

[13] A. M. Прохоров, А. С. Селиваненко, Авторское свидетельство от 24 декабря 1963 г. № 872303

[14] P. P. Sorokin, N. Braslau, IBM. Journ. 8, 177(1964)

[15] R. L. Garwin, IBM Journ. 8, 338 (1964)

譯自 УФН, Том 85, вып. 4 (Апр. 1965) 599—604

胡靜芬譯, 沃新能校

空間光通訊展望

B. C. 包沃茲

我們先考慮一個論題，到目前為止，很少有工程師涉及過它，這便是光的光子結構概念。任何光源產生的並不是連續的輻射，而是巨大數量的、分立的光能量“包”。這種包稱為光子。與每個光子相關的能量隨波長的增加而減少，因此，我們可以斷言，紫外光子的能量比較紅外光子的大。所以，對於給定的功率，紅外光源產生的光子比紫外光源多，這叫做光子能量效應。

這種推理同樣可以一絲不差的用於微波波源，它產生的光子甚至比紅外光源還多。給定時間內產生的光子數目很重要，因為這最終將決定信息傳遞的速率。顯然，微波源具備這種優點。

發射器孔徑的限制

如果要想儘可能地提高發射器波束的功率密度（如果需要作長距離應用，這種要求是必然的），則發射器孔徑的面積必須減至最小。但這個“最小面積”究竟有多小呢？夫琅和費的衍射理論作了回答：波束的角寬度 θ 正比於 λ/α ，其中 λ 是輻射的波長，而 α 是發射器孔徑的寬度。無論是工作在大約1厘米波長的工程師或光學波段的物理學家，都很熟悉這種限制。因此，我們得到結論（這也是問題的疑難之處），對於給定的波束角寬度，微波發射器孔徑的大小，約為其對應的光學發射器的一千倍，這便需要一個龐大的裝備。若考慮到所有空間工作元件在重量上的嚴格控制，便能明顯的看出光激射器具有很大的優點。

參量和系統元件的選擇

我們將考慮輻射背景、系統元件和最佳波長的選擇，並試圖根據現有的知識來證明每一種選擇的正確性。下文各段中，儘可能給出定量的估算，使對所作的選擇有一具體了解。

背景問題

任何通訊系統都存在“背景噪聲”。噪聲通常是由外部和內部噪聲源產生的，所收到的信號的“質量”與噪聲有關，並稱為信噪比(S/N)。幸運的是，一種可能的內部噪聲來源（發射器的）在所論的情況下是很小的。光激射器的重要特性之一，是在其光束中產生的低“噪聲”與其

他(外部的)噪声相比,是十分小的。一个不能除开的噪声源是太阳,它的色球是噪声主要的来源;另一个便是月球。我们再一次借用光子概念来考虑光辐射,而辐射体则用“黑体”温度来描述。黑体辐射理论在很多大学物理教科书中有着详细的叙述,在本文中只引用这一事实,即黑体的辐射遍及所有的波长,而且,更重要的是,辐射在光学波段最强,在中红外波段时,便减弱约一个数量级。更为定性的讨论需要引用一种特殊的(黑体)温度;估计太阳的是 7000°K 左右[米希根(Michigan)大学, 1960]。有关月球的问题虽然重要,但并不那么严重。腊姆塞(Ramsey)(1962)已计算过月球的光谱照度(单位波长上的功率密度),并给出两条曲线,一条对应于从月球反射至地球的日光,而另一条则对应于月球自身真正的辐射。这种情况如图 1 所示。据肖(Shaw)(1962)的计算,月球上被日光照射部分的有效黑体温度为 407°K 。

幸而由地球上观察到的平均背景不过 273°K 左右,因此,只要接收器不露于日光之中,背景问题便很容易处理。更为简便的方法是在夜间进行,此时能获得最好的结果。上述情况甚至在红外波段也仍然正确,因此,使用这一波段时得不到可在白天工作的优点。后文将引入其它的因素,并说明噪声不过是影响可懂信号接收的因素之一。

