第 10 卷　第 4 期　　中国光学　　Vol.10　No.4
2017 年 8 月　　Chinese Optics　　Aug. 2017

文章编号　2095-1531(2017)04-0462-07

星间激光通信终端光学天线的隔离度

杨成龙[1,2]，颜昌翔[1*]，杨宇飞[1,2]
(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033; 2.中国科学院大学，北京 100049)

摘要：为满足星间激光通信对高隔离水平光学天线的要求，实现对光学天线隔离度的仿真分析和优化，提出了一种将红外系统冷反射的特征控制量 *YNI* 值作为衡量光学元件表面后向反射能量强度，并控制光学天线优化以提高隔离度水平的方法。在 LightTools 软件中为某激光通信终端的卡塞格林天线创建了实体模型，通过仿真分析得出了各元件表面的后向反射率。在 ZEMAX 软件中以增大各元件表面的 *YNI* 值为目标优化天线结构。对比优化前后的结果，系统的后向反射率从 $3.068\ 8\times10^{-4}$ 减小到 $1.075\ 5\times10^{-5}$，隔离度从 -35.13 dB 减小到 -49.68 dB。优化后的卡塞格林天线具备较高的隔离度水平，可用于星间激光通信。

关　键　词：激光通信；隔离度；后向反射；*YNI* 值
中图分类号：TN929.13　　**文献标识码**：A　　doi：10.3788/CO.20171001.0462

Isolation of optical antenna of inter-satellites laser communication terminals

YANG Cheng-long[1,2], YAN Chang-xiang[1*], YANG Yu-fei[1,2]
(1.*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: yancx@ciomp.ac.cn*

Abstract: To meet the requirement of inter-satellites laser communication for higher isolation level of optical antenna and achieve the simulation analysis and optimization of optical antenna's isolation level, a method using the *YNI* value (characteristic value of narcissus in infrared optical system) as the evaluation of back-reflection energy intensity of optical element surfaces and increasing the isolation level of optical antenna by controlling its optimization is presented. An entity model of Cassegrain antenna in an inter-satellites laser communication terminal is established by LightTools software, and back-reflection ratio of each element surface is obtained through simulation and analysis. Optical antenna's structure is optimized by increasing the *YNI* value of each element surface by ZEMAX software. Comparing the results before and after optimization, the optical antenna's back-reflection ratio decreases from $3.068\ 8\times10^{-4}$ to $1.075\ 5\times10^{-5}$ and the isolation level decreases from -35.13 dB to -49.68 dB. The optimized Cassegrain antenna has a high isolation level, which can be used for inter-satellites laser communication.

收稿日期：2017-02-05；**修订日期**：2017-03-28
基金项目：国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(No. 2011AA12A103)
Supported by National High Technology Research and Development Program of China(No. 2011AA12A103)

Key words: laser communication; isolation; back-reflection; *YNI* value

1　引　言

星间激光通信终端是一种弱能量探测系统，由于通信接收到的信号光强度非常微弱，而发射光束的能量很强，因此发射和接收之间必须进行高度隔离，否则发射光经过光学元件的后向反射或者散射后会到达通信或捕获接收器上，对信号产生严重影响，甚至会直接湮没接收信号，导致系统不能正常工作[1]。为了提高通信终端的隔离度水平，可以进行时域分光或空间分光，时域分光是在时域上将通信的发射和接收过程分开，而空间分光则是采用不同的光学天线将通信的发射和接收过程在空间上分开。这两种方式虽然均能提高通信终端的隔离度水平，但却降低了效率，增加了成本，并不适合于星间激光通信。星间激光通信终端多采用收发一体的双工通信模式，即通信的发射和接收过程共用光学天线，常用光谱分光、偏振分光等方法进行收发光束的隔离[2-5]，但这些方法对相关光学器件的要求较高，并且当光学天线后向反射的能量较大时，分光难度将进一步增大，导致终端的总隔离度无法达到较高的设计指标，因此必须提高光学天线的隔离度水平，保证发射光束在经过光学天线时，产生的后向反射能量足够小，以减弱对接收光束的影响。

