实验中获得了选通脉冲二元调制的五分贝的改进。

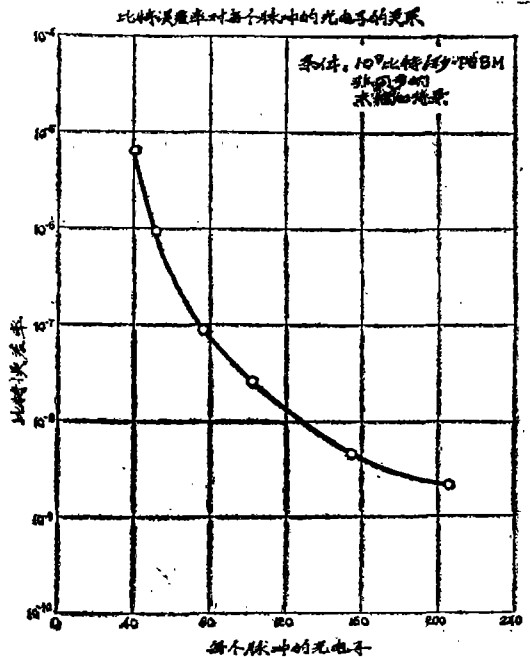


图 6 选通脉冲二元调制(PGBM)比特误差率对每个脉冲的光电子的关系

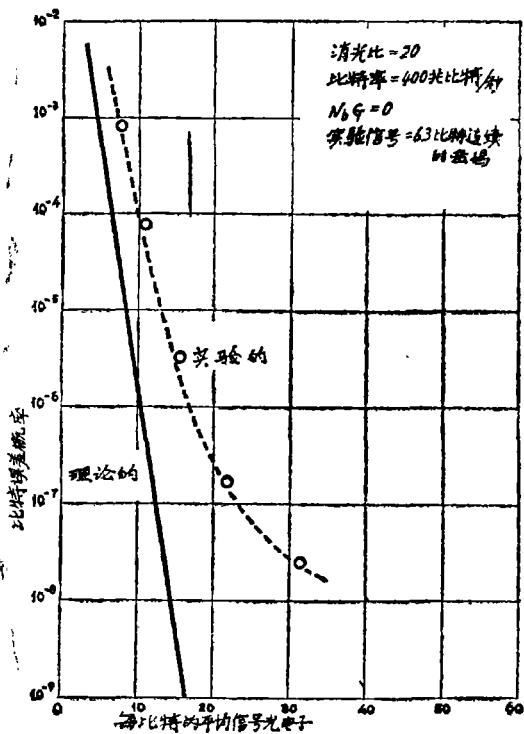


图7 脉冲四元调制(PQM)比特误差概率作为接收到每比特的光电子的函数

## 扑获跟踪实验装置

### 粗略扑获

运转的激光通信子系统的扑获和跟踪部分一要定能自动扑获分开24,300海哩的远距离的端点，并且能够精确瞄准窄的高速通信

激光器到其射束宽度的分数的精度。两端间的发射器瞄准线和瞄准线之间的最初的角度不稳定程度有7.75毫弧度宽。在连续扑获和跟踪时，它减少到小于1微弧度（见粗略扑获的图8）。

这种过程是通过扫描位于高信息率接收器末端的信标激光器开始的（装置B）。信标是一个1600脉冲/秒Q开关的、100毫瓦的掺钕钇铝石榴石激光器，它用于扑获和跟踪以及发射低速指令数据。300微弧度的信标射束对包含高信息率发射器（装置A）的场扫描，提供10脉冲/秒的粗略扑获探测器的信息。粗略扑获探测器的方向误差信息通过20比特的光学轴编码器的反馈改变装置A的瞄准指令，减少不稳定度从7.75毫弧度到小于250微弧度。

