

可用于深空信息传输的光纤激光相控阵技术

王天枢^{1,2,3}, 孙鸿伟^{1,2,3}, 韩建^{1,2,3}, 张鹏^{1,2,3}, 胡源^{1,2,3},
张立中^{1,2,3}, 刘京郊⁴, 姜会林^{1,2,3}

(1. 空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 长春 130022; 2. 长春理工大学 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 长春 130022; 3. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 长春 130022; 4. 北方电子技术研究所, 北京 100083)

摘要:提出采用面向动态连接的光纤激光相控阵的深空激光通信及全光组网技术,对4~35万千米深空探测链路功率进行了仿真,由于1.55 μm掺铒光纤放大器的饱和输出限制,使其安全裕量大大低于1.064 μm载波源的安全裕量。模拟了1.064 μm的光纤激光相控阵在深空通信中的远场强度分布图,阵元数目为20×20时,阵元间距为20 μm、纤芯半径为10 μm,远场的扫描角度范围为±1.309°。结果表明,1.064 μm光纤激光相控阵光源具有深空链路传输优势,该研究为面向动态连接的激光相控通信的实现提供理论依据。

关键词: 深空通信; 光纤激光相控阵; 扫描角度; 动态连接; 全光组网

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2014)04-0282-07

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2014.04.006

Fiber Laser Phased Array for Deep-Space Information Transmission

WANG Tianshu^{1,2,3}, SUN Hongwei^{1,2,3}, HAN Jian^{1,2,3}, ZHANG Peng^{1,2,3},
HU Yuan^{1,2,3}, ZHANG Lizhong^{1,2,3}, LIU Jingjiao⁴, JIANG Huilin^{1,2,3}

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Measuring-Controlling and Optical Information Transmitting Technology, Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. Institute of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 4. North China Institute of Electronic Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the technology of deep space laser communication and all optical networking based on fiber laser phased array using dynamic connection is proposed. The link power in deep space laser communication from 40 000 km to 35 000 km are simulated. Because the limit of saturation output of erbium-doped fiber amplifier, the safety margin using 1.55 μm laser is much lower than that of 1.064 μm. The far field intensity distribution of 1.064 μm fiber laser phased array in deep space is simulated. It is found that the scanning angle range is different with distance between two adjacent elements. With a 20×20 array, fiber core radius and distance between two adjacent elements are 10 μm and 20 μm respectively, the scanning angle range is ±1.309°. Therefore, the fiber laser phased array of the light source at 1.064 μm is more suitable for deep space communication systems. This study provide a theoretical basis for the realization of a dynamic link for laser phased communication.

Key words: deep space communications; fiber laser phased array; the scanning range; dynamic link; all optical network

0 引言

空间信息网络以卫星、气球、无人机等空间平台为载体,实时获取、传输和处理空间信息,可服务远

洋航行、导航定位、航空运输、航天测控等方面重大应用,向上可支持深空探测的超远程、大时延可靠传输。深空探测技术将人类科学、文化、生产活动拓展至深空,使探月和探火等科学任务成为现实,是全球研究的热点,我国也将于2020年完成月面探测和采样返回任务,而深空探测产生的大量科学数据需要依靠大容量、超远距离的空间信息传输技术^[1-3]。

深空通信的最大特点是远距离无中继传输,而天基微波信号发射功率有限,且射频传输衰减与距离平方成正比,限制了通信传输带宽。因此,如何弥补巨大衰减实现远距离宽带通信是深空通信面临的最大难题。近年来,自由空间激光通信技术日益成熟,具有发射光束窄、增益高、安全性好等优点,可广泛应用在民用、空间科学以及军事等领域。尤其在深空通信领域,激光通信可以克服传输距离远、带宽窄等缺点。然而,目前空间激光通信系统采用的半导体激光器发射功率小、线宽较宽、调制速率低、波长稳定性差、发射角不可调等缺点,大大限制了其深空通信中的应用和空间信息网络的动态连接^[4]。而在国内的研究中,使用光纤激光相控阵作为激光发射源的研究领域是空白的,所以,此研究极具创新价值以及科研价值。