目前国内的星间激光通信尚处于实验室研究阶段，在未来应用于实际时，通信终端必将对光学天线提出较高的隔离度要求，但国内外关于如何采用软件实现天线隔离度的仿真计算，以及如何控制光学天线的优化以提高隔离度水平方面的研究还未见报道。因此对天线隔离度的仿真分析、检测研究具有重要的理论和现实意义[6-9]。

本文从提高光学天线的隔离度水平出发，引入后向反射率，提出了一种将红外系统冷反射的特征控制量 *YNI*（入射高度、介质折射率和入射角乘积）作为衡量光学天线元件表面后向反射能量强度的方法，并以增大光学元件表面的 *YNI* 值作为目标，对光学天线进行优化设计。通过 LightTools 软件对优化前后的光学天线进行仿真实验，结果表明，采用 *YNI* 值控制光学天线的优化可以有效提高隔离度水平。

2　光学天线隔离度

星间激光通信终端的光学天线常采用卡塞格林结构，其由物镜和目镜组成。物镜包括 1 个主镜和 1 个次镜，目镜包括若干透镜，当发射激光经过天线各光学元件表面时，产生的后向反射能量就会进入接收器。后向反射能量的相对强度用后向反射率 R 描述：

$$R = E_{\mathrm{R}}/E_{\mathrm{E}}. \tag{1}$$

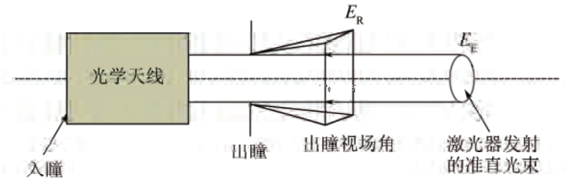


图 1　后向反射率的定义

Fig. 1　Definition of back-reflection ratio

如图 1 所示[10]，E_{E} 为终端发射并充满天线出瞳的准直激光能量，E_{R} 是发射激光经过天线各光学元件表面后向反射回来且入射角小于出瞳视场角的能量。得到后向反射率 R 后，再通过式（2）计算天线的隔离度 Y_{I}：

$$Y_{\mathrm{I}} = 10 \times \lg R. \tag{2}$$

3　基于冷反射理论的后向反射评价方法

3.1　冷反射理论

在制冷型红外光学系统中，冷反射是必须要考虑的现象。由于探测器光敏面的温度为 80～100 K，它与系统的工作温度相差很大，是非常强的冷辐射源[11]。当探测器发出的冷光线聚焦或正入射到透镜表面时，将经表面反射后再度聚焦到焦平面上，从而在图像中心形成一个冷斑，即探测器经光学系统表面而观察到自身形成的冷像[12]。冷反射的存在会影响红外光学系统的成像质量，因此在进行红外光学系统设计时，必须尽量抑制冷反射现象的产生。

冷反射现象中的冷光斑能量与光学构型、镜片形状、镀膜等因素密切相关。在使用光学设计软件设计制冷型红外光学系统时，为抑制冷反射现象，通常将 YNI 和 I/I_{bar} 这 2 个参数作为光学系统中各表面产生冷反射强度的评价标准：

$$YNI = yni, \tag{3}$$

$$I/I_{bar} = I/i_z, \tag{4}$$

式中，YNI 反映的是光学系统中心视场处后向反射能量的强度，它是近轴边缘光线在光学表面上的入射高度 y、介质折射率 n 和入射角 i 的乘积。YNI 的值越接近于 0 时，光学元件表面产生的冷反射就越严重；当 YNI 的值大于 1 时，一般可以认为该光学表面产生的冷反射很小。I/I_{bar} 反映的是光学元件表面后向反射能量随视场的变化，I 和 i_z 分别为轴上视场的边缘光线和边缘视场的主光线在光学表面的入射角，若 I/I_{bar} 大于 1，则可认为冷反射强度不随视场变化[13-16]。