### 精确扑获

当装置A的角度误差被缩小到250微弧度以下时，精确的扑获型式接上去。第二（精确的）扑获探测器采用10脉冲/秒信标信息来瞄准末端间的瞄准线至50微弧度以内。当这个出现时，高信息率通信激光的100微弧度的Q开关射束将照明装置B的末端（见图9）。

平衡环的静态和动态摩擦效应和卫星的运动是精确扑获期间控制瞄准误差的。直至最近对慢转速和小惯性系统的轴承数据很

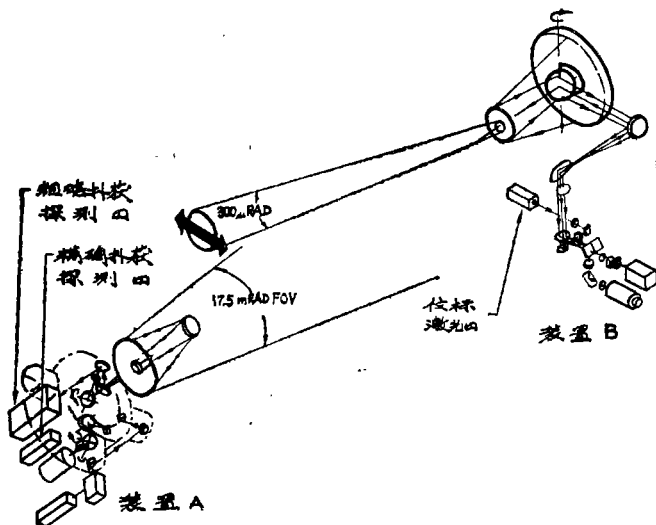


图8 粗略扑获

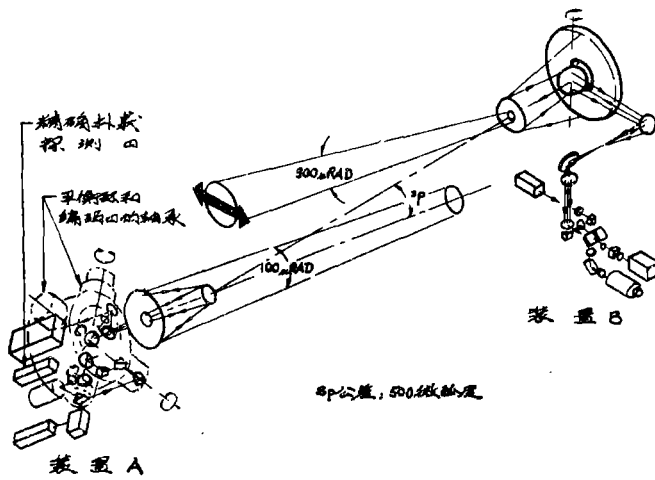


图9 精确扑获

少。所以我们的实验装置就得求出轴承对瞄准误差的影响。

### 精确跟踪

当装置B被100微弧度的装置A的射束照射时：

- a. 它停止扫描并跟踪装置A的信号，并且
- b. 弄窄它的射束从300微弧度到100微弧度。

结果，装置A的精确扑获探测器接收由信标发射的所有1600脉冲/秒，并且由于发射的较窄射束，能量级升高，在这点上，装置

A自动地接入精确跟踪型式。采用此种型式，瞄准误差从50微弧度减小到小于1微弧度。(见图10)

精确跟踪型式的瞄准误差产生的原故是：

- a. 平衡环轴承的静态和旋转摩擦
- b. 探测器的噪音
- c. 卫星的刚体运动
- d. 卫星的非刚体运动
- e. 调准和瞄准向前的误差和
- f. 大气的影晌。