光纤激光相控阵技术是目前新兴的光纤激光相干合成技术,不仅可实现高发射功率,还能对发射光束扫描,可用于激光通信动态连接,为全光组网创造条件^[5-9]。本文对深空激光通信功率的链路进行了仿真,对1.55 μm 和1.064 μm 激光的深空高速信息传输进行了比较,模拟了1.064 μm 的光纤激光相控阵在远场的强度分布图和扫描角度范围。结果表明,1.064 μm 光纤相控阵光源具有深空链路高速信息传输优势,并适用于全光动态网络连接。

1 深空激光通信链路功率仿真

在深空激光通信中,若通信光束以衍射极限角发射,激光通信的链路方程可以简单描述为^[10]

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_{ot} \cdot L_r \cdot \eta_s \cdot L_{\text{APT}} \cdot G_r \cdot \eta_{or} \quad (1)$$

式中: P_r 为探测器接收功率; P_t 为发射单元的发射功率; G_t 为发射光学天线增益; η_{ot} 为发射光学单元的透过率; L_r 为自由空间损耗; η_s 为信道引起的功率损失; L_{APT} 为APT对准失配引起的功率损耗; G_r 为接收光学天线增益; η_{or} 为接收光学系统透过率。

根据天-地间激光通信传输速率10 Gbps、传输距离4万km、误码率 $10e-6$ 的技术指标要求,采用

1.550 μm 激光和1.064 μm 激光光源进行链路仿真。由于1.550 μm 放大器的饱和输出限制,且效率较低,经EDFA放大后发射功率最高为5 W,1.064 μm 光源也同样采用5 W发射功率进行比较。1.064 μm 激光经YDFA后可高效率放大至15 W以上,因此仿真计算也采用15 W输出的1.064 μm 激光进行比较。其链路功率仿真分析如表1所示,其中, L_c 表示为大气损耗, P_t 为接受光功率,SEL为通信接受灵敏度, A 为安全裕量。

表1 两种激光器的链路能量仿真计算

Table 1 The simulation of the link energy between two kinds of lasers

系统参数	1.550 μm	1.064 μm	1.064 μm
P_t	36.98 dBm(5W)	36.98 dBm(5W)	41.76 dBm(15W)
G_t /dB	118.17	121.44	121.44
η_{ot} /dB	-2.22	-2.22	-2.22
L_r /dB	-290.21	-293.48	-293.48
L_c /dB	-6.00	-6.00	-6.00
G_r /dB	126.13	129.40	129.40
η_{or} /dB	-3.01	-3.01	-3.01
L_{APT} /dB	-0.50	-0.50	-0.50
P_t /dBm	-20.66	-17.39	-12.61
SEL/dBm	-36.00	-36.00	-36.00
A /dB	15.34	18.61	23.39

发射天线口径400 mm,由式(2)可知,1.55 μm 激光对应增益118.17 dB,1.064 μm 激光对应增益为121.44 dB。

$$G_t = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2)$$

式中: D 为发射天线口径; λ 为波长。

发射光路损耗包括光纤耦合、中继光学组件效率、发射效率等因素,总发射效率0.6,对应-2.22 dB;若以衍射极限发射,当通信距离为4万km时,1.55 μm 激光的空间损耗为-290.21 dB,1.064 μm 激光光源的空间损耗为-293.48 dB;大气散射损耗和大气闪烁损耗,每项引起-3 dB,共-6 dB;信道引起的功率衰减近似为1;如果保证APT跟踪误差优于束散角的1/8,接收口径处APT对准失配引起的功率损耗比视轴中心功率降低0.5 dB;当地面接收口径为1000 mm时,1.55 μm 激光器对应的光学天线增益126.13 dB,1.064 μm 对应的光学天线增益为129.40 dB,由于接收光路光纤耦合、中继光学组件效率等因素的损耗,其总发射效率0.5,对应-3.01 dB;通信探测灵敏度可达-35 dBm到-38 dBm,具体调制方式与接收带宽有关,选取接收光学系统透过率-36 dBm;通信束散角均以衍射极限角发

