

激光通信地面测试终端间隔隔离度的仿真分析

赵 猛^{1,2}, 颜昌翔^{1,3}, 吴从均^{1*}

(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;

3. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘要:受空间所限,激光通信地面测试平台与被测终端之间的距离远小于实际通信距离,导致测试平台光机等器件产生的后向散射杂光进入被测终端,从而严重影响被测终端的测试性能。从被测终端与测试平台间的光学干扰问题出发,本文研究了被测终端与测试平台间隔隔离度的关系,分别设计了卡塞格林和离轴三反光学天线,并根据杂散光传输模型,采用杂散光分析软件分析了光学天线结构形式及表面粗糙度两方面对隔离度的影响。分析结果表明,采用离轴三反光学天线时的隔离度明显高于卡塞格林光学天线,且隔离度随着光学表面粗糙度的减小而增大,当光学表面的粗糙度达到0.892 nm时,隔离度可达-86.22 dB。最后,推导了ABg模型与Harvey模型参数间的关系,并根据粗糙度与TIS计算公式,得出粗糙度分别为0.7 nm及0.5 nm的ABg模型参数,它们的终端间隔隔离度分别为-94.39 dB和-97.3 dB,实现了-90 dB的隔离度指标。

关键词:激光通信;光学天线;隔离度;表面散射模型;杂散光

中图分类号:TP394.1;TH691.9 文献标志码:A doi: 10.3788/CO.2019-0154

Simulation analysis of isolation between laser communication ground test equipments

ZHAO Meng^{1,2}, YAN Chang-xiang^{1,3}, WU Cong-jun^{1*}

(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;

3. Center of Materials Science and Optoelectrics Engineering, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: wucongjun789@163.com

Abstract: The distance between a laser communication ground test platform and the terminal under test is far less than the actual communication distance due to space limitations. As a result, the backscattered stray light generated by the test platform optical device will enter the terminal under test, and the signal will seriously

收稿日期:2019-07-23; 修订日期:2019-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61805235)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61805235)

affect the performance of the terminal under test. Aiming at this problem, we research the isolation relationship between the tested terminal and the test platform based on the optical interference problem. The Cassegrain and off-axis three-mirror optical antenna are designed respectively. According to astigmatic transmission model, the stray light analysis software is employed to analyze the influence of optical antenna's structure and surface roughness on the isolation. The results of the analysis show that the isolation when applying the off-axis three-mirror optical antenna is significantly higher than that applying the Cassegrain optical antenna, and that this isolation increases with a decrease in the roughness of the optical surface. When the optical surface's roughness reaches 0.892 nm, the isolation is -86.22 dB. Finally, the relationship between the ABg model and the Harvey model parameters is derived. According to calculation formula of the roughness and TIS, the ABg model parameters with roughness of 0.7 nm and 0.5 nm are theoretically obtained. The isolation between the terminals is -94.39 dB and -97.3 dB, achieving an isolation rating of -90 dB.

Key words: laser communication; optical antenna; isolation; surface scattering model; stray light

1 引言

激光通信具有通信频带宽、信息量大、天线尺寸小、功耗低、抗干扰、抗截获能力强等优点^[1-2]。激光通信终端在投入使用前,要进行一系列的性测试及技术指标验证试验,但是这些实验不可能直接在轨进行,必须先在地面试验时对终端系统进行模拟测试实验,所以要建立激光通信地面测试终端。欧洲航天局 SILEX 计划的光学终端地面检测设备有用于测试激光通信终端地面支撑测试设备和用于验证动态情况下 ATP 系统性能的系统测试平台。JPL 和 NASA 开发了用于 STRV-2 和 OCD 的激光通信终端测试的激光测试和评估平台,可以直接与被测设备结合进行通信测试^[3-4]。

对于传统的激光通信系统,通信距离可达几百公里至几万公里,对于如此远距离的传输,两个终端之间的杂散光的影响可以忽略。但是,对于激光通信地面检测系统而言,由于空间有限,通信距离远小于实际通信距离,仅有 10 m 左右,这种情况下,测试平台光机等器件产生的后向散射杂光会进入被测终端,该信号会严重影响被测终端的测试性能。为了提高两个终端之间的隔离度,本文将从光学天线设计及光学元件表面粗糙度两方面展开研究。

激光通信系统的隔离度主要由系统的后向反射率决定。对于激光通信地面检测系统与被测终端而言,被测终端发出的光束进入测试终端光学

天线时会发生后向散射,若两终端距离很近,则散射的杂散光会返回到被测终端的光学天线,并进入探测器,从而造成测试终端信噪比降低或者直接淹没有效信号,最终导致通信失败。