研制了捕获和跟踪的实验装置以定量各种误差源并且说明与现有卫星环境相容的扑

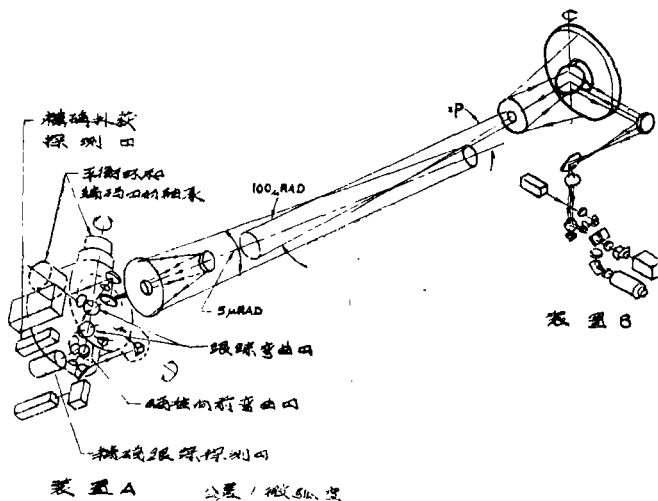


图10 精确跟踪

获和跟踪性能。

### 扑获性能

下表给出扑获要求，实验装置设计目的和测出的实验装置的性能的对照。

表1 扑获性能摘要

特 点	系 统 要 求	所设计的实验装置的能力	所测量的实验装置的性能
视 场	±7.75毫弧度(LAS) ±3.5毫弧度(SS)	±7.75毫弧度	±8.6毫弧度
灵 敏 度	$1.0 \times 10^{-8}$ 瓦特 峰值功率/脉冲 所需要的最小功率	$1.0 \times 10^{-8}$ 瓦特 峰值功率	$1.0 \times 10^{-8}$ 瓦特 峰值功率
扑 获 时 间	5.0秒	4.3秒	2.6秒 额定的； 最小信号时为3.5秒
粗略瞄准精度	±50微弧度 (方均根)	±25微弧度 (方均根)	< ±15微弧度 (方均根)

测得的实验装置的数据说明所有的设计要求都被满足或超过，测得的灵敏度和扑获时间说明扑获探测器目前的0.09%的量子效率对于可靠扑获是足够的并且低的粗略瞄准误差证实了实验装置的平衡环轴承的低摩擦和低的紧缩/摩擦比。

### 跟踪性能

把实验装置的跟踪系统设计得按照初步设计研究指令的最严格的精度。精度跟踪回路的控制带宽在实验装置中是可变的以容许对参数的研究。

测得的实验装置的跟踪灵敏度比所要求的好一点。测得的瞄准误差在最小信号强度时是预告的瞄准误差的70%，这大体上是由于比预告的平衡环产生的效应好和卫星非刚体动力学的原故。在用初步设计研究表示的最小的信号强度时，以1700微弧度/秒的视线速率和+2毫弧度/秒和-2毫弧度/秒的极限周期率测量出了0.8微弧度的峰到峰

这些要求是在子系统初步设计中提出的，并于1971年11月实现了他们。

把实验装置设计得满足工作上最难的要求，尤其是，它的特点与低高度的卫星(LAS)装置A的要求相匹配。

(0.13微弧度方均根)误差。当卫星弯曲(50赫兹时+2微弧度)被加到干扰时观察到的最大的峰到峰误差是3.2微弧度(0.72微弧度方均根)。在不太严峻的卫星条件下和标称的信号强度条件下获得了13微弧度(方均根)的误差。

### 激光器的考虑

同步卫星里的激光器可能是用太阳光抽运的激光器。作为405B计划的一部分，非常成功地研究了太阳抽运。用一个24吋的集光器获得了TEM<sub>00</sub>。1.06微米的5瓦特功率。显然，同步卫星到同步卫星线路用以支持 $1 \times 10^9$ 特/秒线路的足够的功率是可行的。低地球轨道卫星采用的激光器将使用一个250瓦输入功率的铷钾灯以获得150毫瓦的0.53微米绿色输出。基于街道照明用的有电源金属灯的民用灯的历史，最后应具有10000—15000小时的寿命。直接的工程问题之一是改进目前设计的灯以达到这个目的。