射,修正损耗为 0 dB。

通过以上分析,同等发射功率(5 W)的情况下,1.064 μm 的激光器的安全裕量比 1.550 μm 大 3 dB 以上;而 1.064 μm 激光若采用 15 W 的发射功率,其安全裕量更高。因此,相同发射功率下,1.064 μm 激光更容易探测接收。由于 YDFA 效率远高于 EDFA,相同功耗下,1.064 μm 激光输出更高。故采用 1.064 μm 激光可以使发射功率高达 15 W,其安全裕量远远高于 1.55 μm 激光传输。通信系统的灵敏度取决于光探测器灵敏度,提高光探测器灵敏度,工艺难度较大,采用 1.064 μm 激光可以提高发射功率,从而降低光探测器灵敏度要求,简化了通信接收系统的工艺难度。

发射功率 5 W 的 1.55 μm 激光和发射功率 15 W 的 1.064 μm 激光,对不同深空距离进行链路仿真得到的安全裕量如图 1 所示。

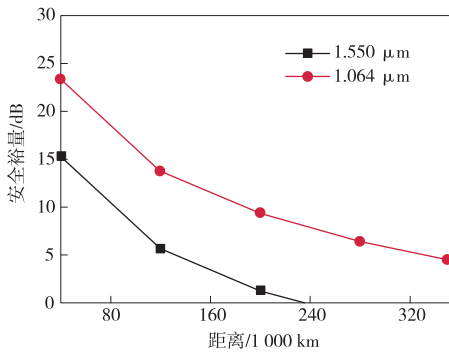


图 1 不同距离的安全裕量

Fig. 1 The safety margin from the different distance

由图 1 可知,在深空环境下,随着通信距离的增加,1.064 μm 的光纤激光器更容易探测接收,在通信距离为 23 万 km 时,1.550 μm 的激光器已经无法探测接收,在通信距离为 35 万 km 时,1.064 μm 的安全裕量为 4.55 dB。而在相干探测中,通信系统更加复杂,此时,1.064 μm 的优势将更加明显。总之,1.064 μm 的光纤激光器更容易探测接收。可见,随着深空距离的增加,1.064 μm 激光通信更具优势。

2 光纤激光相控通信技术

通过以上分析,1.064 μm 激光作为激光通信载波源可大大提高发射功率,若采用光纤激光相控阵

$$I(x, y) = |E(x, y)|^2 = \left\{ \frac{\sin \left[\frac{\pi N_x d_x (x/z - \sin \theta_{x0})}{\lambda} \right]}{\sin \left[\frac{\pi d_x (x/z - \sin \theta_{x0})}{\lambda} \right]} \frac{\sin \left[\frac{\pi N_y d_y (y/z - \sin \theta_{y0})}{\lambda} \right]}{\sin \left[\frac{\pi d_y (y/z - \sin \theta_{y0})}{\lambda} \right]} \right\}^2 \exp \left[-\frac{\pi^2 \omega_0^2}{\lambda^2 z^2} (x^2 + y^2) \right]$$

光源,还能获得更高的发射功率和更大的裕量。而光纤激光相控阵应用于深空通信,可实现高发射功率,还能对发射光束进行扫描,实现动态连接激光相控通信,实现全光组网。

2.1 光纤激光相控阵在深空传播中的模型

假设深空通信中的目标平面平行于光纤相控阵的出射平面,激光相控阵是由 $N_x \times N_y$ 个调制单元(又称移相器)组成的二维阵列(如图 2 所示),其相位的变化与坐标成正比,相邻的两个相控单元在 x, y 方向上的距离为 d_x 和 d_y ,每个相控单元的半径近似等于光纤的半径 ω_0 ,假设每一个相控单元的传播方向都在同一个方向且具有相同的发射功率,则每个相控单元在出射方向上的偏转角为 θ_{xy} ($x=1, 2, \dots, N_x; y=1, 2, \dots, N_y$)。

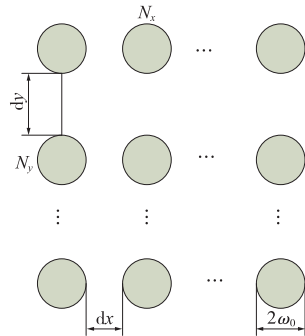


图 2 二维光学相控阵
Fig. 2 2D optical phased array

若每个相控单元有固定的相位,在 x, y 方向上的偏转角为 θ_{x0} 和 θ_{y0} ,则在出射平面的相位满足

$$\varphi_{xy} = \varphi_x + \varphi_y = x \frac{2\pi d_x \sin \theta_{x0}}{\lambda} + y \frac{2\pi d_y \sin \theta_{y0}}{\lambda} \quad (3)$$