2 隔离度定义及杂散光传输理论

2.1 隔离度定义

激光通信地面测试设施和被测终端测试原理如图 1 所示^[5]。

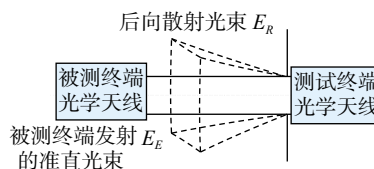


图 1 隔离度定义示意图

Fig. 1 Schematic diagram of isolation definition

测试终端的后向散射如式 (1) 所示^[6]:

$$R = E_R / E_E, \quad (1)$$

其中, E_E 是激光器发出的充满入瞳的能量, E_R 是激光光束经过系统各个元件被后向反射回来的能量, 则系统的隔离度 Y 为:

$$Y = 10 \times \log(R). \quad (2)$$

2.2 表面散射模型

光机结构表面的散射特性一般用双向散射分布函数 (Bidirectional Scattering Distribution Function, BSDF) 表示, 但在杂散辐射分析中, 主要考

虑表面的反射特性,因此用双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)近似代替 BSDF,其数学表达式如式(3)所示:

$$BRDF(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s) = \frac{L_s(\theta_s, \phi_s)}{E_i(\theta_i, \phi_i)}, \quad (3)$$

式中: $L_s(\theta_s, \phi_s)$ 为反射光的辐亮度, $E_i(\theta_i, \phi_i)$ 为入射光的辐照度, θ_s 、 ϕ_s 分别为反射光的反射角和方位角, θ_i 、 ϕ_i 分别为入射光的入射角和方位角。

光学表面集低、中、高频于一体,其 BRDF 无法用某一特定的函数表示,要先通过实验获得材料表面的散射数据,并对数据进行数值拟合,得到 BRDF 模型^[7-9]。

ABg 模型适用于描述大量表面的 BRDF,而且可以直接应用于杂散光分析软件 TracePro 中,表达式为:

$$BRDF = \frac{A}{B + |\beta - \beta_0|^g}. \quad (4)$$

式中: β_0 、 β 分别为入射方向和反射方向的方向余弦, A 、 B 、 g 为待定参数。

Harvey 模型可描述光滑镜面的散射,表达式为:

$$BRDF(\theta, \theta_0) = b_0 \left[1 + \left(\frac{\sin \theta - \sin \theta_0}{L} \right)^2 \right]^{\frac{s}{2}}, \quad (5)$$

其中: θ 、 θ_0 为散射角和入射角, b_0 为常数, s 为倾斜因子, L 为翻转角。常数 b_0 可通过半球空间内总的散射量 TIS 计算获得。

当 $s \neq -2$ 时:

$$TIS = \frac{2\pi b_0}{L^s(s+2)} \left[(1+L^2)^{\frac{s+2}{2}} - (L^2)^{\frac{s+2}{2}} \right]; \quad (6)$$

当 $s = -2$ 时:

$$TIS = \pi b_0 L^2 \ln \left(1 + \frac{1}{L^2} \right). \quad (7)$$

对于干净镜面, TIS 与波长、表面粗糙度的关系可由下式给出:

$$TIS = 1 - \exp \left\{ -(4\pi\delta/\lambda)^2 \right\} \cong (4\pi\delta/\lambda)^2, \quad (8)$$

其中: δ 是镜面的均方粗糙度。由式(8)可知,在相同的波长条件下,镜面均方粗糙度越大, TIS 越大,散射量越大,即杂散光越强。

2.3 杂散光传输方程

杂散光传输方程的基本表达式如下^[10]:

$$\begin{aligned} d\phi_c &= L_s(\theta_0, \psi_0) \cdot dA_s \cdot \frac{\cos \theta_s \cdot dA_c \cdot \cos \theta_c}{R_{sc}^2} \\ &= BRDF(\theta_i, \psi_i, \theta_0, \psi_0) \cdot d\phi_s \cdot d\Omega_{sc}. \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $d\phi_c$ 为接收面元上接收到的辐射光通量, $L_s(\theta_0, \psi_0)$ 为辐射亮度, $BRDF(\theta_i, \psi_i, \theta_0, \psi_0)$ 为双向反射分布函数; $d\phi_s$ 为发射面元发出的辐射光通量, $d\Omega_{sc}$ 为发射面元对接收面元的投影立体角。

根据式(9)可知,影响接收表面杂散光能量的因素主要有3个:(1)材料表面的双向反射分布函数 BRDF; (2)杂散光表面发出的辐射能量 $d\phi_s$; (3)与光学系统结构和尺寸有关的几何结构因子 $d\Omega_{sc}$ 。