3.2　光学天线后向反射强度的评价方法

对于激光通信过程，终端发射的激光光束经过光学天线各元件表面后，产生的后向反射能量会进入到接收探测器中，影响通信质量。这类似于红外系统的冷反射现象，二者都是内部光束经过系统各元件表面后产生后向反射能量。不同的是，冷反射现象中的冷光线是因探测器与环境温差较大而产生的红外辐射，不是单一波长；而激光通信的后向反射光束则来源于终端发射支路激光器发出的单一波长的激光。

由于激光通信系统元件表面的后向反射类似于红外系统的冷反射现象，因此本文提出了一种控制光学天线后向反射能量的新方法，即：将红外系统设计时评价冷反射强度的特征参数 YNI 和 I/I_{bar} 应用于激光通信终端光学天线的优化设计过程。星间激光通信的信号光视场很小，所以在评价光学天线各表面的后向反射强度时，仅需考虑 YNI，而不用考虑 I/I_{bar}。

当发射光线被某一表面反射而原路返回时，根据光路可逆原理，必定会进入原发射单元，这时该表面产生的后向反射能量最大。例如，光线垂直入射到光学元件表面时，即入射角为 0°；光线入射在某表面的顶点时，即在该表面的入射高度为 0。由 YNI 的定义可知，图 2 中表面 2 和图 3 中表面 4 的 YNI 值都为 0，此时产生的后向反射能

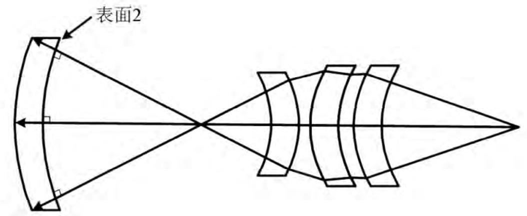


图 2　入射角为 0°时的光学系统

Fig. 2　Schematic diagram of optical system when incident angle is zero

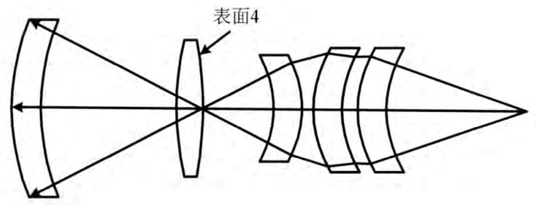


图 3　入射高度为 0 时的光学系统

Fig. 3　Schematic diagram of optical system when incident height is zero

量最强[11]。因此光学元件表面的 YNI 值越接近于 0，其产生的后向反射能量越强；而当 YNI 值大于 1 时，则可认为该光学表面产生的后向反射能量很小，返回到后继光学系统中的光能很弱，对接收光束的影响较小。

根据以上理论，在对激光通信终端光学天线系统进行设计时，可以通过约束 YNI 值（尽量使每个表面的 YNI 值都大于 1），来对中心视场的后向反射进行分析和控制；同时，通过改变光学表面的曲率来增加光线在该表面的入射角 i，或改变间隔来增加入射高度 h，进而达到提高各光学表面 YNI 值的目的，使后向反射的光线散焦，入射角度超过像方视场角范围，从而无法进入后继光学系统影响接收光束。如此，在保证光学系统像质优良的情况下，达到了减小后向反射能量的目的。

4　实例分析

4.1　卡塞格林天线光学设计

该实例系统应用于某在研的星间激光通信终端，卡塞格林天线的设计指标如表 1 所示。

根据以上参数指标，选取合理的初始结构进行优化，在 ZEMAX 软件中完成了如图 4 所示的

光学系统设计。从如图 5 所示的调制传递函数曲线可以看出，最终系统的成像质量良好，各个视场都在衍射极限以内。

表 1　卡塞格林天线的设计指标

Tab. 1　Design specifications of Cassegrain antenna

指标参数	参数值
波长/nm	1 550，1 530（发射和接收的信号光） 810，830（发射和接收的信标光）
视场/mrad	0.25（信号光） 4（信标光）
放大倍率	12.5
透过率	⩾0.75
口径/mm	250