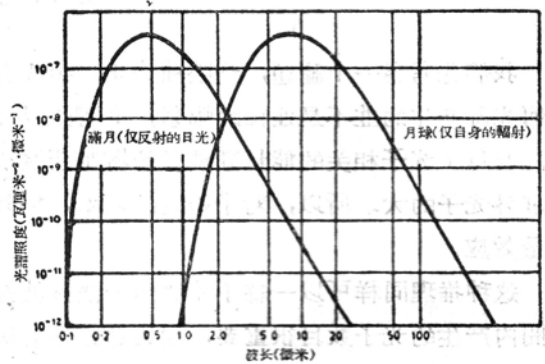


图 1 月球的光谱照度(据腊姆塞 1962)。

工作波长的选择

(a) 红外区

鉴于上文所述,选择波长时必须遵照某些条件。例如,光子能量效应便指出应该选择低的光子能量(长波)。此外,还要尽可能的避免背景辐射。有必要指出,光频区域的背景辐射很严重,因此必须避免这个区域。另外一种限制源自地球大气的吸收特性,因此必须寻找一个“窗”(大气差不多透明的波长区域)。据上述理由我们同意比特曼(Bittman)(1964)关于最适当的区域应在 10 微米 (10^{-3} 厘米) 附近的结论。目前还没有能产生这种波长辐射的光激光器,但我们首先关心的就是要克服这些天然的限制,因为它们是不可能改变的;尚待观察的是,究竟是这种限制妨碍了 10 微米光激光器的创造呢还是光激光器制造者的机巧还没有进入这个区域。

(b) 可见与紫外区

可见与紫外区并不具备甚么优点,因此本文不作考虑。

光激光器台的稳定性

空间光通讯中最困难的问题之一是要求光激光器台具有很高的稳定性。我们很快会遇到两个问题,其一是希望光束很窄;另一是必需一个极稳定的台,以致该台对于联接它和地面

接收站的路綫的角变动具有差不多的角寬度。这就要求一种折衷的方案；接收器自始至終必須被漏失但可能小的光束“盖”住，同时，接收器又必須足夠寬，以便能容忍发射台的不稳定所引起的光束方向的变动。很明显，当光束的整个橫截面都被接收器捕获时，便接收到最大的功率。限制接收器孔徑大小的另一个条件是，它應該但可能小（理想情况下至少能与光束的面积相称）以便将背景噪声的影响減至最小。因此，但最大可能去稳定发射台具有很重要的意义。斯米思 (Smith) (1963) 指出切实可行的激射光束寬为 10^{-4} 弧度（約 20 弧秒）。但雷奇廷 (Rechtin) 却指出，实际的稳定性在十分之几度和五度之間，这要看影响光激射器台的力（如太阳的輻射压力、空間的磁場、运动部件等）如何而定。很明显，就目前的技术水平而論，由于发射台的不稳定，激射光束在地球表面上扫出的面积至少是自身截面的一千倍。要記住 θ 是徑向張角，而不是立体角。用几个光激射器同时发射相同的信息似乎是一种方案，但却是一种很差的方案。单是电源的重量就会抵消掉大部分优于微波系統之处（虽然重量本身並不总是主要的因素）。

由月球向火星发射信号（我們假定是稳定的）的前景激起了人們极大的兴趣，但必須考虑火星的大气衰減問題〔晓 (Shaw) 曾討論过火星的光学性质 (1962)〕。

月球和地球間的通訊

既然已将討論限于月球，那么稳定性的問題几乎可以不作考虑，而只把束寬作为主要問題。不幸，由于大气不均匀所引起的“閃爍”效应会散射光束，因此我們不能充分利用光激射器产生窄光束的特点。波特 (Potter) 等人指出 (1963)，散射角約为 5 弧秒 (25×10^{-6} 弧度)，因此这种效应会降低光激射器的性能。但实际上还没有达到激射光束寬度的理論極限值。〔斯米思曾就 20 弧秒的束寬作过計算 (1963)〕。

光激射器的功率和束寬

在条件 (a) 信息速率不变 (b) 天綫直徑固定的限制下，考虑一下激射光束寬度如何影响对功率的要求是很有好处的。

比殊門 (Bittman) 于 1964 年作过这种尝试，导出了信号功率的表示式：

$$P_s = \left(\frac{S}{N} \right) \frac{NB}{\eta} \psi(\nu) \frac{\text{Sin}^4 \theta}{4}.$$