为了减弱杂散光,需要尽可能地减小上述3个因子。本文主要从双向反射分布函数和光学天线的结构角度研究减弱杂散光,提高隔离度的方法。

3 光学天线设计与隔离度仿真

3.1 光学天线的设计

光学天线是构成激光通信系统的核心部分,在发射端和接收端均发挥着不可替代的作用。本节根据表1所示的光学天线设计指标,在 ZEMAX 中分别设计了同轴的卡塞格林光学天线和离轴的离轴三反光学天线。

图2(彩图见期刊电子版)~图5(彩图见期刊电子版)分别为卡塞格林光学天线^[11-12]和离轴三反光学天线^[13-14]的二维布局图及传递函数曲线,表2、表3分别为两种天线的波像差。

表1 光学天线的设计指标

Tab. 1 Design specifications of optical antenna

指标名称	参数值
测试波长/nm	632.8
望远镜放大倍率	15±0.1
望远镜主口径/mm	≥610
有效视场/mrad	≥±6
像质要求	中心视场: 0.033λ(rms)、0.25λ(PV) 边缘视场: 0.050λ(rms)、0.33λ(PV)

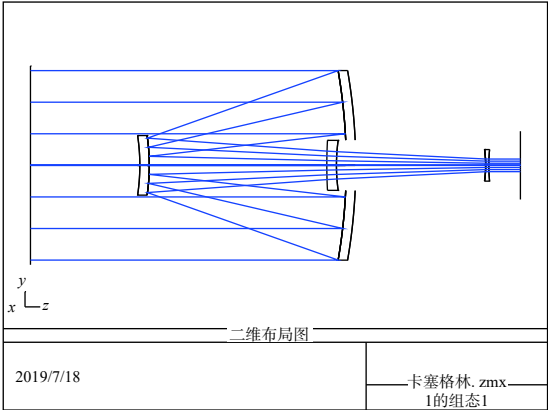


图 2 卡塞格林光学天线二维布局图

Fig. 2 Two-dimensional layout of Cassegrain optical antenna

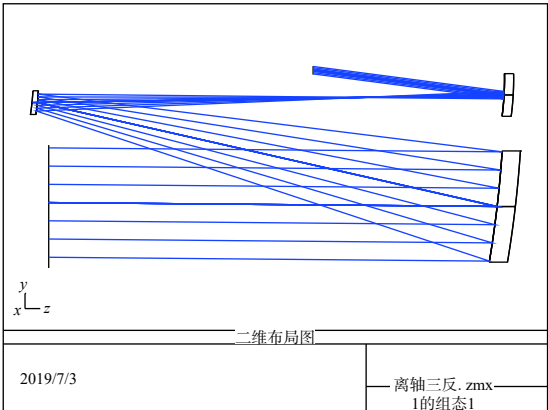


图 4 离轴三反光学天线二维布局图

Fig. 4 Two-dimensional layout of off-axis three-mirror optical antenna

表 2 卡塞格林光学天线波像差				
Tab. 2 Wave aberration of Cassegrain optical antenna				
波段(μm)	项目	视场		
		中心视场	边缘视场	
0.632 8(λ)	波像差	P-V	0.033 8λ	0.143 7λ
		RMS	0.006 5λ	0.032 4λ
	斯特尔比		0.999 8	0.999 7