在宇航局感兴趣的400兆比特/秒的信息率线路中，使用一个二极管抽运的激光器就可能本质上减少原来的功率要求。二极管抽运的激光器可能只用50瓦特的功率。一直为实验到400兆比特/秒的各种元件和系统工作投资的宇航局对在1.06微米时具有100毫瓦的输入的二极管抽运激光器感兴趣。在1.06微米和400兆比特/秒时也可能使用一个雪崩光电二极管（APD）作为代替光电倍增管的通信探测器，已知光电二极管有了一定进展。光电倍增管在1.06微米时的量子效率提高到2%，使得光电二极管和光电倍增管的这种交换有困难。而且，为了使激光器的功率低并保持在二极管抽运的激光器能力以内，灵敏度是最重要的。

其它高速信息率的调制方法：

空军405B计划最初赞成两种达到高信息率的方法，一是锁模，另一是副载波。副载波技术采用了能调制连续副载波的相位的90°相移键控法(QSPK)；它连续地调制光线的振幅。这种技术还应用于图11所示的宽带模拟调制。在制造具有能量，单模和单频结合要求的掺铍铝石榴石出现了困难。另外，由于理论与实际结合的理由，已经证明在接收器处要获得比用锁模方法相当多的信号才能获得相等的误差率。

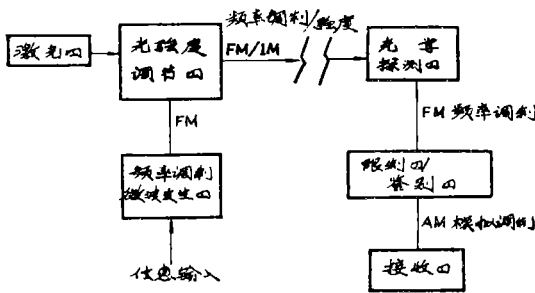


图11 宽带FM-IM直接探测的方块图

中等信息掺铍铝石榴石系统

当我们考虑低于10兆比特/秒的信息率时，对此存在比较有效的调制技术。短脉

冲、低占空因数光学通信的可能效率已被承认。实验测量已证实了二元的和M元的短脉冲、低占空因数格式的分析结果。

M元调制格式通过使每个被传输的脉冲传送许多比特信息以提供改进的传输效率。我们研究脉冲间隔调制(PIM)和脉冲位置调制(PPM)的实验，在这些实验中，我们传输电视图象并进行系统误差率的测量。在信息率高达10兆比特/秒时，大的M元系统用掺铍铝石榴石是可能的。

光学通信系统的噪音基本可分为两类，即系统产生的噪音源和外部背景辐射源。主系统的光学噪音源是统计的信号起伏，光学调制器中的有限消光比和接收器的噪音（象放大器中的暗电流和热噪音）。然而，在许多应用中，支配的噪音源将是背景。在使用光电倍增管的适当设计的系统中，背景噪音的消除能够获得接收器的最大灵敏度（即只有由于信号的统计学的起伏产生的噪音）。

当然，在接收器的输入端使用一个窄的光谱滤光片就可大大地缩小背景噪音级。同样，把光学接收器的视场缩小到最小也将减少背景噪音。然而用光学接收器脉冲选通技术可以获得的时间的鉴别只能对于短脉冲、低占空因数的调制格式可以应用。

脉冲间隔调制是一种M元过程，其中一个信号脉冲输送许多比特的信息。正常的脉冲之间的时间间隔被分成M个分离的时间缝隙，如图12所示。一个并且只有一个信号脉冲被送入这些M缝隙中的一个。其中脉冲会出现的每个特有的时间缝隙表示一个编码符号。因此，每个脉冲被传输的比特数是 $\log_2 M$ 。使用非常窄的时间缝隙和非常窄的脉冲可达到一种高信息率。把脉冲能量聚束成强烈的短脉冲引起对噪音的鉴别，因此容易鉴别信号脉冲和背景之间的噪音。