式中: λ 为入射光的波长; d 为合束间距,此时光纤激光相控阵的光束将偏转 θ 角度。假设光学相控阵有 $N_x \times N_y$ 个相控单元,则总的光电场公式为

$$E(x, y) = C \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} \exp \left[-\frac{kj}{z} (md_x x + nd_y y) - \varphi_{mn} \right] \times \exp \left[-\frac{k^2 \omega_0^2}{4z^2} (x^2 + y^2) \right] \quad (4)$$

式中: $C=1/(jkz) \times \exp(jkz) \times \exp[jk(x^2 + y^2)/(2z)]$, $k=2\pi/\lambda$ 。

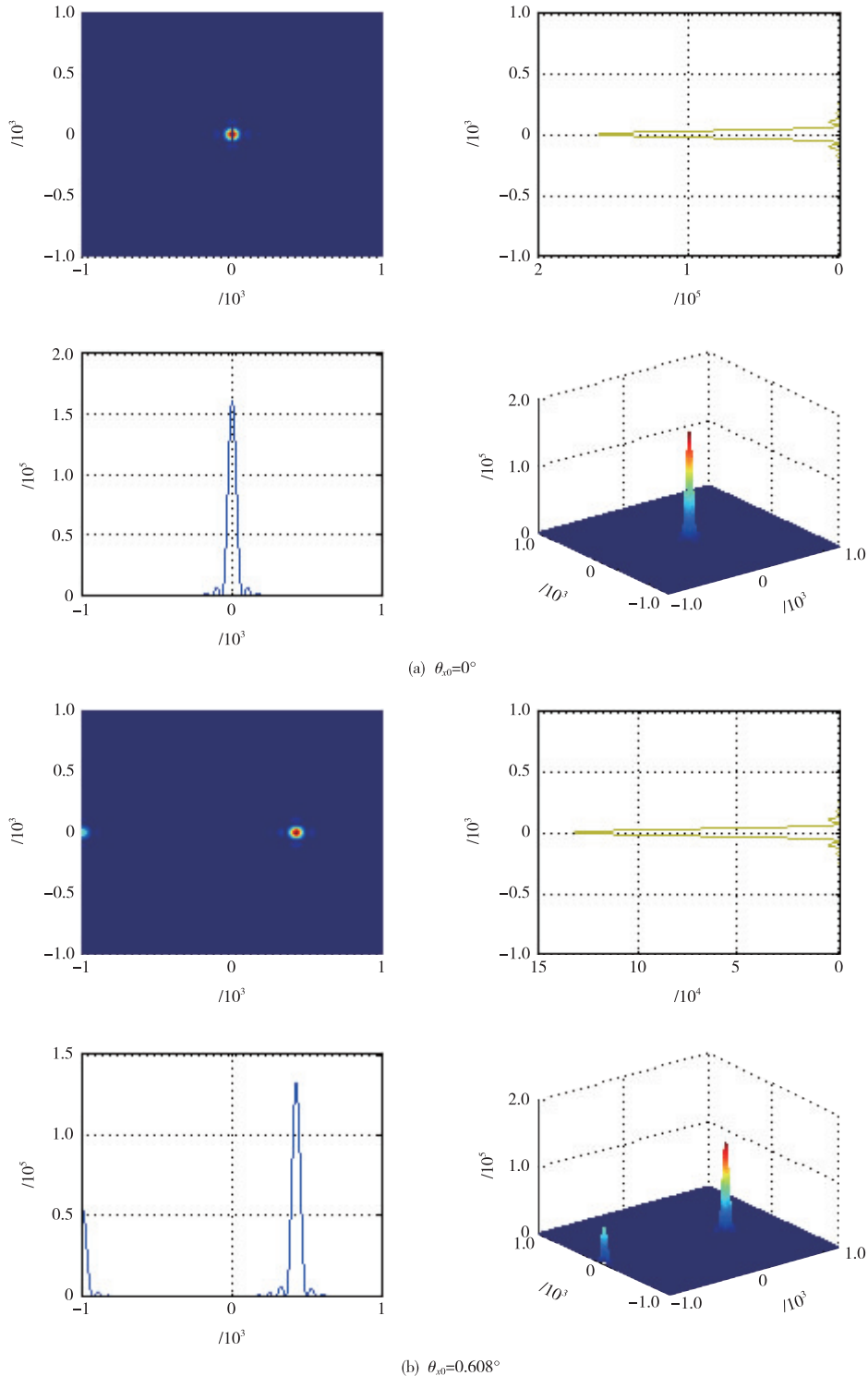
则相对光强公式为

2.2 用于深空通信中的光纤激光相控阵分析

本文模拟 $1.064 \mu\text{m}$ 光纤激光相控阵在深空通信中远场的强度,其中设置的参数为:激光波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$;相邻相控单元的距离 $d_x = 30 \mu\text{m}, d_y = 30 \mu\text{m}$;纤芯的半径 $\omega_0 = 10 \mu\text{m}$;通信的距离 $z = 40 \text{ km}$;相控单元的数目 $N_x = 20, N_y = 20$; y 方向上的偏转角度 $\theta_{y0} = 0^\circ$ 。

假设每一个相控单元的偏转角度都在同一个方向上,则不同角度在深空远场的光强如图 3 所示。

分别调节各移相器中激光束相位可控制光束的波形,实现光束偏转。当偏转角度为 0 度时,远场光强的极值为最大值,增大偏转角度,远场光强的极值开始移动,当偏转角度达到 1.016° 时,出现两个相等光强的峰值,此时无法正确、清晰地观察物体位置。当继