根据设计结果可知,设计的卡塞格林光学天线及离轴三反光学天线像质良好,各个视场均在衍射极限内,满足设计指标中的像质要求。

3.2 不同光学结构形式下的隔离度分析

将设计好的卡塞格林光学天线和离轴三反光

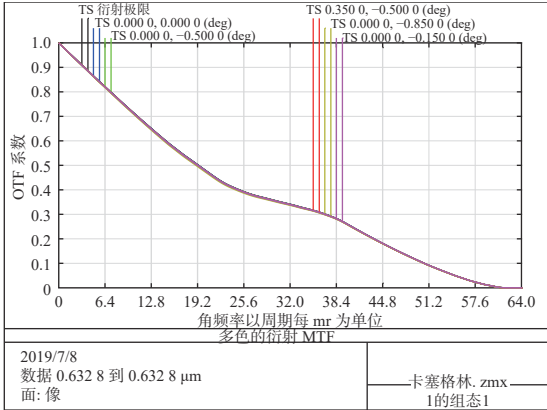


图 3 卡塞格林光学天线传递函数曲线

Fig. 3 MTF of Cassegrain optical antenna

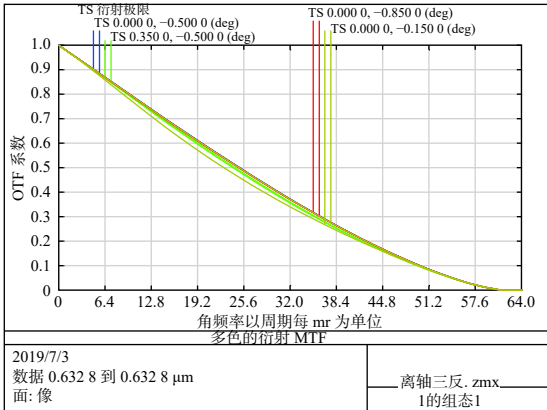


图 5 离轴三反光学天线传递函数曲线

Fig. 5 MTF of off-axis three-mirror optical antenna

表 3 离轴三反光学天线波像差				
Tab. 3 Wave aberration of off-axis three-mirror optical antenna				
波段(μm)	项目	视场		
		中心视场	边缘视场	
0.632 8(λ)	波像差	P-V	0.037λ	0.140λ
		RMS	0.009λ	0.024λ
	斯特尔比		0.998	0.987

学天线分别导入 TracePro 软件,设置光源功率为 1 000 W,追迹光线数目为 100 万条,阈值为 10⁻¹⁰,设置各部件的表面参数,在光学天线前端放置等效聚焦镜及探测器,以模拟被测终端的接收光学系统,并进行光线追迹,示意图如图 6 所示。

模拟两种不同光学天线杂散光(图 7),得到

探测器入射的杂散光光通量图如 8 所示。表 4 给

出了两种光学天线的隔离度结果。

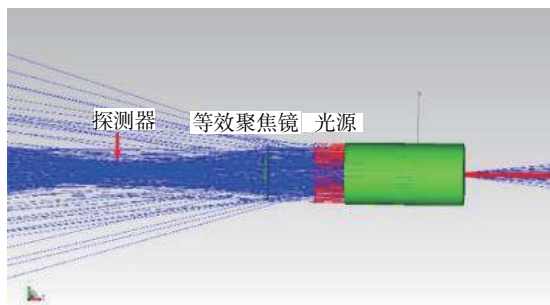


图 6 卡塞格林光学天线的杂散光模拟

Fig. 6 Stray light simulation of Cassegrain optical antenna

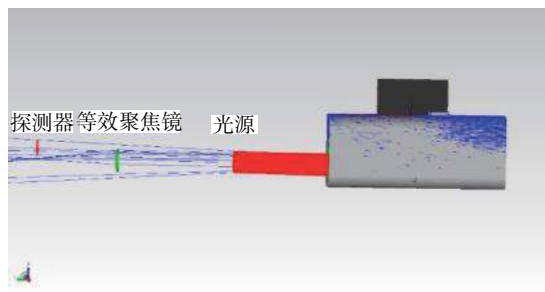
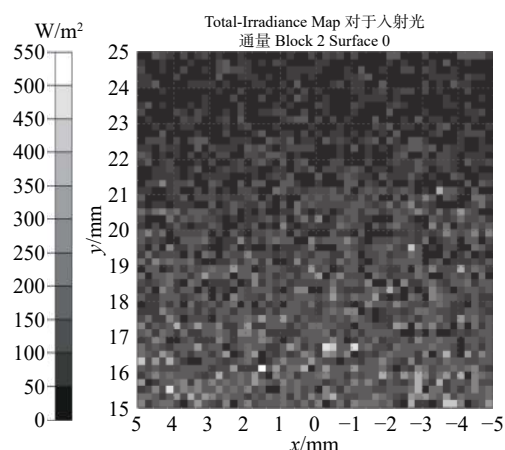


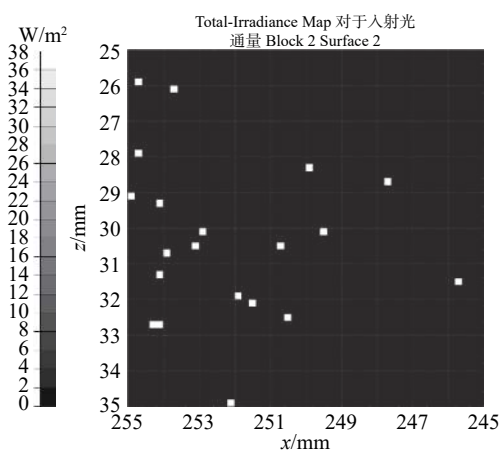
图 7 离轴三反光学天线的杂散光模拟

Fig. 7 Stray light simulation of off-axis three-mirror optical antenna



最小值: 0, 最大值: 507.49, 平均值: 112.41
总光通量: 0.011 241 W, 光通量/发射光通量:
1.124 1×10⁻⁵, 7 214 Incident 条光线

(a) 卡塞格林光学天线
(a) Cassegrain optical antenna



最小值: 0, 最大值: 37.906, 平均值: 0.293 98
总光通量: 2.939 8×10⁻⁵ W, 光通量/发射光通量:
2.939 8×10⁻⁵, 20 Incident 条光线