除了容许脉冲占领位置的连续区而不是分离的时间缝隙之外脉冲位置调制和脉冲间隔调制在形式上相似。脉冲位置调制是一种模拟的调制技术，因此它的占空因数必须选

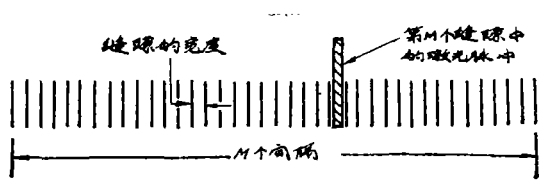


图12 脉冲间隔调制(PIM)的波形图

择到容许取样率至少是信息带宽的两倍。模拟的信息安排不需要象对于 PIM 或 PGBM 是必要的高速的模拟—数字的转换。在 PPM 中使用的每个取样的比特数可能受每个取样要求的有用的模拟幅度（灰度级）量的限制。

实验用的信息率范围由实际考虑确定。由于原件限制的原故，象 PPM 和 PIM 这样的 M 元信息安排在比  $10^7$  比特/秒大得多的信息率就受到限制。工艺状态，高速编码和解码的电子件技术限制了 PIM 的时间缝隙的宽度。目前，这个极限是 1 毫微秒，这就限定在任意给定时间内的可能的缝隙数，于是也就限制比特率。在 PPM 中，模拟线路的线性限定有用的脉冲位置数。两种信息安排都受激光能力的限制。目前，产生短脉冲的激光器要以高的脉冲速率，精确可变的脉冲间距本领还难以实现。这就把 PIM 和 PPM 限制到较低信息率的应用，这时不需要毫微秒的精确度和兆脉冲/秒的速率。根据这些考虑，我们进行了以下实验：①以高达  $10^7$  比特/秒的速率进行脉冲间隔调制和 ② 高达 2 兆赫兹模拟带宽的脉冲位置调制（能实现实时电视）。

在不同的信号和背景条件下用通过 PIM' 系统对光学信路进行的视频信号对慢扫描电视进行单帧照相传输。典型的信号级是 25 光电子/脉冲；每个脉冲宽度时间连续出现的背景的变化达到 10 个光电子。

根据脉冲率和每个脉冲的信号光电子数来确定平均信号级。譬如，若我们把每个同步脉冲看作能量，那末平均背景对平均信号的比是 200（在工作系统中，没必要为每个

信息脉冲传送一个同步脉冲）。

另外对于定性的电视线路的实验，进行了定量的误差率的测量以估价 PIM 作为一种短脉冲调制技术。

图13表示从 0 到  $10^9$  光电子/秒的平均背景级 ( $\bar{n}_b$ ) 时误差率对信号级 ( $\bar{n}_s T =$  信号光电子/脉冲) 的关系图。对应这些曲线的信息率是  $2.5 \times 10^6$  比特/秒（在 12 比特/取样时为  $2.08 \times 10^5$  取样/秒），还以  $10^7$  比特/秒的信息率（在 8 比特/取样时为  $1.25 \times 10^6$  取样/秒）进行了一些实验，其结果非常相似。

凭借象 PIM 这样的技术，可以使用非常低的激光功率传送低于  $10^7$  比特/秒的信息率。对一个样品线路的计算说明传送 1 兆比特/秒，使用与美国空军 405 B 计划的大约是 5 微弧度的光束和 2 呎的集光器的相同的捕获和跟踪能力，只需要几微瓦的激光功率。这是假设激光器利用低的占空因数的安排以一种模式工作。虽然二极管抽运的掺钕钇铝石榴石的空腔抽空了或 Q 开关激光器提供这种可能性，但不幸这不是通常的情况。只有在要求激光脉冲时才使用能量，因为只有需要时，二极管才能被激励出脉冲去抽

