星地激光通信中地球背景辐射的抑制研究

胥全春[1],俞建杰[1,2],周彦平[1],马 晶[1],谭立英[1]

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 仪器科学与技术博士后流动站,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:研究了星地激光通信中地球背景辐射及其抑制技术。推导出了不同轨道处星上终端的地球背景辐射入瞳功率理论公式,提出了固有杂散辐射的概念,并对其作了理论推导。针对一个典型的终端对其地球背景辐射进行了理论计算,并设计了不同形式的遮光系统。最后利用光学仿真软件 LightTools 对不同轨道高度、不同遮光系统形式的星上终端的杂散辐射进行了仿真,得到了轨道高度以及遮光系统形式对杂散辐射的影响曲线,并对其作了分析。为星地激光通信中星上终端的地球背景辐射提供了理论依据,为星上终端的遮光系统设计提供了仿真依据。

关键词:地球背景辐射; 星地激光通信; 杂散辐射; 遮光系统; LightTools
中图分类号:TN929.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)07-2300-07

Decreasing earth background radiation in satellite-ground communication

Xu Quanchun[1], Yu Jianjie[1,2], Zhou Yanping[1], Ma Jing[1], Tan Liying[1]

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Post-doctoral Mobile Station of Instruments Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The earth background radiation and its suppression technologies for satellite-ground laser communication system were studied. Firstly, a theoretical formula of the power of entrance pupil caused by earth background radiation at different orbits was derived, and the concept of inherent stray radiation was put forward and theoretically deduced. Furthermore, theoretical calculations of earth background radiation for a typical terminal were accomplished, and baffle system designs of different forms were given. Finally, optical simulation software LightTools was used to simulate the stray radiation of the terminal with different forms of baffle system at different orbits, and then the curves of stray radiation affected by orbit altitude and the form of baffle system were obtained and analyzed. This article provides a theoretical foundation of earth background radiation for the satellite-ground laser communication and a simulation basis for baffle system of the laser communication terminal on the satellite.

Key words: earth background radiation; satellite-ground communication; stray radiation; baffle system; LightTools

收稿日期:2013-11-14; **修订日期**:2013-12-15
基金项目:国家自然科学基金(10904026);黑龙江省博士后基金(LBH-210140)
作者简介:胥全春(1990-),男,硕士生,主要从事空间光电信息方面的研究。Email:springxqc@163.com
导师简介:周彦平(1956-),男,教授,博士生导师,主要从事空间光电信息探测技术和空间辐射环境及防护技术等方面研究。Email:ypzhou@hit.edu.cn

0 引 言

卫星激光通信是以激光作为信息载体在卫星间或星地间进行极远距离、极弱信号传输的通信方式，是光通信技术在卫星应用领域的拓展，也是现代大容量空间通信领域的重要研究方向[1-2]。在星地激光通信中，星上激光通信终端在通信时需对准地面站，此时来自地球的背景辐射(主要包括地球自身的黑体辐射和地球反射的太阳黑体辐射)和信号光束将同时进入系统探测器，造成系统跟踪精度和通信信噪比等下降。为提高星上终端的跟踪精度和信噪比，改善通信质量，必须分析地球背景辐射的产生机理，并研究其抑制技术。

到目前为止，在激光通信领域中，瓦尔特利珀研究了在直接探测和相干探测情况下地球背景噪声对信噪比的影响[3]，默罕默德阿里等人采用双波长差分信号的方法降低背景辐射的影响[4]；而且前人对空间光学系统的遮光系统设计做了大量工作[5-7]。但没有星上终端中地球背景辐射的理论推导，以及未研究遮光系统对星上终端杂散辐射的抑制作用。

文中以普朗克黑体辐射定律为理论依据，对不同轨道上的地球背景辐射入瞳功率和固有杂散辐射的理论公式进行推导。然后为激光通信中常用的 R-C 系统为例典型激光通信系统设计了遮光系统，并利用 LightTools 软件对几个典型的轨道进行杂散辐射仿真，分析各级遮光系统对地球背景辐射的抑制作用，为实际星上终端的遮光系统设计提供依据。

