

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H04B 10/08 (2006.01)

H04B 10/10 (2006.01)

G02B 27/00 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510023202.9

[45] 授权公告日 2007年6月20日

[11] 授权公告号 CN 1322688C

[22] 申请日 2005.1.10

[21] 申请号 200510023202.9

[73] 专利权人 中国科学院上海光学精密机械研究所

地址 201800 上海市 800-211 邮政信箱

[72] 发明人 刘立人 万玲玉 曲伟娟 王利娟
许楠 栾竹 刘德安 周煜

[56] 参考文献

US6490067B2 2002.12.3

JP6-152541A 1994.5.31

JP8-265262A 1996.10.11

CN 1434581 A 2003.8.6

审查员 姚宏颖

[74] 专利代理机构 上海新天专利代理有限公司

代理人 张泽纯

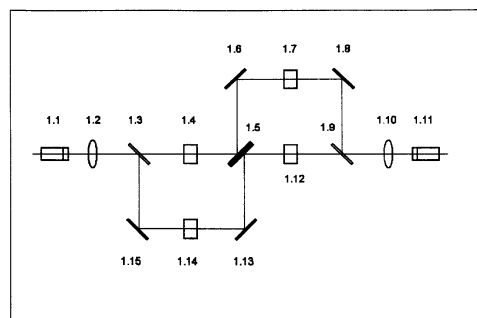
权利要求书 2 页 说明书 11 页 附图 1 页

[54] 发明名称

空间激光通信运动双终端远距离传输模拟装置

[57] 摘要

一种空间激光通信运动双终端远距离传输的模拟装置，其构成是双通道对称系统：第一被测激光通信终端发射波长为 λ_1 的光束依次经过第一傅立叶透镜、第一波分透反镜、第一光学成像放大器、扫描双面反射镜、第一反射镜、第二光学成像放大器、第二波分透反镜、第二傅立叶透镜到达第二被测激光通信终端；第二被测激光通信终端发射波长为 λ_2 的光束依次通过第二傅立叶透镜，第二波分透反镜，第三光学成像放大器，扫描双面反射镜，第三反射镜，第四光学成像放大器，第四反射镜，第一波分透反镜，第一傅立叶透镜抵达第一被测激光通信终端；该装置可在实验室实现两个被测通信终端的相互远场运动，可应用于卫星激光通信终端的捕获、跟瞄和通信性能的检测与验证。



1、一种空间激光通信运动双终端远距离传输的模拟装置，特征在于其构成：包括第一被测激光通信终端（1.1）和第二被测激光通信终端（1.11），自第一被测激光通信终端（1.1）发射波长为 λ_1 的激光光束先经第一傅立叶透镜（1.2），透过第一波分透反镜（1.3），通过第一光学成像放大系统（1.4），由扫描双面反射镜（1.5）的第一反射镜面反射，经第一反射镜（1.6）反射，通过第二光学成像放大系统（1.7），再由第二反射镜（1.8）反射到第二波分透反镜（1.9），经第二波分透反镜（1.9）反射后的光束再通过第二傅立叶透镜（1.10）抵达第二被测激光通信终端（1.11）；

第二被测激光通信终端（1.11）发射激光波长为 λ_2 的光束先通过第二傅立叶透镜（1.10），透过第二波分透反镜（1.9），通过第三光学成像放大系统（1.12），由扫描双面反射镜（1.5）的第二反射镜面反射，经第三反射镜（1.13）反射，通过第四光学成像放大系统（1.14），再由第四反射镜（1.15）反射到第一波分透反镜（1.3），经第一波分透反镜（1.3）反射后的光束再通过第一傅立叶透镜（1.2）抵达第一被测激光通信终端（1.1）；

所述的第一波分透反镜（1.3）对波长为 λ_1 的激光高透射率，对波长为 λ_2 激光高反射率，所述的第二波分透反镜（1.9）对波长为 λ_1 的激光高反射率，对波长为 λ_2 激光高透射率；

第一反射镜（1.6）和第二反射镜（1.8）对于 λ_1 光束高反射率，第三反射镜（1.13）和第四反射镜（1.15）对于 λ_2 光束高反射率；

扫描双面反射镜（1.5）的第一反射镜面对于 λ_1 光束高反射率，第二反射镜面对于 λ_2 光束高反射率；

第一傅立叶透镜（1.2）的焦面位于第一光学成像放大系统（1.4）的物面上，第二傅立叶透镜（1.10）的焦面位于第三光学成像放大系统（1.12）的物面上；第一光学成像放大系统（1.4）的像面位于第二光学成像放大系统

(1.7)的物面上;第三光学成像放大系统(1.12)的像面位于第四光学成像放大系统(1.14)的物面上;

所述的扫描双面反射镜(1.5)处于第一光学成像放大系统(1.4)的像面上和第三光学成像放大系统(1.12)的像面上。

2、根据权利要求1所述的空间激光通信运动双终端远距离传输的模拟装置,其特征在于沿波长为 λ_1 的激光的光路,所述的第一傅立叶透镜(1.2)放在第一波分透反镜(1.3)和第一光学成像放大系统(1.4)之间,相应的沿波长为 λ_2 的激光的光路,第二傅立叶透镜(1.10)放在第二波分透反镜(1.9)和第三光学成像放大系统(1.12)之间。

3、根据权利要求1所述的空间激光通信运动双终端远距离传输的模拟装置,其特征在于沿波长为 λ_1 的激光光路,所述的第二光学成像放大系统(1.7)的像面位于第二光学成像放大系统(1.7)与第二被测激光通信终端(1.11)之间。

4、根据权利要求1所述的空间激光通信运动双终端远距离传输的模拟装置,其特征在于沿波长为 λ_2 的激光光路,所述的第四光学成像放大系统(1.14)的像面位于第四光学成像放大系统(1.14)与第一被测激光通信终端(1.1)之间。