由于 $(S/N)NB/\eta$ 是常量，故引出相对功率：

$$P_r = \psi(\nu) \frac{\text{Sin}^4 \theta}{4},$$

式中的 (S/N) 是信噪比，

N 是每秒內的信号光子总数，

η 是把功率泵浦給信号光子的轉換效率，

B 是束寬，

$\psi(\nu)$ 是噪声的譜密度,

$$= h\nu \left[1 + \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1} \right]$$

$$\theta = 1.22\lambda/D$$

D是发射器孔径的直径

$\alpha = 2\theta$ 是“跟踪誤差角”。

在比特門的計算中, 假定天綫增益是匹配的。如果接收天綫(具有任意的大小, 則 P_s 因而 P_r 的表示式应減少一个因子 $\sin^2\theta$, 这样

$$P_s = \left(\frac{S}{N} \right) \frac{NB\psi(\nu)}{\eta} \frac{\sin^2\theta}{4}$$

和

$$P_r = \psi(\nu) \frac{\sin^2\theta}{4}.$$

由于 $\sin\theta \ll 1$, 故当使用大接收天綫时, 功率要求远比具有匹配增益的天綫为小, 但这种优点仅存在于单程通訊(如月球与地球之間)之中。

注意在上述計算中並未提及信噪比。这是因为在所考虑的各种情况下, 都把它当作常量, 因此下一节将考虑这个比值, 目的在于确定月球-地球通訊联络的最小功率要求。

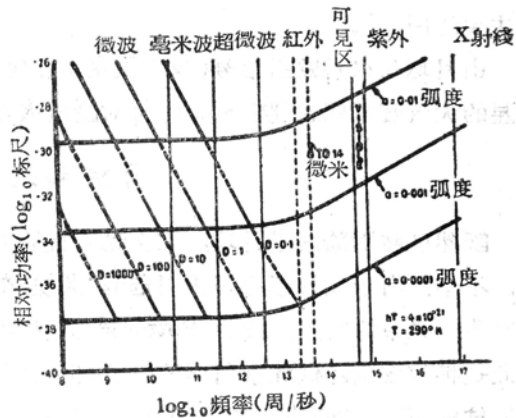


图2 固定天綫直径和束寬时, 进行通訊所需的相对功率。

实际信噪比的計算

討論时使用了下列值:

輻射波长——10微米,

激射光束寬度——20 秒(斯米思 1963),

接收天綫面积—— 20×10^4 平方厘米(斯米思 1963)。

进入接收器的背景光子数可根据图梅(Twomey)(1963)的結果算出。

使用普朗克函数

$$B_\nu = \frac{2h\tilde{\nu}^{-3}C^2}{(e^{hC\tilde{\nu}/KT} - 1)},$$

式中 $\tilde{\nu}$ = 波数 = $\frac{\nu}{c}$ 。据某些作者(如哈克福思(Hackforth)(1960))的意見, 背景輻射的黑体溫度可以取为 $275^\circ K$ 。采用这个数据, 再根据图梅的数据可得

$$B_{1000} = 63.98 \text{ 尔格/平方厘米} \cdot \text{球面度} \cdot \text{波数}$$

若束寬取作 20 秒，則激光束所張的立體角約為 19.2×10^{-7} 球面度，乘以接收天綫的面積之後，便得到天綫所收到的輻射為

$$B_{1000} = 63.98 \times 20 \times 10^4 \times 19.2 \times 10^{-7} \text{ 尔格/波数}$$

倫盖耳(Lengyel)(1962)引用了賈文(Janvan)的氦-氖光雷射器的譜綫寬度 6 兆赫，這得到波數差為 $\Delta K = 2 \times 10^{-4}$ 厘米⁻¹

由此，取得的值近于

$$5.12 \times 10^{-3} \text{ 尔格。}$$

由于光子能量為

$$6.6 \times 10^{-14} \text{ 尔格，}$$

故天綫在每秒內收到的光子數為

$$\frac{5.12 \times 10^{-3}}{6.6 \times 10^{-14}} \approx 8 \times 10^{10} \text{ 光子/秒。}$$