1 星上终端的地球背景辐射理论推导

在星地激光通信时，星上终端的光学天线始终对准地球，此时，地球背景辐射引起的杂散光将随信号光束进入星上终端的接收探测器，该部分地球背景辐射主要包括以下两部分：

(1) 地球自身的光谱辐照度 $E_e(\lambda)$；

(2) 地球反射的太阳光谱辐照度 $E_s'(\lambda)$。

因此在终端轨道处的总光谱辐照度为：

$$E(\lambda)=E_e(\lambda)+E_s'(\lambda) \tag{1}$$

1.1 地球自身的光谱辐照度 $E_e(\lambda)$

在文中的计算中，地球的黑体等效成温度为 T_e=293 K，它的表面辐射遵守朗伯定律。由普朗克黑体辐射定律[8]得地球表面的光谱辐射出射度 $M_e(\lambda)$为：

$$M_e(\lambda)=\frac{c_1}{\lambda^5(e^{c_2/\lambda T_e}-1)} \tag{2}$$

式中：c_1 为第一辐射常数，$3.741\,8\times10^8\ \mathrm{W\cdot\mu m^4\cdot m^{-2}}$；$c_2$ 为第二辐射常数，$1.438\,8\times10^4\ \mathrm{\mu m\cdot K}$；$\lambda$ 为波长。

由能量守恒定律可知：

$$M_e(\lambda)\cdot4\pi r_e^2=E_e(\lambda)\cdot4\pi(r_e+h_o)^2 \tag{3}$$

则地球自身在星上终端处的辐照度 $E_e(\lambda)$为：

$$E_e(\lambda)=M_e(\lambda)\cdot\left(\frac{r_e}{r_e+h_o}\right) \tag{4}$$

式中：r_e 为地球半径，约 6 400 km；h_o 为星上终端所处的轨道高度。

1.2 地球反射的太阳光谱辐照度 $E_s'(\lambda)$

星上终端处于某一轨道时，其接收到的地球背景辐射不仅包括地球自身辐射，还包括地球反射的太阳辐射。

与地球光谱辐射出射度类似，太阳的光谱辐射出射度 $M_s(\lambda)$为：

$$M_s(\lambda)=\frac{c_1}{\lambda^5(e^{c_2/\lambda T_s}-1)} \tag{5}$$

式中：c_1，c_2，λ 与公式(2)相同；T_s 为太阳的等效黑体温度，约 5 762 K[9]。

文中地球对太阳辐射的反射可认为是地表均匀的漫反射，由此在计算地球反射太阳辐射时可将地球当作二次光源来处理。

忽略太阳辐射在太阳与地球大气层间(不包括大气层)的传输损耗，由能量守恒定律：

$$M_s(\lambda)\cdot4\pi r_s^2=E_s(\lambda)\cdot4\pi(1\mathrm{AU})^2 \tag{6}$$

式中：$E_s(\lambda)$为太阳在地球大气层外的光谱辐照度；r_s 为太阳半径，7×10^5 km；1AU 为地球与太阳的平均距离，约为 1.5×10^8 km[10]。

地球反射后，太阳的光谱辐射出射度 $M_s'(\lambda)$为：

$$M_s'(\lambda)=E_s(\lambda)\cdot R_e(\lambda) \tag{7}$$

式中：$R_e(\lambda)$为地球对太阳辐射的光谱反射率。

则地球反射的太阳辐射在星上终端轨道处的光谱辐照度 $E_s'(\lambda)$为：

$$E_s'(\lambda)=M_s(\lambda)R_e(\lambda)\left[\frac{r_s\cdot r_e}{1\mathrm{AU}(r_e+h_o)}\right] \tag{8}$$

1.3 入瞳光谱辐射功率 Φ_0 与固有杂散辐射 Φ_{Direct}

1.3.1 入瞳光谱辐射功率 Φ_0

确定地球背景辐射在星上终端处的光谱辐照度

$E(\lambda)$后,可以由下式计算地球背景辐射在星上终端入瞳处的辐射功率 Φ_0:

$$\Phi_0=\int E(\lambda)\cdot S_0\cdot \mathrm{d}\lambda \tag{9}$$

式中:S_0 为入瞳面积。

若取公式(9)的积分限为整个光谱范围,则得到地球背景辐射在入瞳处的总功率;若取积分限为探测器的光谱响应范围,则得到后续仿真中的有效入瞳功率,因为即使超过该光谱范围的辐射进入探测器,探测器也不会有响应,属于无效功率。