(b) 离轴三反光学天线
(b) Off-axis three-mirror optical antenna

图 8 不同光学天线的光通量图

Fig. 8 Luminous flux maps of different optical antennas

表 4 两种光学天线的隔离度对比

Tab. 4 Comparison of isolation between two optical antennas

光学天线类型	进入探测器的杂散光数目	光通量大小(W)	隔离度(dB)
卡塞格林	7 214	0.011 24	-49.49
离轴三反	20	2.94 × 10 ⁻⁵	-75.32

由表 4 可以看出, 离轴三反光学天线的终端隔离度明显高于卡塞格林光学天线。这是由于卡塞格林光学天线存在中心遮拦, 同轴反射杂光较强, 为达到更高的隔离度水平, 本激光通信地面测试终端将采用离轴三反光学天线。

4 不同粗糙度下的杂散光仿真

4.1 散射实验数据拟合

对不同粗糙度的镀膜基片进行散射测量实验, 在不同入射角下, 分别测量各散射方向的散射强度, 获得实验数据, 并对实验数据进行拟合, 得到散射分布函数。由于 ABg 模型可在杂散光分析软件 TracePro 上直接使用, 故本文利用 ABg 模型对散射数据进行拟合。

利用 MATLAB 对粗糙度为 0.892、1.297、1.646、2.327、6.479 nm 的镀膜基片散射数据进行拟合, 拟合图形如图 9 所示。

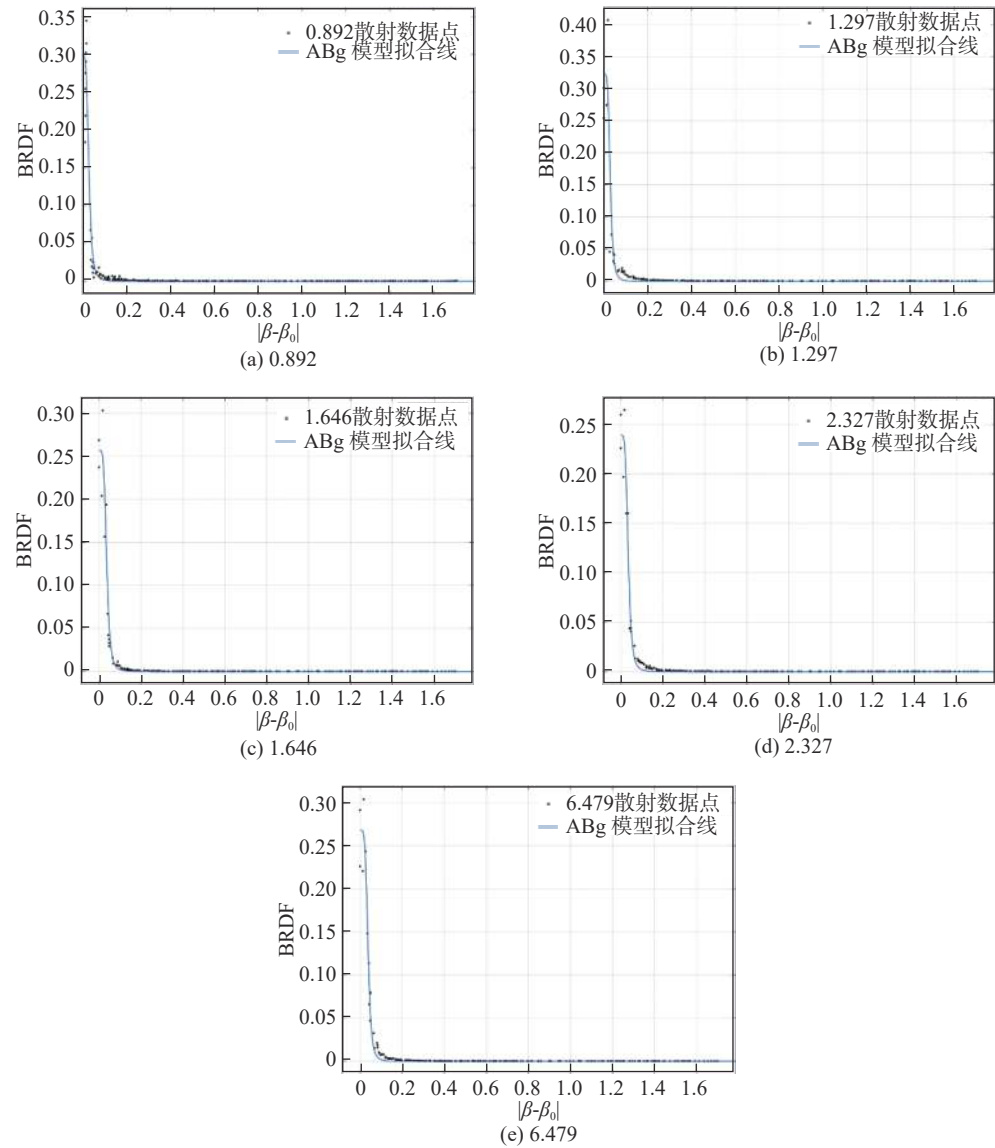


图 9 不同粗糙度镀膜基片的散射数据拟合曲线

Fig. 9 Scattering fitting curves of coated substrate with different roughnesses

表 5 具有不同粗糙度镀膜基片的散射数据的 ABg 模型拟合参数

Tab. 5 ABg model fitting parameters of scattering data of coated substrate with different roughnesses

粗糙度(nm)	A	B	g	RMSE
0.892	2.15×10^{-8}	7.51×10^{-8}	4.624	0.008 798
1.297	2.47×10^{-8}	7.93×10^{-8}	4.389	0.001 32
1.646	1.34×10^{-8}	5.37×10^{-8}	4.986	0.007 629
2.327	1.17×10^{-7}	4.92×10^{-7}	4.290	0.005 674
6.479	1.01×10^{-7}	3.81×10^{-7}	4.503	0.006 217

由图 9 可知, 拟合的均方误差 RMSE 都在 10^{-3} 量级, 即 ABg 模型与实验数据匹配较好。由此可知利用 ABg 模型匹配实验数据是可行的, 拟合得到的 ABg 模型参数如表 5 所示。

4.2 粗糙度对隔离度的影响分析

针对在相同粗糙度下隔离度水平较高的离轴三反光学天线进行杂散光仿真, 研究隔离度与粗糙度之间的关系。仿真实验及各元件表面参数与 3.2 节中离轴三反光学天线的隔离度仿真实验相同, 仅改变 3 个反射镜的表面参数。