為了將這個數值與從光雷射器接收到的光子數相比較，我們將假設功率輸出為 0.1 瓦 (10⁶ 尔格/秒)。以光子能量除輸出功率，便得所產生的光子總數約為

$$1.5 \times 10^{19} \text{ 光子/秒}$$

這些光子分佈在大小為

$$\frac{\pi R^2 \theta^2}{4}$$

的面積上，式中 R 為光雷射器到地球的距离， θ 為束寬。如果 R 為 250,000 哩，則光束照射的面積接近

$$1.22 \times 10^{13} \text{ 平方厘米。}$$

而天綫的面積不過 20×10^4 平方厘米。

因此，天綫所截獲的信号光子數為

$$\frac{20 \times 10^4}{1.22 \times 10^{13}} \times 1.5 \times 10^{19} \text{ 光子/秒}$$

$$= 2.25 \times 10^{11} \text{ 光子/秒。}$$

若不考慮其他噪声源和損失源，則在上述條件下，信噪比為

$$\frac{S}{N} = \frac{22.5}{8} \approx 3:1$$

實際上，這個數字可能大大減小，因此未必是足夠的。但選用 0.1 瓦的輸出可能比目前所能容許的性能低。它無疑比紅寶石激光系統所能取得的還要低很多，但在這種情況下，寬的譜綫寬度會抵消高功率的優點。

探 測 器

探測器的選擇範圍比較窄，本文只考慮三種比較可能的裝置：

- (a) 光电倍增管,
- (b) 光激光器,
- (c) “量子计数器”。

(a) 光电倍增管

用光电倍增管所遇到的一个首要问题是它所探测的辐射具有相当大的带宽。这就引起寻求窄带滤光器的问题。关于这类工作,我们考虑到并不存在这种滤光器,而且,不管最后成功地寻求到的材料的性质如何,其亚原子性质总得仔细地考虑。雷斯特勒伦(Restrahlen)滤光器便是一个适当的例子;发射频率不能改变,因此,在设计通讯系统的最初阶段必须加以考虑。虽然尚不能肯定,是否能设计出具有很窄的红外光谱灵敏度的光阴极,但要想使它满足其他一些要求——如在大气窗内或在激光频率上工作——似乎不大可能。即使如此,光电倍增管仍然具备很多优点。它接收辐射的角度远比激光器的大[为了取得有效的放大,后者要求光束严格的平行于自身的轴)。若冷却光电倍增管,则其内噪声会减少,但若冷却滤光器,则得不到真正的好处[除非工作波长小于3微米左右(克鲁斯(Kruse)等1962)]。但是,一个优良的光学系统把激光能量聚焦于光阴极上时,会给光电倍增管带来很多外部光子(包括信号和噪声),因而,外噪声仍然是主要问题。若使用光束调制技术,或许能减弱到很满意的程度。

(b) 光激光器接收器

盖林訥(Gelinas)和根瑞德(Genoud)指出(1959),聚光系统不能用于光激光器接收器,这是因为它们的接受角非常小(10^{-8} 球面度)。这对于单波型运转是正确的,但当使用聚光系统时,对于多波型光激光器自发发射,噪声按 \sqrt{n} (n 为波型数)增加而信号线性地随 n 增加。不幸,目前的情况并不那样有利;每秒收到的信号光子数的波动在这种以及任何其它探测器中是很大的。这是一个统计学问题,稍后将讨论。

(c) 量子计数器

由很宽的频率范宽内选择一个给定频率的最有效方法是利用束缚电子的能级。对于发生的跃迁,吸收或发射辐射的频率很精确。这条原理的实际应用便导致了光激光器,当然,也导致量子计数器。最近,红外量子计数器已宣布成功[布朗(Brown)和香德(Shand)1963]。到目前为止,这种能同时探测两种红外频率的装置似乎还很少使用。能否同时而且有效地使用两个信息通道,主要取决于能否制造出具有正确工作频率的光激光器。波特(1961)给出了“单”布郎伯根(Bloembergen)量子计数器的一些例子。到目前为止,量子效率和噪声问题还没有引起很大的注意,但至上在原则上可以肯定,量子计数器是解决探测问题的有效手段。

光子统计学

(a) 热辐射

对“光子能量效应”谈了很多,而这已经左右着我们对于工作波长的选择。为了更仔细的考查这种效应的含意,我们准备考虑最终将确定探测器所需的最小信号功率的统计极限。首先考虑。