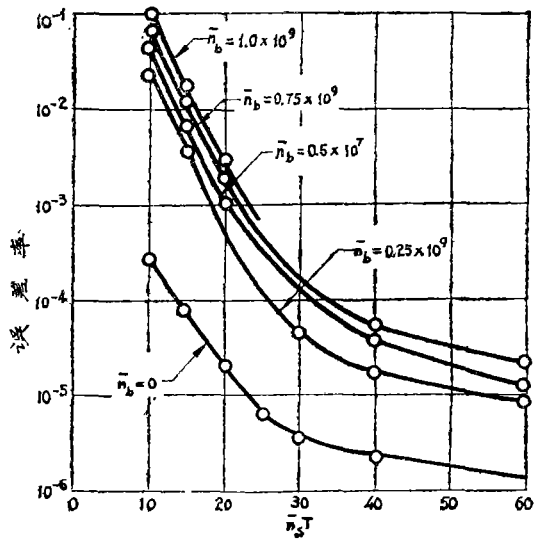


图13 不同背景级  $M=4095$ ; 比特率  $= 2.5 \times 10^6$  比特/秒;  $\bar{n}_b =$  光电子/秒的 PIM 实验误差率。

运激光器的棒。在此种方法实现之前，对二极管泵要求更多的研究工作。

## CO<sub>2</sub> 激光通信

宇航局为应用于 200—400 兆比特/秒的信息范围正积极地追求 CO<sub>2</sub> 激光通信的子系统。当然，10.6 微米的二氧化碳激光器具有相当效率的能受衍射限制的性能，并能输出足够的功率。要使灵敏度具有信号受量子限制，要求用外差法探测，因为外差法的作用提供克服探测器噪音极限的转换增益和背景噪音的鉴别。

因为外差系统取决于已知的本机振荡器频率和已知的副载波频率，所以 CO<sub>2</sub> 激光器的频率一定是要格外稳定的。要获得远距离通信必须的窄光束宽度需要单模的受衍射限制的性能。

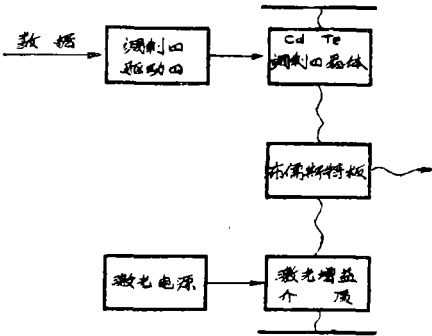


图14 CO<sub>2</sub>激光器发射部分的方块图

图14表示 CO<sub>2</sub> 激光器发射部分的图解。通过直流气体放电过程激励 CO<sub>2</sub> 工作增益的介质。腔谐振特性容许维持  $2.8 \times 10^{13}$  赫兹的振荡，产生 10.6 微米波长的偏振光。耦合器被设计为传输非调制的激光辐射的一个偏振灵敏装置(布儒斯特板)。调制器是一块双折射的晶体(碲化镉)，它产生椭圆偏振，有一偏振分量与激光辐射垂直。这个正交分量由耦合器反射，于是离开空腔并组成被传输的信号。最后被传输的信号是线性的偏振波，它的振幅与由调制器驱动电压感应的相位延迟