对于具有不同粗糙度的镀膜基片, 探测器的光通量如图 10 所示。

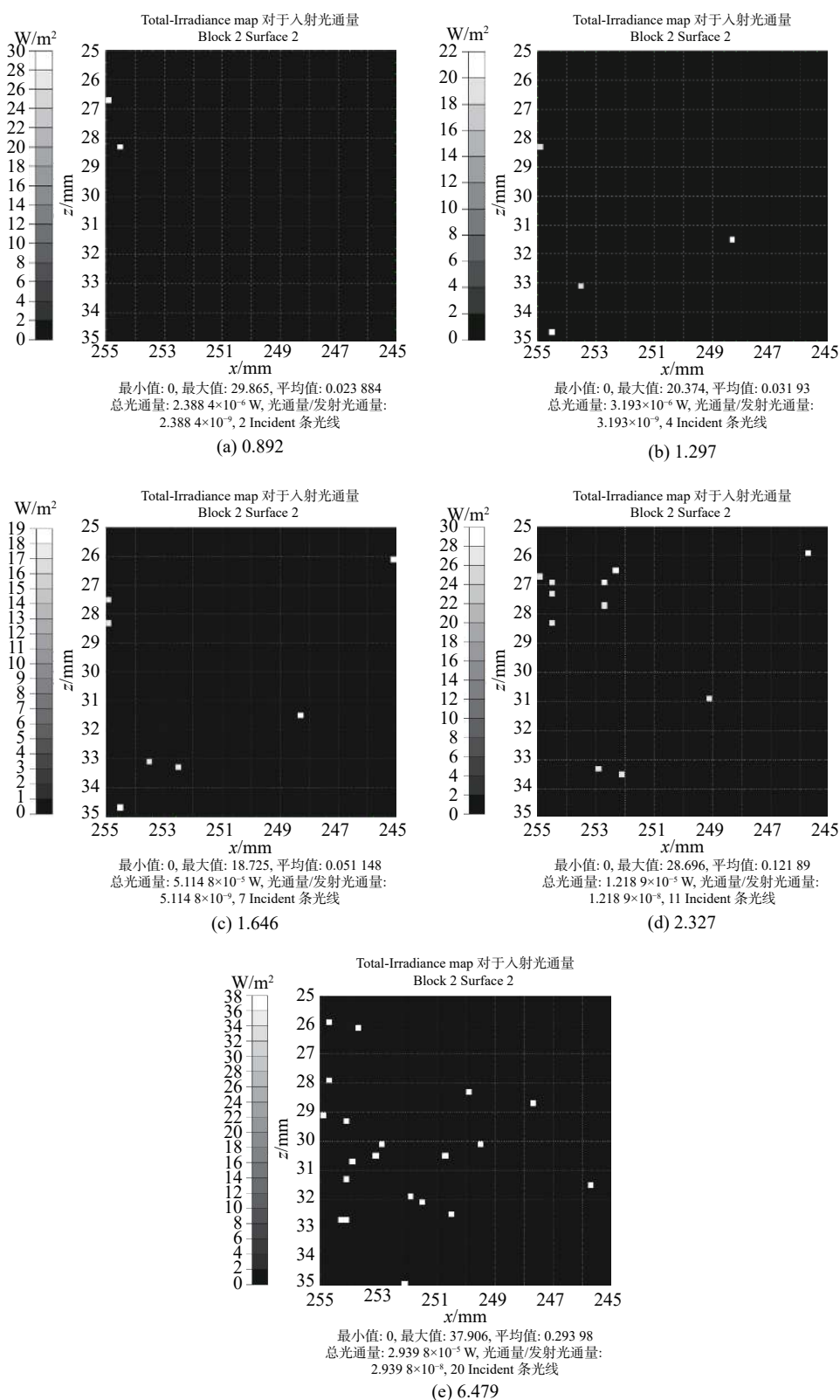


图 10 采用不同粗糙度反射镜时探测器的光通量图

Fig. 10 Detector's luminous flux maps when applying reflectors with different roughnesses

由图 10 的 5 幅光通量图可以计算得到不同粗糙度对应的隔离度, 如表 6 所示。

表 6 采用不同粗糙度反射镜对应的隔离度
Tab. 6 Isolations when applying reflectors with different roughnesses

粗糙度	进入探测器的杂光数目	杂光光通量大小(W)	隔离度(dB)
0.892	2	2.39×10^{-6}	-86.22
1.297	4	3.19×10^{-6}	-84.96
1.646	7	5.11×10^{-6}	-82.92
2.327	11	1.22×10^{-5}	-79.14
6.479	20	2.94×10^{-5}	-75.32

由表 6 可明显看出,随着粗糙度的降低,隔离度水平逐渐增大,当粗糙度达到 0.892 nm 时,隔离度可达-86.22 dB。

4.3 更低粗糙度下的参数计算及隔离度仿真