(a) 一个理想的探测器(无噪声的)和

(b) 热(非相干的)辐射。

选择(b)似乎有点奇怪,但我们认为一个强烈衰减的辐射源,不管是相干的或非相干的,大致都有相同的随机出现性质,因此,探测器很难说明是否收到了相干辐射。这种严格的限制太过于苛刻了。如果使用了脉冲编码调制技术,则在信息量中便需要大量的多余信息,并且还必須设计很可靠的误差校正编码。有一点是可以肯定的,即信息率会很低。

虽然如此,通过下述的基本讨论仍然可得到一些有用的概念。首先考虑,如果一秒钟内平均有 n 个频率为 ν 的光子投射到探测器上时的均方起伏值。盖林纳和根瑞德(1959):给出这个值为:

$$\overline{\Delta n_{\nu}^2} = n_{\nu} \left[1 + \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1} \right].$$

当

$$\frac{h\nu}{KT} \rightarrow 1$$

时,开始出现随机性偏差,而当

$$\frac{h\nu}{KT} \ll 1$$

时,偏差很厉害。

费耳盖特(Fellgett)已作出了比较 Δn_{ν}^2 和 n_{ν} 的图解(图3)(曾为盖林纳和根瑞德所引用)。由图可知,当

$$\frac{h\nu}{KT} \leq 3$$

时,起伏变得很厉害。如果将探测器的噪声温度取为 150°K ,则我们发现,在 10 微米(即通讯波长)时开始起伏。

被接收讯号的统计性质基本确定了,要想在给定瞬间精确地予测所予期的讯号是不可能的。

(b) 光激光器(相干的)辐射

欲对光子统计学进行严格的讨论,就必须了解甚么是玻色-爱因斯坦统计。这种方法的确实现曾受到责难[希文斯(Heavens)1962],这主要是考虑到光激光器并不处于热平衡态。此外,光子间相干性的实际探测还没有得到足够的注意[见 H. 布朗(Brown)和特威斯(Twiss)1957年的文章]。在这种不够确实的基础上似乎不可能得出可靠的结论。此外,对于整个相干问题可能了解得还不够。进一步作透彻的研究固然需要,但却是一个非常困难的问题。

(c) 最低的可探测讯号

前文曾计算过目前切实可行的信噪比。为了看看这个值距理想的最小值还有多远,我们准备考虑同一个背景,并算出需要多少光子才能使透过背景刚好看到信号。我们将“刚好看到”的标准定为:讯号至少必须等于背景起伏的均方根值。对于光子的完全随机出现情况,我们认为

$$\overline{\Delta n^2} = n,$$

其中 $\overline{\Delta n^2}$ 是每秒內光子的平均数 n 的起伏的均方值。起伏的均方根值为

$$\left[\overline{\Delta n^2} \right]^{1/2} = n^{1/2}.$$

但我們已經知道 n 大約为每秒 8×10^{10} 个光子, 假設滤光器只透过光激射器的譜綫宽度 (最佳情况的假設) 見[(b)]段, 則

$$\left[\overline{\Delta n^2} \right]^{1/2} \text{ 約为 } 3/10^5 \text{ 光子/秒.}$$

当以波长为 10 微米的光子能量乘这个数值时, 便得到 6×10^{-15} 瓦左右的功率。据波特等人 (1962) 的意见, 实际上需要的功率約为 10^{-12} 瓦。

由理想情况看来 (特别是无探测器噪声的假設), 实际值与理論值之間的偏离並不大。但当

$$\frac{h\nu}{KT} \leq 3$$

时, 比无規更为严重的影响常常会使探测器之后的判定网路弄得更为复杂。另外一个因素是, 誤差矫正編碼技术 (它也要求一个不变的判定电平) 的使用会造成更大的困难。不幸, 我們可能正在接近背景輻射所注定了的极限。

