

文章编号: 1001-3806(2005)01-0043-03

## 微波信号在空间光通信系统中的传输

邱 琪, 龙祖利, 田 江, 邱 昆\*

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信网技术重点实验室, 成都 610054)

**摘要:** 采用 ITU (国际电信联盟) 推荐的 Ka 波段为星间微波链路的通信频段, 设计了采用激光链路透明传输微波信号的系统方案, 包括直接微波信号传输和微波信号变频传输的两种方案。并指出了实现该目标的基本条件, 即采用大功率、高光束质量的 DPSSL (半导体激光器抽运固体激光器) 为光发射机的光源, 以及光发射机调制器的最佳选择是宽带  $\text{LNbO}_3$  波导调制器。

**关键词:** 空间光通信; 空间传输损耗; 微波信号;  $\text{LNbO}_3$  光波导调制器

**中图分类号:** TN929.1 **文献标识码:** A

### Microwave signal transmission over space optical communication system

QIU Qi, LONG Zu-li, TAN Jiang, QIU Kun

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Network Technology, University of Electronic and Science Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** According to ITU proposal, microwave link is used to Ka band, the scheme of transparence transmitting microwave signal over laser link was designed, including direct modulation transmission and microwave frequency conversion transmission. The basic conditions of realizing the goal are indicated: light source of the transmitter is diode pumped solid-state laser (DPSSL) with high power and good quality of beams, and the optimum driver of the transmitter is a broadband  $\text{LNbO}_3$  optical waveguide modulator.

**Key words:** space optical communication; space transmission loss; microwave signal;  $\text{LNbO}_3$  optical waveguide modulator

## 引 言

跟踪和数据中继卫星 (TDRS) 以其能较大幅度地覆盖和转发地球站对中、低轨道航天器的跟踪测控信号, 并具有对中低轨道航天器发回地面的数据、图像、话音等信息进行实时连续的中继等优势, 逐渐成为航空航天领域的关键技术。美国与俄罗斯两国的跟踪与数据中继卫星已组网运行, 欧空局和日本在这种卫星的发展中, 以其新思路 and 新技术途径大有后来居上之趋势<sup>[1~4]</sup>。

一直以来, 卫星间通信普遍采用微波通信方式, 随着现代信息量的高速增长, 微波通信越来越难以满足人们对信息的需求。以激光为载波的自由空间光通信被认为是实现空间超高速、大容量通信的最佳方案。自 70 年代以来, 美国、欧洲和日本先后开始了对空间光通信的研究, 现在已经进入空间实验阶段, 以检验空间光通信系统的总体性能。可以预期, 随着各国对空间光通信的重视, 以及广泛的空间光通信设备的空间

实验研究, 空间光通信必然很快进入实用阶段。

空间激光链路和微波链路相比具有如下优势:

(1) 频带比微波宽 3~4 个数量级, 可获得更高的数据传输速率或带宽; (2) 更低的系统功耗, 且具有体积小, 重量轻的特点; (3) 高度的保密性和抗干扰能力。

1995 年, 日本的 ETS-V I 卫星分别与日本及美国的地面站进行了激光星地链路试验, 研究了大气信道对光通信的影响。由于卫星和地面站之间的光通信性能受到大气环境的扰动, 所以大气信道仍有相当的技术难点有待攻克。目前存在多种解决方案。方案之一是在气候干燥少雨的地方建地面站, 这样容易实现卫星对地面站的光通信, 而地面站之间则利用光纤组网, 继而实现不同地面站之间的信息交流。另一个方案是实现激光与微波通信组网, 即卫星间用激光通信, 经过信号压缩处理后, 再用微波与地面站通信。以此设想为基础, 日本提出激光与微波通信结合的双层低轨道全球通信组网方案, 并具体论证了在地球 700km 和 2000km 的低空中部署两套卫星系统的可行性。选择激光与微波通信组网的方式, 即在 TDRS 之间采用激光链路, 而 TDRS 与机载设备、卫星地面站、遥测遥控站等采用微波链路。2001 年 11 月, 由欧空局的数据中继卫星 ARTEMIS 与法国地球观测卫星 SPOT-4 之