1.3.2 固有杂散辐射 Φ_{Direct}

在卫星与地面站通信时,星上终端始终对准地面站,终端视场内的辐射直接通过光学系统的通光面进入探测器,如图 1 所示。视场角内的地球辐射能通过光学系统的所有通光面到达探测器,而视场角外的地球辐射不能直接通过个通光面进入探测器。

由于光通信终端的视场一般在毫弧度量级,而地球对终端的张角为几度到几十度,所以可认为在通信时,终端的视场内总是充满地球背景辐射,这部分辐射定义为固有杂散辐射,其功率用 Φ_{Derect} 表示。

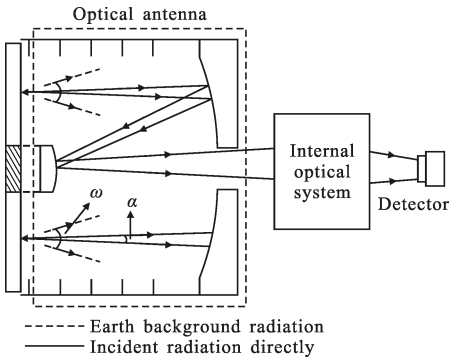

图 1 地球背景辐射直接入射的机理图

Fig.1 Mechanism of incident earth background radiation directly

图中:ω 为地球对终端的张角;α 为终端视场角。

首先确定轨道处(大气层外)的光谱辐射亮度 $L(\lambda)$,由辐射亮度的定义得:

$$E(\lambda)\cdot \mathrm{d}S=\int_{\Omega} L(\lambda)\cdot \mathrm{d}S\mathrm{d}\Omega \tag{10}$$

式中:$E(\lambda)$为地球辐射在终端轨道处的总光谱辐照度;$\mathrm{d}S$ 为终端轨道处的微小面元;Ω 为地球对终端所张的立体角;α 为地球对终端的张角。

则 Φ_{Derect} 可由下式确定:

$$\begin{aligned}\Phi_{\mathrm{Derect}}&=\iint_{\lambda,\Omega'} T(\lambda)L(\lambda)S_0\cdot \mathrm{d}\Omega'\cdot \mathrm{d}\lambda=\\&\int E(\lambda)T(\lambda)S_0\frac{\sin^2(\omega/2)}{\sin^2(\alpha/2)}\cdot \mathrm{d}\lambda=\\&\int\left[M_e(\lambda)+M_s(\lambda)\left(\frac{r_s}{1\mathrm{AU}}\right)^2R_e(\lambda)\right]\cdot T(\lambda)S_0\sin^2(\omega/2)\cdot \mathrm{d}\lambda\end{aligned} \tag{11}$$

式中:$T(\lambda)$为系统的光谱透过率;Ω'为终端的立体视场角;ω 为终端视场角;其积分限为整个光谱范围。

由公式(11)最后一项表达式可得:固有杂散辐射仅与太阳和地球的光谱辐射出射度、地球的光谱反射率、星上终端的基本参数(光谱透过率、视场角和如同面积)以及两个基本常数(太阳半径和日地距离)有关,而与轨道高度无关。其中地球的光谱反射率与地面终端所处的地理位置等有关。

由上述分析可知,消杂散辐射的措施,只能使杂散辐射降低到接近固有杂散辐射,而不能小于这一值。

2 杂散辐射抑制技术

2.1 杂散辐射传输理论

杂散辐射从一个面传输到另一个面的理论模型可由下式表示[11]:

$$\mathrm{d}\phi_c=\mathrm{BRDF}\cdot \mathrm{d}\phi_s\cdot \mathrm{d}\Omega_{sc} \tag{12}$$

式中:$\mathrm{d}\phi_c$ 为传递到单位接收面的辐射通量;$\mathrm{d}\phi_s$ 为源面的出射辐射通量;$\mathrm{d}\Omega_{sc}$ 为源面对接收面的投影立体角,也称几何构成因子 GCF;BRDF 为源面材料的双向反射分布系数,定义为材料表面出射辐射的辐亮度 L_s 与入射辐射的辐照度 E 的比值。