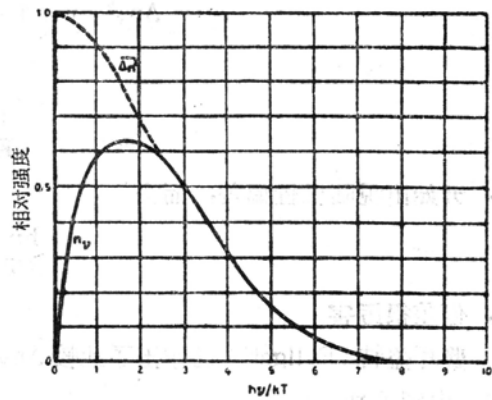


图 3 光子的光谱密度和起伏的均方值与 $h\nu/KT$ 的关系 (費耳盖特1960)。

結 論

本文的目的在于考虑光通訊的某些問題, 並指出准备完成的几个任务。任何取得成效的系統都将在光学技术上致力的結果, 因为目前使用的部件实在是不合用。但光激射器所蘊藏的巨大潛力却是一致公认的。並且已經在地球上接收到了由月球表面反射回来的激射光束, 此外已經演示了激光通話实验。

8—12 微米区域的選擇特別值得推荐, 虽然能找到更好的理由來說明並不需要使用它。这主要是因为, 虽然光学部件 (光激射器、望远鏡、探测器等) 要求可見区域, 但地球的大气层和光学“噪声”却要求使用这个区域。

光激射器台的稳定性是卫星-地球光通訊系統中的另一影响大的因素。目前的性能至少要求改善两个数量級, 而从作用到卫星上的力 (太阳风, 重力梯度和微粒轰击等) 的不确定性来看, 这显得是十分不可能的。整个瞄准和跟踪問題是严格的, 它可能确定未来进展的速度。

月球-地球通訊可能是目前的問題中最簡單的一个, 但比特門的匹配天綫增益計算却指出, 虽然单程通訊系統可能实现, 但双程通訊却有相当的困难。

(下轉第 26 頁)

射鏡作为光学共振腔，端面的平行度不坏于 $15''$ 。单个反射鏡的透过率約 3%，带有晶体的聚光器位于装有純淨液氮的低溫恆溫器中。

反射鏡的有效面积約 1500 厘米²，这就保証振盪器具有接近閾值时的工作状态。反射鏡的小部分的阴影会导致停止振盪。以 ДКСИИ 型氙灯激发的振盪器的初步实验研究表明，振盪波长等于 $2.35\% \pm 10$ 埃。图2给出了振盪和時間关系的波型图。用带有鍍滤波器的 InSb 光敏电阻作为发射指示器。记录图形的時間恆定，約 10^{-6} 秒；日光光激射器的功率估計为几微瓦。

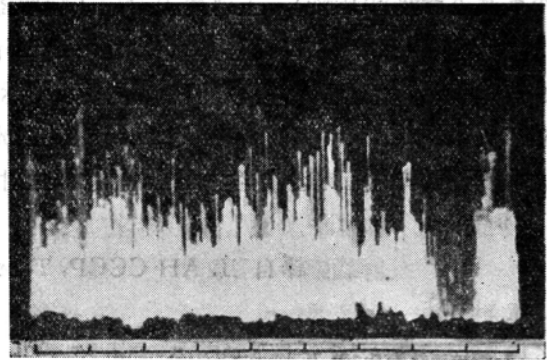


图 2 振盪和時間的关系，每一刻度等分为 250 毫秒

国立莫斯科大学罗蒙諾索夫核物理研究所

苏联科学院列別捷夫物理研究所

譯自 Д. АН СССР, Том 161, вын. 5 (Апр. 1965) 1063—1064

張榮康譯，沃新能校

(上接第 12 頁)

未来的情况究竟怎么样呢？如果美国按自己的計劃发射一个载人火箭到火星上去，那就需要一个有效的通訊体系。微波技术的巨大价值是无可非議的，但其发展已經受到限制，唯有激射光技术才在迅速的进展。在无线电剛出現的时候，欲橫过大西洋进行通訊的想法必定会被认为是一种妄想，現在看来，这不过是一件普普通通的事情。“Telstar”（所論及的另一种情况）也是完全可以理解的。行星間的通訊还未实现，但施沃次（Schwartz）和陶恩斯（Tewnes）(1961)的論証是有說服力的，或許这的确是不錯的，因为他們的計算在某一理論限度內是很好的。他們的主要要求是一种强的相干光源，我們知道，这种光源已經有了。除此之外尚未发现其他的重大問題，因而有相当的理由对前途抱以乐观的态度。

譯自 Brit. Commun. & Electron. Vol. 12, № 4 (April 1965) 222—227

顏紹知譯，孙占鳌校