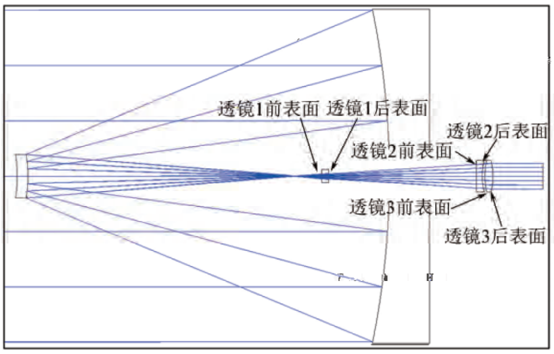


图 4　卡塞格林天线结构

Fig. 4　Structure of Cassegrain antenna

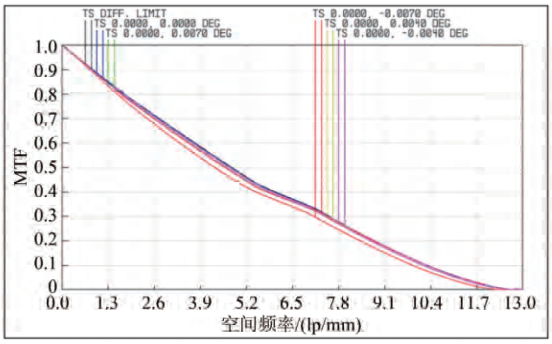


图 5　卡塞格林天线的调制传递函数曲线

Fig. 5　MTF curves of Cassegrain antenna

4.2　系统的建模与仿真

根据光学设计结果，在照明分析软件 LightTools 中对设计好的卡塞格林天线进行建模。首先定义各光学元件和机械结构的表面属性，主、次镜表面镀银膜后的反射率及透镜镀增透膜后的透过率按 ZEMAX 中的数据进行赋值，机械结构表面为朗伯散射，吸收率设置为 99%。在天线出瞳位置处建立和出瞳大小（即半径为 10 mm）相同的圆形接收器，用来接收后向反射光。在透镜 3 与接收器之间定义一个激光光源，发射充满透镜 3 的准直激光，辐射功率为 1 W。在接收器上，为每个待测表面定义一个滤片组，用来获取仿真分析时各表面的后向反射能量数据，并通过角度滤片限制接收的后向反射光的入射角小于像方视场角±0.087 5°，以保证接收到的后向反射光能够进入后继光学系统。

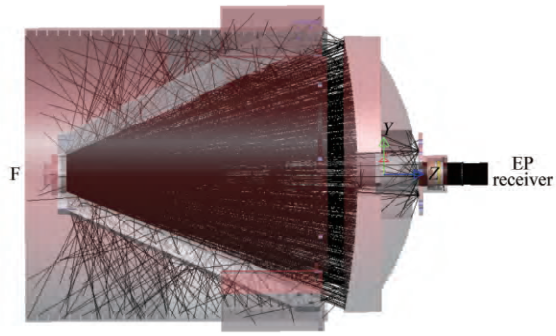


图 6　卡塞格林天线的光线追迹

Fig. 6　Ray tracing of Cassegrain antenna

在 LightTools 软件中，采用蒙特卡洛法进行光线追迹，如图 6 所示，设置追迹的光线总数为 200 万，相对光线功率阈值为 10^{-10}，启用正向模拟。仿真结果如表 2 所示。表 2 中给出的透镜编号和图 4 保持一致。