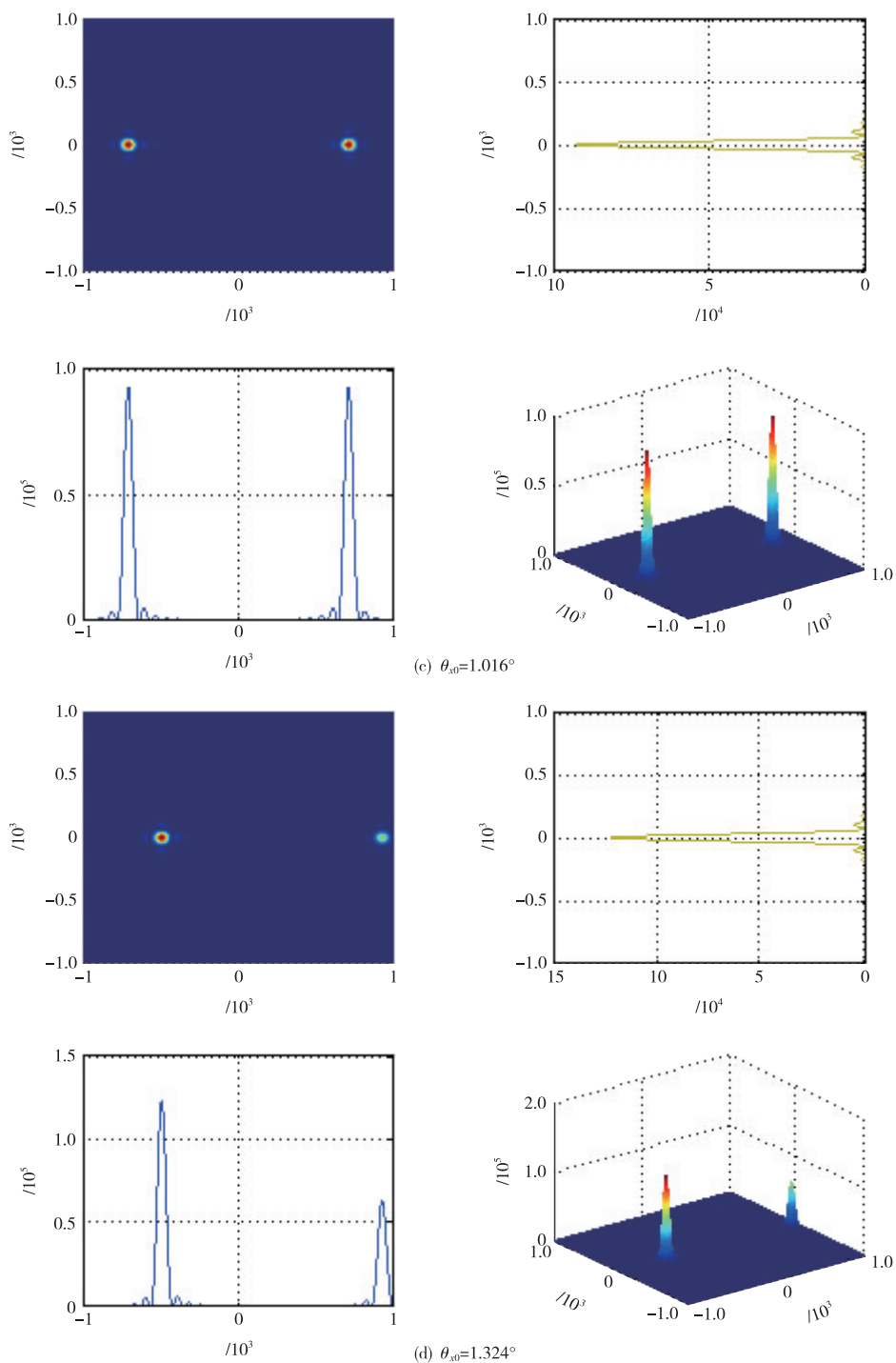


图 3 相控阵远场切向强度分布
Fig. 3 The intensity distribution in the far field

续增大偏转角度时,会出现误差,此时,对于空间激光通信,将会大大增加误码率,使信息传输出现错误。

由偏转角度式(3)可知,阵元间距和偏转角度成反比,与波长成正比。所以当减少阵元间距时和增大波长时,可以提高光纤相控阵的偏转角度,在其他

参数不变情况下,当波长为 $1.550 \mu\text{m}$ 和 $1.064 \mu\text{m}$ 时,改变阵元间距,当获得两个相等远场强度分布图时,偏转角度如表 2 所示。

表 2 为在不同间距的情况下,在远场出现两个相等的光强分布时的最大的偏转角度,在此偏转角度的情况下,无法清晰地分辨物体。但是,也不能将

此角度定义为光纤激光相控阵的偏转角度。因为,在远场中主瓣的旁边有许多栅瓣和旁瓣^[11],此时将大大影响光纤激光相控阵的精度,由式(6)可以得到栅瓣的位置

表2 不同间距时的偏转角度

Table 2 The steering angle in different distance

距离/ μm	偏转角度/ $(^\circ)$	
	1.064 μm	1.55 μm
20	1.524	2.221
30	1.016	1.480
40	0.762	1.110