作者简介: 邱 琪 (1965-), 男, 教授, 博士研究生, 主要从事光纤通信及光电子技术方面的研究工作。

\* 通信联系人。E-mail: kqiu@uestc.edu.cn

收稿日期: 2004-02-21; 收到修改稿日期: 2004-06-10

间成功进行了激光链路的试验<sup>[1~4]</sup>。本文中着重研究微波信号在空间光通信系统中传输的系统方案及关键技术。

### 1 系统方案设计

在图 1中, TDRS(跟踪与数据中继卫星)与 TDRS之间采用激光链路,而卫星地面站、遥测遥控站等与 TDRS之间采用微波链路。

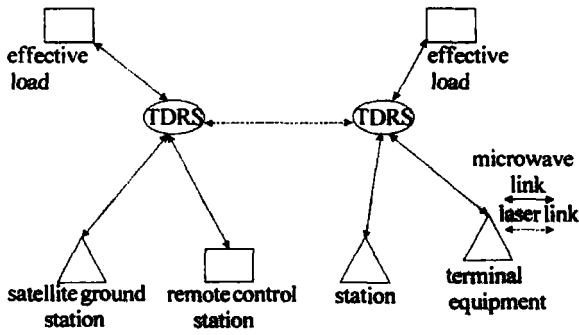


Fig 1 Scheme of TDRSS

#### 1.1 微波频段的选取

在 TDRS 系统中所用的微波频段有 L, S, C, X, Ku, Ka等频段。Ka频段是国际电联推荐的星间链路使用频段之一,前向链路为 22.55GHz~23.55GHz,反向链路为 25.25GHz~27.5GHz。选取 Ka频段的主要原因有以下几点<sup>[5]</sup>: (1)与较低频率的 C频段和 Ku频段相比, Ka频段的卫星通信具有 3个明显优势,即频谱可用率高、潜在干扰小和设备体积小等; (2)中继卫星系统选择 Ka频段,具有向更高传输数据率的扩展能力,有利于中继卫星系统今后的发展; (3)自 1987年以来,美国、日本及欧空局多次就中继卫星的相互支持问题进行了讨论,论证了 Ka频段的可行性,并保持与国际电联推荐的频段一致,这将有利于中继卫星系统的相互支持和国际接轨。

### 1.2 空间传输损耗和光源

信号传输通过调制在卫星上的光发射机输出激光光束,以一定的发散角射向接收卫星,经过长距离传输后,光斑尺寸显著扩大,因此降低了接收机上的有效光功率。从图 2可见,自由空间的传输损耗是由传输距

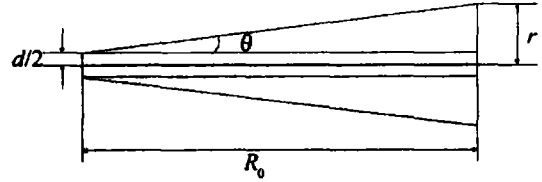


Fig 2 Loss of optical space transmission

离和发散角造成,从发射机出来的激光束的光斑半径为  $d/2$ ,光束发散角为  $\theta$ ,经过  $R_0$  距离的空间传输后,在接收机处的光斑半径扩大到  $r$ 在自由空间没有任何损耗,而光斑面积扩大带来接收面的光功率降低。通过计算有效接收面积和发散的光斑面积之比就可以得到激光束传输后的光功率损耗。通常空间光通信的收发光学天线孔径是一样的,接收机可接收的有效光束半径也是  $d/2$ 。利用下面两式,可计算得到激光束的空间传输损耗,即可表示为(单位 dB):

$$L_s = 10 \lg \left[ \frac{\pi (d/2)^2}{\pi r^2} \right] \tag{1}$$

扩散到接收机处的光斑半径为:

$$r = d/2 + R_0 \tan(\theta) \tag{2}$$

发散角  $\theta$ 是需要尽可能小的量,但是受到衍射极限的限制( $\theta = 1.22\lambda/d$ ),为降低损耗,要压缩发散角,但是从理论上发散角是大于衍射极限的。表 1中罗列了不同发散角在不同空间传输距离的损耗值。不难看出,这一损耗是非常巨大的,这是限制空间光通信发展的主要因素之一,也对空间光通信提出了严格的技术要求。

Table 1 Loss of space transmission, laser beams scatter angle and transmission distance

transmission distance/ $10^4$ km	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
at $\theta = 10\mu$ rad, loss of space transmission/dB	60.0	66.0	69.6	72.0	74.0	75.6	76.9	78.0
at $\theta = 15\mu$ rad, loss of space transmission/dB	63.5	69.5	73.1	75.6	77.5	79.1	80.4	81.6
at $\theta = 20\mu$ rad, loss of space transmission/dB	66.0	72.0	75.6	78.0	80.0	81.6	82.9	84.0
at $\theta = 25\mu$ rad, loss of space transmission/dB	68.0	74.0	77.6	80.0	82.0	83.6	84.9	86.0
at $\theta = 30\mu$ rad, loss of space transmission/dB	69.5	75.5	79.1	81.6	83.5	85.1	86.4	87.6

note:  $\theta$  is laser beams scatter angle, optical antenna aperture  $d = 200\text{mm}$ , wavelength  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$