可以看出,影响光学系统杂散辐射能量传递的三个要素[12]:

(1) 入射杂散辐射的强弱;

(2) 材料(遮光罩或系统的各种机械支架等)表面的散射特性 BRDF;

(3) 几何构成因子 GCF,它仅仅取决与系统结构形式和尺寸等(包括中心遮拦、遮光罩的形状和位置等),而与另外两个因无关。

上述影响辐射能量传输的三个要素中任一为零,都会使得到达系统探测器的杂散辐射能量为零。显而易见,双向反射分布系数 BRDF 永远不可能为零,而 $\mathrm{d}\phi_s$ 为零的原因,只能是另外两个要素为零,要么几何构成因子 GCF 为零,意味着杂散辐射的传输途径完全被阻挡,要么入射杂散辐射能量为零,即

上一级系统 (上一级的接收面可以看为这一级的源面)的杂散辐射出射能量为零。

为达到抑制光学系统的杂散辐射传递到系统探测器的目的,可以采取以下方法[12]:

(1) 减小入射杂散辐射实际上是减小上一级杂散辐射源面的出射杂散辐射;

(2) 采用特殊的物化处理(比如涂覆吸收涂层,增加材料对杂散辐射的吸收率;在后文中,遮光罩对杂散辐射的吸收率设置为 95%), 使得材料表面的 BRDF 在空间的分布值减小,有助于杂散光的抑制;

(3) 减小杂散辐射能量每一级传递的几何构成因子 GCF 即设计遮光罩,用以遮挡杂散光的传输途径。

2.2 杂散辐射抑制方法

根据上一小节的理论分析, 该节将介绍星地激光通信中最常用的几种抑制杂散辐射的方法。

2.2.1 材料黑处理

由于很大一部分杂散辐射是通过多次散射进入探测器的, 所以可以通过降低散射面的散射率从而减少杂散辐射。在不影响热控和光学系统透过率的前提下, 通常采取对其他材料进行表面黑处理以增大光谱吸收率从而减小公式(12)中的 BRDF。

2.2.2 添加窄带滤波片

由于星上终端的工作波段相对探测器的响应光谱段很窄,所以如果不加任何措施,进入探测器的杂散辐射的波段是探测器的响应波段, 这部分杂散辐射具有较大功率。通常添加窄带滤光片对非工作波段的杂散辐射进行抑制, 窄带滤光片的透过波段即为星上终端的工作波段(在文中,窄带滤波片的带宽设置为 10 nm)。

2.2.3 遮光罩设计

由上述分析可知,通过减小公式(12)中的BRDF,可以有效的减小杂散辐射。而减小 BRDF 的有效方法就是添加适当的遮光系统。遮光罩按级数分,可分为一级、二级或更高级数。级数越高,杂散辐射传递到探测器所要走的路径就越长。

星上终端的遮光系统主要包括主遮光罩、主次镜锥形遮光罩,则主遮光罩可分为一级遮光系统,主次镜锥形遮光罩为二级遮光系统。

针对采用 RC 系统作为光学系统的星上终端,为其设计遮光系统。用作图法确定 RC 光学系统中主次镜锥形遮光罩和主遮光罩的过程[6]如图 2 所示。因是轴对称系统,作图只需画一半。光线 1 为主镜外直径决定的视场边缘光线, 光线 2 是由次镜遮拦比决定的内孔径视场边缘光线。

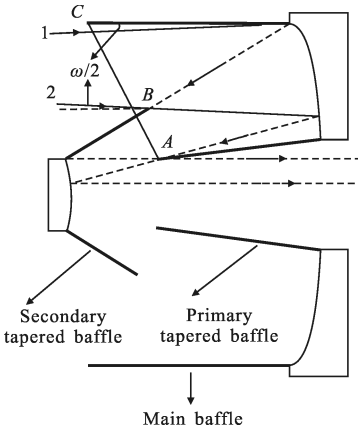

图 2 主遮光罩和主次镜锥形遮光罩设计示意图

Fig.2 Design of the main baffle and the primary and secondary tapered baffles

主镜锥形遮光罩 A 是由光线 1 经主镜、次镜依次反射后的光线和光线 2 经主镜反射后的光线交点。次镜锥形遮光罩点 B 是由光线 2 和光线 1 经主镜反射后光线的交点。主遮光罩的边缘点 C 是由 AB 连线延长线与外镜筒的交点。