根据上一节结果可知,隔离度仿真结果与-90 dB 的目标还存在一些差距,故需进一步降低镀膜基片的表面粗糙度。

由式 (4)、式(5)可知,ABg 模型与 Harvey 模型间的参数关系为:

$$\begin{cases} A=b_0B \\ B=L^{-s} \\ g=-s \end{cases}.$$

(10)

ABg 模型中, g 为双对数坐标系下的曲线斜率, B 与 g 确定转折点的位置, A 与 B 的比值确定初始散射点的 BRDF 值, 3 个参数中任意一个发生变化,均可改变表面散射情况,故仍取粗糙度为 0.892 nm 时的 B 、 g 参数值,根据式 (6)、式 (8)、式 (10),计算粗糙度为 0.7 nm 及 0.5 nm 时参数 A 的值,分别为 7.784×10^{-9} 、 3.98×10^{-9} 。将两组数据分别导入 TracePro 中,并进行仿真,探测器光通量图如图 11 所示,结果如表 7 所示。

由仿真结果可知,隔离度大于-90 dB,达到了目标要求。

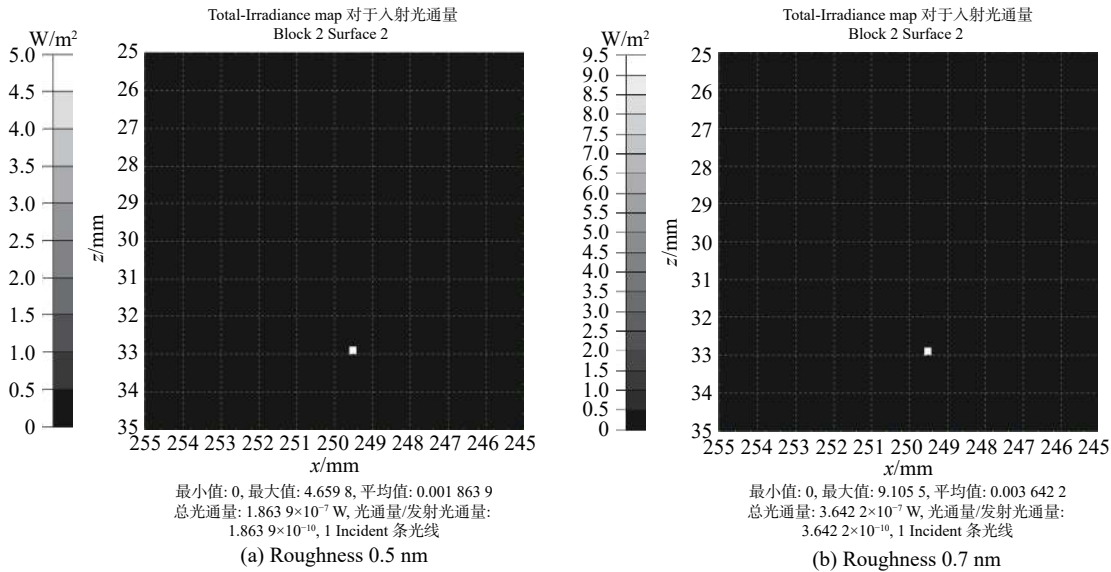


图 11 低粗糙度下探测器的光通量图
Fig. 11 Luminous flux maps of detector when applying low roughness reflector