从上面计算可见,空间光通信对光发射机的主要要求是:产生足够大的发射光功率和高的光束质量,并进行有效的高速调制。目前半导体激光器,无论是光功率,还是光束质量(发散角达 mrad 数量级)都难当重任,而半导体激光器抽运固体激光器(DPSSL),显示出很强的生命力,原因在于它综合了半导体激光器与固体激光器的优点,具有重量轻、体积小、可靠性高、大

功率(可到 W 数量级)和高光束质量(准直可达  $\mu$ rad 数量级)等优点,适合于卫星之间激光通信。DPSSL 的选择使得外调制方式的应用成为必然,它具有高速率、大消光比、大光功率和无啁啾的优点。

#### 1.3 调制方式

电光效应导致的相位调制器中光波导折射率的线性变化,使通过该波导的光波有了相位移动,从而实现

相位调制。单纯的相位调制不能形成对光的强度调制,由包含两个相位调制器和两个 Y 分支波导构成的马赫-泽德 (Mach-Zehnder) 干涉仪型调制器能实现光的强度调制。在各种外调制中,行波型钛扩散铌酸锂 ( $\text{Ti:LiNbO}_3$ ) 光波导电光调制器是一种适合高速宽带调制的器件。

$\text{LiNbO}_3$  光波导一般是在铌酸锂基片上采用钛扩散或质子交换工艺形成,其优点是:传播损耗较低,一般为  $0.2\text{ dB/cm} \sim 0.5\text{ dB/cm}$ ;波导耦合效率高,插入损耗最低可达  $0.15\text{ dB}$ ;调制器的驱动电压低,最低已达到  $0.35\text{ V}$ 。一般的调制器带宽为几个  $\text{GHz}$ ,而采用行波电极的集成电光调制器的带宽已超过  $40\text{ GHz}$ <sup>[6,7]</sup>。

行波调制器的主要参数调制带宽受限于光波与微波的速度失配,这源于铌酸锂的介电常数太高,导致调制器的微波等效折射率  $n_m$  远大于光波的折射率  $n_0$ 。由微波和光波失配时的  $3\text{ dB}$  调制带宽公式<sup>[6]</sup>:

$$\Delta f = 2c/\pi(n_m - n_0)L \quad (3)$$

可见在给定的电极长度下,调制器所达到的带宽取决于微波和光波的失配程度。图 3 为一种光波导为脊形

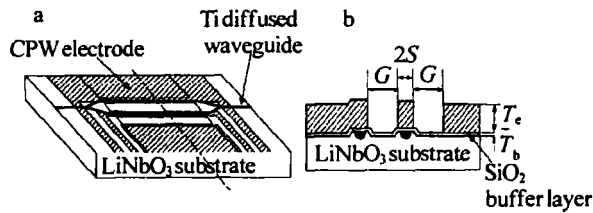


Fig 3 Figure of the  $\text{LiNbO}_3$  modulator

波导的行波调制器。图中,  $T_c$ ,  $T_d$  分别为电极厚度和  $\text{SiO}_2$  缓冲层厚度,  $G$ ,  $S$  分别为电极间隔和宽度,单位均为  $\mu\text{m}$ ,两个黑点为光波导截面图。这些参数与计算调制特性有关。在脊形结构中,电场在空气中得到泄漏,而作用在基片上的较小,就可以达到减小  $n_m$  的目的,从而得到速度匹配。同时,电极周围高介电常数的  $\text{LiNbO}_3$  被低介电常数的  $\text{SiO}_2$  和空气所代替,通过让微波泄漏到这个区域减少微波的有效指数,这样基片的实际折射率变小、实际介电常数也减小,同时避免了在速度匹配时特征阻抗的减小,实现了高速调制的阻抗匹配<sup>[7~9]</sup>。