表 2　各元件的后向反射率及 *YNI* 值

Tab. 2　Back-reflection ratio and *YNI* value of each element

表面	透过率与反射率之比/%	后向反射率 R	*YNI*
透镜 3 后表面	98.75	$1.687\ 5\times10^{-7}$	−2.076 84
透镜 3 前表面	98.75	$5.472\ 4\times10^{-8}$	3.682 68
透镜 2 后表面	99.80	$9.488\ 1\times10^{-9}$	3.517 04
透镜 2 前表面	99.80	$3.316\ 5\times10^{-7}$	0.584 13
透镜 1 后表面	98.75	$2.694\ 5\times10^{-4}$	0.051 99
透镜 1 前表面	98.75	$3.378\ 9\times10^{-5}$	0.138 37
次镜	98.00	$3.071\ 9\times10^{-6}$	−4.031 07
主镜	98.00	0	−25.000 00
支撑结构	–	0	–
各级遮光罩	–	0	–

天线系统整体的后向反射率为 3.068 8×10^{-4}，代入到隔离度计算公式中，得到卡塞格林光学天线的隔离度为-35.13 dB，隔离度水平不高。在所有的光学元件和机械结构中，3块透镜和次镜的后向反射能量较高，因为这些元件表面可以直接将发射激光反射到接收器上。各级遮光罩、支撑结构、主镜等因目镜筒上的机械结构挡住了从主镜中心开孔处散射回来的光线，因此后向反射能量为0。在3块透镜中，透镜1前后2个表面的后向反射能量最强，远高于另外2块透镜表面的反射能量。从ZEMAX中得到的各表面的*YNI*数据也完全符合这个规律，即透镜1前后2个表面的*YNI*值非常小，尤其是透镜1后表面的*YNI*值仅为0.051 99，而该表面对应的后向反射能量占总能量的87.8%，是天线后向反射能量的最主要来源，严重降低了系统的隔离度水平。仿真结果表明，光学元件表面的*YNI*值越接近0，其后向反射能量越强，证明上面提到的用*YNI*值来评价光学系统中各表面后向反射强度的方法是正确的。

4.3 优化设计及结果

为减弱天线的后向反射能量，提高隔离度水平，在ZEMAX软件中对光学天线进行优化，优化过程中使用YNIP操作数来控制各表面*YNI*值的变化。在保证系统像质优良且不增加透镜数量的条件下，通过改变3块透镜的表面曲率及透镜间隔，增大透镜1前后2个表面的*YNI*值，并尽量保持其他元件表面的*YNI*值仍大于1。优化后的系统如图7所示，主、次镜的口径和位置保持不变，但3块透镜的表面曲率及相对位置发生了改变。从图8所示的优化后系统的调制传递函数曲线可以看出，优化后系统的像质和优化前的像质相同，各视场都在衍射极限内。对比表2和表3可知，在优化后的系统中，透镜1前后表面的*YNI*值分别从优化前的0.138 37和0.051 99增大到0.525 68和0.500 21，虽然优化后的*YNI*值仍小于1，但与优化前相比，前后2个表面的后向反射能量得以大幅减弱。此外，其他元件表面的*YNI*值均大于1，相比于优化前变化不大，后向反射能量仍保持在优化前的数量级水平。