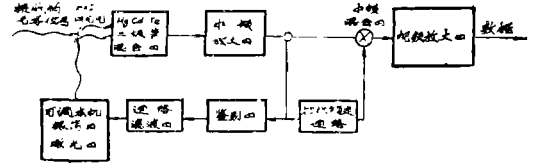


图15 CO<sub>2</sub>接收器的方块图解。

的正弦或比例。更换调制器电压的符号要旋转输出信号的相位 180°。

图15是典型的 CO<sub>2</sub> 接收器的工作图解。光学信号(10.6 微米)与可调谐的 CO<sub>2</sub> 激光器的本机振荡器的光束结合在一个 5% 的析光片里。结合的光束射在一个三种金属的红外探测器(Hg, Cd, Te)上，该探测器产生的电子流的幅度比例于信号和本机振荡器激光振幅总和平方。叉积项包含一个不同频率的部分，它是探测器带宽中的唯一部分。用压电现象改变压致增宽的本机振荡器的激光器空腔长度，则出现在输入信号的多普勒频移的缓慢改变。将由频率控制回路保持一个几乎不变的中频。锁定相位回路检查中频信号并且产生一个与中频载波同相位的本机信号。当回路输出与中频混合器中的中频信号产生拍频时，基带数据信号就再现并由视频放大器放大。

图16是可调谐的本机振荡激光器的另一安排情况。根据前面描述的方法，本机振荡器包括在空腔一端有一个压电驱动的末端平面镜的压致增宽的波导激光器。误差信号驱动末端平面镜以跟踪由于多普勒频移引起的输入频率的缓慢变化。为增大本机振荡器的

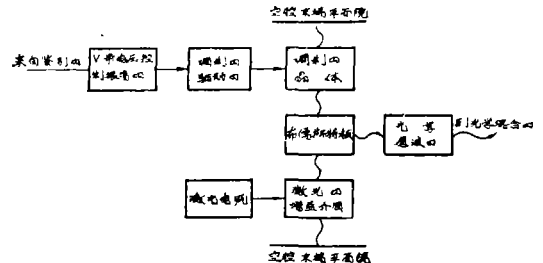


图16 可采用的本机振荡器

调谐范围发明了图16中表示的方法。这种方法使用本机振荡激光器空腔里的空腔耦合调制器。这个调制器是由 $f_0$ 窄带能调谐的V-带源驱动。最后的输出光谱在激光器特性频率的任何一侧上都具有 $f_0$ 赫兹的两条线。使该激光器在接近发射器激光器的一条线上产生激光。当V带源是530亿赫兹时，本机振荡器激光谱的旁侧带的其中一条的频率是信号频率，其它一条是在1060亿赫兹以外。用标准具技术抑制远隔的信号并改变V带源的频率在所估计的多普勒频率范围时，为 $\pm 10$ 亿赫兹（或稍小），于是就产生可广范围跟踪输入信号的本机振荡器的信号。虽然这种方法比较容易适应能调谐的要求，但在如此高的调制频率时有调制器耦合低效率的缺点。

正在考虑两种另外的接收器的结构，它们将本机振荡器的复杂性来与光学混合器带宽替换。使本机振荡器的激光器缓和的这种方法使用一种固定频率的本机振荡激光器并且用相位锁定回路的方法跟踪多普勒频移。二极管混合器的带宽必须大于数据带宽，中频和最大的多普勒频移，其和等于几十亿赫兹。第二种方法采用一个光学零差的方案，其中本机振荡激光器与输入光学信号是相位锁定的，在光学混合器输出产生基带数据。采用这种方法，相位锁定的回路一定要用光学混合器而不是射频混合器。因此，虽然混合器的带宽可完全被基带数据信号占满，但多重Hg Cd Te 混合器造成的复杂性和它们的辐射冷却器是不易保证的。宇航局目前还没有同意这些方法，仍在考虑之中。

虽然CO<sub>2</sub>激光器具有高效率 and 强的相干性，但灵敏的探测需要与冷却的光电探测器进行光电混合。这就需要在冷空间的辐射冷却器。CO<sub>2</sub>激光器还没完全解决的另一个问题是高速调制器的功率问题。这是阻碍较高信息率，是CO<sub>2</sub>系统受限制的一个主要方面，并且是调制器放置在激光空腔内的原因所在，虽然在那里会减少激光功率，但能调制。