经过大量的设计与计算,得到了电光调制器的主要技术参数,其中  $\text{Ka}$  频段的微波光调制器:  $N_m = 2.38$ ,  $\Delta f = 55.7\text{ GHz}$ ,  $Z_c = 40.6\ \Omega$ ;  $\text{C}$  波段调制器参数为:  $N_m = 3$ ,  $\Delta f = 14.7\text{ GHz}$ ,  $Z_c = 42.2\ \Omega$ 。从现有技术来看,空间光通信可以实现对任意频段微波信号的调制传输,但由于随着传输带宽的增加,系统的复杂性和成本急剧增加,因此,有必要研究微波信号在空间激光链路的传输技术。

## 1.4 微波信号在空间激光链路的传输

$\text{Ka}$  频段的微波信号是目前卫星通信使用最为广泛的频段,因此,笔者将着重研究该频段在光波中的传输。 $\text{Ka}$  频段的微波的频率接近  $30\text{ GHz}$ ,根据高频信号光调制的特征,有两种可行的方案可以选择:第 1 种方案是对  $\text{Ka}$  频段的微波信号直接进行光调制;第 2 种方案是采用变频技术,将  $\text{Ka}$  频段的信号变频到较低频率上,再对光波进行直接调制。图 4 是变频传输的原理图<sup>[10]</sup>。

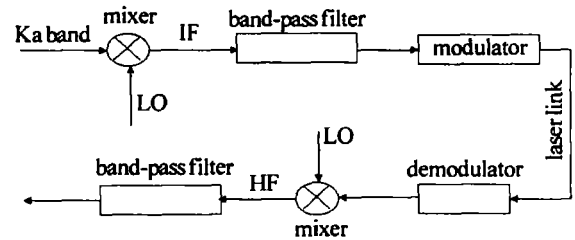


Fig 4 Scheme of frequency conversion transmission system

首先,简单易行的方法是  $\text{Ka}$  频段微波信号直接通过波导调制器对激光束进行调制,然后在自由空间传输,该方法的优点是电信号处理方便,系统相对较简单,但由于传输带宽巨大,对调制器和接收机都提出了极高的技术要求,目前的技术难以实用化。其次,利用微波技术中成熟的变频技术,分别在发射端和接收端采取下变频和上变频技术,如图 4,就可以降低对光传输的技术要求。如果把  $\text{Ka}$  频段的微波信号变频到  $\text{C}$  频段 ( $3.7\text{ GHz} \sim 4.2\text{ GHz}$ ),就可以大大降低了系统的传输带宽,提高接收机的灵敏度,降低了调制器难度。同样的传输技术指标, $\text{C}$  频段光接收灵敏度比  $\text{Ka}$  频段的可提高  $6\text{ dB} \sim 8\text{ dB}$ ,因此对系统而言,减小了对发射机激光功率的要求,使系统具有了实际应用的可能。

## 2 结束语

空间光通信技术极大地提高了通信质量和通信容量,增强了通信系统的保密性和抗干扰能力,受到世界各国的高度重视,是航空航天领域技术发展的一个制高点。通过研究卫星通信系统中微波信号在激光链路中传输的系统方案和关键技术,采用 ITU 推荐的  $\text{Ka}$  频段为系统的微波频段,便于系统的互联互通和兼容性的提高。通过对空间传输损耗的计算,确立了功率大、高光束质量的  $\text{DPSSL}$  为光发射机的光源,理论上论证了宽带  $\text{LiNbO}_3$  行波调制器在系统中的可行性,在传输方式上提出了新颖有效的变频传输方案。总之,高频微波信号的激光空间链路传输是一个复杂的、高难度的系统工程,本文中基于其中的关键技术,提出了相应的解决方案,有许多细节问题有待进一步研究。

(下转第 86 页)

率很快超过断裂功率极限,使 Yb:YAG 的工作失效。在 200kW, 260kW, 300kW, 340kW 抽运功率下, Yb<sup>3+</sup>的

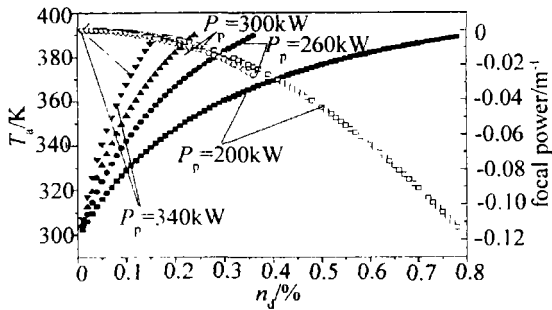


Fig 7 Average temperature and focal power variety of the slab with different pump power, the close and open symbols stand for the temperature and focal power curves respectively