50	0.610	0.888

$$N \frac{\pi d (\sin \theta_x - \sin \theta_{x0})}{\lambda} = \pm \pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \dots \quad (6)$$

当 $\theta_x = 90^\circ, -90^\circ$, 上式简化为

$$d(1 + |\sin \theta_{x0}|) = \lambda \quad (7)$$

由式(7)可知,当满足 $d < \lambda$ 时,光纤相控阵中没有栅瓣。但是由于光波的波长极短,满足这样的条件非常困难,所以定义栅瓣强度的最大值与主瓣强度的比值等于 0.5 时,此时的偏转角度为光纤激光相控阵的最大偏转角^[12]。图 4 为不同波长的光纤激光相控阵在不同距离的最大偏转角度。

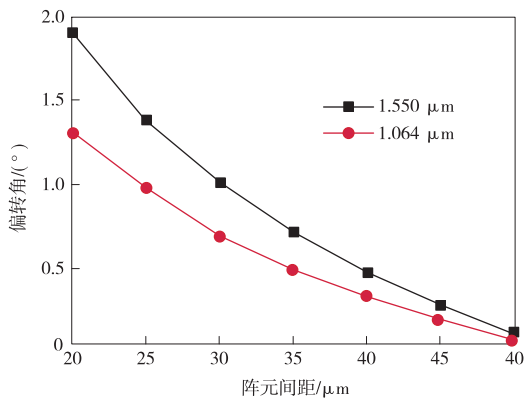


图4 最大偏转角

Fig. 4 The max steering angle

由图 4 可知,当增大阵元间距时,偏转角度下降。在阵元间距相等的情况下,虽然 1.550 μm 的光纤激光相控阵的偏转角度比 1.064 μm 的大,但在深空通信中,1.064 μm 的光纤激光相控阵的偏转角度已经可以很好地满足深空通信的使用要求,且对探测接受器件的灵敏度要求较低。