宇航局的通信线路分析说明具有5吋直径的发射器和10吋直径的接收器用1瓦特的CO<sub>2</sub>激光器将支持一个400兆比特/秒低高度的同步卫星。然而对于掺铈钇铝石榴石激光器，还没有这类实验装置的结果数据来确保无线电通信线路的生存能力。CO<sub>2</sub>激光器使用碲化镉作为调制器，用一个光电二极管作为红外混合器和前置放大器。混合器是光生伏打碲化汞、镉。

## 接收站和集光装置

空间数据通过微波或毫米波或激光由通信线路传送到地球，这节给出激光集光装置的特点。应清楚不一定通过激光传输的路线都达到地球。利用对气候不太敏感的波长传输可能是所希望的。这种转换可能发生于卫星、飞船或飞机上。但最初的空间实验将采用实验用的地面发射和接收站。

用大口径的光学器件能进行直接探测，在地球上可以使用非常大的集光装置接收空间信号；而在空间可使用1—3呎的集光装置，因它重量可以制得较轻并不需要精确度、最终的质量以及成象光学望远镜的结构支架。模糊圈是光学件质量的衡量。对于直接探测系统，大模糊圈是可以的，只要注意到：(1)保证全部信号光射到光敏区上，并且(2)适当地考虑背景，于是最后的较宽的视场不容许背景噪音增大，也就不需要增强信号级。

对于直接探测，在地球上用大口径的光学器件是很合理的。譬如，可有一个10米直径的集光装置由248个能分别对准的精度优于20弧分的分割的平面镜组成。这些集光装置的价格比一个2米的光学望远镜（价格几百万）还是较小的。

由于光学信号与相位无关，所以直接探测系统不受大气的相位损坏的影响。因此，不象在外差系统里那样受相干口径的限制。实际上，在文献中这种集光装置被称作“光

子吊桶”。对这种类型的集光装置有限制，但在这些限度产生之前，能获得比相干口径大得多的接收口径。CO<sub>2</sub>波长的相干口径大约为1—1.5米。对于可见光波长，只有几吋。10.6微米时，相干口径尺寸的改进约为20，即波长的比。目前出现可大于15米的非相干探测口径。

对CO<sub>2</sub>和掺钕钇铝石榴石激光束的大气效应在定量上还属未知。在卫星到地面的实验中，将确定经过云彩的脉冲频散，衰减，

射束转向，射束游离，相位破坏和闪烁。这些实验将是重要的，在实验中存在于空间的亮的、已知的能控制的发射源能在昼夜测量大气对从空间到地面的光学和红外波的影响，

译自 “Optical Engineering”

Sep.—Oct.1974.

Vol.13, No. 5, p.374.

(于和平译·卢寿枏校)

(上接第70页)

polymeric and metallic materials  
NASA TM X-59743.

- ⑤⑥ 空间—稳定聚合物薄膜形成剂的合成  
Synthesis of space-stable polymeric  
film formers  
NASA CR-111884 (N7-125364)
- ⑤⑦ 伊利诺斯理工学院辐射研究所关于高温  
保护涂层的现行研究  
Current activities at IITRI on high-  
temperature protective coatings  
NASA-CR-89349
- ⑤⑧ 在红外光谱中光学窗口湿度保护用的聚  
合物膜  
Polymer coating for moisture protec-  
tion of optical windows in infrared  
spectroscopy

NASA-CASE-ARC-10749~1 (N73-  
32542)

- ⑤⑨ 模拟的高能量空间环境对1050 Å和3000  
Å间的光学材料紫外透射比的影响  
Effects of a simulated high-energy  
space environment on the ultraviolet  
transmittance of optical materials  
between 1050Å and 3000Å  
Applied optics 1966, Vol.5 P 937
- ⑥⑩ 模拟的空间辐射环境对阿波罗宇宙飞船  
窗口材料的影响  
Simulated space radiation environment  
effects on Apollo spacecraft window  
materials  
NASA CR-65142.