3 数值仿真与结果分析

根据上一节介绍的杂散辐射抑制技术, 该节采用这三种方法对一个典型星上终端进行地球杂散辐射抑制设计,并进行仿真分析。

3.1 数值仿真

针对一个典型的终端设计了遮光系统(包括主遮光罩和主次镜锥形遮光罩),在光路中添加了窄带滤光片,对非光学表面进行黑处理,并在光学仿真软件 LightTools 中建模,进行杂散辐射仿真[13]。图 3 和图 4

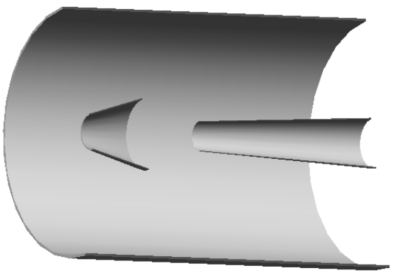

图 3 LightTools 中遮光系统的剖面模型

Fig.3 Section plan of the baffle system in LightTools

分别为 LightTools 中遮光系统的剖面模型和整个系统的线框图模型。

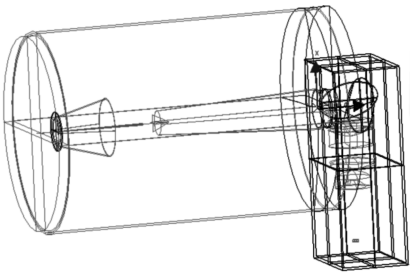

图 4 LightTools 中整个系统的线框图模型

Fig.4 Wireframe model of the entire system in LightTools

对于该星上终端，其探测器的光谱响应范围为 400~1 200 nm，并取地球对该范围波段的反射率为地球对太阳辐射的平均反射率 30%[14]，终端中窄带滤光片的通光谱段(即星上终端的通光谱段)为 800 nm±5 nm，终端口径为 100 mm，视场角为 5 mrad。

假设通过光学系统的所有通光面直接进入探测器的光谱段为终端的通光谱段，而通过多次反射、透射或者散射间接进入探测器的光谱段为探测器响应光谱段，并且假设探测器对不同波长的光谱响应一致。

在以上条件的基础下，利用公式(9)求得地球背景辐射在不同轨道高度处的入瞳功率，如图 5 所示。利用公式(11)求得星上终端的固有杂散辐射功率为 1.537 4E−07 W。

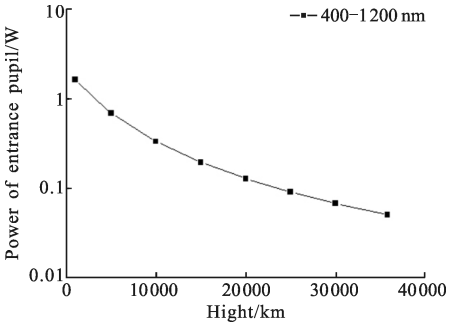

图 5 不同轨道高度处的入瞳功率

Fig.5 Entrance pupil power at different orbital altitudes

由图可知，在 400~1 200 nm 谱段范围，终端在不同轨道高度处具有不同入瞳功率，从理论最大值 2.19 W(轨道高度为零)逐渐下降到 50.3 mW(地球同步轨道高度)。