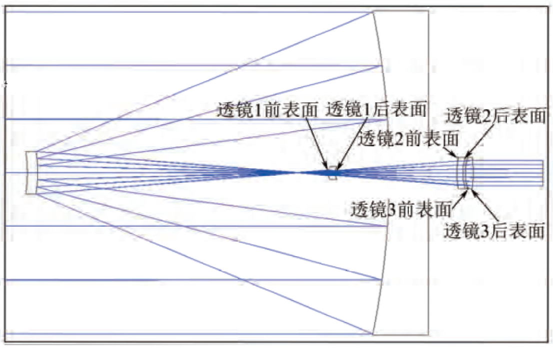


图7 优化后的天线结构

Fig. 7 Structure of optimized antenna

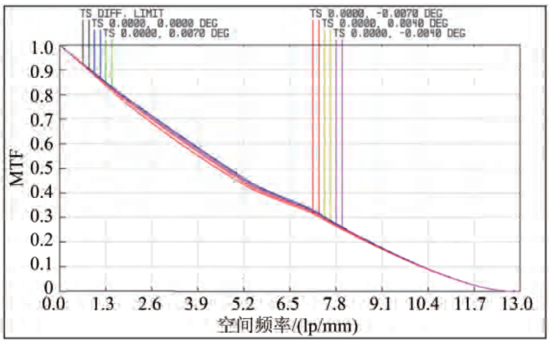


图8 优化后系统的调制传递函数曲线

Fig. 8 MTF curves of optimized system

依据优化后系统的结构参数，在LightTools软件中对卡塞格林天线模型进行修改，仍然设

表3 优化后各元件的后向反射率及*YNI*值

Tab. 3 Back-reflection ratio and *YNI* value of each element after optimization

表面	透过率与反射率之比/%	后向反射率 *R*	*YNI* 值
透镜3后表面	98.75	7.275 0×10^{-7}	-1.000 28
透镜3前表面	98.75	4.134 8×10^{-8}	4.070 96
透镜2后表面	99.80	6.831 9×10^{-9}	3.962 30
透镜2前表面	99.80	3.026 4×10^{-8}	1.893 74
透镜1后表面	98.75	2.672 7×10^{-6}	0.500 21
透镜1前表面	98.75	4.124 9×10^{-6}	0.525 68
次镜	98.00	3.152 0×10^{-6}	-4.031 07
主镜	98.00	0	-25.000 00
支撑结构	-	0	-
各级遮光罩	-	0	-

置追迹的光线总数为 200 万，相对光线功率阈值为 10^{-10}，启用正向模拟，得到表 3 数据。

天线系统整体的后向反射率为 $1.075\ 5\times10^{-5}$。优化后的仿真结果显示，卡塞格林天线的后向反射率减小了 1 个数量级，系统的隔离度减小到 -49.68 dB，光学天线的隔离度水平提高了 14.55 dB。透镜 1 前表面的后向反射率从 $3.378\ 9\times10^{-5}$ 减小到 $4.124\ 9\times10^{-6}$，占系统总后向反射能量的 38.35%；透镜 1 后表面的后向反射率从 $2.694\ 5\times10^{-4}$ 减小到 $2.672\ 7\times10^{-6}$，占系统总后向反射能量的 24.85%。与优化前相比，透镜 1 前后 2 个表面的后向反射能量大幅减弱。在优化后的系统中，透镜 1 前后 2 个表面及次镜的后向反射率都在 10^{-6} 数量级，是系统中对后向反射贡献最大的表面，但与优化前相比，各表面对后向反射能量的贡献趋于平均，实现了优化目标。优化后系统各表面的 *YNI* 值与后向反射率 *R* 的变化趋势相反，仍然保持了 *YNI* 值越接近于 0，后向反射率 *R* 越大的规律。因此在激光通信光学天线的设计过程中，不仅要保证系统的像质良好，而且要保证各元件表面的 *YNI* 值不能太小，尽量大于 1，以保证天线的隔离度水平满足通信要求。

5　结　论

本文从理论上给出了卡塞格林天线后向反射率和隔离度的定义及分析方法，提出了一种以 *YNI* 值控制天线后向反射能量的优化方法，通过对某激光通信终端卡塞格林天线进行建模并仿真分析，验证了元件表面 *YNI* 值越接近于 0 时，其后向反射能量越大的规律。因此在设计激光通信终端光学天线时，应合理选择结构的形式，在确保像质优良的同时对光学表面的 *YNI* 值进行分析、控制，使各表面的 *YNI* 值越大越好，减少能够进入后继光学系统中的后向反射能量，提高激光通信中光学天线的隔离度水平，使整个系统的总隔离度满足高指标设计要求。

参考文献：

[1] 吴从均. 星间激光通信终端及其实验室检测平台光学系统研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2014.
WU C J. Study of inter-satellites laser communication terminals and its laboratory testing platform´s optical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[2] 程彦彦. 星载激光通信终端光学系统研究[D]. 西安：中国科学院西安光学精密机械研究所，2012.
CHENG Y Y. Research on space laser communication optical system[D]. Xi´an: Xi´an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)

[3] HONG J, KOH H S. Backward reflection analysis of transmitting channel of active laser ranging optics[J]. *SPIE*, 2013: 88410Q.