最大摩尔分数分别为 0.78%, 0.36%, 0.24%, 0.16%, 最高输出功率为 90743W, 117135W, 124584W, 128190W。超过最大摩尔分数,应力开裂将使 Yb:YAG 的工作失效。可以看到,抽运功率越高,相应的最高摩尔分数也就越小。总的说来,在 100kW 的工作条件下, Yb<sup>3+</sup>的摩尔分数应小于 1%。

在 200kW, 260kW, 300kW, 340kW 抽运功率下,板条的平均温度和焦度随摩尔分数的变化如图 6 所示。可以看到,随摩尔分数的增加,板条温度上升很快,而焦度的绝对值则增加。板条的温度和焦度随摩尔分数的变化可用如下关系式拟合:

$$y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{e^{(x-x_0)/dx}} \quad (19)$$

如在 200kW 抽运下,板条平均温度与摩尔分数的关系为:

$$T_a = 394 + \frac{-1361}{e^{(n_d+0.746)/0.284}} \quad (20)$$

式中,  $n_d$  的单位为摩尔分数 (%)。

实际中总希望板条的焦度平均值尽可能的小,在满足输出功率的情形下平均温度最低。由此也可以看出, Yb<sup>3+</sup>的摩尔分数应小于 1%。

### 3 结论

计算表明, Yb:YAG 可实现 100kW 的激光输出,此时,板条的尺寸在 160mm × 75mm × 6mm 左右, Yb<sup>3+</sup>的摩尔分数应小于 1%。从晶体的生长的角度看,生长出满足此尺寸晶体元件加工的 Yb:YAG 是可行的。所以, Yb:YAG 是未来激光战术武器中的候选材料。但 LD 抽运 Yb:YAG 激光器为战略武器尚依赖 940nm LD 的发展。以 34% 的实验光-光效率计算,要发展 100kW 的 LD 抽运 Yb:YAG 激光器,至少需要 294kW 的 940nm LD 抽运源。

### 参考文献

- [1] HÖNNINGER C, PASCHOTTA R, GRAFM *et al* Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers [J]. *Appl Phys*, 1999, B69: 3~17.
- [2] RUTHERFORD T S, TULLOCH W M, GUSTAFSON E K *et al* Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling [J]. *IEEE J Q E*, 2000, 36(2): 205~219.
- [3] KANE T J, EGGLESTON J M, BYER R L. The slab geometry laser: thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J Q E*, 1985, QE21(8): 1195~1210.
- [4] TAIRA T, TULLOCH W M, BYER R L *et al* Modeling of quasi-three-level lasers and operation of CW Yb:YAG lasers [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(9): 1867~1874.
- [5] 克希耐尔 W. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 40.

(上接第 45 页)

### 参考文献

- [1] 王景泉. 跟踪与数据中继卫星系统及其技术的新发展(上) [J]. *中国航天*, 1997(5): 31~34.
- [2] 王景泉. 跟踪与数据中继卫星系统及其技术的新发展(下) [J]. *中国航天*, 1997(6): 19~21.
- [3] 刘晓川. 激光卫星通信的现状和发展趋势 [J]. *航天国际动态与研究*, 1997(26): 1~4.
- [4] JACKSON A H, GUDIN W S, CHANG R W. A TDRSS program overview [A]. *IEEE Global Telecommunications Conference [C]*. New York: IEEE, 1991. 188~194.
- [5] 陈明章, 赵恩惠, 冯达武. 我国跟踪与数据中继卫星间链路通信频段选择研究 [J]. *空间电子技术*, 2000, 7(2): 15~19.
- [6] 陈福深. 集成电光调制器理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 139~150.
- [7] 张兵, 吴伯瑜, 周伟勤 *et al* 40GHz 铌酸锂电光调制器 [J]. *光电子·激光*, 2001, 12(11): 1199~1201.
- [8] NOGUCHI K, MIYAZAWA H, MIYAZAWA H. Millimeter-wave Ti:LnB-O<sub>3</sub> optical modulators [J]. *J Lightwave Technol*, 1998, 16(4): 615~619.
- [9] NOGUCHI K, MIYAZAWA H, MIYAZAWA H. 75 GHz broadband Ti:LnB-O<sub>3</sub> optical modulator with ridge structure [J]. *Electron Lett*, 1994, 30(12): 949~950.
- [10] 周仲林, 杨建军. 通信卫星 Ka 波段转发器技术的研究 [J]. *电讯技术*, 1997, 37(2): 43~55.