图 6 为没有遮光罩的情况下，终端处于不同轨道高度时地球背景辐射造成的杂散辐射功率。

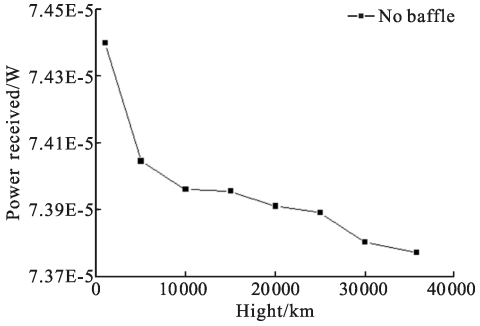

图 6 无遮光罩时不同轨道处的杂散辐射

Fig.6 Stray radiation at different orbits without baffle

图 7 为只有主遮光罩(一级遮光系统)的情况下，终端处于不同轨道高度时地球背景辐射造成的杂散辐射功率。

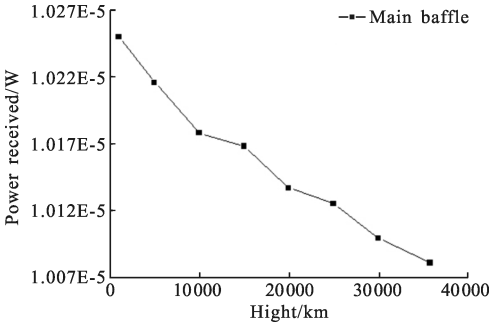

图 7 有主遮光罩时不同轨道处的杂散辐射

Fig.7 Stray radiation at different orbits with the main baffle

图 8 为在主遮光罩和主次镜锥形遮光罩(一级和二级遮光系统)的情况下，终端处于不同轨道高度时地球背景辐射造成的杂散辐射功率。

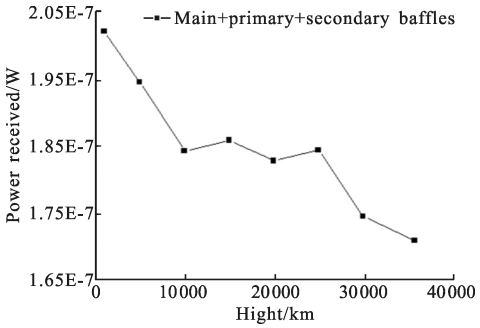

图 8 有主遮光罩和主次镜锥形遮光罩时不同轨道处的杂散辐射

Fig.8 Stray radiation at different orbits with the main baffle and the primary and secondary tapered baffles

图 9 为在主遮光罩和主镜锥形遮光罩的情况下，终端处于不同轨道高度时地球背景辐射造成的杂散辐射功率。

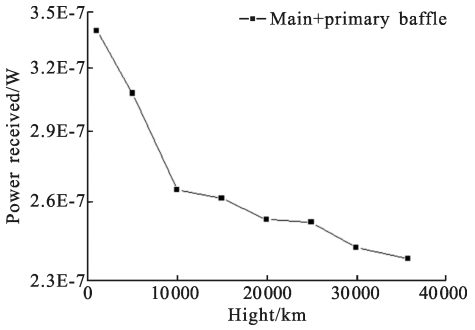

图 9 有主遮光罩和主镜锥形遮光罩时不同轨道处的杂散辐射

Fig.9 Stray radiation at different orbits with the main baffle and the primary tapered baffle

图 10 为在主遮光罩和次镜锥形遮光罩的情况下,终端处于不同轨道高度时,地球背景辐射造成的杂散辐射功率。

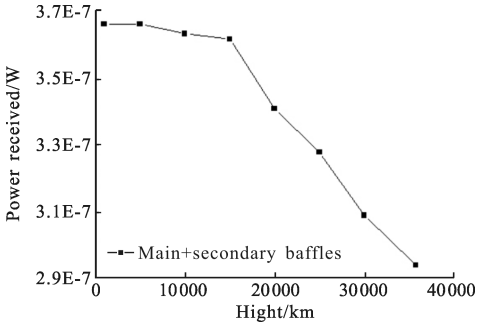

图 10 有主遮光罩和次镜锥形遮光罩时不同轨道处的杂散辐射

Fig.10 Stray radiation at different orbits with the main baffle and the secondary tapered baffles

图 11 为具有不同形式遮光系统的终端处于不同轨道高度时,地球背景辐射造成的杂散辐射功率。图中:“No baffles”代表没有遮光罩,“M”代表主遮光罩,“P”代表主镜锥形遮光罩,“S”代表次镜锥形遮光罩。