[4] 胥全春. 星地激光通信星上终端杂散光分析及抑制方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014.
XU Q CH. Research and analysis on stray light and suppression methods of satellite terminal in satellite-to-ground laser communications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

[5] 金光，李艳杰，钟兴，等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. 光学 精密工程，2014，22(8)：2067-2074.
JIN G, LI Y J, ZHONG X, *et al*.. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(8): 2067-2074. (in Chinese)

[6] SODNIK Z, SMIT H, SANS M, *et al*.. LLCD operations using the lunar lasercom OGS terminal[J]. *SPIE*, 2014: 89710W.

[7] 姜会林. HTSS空间激光通信技术与系统[M]. 北京：国防工业出版社，2010.
JIANG H L. *The technologies and systems of space laser communication*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)

[8] 吴从均，颜昌翔，高志良. 空间激光通信发展概述[J]. 中国光学，2013，6(5)：670-680.
WU C J, YAN CH X, GAO ZH L. Overview of space laser communications[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)

[9] 姜会林，安岩，张雅琳，等. 空间激光通信现状，发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报，2015，34(3)：207-217.
JIANG H L，AN Y，ZHANG Y L，*et al*.. Analysis of the status quo，development trend and key technologies of space laser communication[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*，2015，34(3)：207-217. (in Chinese)

[10] BIRKL R A，MANHART S. Back-reflection measurements on the SILEX telescope[C]. *Munich'*91 (*Lasers'*91)，International Society for Optics and Photonics，Munich，Germany，June 10，1991.

[11] 刘欣，潘枝峰. 红外光学系统冷反射分析和定量计算方法[J]. 红外与激光工程，2012，41(7)：1684-1688.
LIU X，PAN ZH F. Analysis and quantitative calculation methods for Narcissus of infrared optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2012，41(7)：1684-1688. (in Chinese)

[12] 刘涛，崔庆丰，杨亮亮，等. 红外光学系统中衍射面冷反射的分析与评价[J]. 科学通报，2012，57(1)：36-41.
LIU T，CUI Q F，YANG L L，*et al*.. Evaluation and control of narcissus for diffractive surfaces in IR systems[J]. *Chinese Science Bulletin*，2012，57(1)：36-41. (in Chinese)

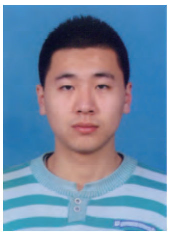
[13] 杨正，屈恩世，曹剑中，等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究[J]. 激光与红外，2008(1)：35-38.
YANG ZH，QU E SH，CAO J ZH，*et al*.. The narcissus study in the optical system for the infrared staring arrays[J]. *Laser & Infrared*，2008(1)：35-38. (in Chinese)

[14] HOWARD J W，ABEL I R. Narcissus：reflections on retroreflections in thermal imaging systems[J]. *Applied Optics*，1982，21(18)：3393-3397.

[15] 张鹏，罗长江，熊钟秀. 制冷型红外光学系统冷反射的逆光路分析[J]. 电光与控制，2013，20(6)：66-69.
ZHANG P，LUO CH J，XIONG ZH X. Analysis of inverse path tracing rays of narcissus for cooled infrared optical system[J]. *Electronics Optics & Control*，2013，20(6)：66-69. (in Chinese)

[16] 张葆，崔恩坤，洪永丰. 红外双波段双视场共光路光学系统[J]. 光学 精密工程，2015，23(2)：395-401.
ZHANG B，CUI E K，HONG Y F. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*，2015，23(2)：395-401. (in Chinese)

作者简介：



杨成龙(1991—)，男，吉林省吉林市人，硕士研究生，2014年于天津大学获得学士学位，主要从事星间激光通信光学系统设计及杂散光方面的研究。E-mail：yangcl_1991@163.com

颜昌翔(1973—)，男，湖北洪湖人，研究员，2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail：yancx@ciomp.ac.cn