基于光纤激光相控阵源的激光通信系统中,每台激光通信端机作为一个光网络节点,每个节点之间的最大扫描角度就是动态连接的区域,在此区域

内,可以依靠光纤激光相控阵实现动态通信,实现全光组网。因此,基于动态连接的激光相控通信技术可以满足一点到多点高速通信,为实现空间信息的全光组网提供了条件,也能实现深空探测信息的动态网络接入。

3 结 论

本文提出了基于动态连接的光纤激光相控阵在深空通信中的应用及全光组网,链路仿真和模拟光纤激光相控阵在远场的强度分布图,结果说明 1.064 μm 光纤激光相控阵具有深空链路传输的优势,并求得了不同波长的最大偏转角度范围,即动态连接的区域。目前的空间激光通信主要采用 1.55 μm 的激光作为发射源,主要原因是 1.55 μm 的接受器件的工艺已经比较成熟,而采用 1.064 μm 的光纤激光相控阵作为发射源,其探测、接收器件都对工艺提出新的要求,而在未来的通信领域,综合考虑光纤激光相控阵本身的性能和栅瓣的限制,1.064 μm 光纤激光相控阵光源在深空通信中具有更好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Sodnik Z, Furch B, Lutz H. Free-space laser communication activities in Europe: SILEX and beyond[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006;78-79.
- [2] Jono T, Takayama Y, Shiratama K, et al. Overview of the inter-orbit and the orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS [J]. SPIE, 2007 (6457): 645702-1,645702-10.
- [3] Lange R, Heine F, Kampfner H, et al. High data rate optical inter-satellite links[C]// Proceedings of Eur. Conf. Opt. Commun. Vienna:[s. n.],2009.
- [4] 罗建将,李洪祚,唐雁峰,等.深空探测激光通信技术发展研究[J].航天器工程,2013,22(2):94-97.[Luo J J, Li H Z, Tang Y F, et al. Research on laser communication technology development for deep space exploration [J]. Spacecraft Engineering, 2013,22(2):94-97.]
- [5] Polishuk A, Arnon S. Communication performance analysis of microsatellites using an optical phased array antenna[J]. Opt. Engng., 2003,42(7):2015-2024.
- [6] Mcmanamon P F, Porscher T A. Optical phased array technology [J]. IEEE, 1996,84(2):268-298.
- [7] Leeb W R, Neubert W M, Kudielka K H, et al. Optical phased array antennas for free space laser communications [J]. SPIE, 1994(2210):14-29.
- [8] Arain M A, Riza N A. High-beamforming power-code-multiplexed optical scanner for three-dimensional display[J].

- SPIE, 2003(5243):59-64.
- [9] Zhao Y, Yang X, Cai Q, et al. Application of simulated annealing to design and realisation of two-dimension fiber-type optical phased array[J]. Electron Lett, 2008(44): 490-492.
- [10] 姜会林, 佟首峰. 空间激光通信与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 82-88. [Jiang H L, Tong S F. The technologies and systems of space laser communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 82-88.]
- [11] Stuart Yin, Jae Hun kim, Fei Wu, et al. Ultra-fast speed. low grating lobe optical beam scanning using unequally spaced phased array technique[J]. Opt. Comm., 2007, 270: 41-46.
- [12] Zhao S, Ye Zh, Yang D, et al. Far field analysis of fiber laser phased array for free space communication[C]// IEEE Photonics and Optoelectronics 2011 Symposium on, 978-1-4244-6554-5/1.
- 作者简介:
王天枢(1975—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为光纤激光器技术、激光通信技术等。
E-mail: wangts@cust.edu.cn
孙鸿伟(1989—), 男, 硕士, 主要研究方向为光学相控阵。
E-mail: shw805986996@sina.cn
- [责任编辑: 高莎]

更 正

本刊 2014 年第 1 卷第 2 期刊登文章《深空网干涉测量技术在“嫦娥 3 号”任务中应用分析》, 作者提供信息有误, 单位名称“航天飞行动力学技术国家重点实验室”, 应为“航天飞行动力学技术重点实验室”, 特此更正。