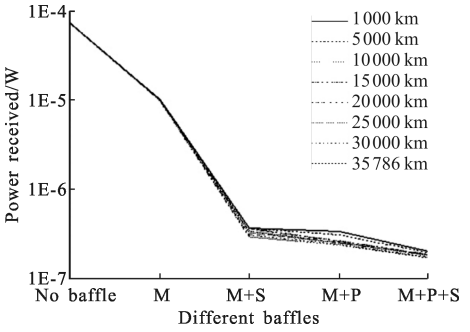

图 11 不同形式的遮光系统在不同轨道高度的杂散辐射

Fig.11 Stray radiation at different orbits with different form of baffle system

3.2 结果分析

由图 6~10 可知，当遮光系统的形式确定后,随着轨道高度升高，探测到的杂散辐射功率整体上呈下降趋势,但是杂散辐射功率的量级不变。

由图 6 可知,没有遮光系统时,地球背景辐射造成的系统杂散辐射功率为 10 mW 量级，而从图 7 可知,增加主遮光罩(一级遮光系统)后,这一值减小到约 1/7,从图 8~10 可知,再次增加主次镜锥形遮光罩(二级遮光系统)或其中之一后,杂散辐射功率降到 100 μW 量级，相对没有遮光系统时下降了两个数量级,接近固有杂散辐射功率且均高于这一值。

由图 11 可知,当系统的参数确定后,终端对地球背景辐射的抑制能力受终端的轨道高度影响较小,此时遮光系统的形式起到了决定性的作用,且遮光系统的级数设计得越多,杂散辐射的抑制能力越好。

4 结 论

星上终端的固有杂散辐射仅与太阳和地球的光谱辐射出射度、地球的光谱反射率、星上终端的基本参数(光谱透过率、视场角和如同面积)以及两个基本常数(太阳半径和日地距离)有关,而与轨道高度无关。其中地球的光谱反射率与地面终端所处的地理位置等有关。消杂散辐射的措施,只能使杂散辐射降低到接近固有杂散辐射,而不能小于这一值。

文中所用的终端中,当没有任何遮光措施时,地球背景辐射造成系统杂散辐射功率为 10 mW 量级,设计适当的遮光系统，可以使杂散辐射功率降到接近固有杂散光功率。当系统的参数确定后,终端对地球背景辐射的抑制能力受轨道高度影响较小，此时遮光系统的形式起到了决定性的作用，且遮光系统的级数设计得越多,杂散辐射抑制的能力越好。

参考文献:

[1] Mecherle G S, Horstein M. Comparison of radio frequency and optical architectures for deep-space communications via a relay satellite[C]//SPIE, 1994, 2123: 36–53.

[2] Nilsson. Fundamental limits and possibilities for future telecommunication [J]. ***IEEE Communications Magazine***, 2001, 39(5): 164–167.

[3] Leeb Walter R. Degradation of signal to noise ratio in optical free space data links due to background illumination

[J]. ***Applied Optics***, 1989, 28(15): 3443-3449.

[4] Mohammad-Ali Khalighi, Fang Xu, Yacine Jaafar, et al. Double-laser differential signaling for reducing the effect of background radiation in free-space optical systems [J]. ***Optical Communication***, 2011, 3(2): 145-154.

[5] Prescott R. Cassegrain baffle design [J]. ***Applied Optics***, 1968, 7: 479-481.

[6] Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(2): 316-318. (in Chinese)
钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 316-318.

[7] Deng Chao. Analysis on stray light elimination for space solar telescope [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(4): 715-720. (in Chinese)
邓超. 空间太阳望远镜消杂散光分析 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 715-720.

[8] Che Nianzeng, Yan Dayuan. Radiometry and Photometry [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. (in Chinese)
车念增, 闫达远. 辐射度学和光度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.

[9] Wu Zongfan, Liu Meilin, Zhang Shaoju, et al. Infrared and Shimmer Technology [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
吴宗凡, 柳美琳, 张绍举, 等. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

[10] Jiang Yuesong. Photovoltaic Technology and Experiment[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. (in Chinese)
江月松. 光电技术与实验 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.

[11] Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1982. (in Chinese)
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

[12] Robert P Breault. Problems and techniques in stray radiation suppression[C]//SPIE, 1977, 107: 1-2.

[13] Gary L Peterson. Stray light calculation methods with optical ray trace software[C]//SPIE, 1999, 3780: 132-137.

[14] Yao Lianxing, Chou Weili, Wang Fuheng. Optical Characteristics of The Target and The Environment [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 1995. (in Chinese)
姚连兴, 仇维礼, 王福恒. 目标和环境的光学特性 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1995.