表 7 采用低粗糙度反射镜时对应的隔离度
Tab. 7 Isolations when applying low roughness reflector

粗糙度 (nm)	进入探测器的 杂光数目	杂光光通量 大小(W)	隔离度 (dB)
0.5	1	1.86×10^{-7}	-97.30
0.7	1	3.64×10^{-7}	-94.39

5 结 论
本文从激光通信被测终端与地面测试平台之间的光学干扰问题出发研究了被测终端与测试平台间隔度的问题,分别设计了卡塞格林和离轴三反光学天线,并根据杂散光传输模型,采用杂散

光分析软件分析了光学天线结构形式及表面粗糙度对隔离度的影响。分析结果表明,离轴三反光学天线的隔离度明显高于卡塞格林光学天线,且隔离度随着光学表面粗糙度的减小而增大,当光学表面粗糙度达到 0.892 nm 时,隔离度可达

-86.22 dB。最后,推导了 ABg 模型与 Harvey 模型参数间的关系,并根据粗糙度与 TIS 计算公式,理论推导出粗糙度为 0.7 nm 及 0.5 nm 的 ABg 模型参数对应的终端间隔度分别为 -94.39 dB 和 -97.3 dB,实现了 -90 dB 的隔离度指标。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 高铎瑞, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展趋势[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 901-913.
GAO D R, LI T L, SUN Y, *et al.*. Latest developments and trends of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese)
- [3] 田媛. 空间链路模拟器设计和实验标定[D]. 长春: 中国科学院研究生院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
TIAN Y. Optical design and experimental calibration for the space link model system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 杨成龙, 颜昌翔, 杨宇飞. 星间激光通信终端光学天线的隔离度[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 462-468.
YANG CH L, YAN CH X, YANG Y F. Isolation of optical antenna of inter-satellites laser communication terminals[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 462-468. (in Chinese)
- [6] BIRKL R A, MANHART S. Back-reflection measurements on the SILEX telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1522: 252-258.
- [7] 朱杨. 空间光学系统杂散辐射抑制研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
ZHU Y. Research on stray radiation suppression of space optical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [8] 石栋梁. 基于BRDF的光机系统杂散辐射研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
SHI D L. Research on stray light of optical and mechanical system based on BRDF[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [9] 宋延松, 杨建峰, 李福, 等. 基于杂散光抑制要求的光学表面粗糙度控制方法研究[J]. 物理学报, 2017, 66(19): 194201.
SONG Y S, YANG J F, LI F, *et al.*. Method of controlling optical surface roughness based on stray light requirements[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(19): 194201. (in Chinese)
- [10] 陈醒, 胡春晖, 颜昌翔, 等. 大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 678-685.
CHEN X, HU CH H, YAN CH X, *et al.*. Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 678-685. (in Chinese)
- [11] 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 Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2067-2074. (in Chinese)
- [12] 卢政伟, 邵帅, 马亚坤. 复合式无遮拦激光扩束器的设计[J]. 中国光学, 2018, 11(4): 582-589.
LU ZH W, SHAO SH, MA Y K. Design of a composite laser beam expander without obscuration[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(4): 582-589. (in Chinese)
- [13] 赵宇宸, 何欣, 张凯, 等. 轻小型大视场自由曲面离轴光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1218001.

- ZHAO Y CH, HE X, ZHANG K, *et al.*. Optical design of miniaturized and large field of view off-axis optical system based on freeform surface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1218001. (in Chinese)
- [14] 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 长焦距空间三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 315-318.
- CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors[J]. *Optics Precision Engineering*, 2001, 9(4): 315-318. (in Chinese)

作者简介:



赵 猛(1994—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 2017 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 主要从事激光通信系统的隔离度方面的研究。E-mail: zhaomeng_199474@163.com



吴从均(1986—), 男, 陕西安康人, 2014 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, 主要从事空间光学仪器光学设计和光学系统像质研究。E-mail: wucongjun789@163.com

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D 显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号

《液晶与显示》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)6176059

E-mail:yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/O4

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50 元/期

网 址:www.yjyxs.com