5、根据权利要求1所述的空间激光通信运动双终端远距离传输的模拟装置,其特征在于所述的第一光学成像放大系统(1.4)、第二光学成像放大系统(1.7)、第三光学成像放大系统(1.12)和第四光学成像放大系统(1.14)由多级的单透镜成像放大器组成,或为单透镜的单级光学成像放大器,或无透镜。

6、根据权利要求1所述的空间激光通信运动双终端远距离传输的模拟装置,其特征在于所述的扫描双面反射镜(1.5)具有两个正交偏转轴。

空间激光通信运动双终端远距离传输模拟装置

技术领域:

本发明涉及卫星激光通信,特别是一种空间激光通信运动双终端远距离传输模拟装置。该装置可在实验室实现两个被测通信终端的相互远场运动,可应用于卫星激光通信终端的捕获、跟瞄和通信性能的检测与验证。

背景技术

卫星激光通信包括卫星之间,卫星和其它飞行体之间,卫星和地面之间等等的自由空间激光通信。为了保持两个相对运动着的激光通信终端之间的稳定的通信链路,一个激光通信终端必须包含激光通信和光学捕获跟瞄两大分系统。卫星激光通信的作用距离为数百至数万公里,因此不可能在空间直接完成激光通信终端的性能检测和验证,所以激光通信终端的捕获跟瞄性能和通信性能的检测和验证评估必须在地面和实验室内进行。

国外的卫星激光通信终端的研制单位在实验室都采用平行光管的手段和半物理半仿真的方法检测和验证激光通信终端的性能,平行光管用于发射一个检验被测激光通信终端的波面或者用于接收被测激光通信终端的发射光束(见: 1. B. Laurent and G. Planche, "Silex overview after flight terminals campaign", Proc. SPIE, Vol. 2990, pp. 10-22, 1997), 这种方案可以单独检验一个激光通信终端。但是,至今还没有对两个被测激光通信终端进行相互直接对接而实施跟瞄和通信性能的检测验证的方法。主要原因是还没有一种光学方法可以在实验室空间尺度下模拟实现光束从近场分布到远场分布的转换,而且是双向的,并且能够同时模拟卫星的远场。在实践中两个卫星激光通信终端都一定处于对方的光学远场区域内,而且除了本身的转动外终端的相互平动才能产生光跟踪的误差信号。

发明内容

本发明要解决的技术问题是基于光学傅立叶变换和光学成像放大的原理实现光束的近场分布向远场分布的转换，提出一种空间激光通信运动双终端远距离传输模拟装置。它利用空间双通道的结构实现光束的独立的正、逆双向传播，同时提出在傅立叶空间频率谱面进行双反射镜双通道角度扫描的原理实现激光通信终端的相对平移，从而可以在实验室空间采用光学模拟实现两个被测激光通信终端的相互远场运动，进而进行光学捕获、跟瞄和远距离激光通信的检测和验证。本装置的结构简单，原理可靠。

本发明的技术解决方案如下：

一种空间激光通信运动双终端远距离传输的模拟装置，特征在于其构成：包括第一被测激光通信终端和第二被测激光通信终端，第一被测激光通信终端发射波长为 λ_1 的激光光束先经第一傅立叶透镜，透过第一波分透反镜，通过第一光学成像放大系统，由扫描双面反射镜的第一反射镜面反射，经第一反射镜反射，通过第二光学成像放大系统，再由第二反射镜反射到第二波分透反镜，经第二波分透反镜反射后的光束再通过第二傅立叶透镜抵达第二被测激光通信终端；

第二被测激光通信终端发射激光波长为 λ_2 的光束先通过第二傅立叶透镜，透过第二波分透反镜，通过第三光学成像放大系统，由扫描双面反射镜的第二反射镜面反射，经第三反射镜反射，通过第四光学成像放大系统，再由第四反射镜反射到第一波分透反镜，经第一波分透反镜反射后的光束再通过第一傅立叶透镜抵达第一被测激光通信终端；

所述的第一波分透反镜对波长为 λ_1 的激光高透射率，对波长为 λ_2 激光高反射率，所述的第二波分透反镜对波长为 λ_1 的激光高反射率，对波长为 λ_2 激光高透射率；

第一反射镜和第二反射镜对于 λ_1 光束高反射率，第三反射镜和第四反射

镜对于 λ_2 光束高反射率；

扫描双面反射镜的第一反射镜面对于 λ_1 光束高反射率，第二反射镜面对于 λ_2 光束高反射率；

第一傅立叶透镜的焦面位于第一光学成像放大系统的物面上，第二傅立叶透镜的焦面位于第三光学成像放大系统的物面上；第一光学成像放大系统的像面位于第二光学成像放大系统的物面上；第三光学成像放大系统的像面位于第四光学成像放大系统的物面上；

所述的扫描双面反射镜处于第一光学成像放大系统的像面上和第三光学成像放大系统的像面上。

沿波长为 λ_1 的激光的光路，所述的第一傅立叶透镜放在第一波分透反镜和第一光学成像放大系统之间，相应的沿波长为 λ_2 的激光的光路，第二傅立叶透镜放在第二波分透反镜和第三光学成像放大系统之间。

所述的第二光学成像放大系统的像面位于第二光学成像放大系统和第二被测激光通信终端之间。

所述的第四光学成像放大系统的像面位于第四光学成像放大系统和第一被测激光通信终端之间。

所述的第一光学成像放大系统、第二光学成像放大系统、第三光学成像放大系统和第四光学成像放大系统由多级的单透镜成像放大器组成，或为单透镜的单级光学成像放大器，或无透镜。

所述的扫描双面反射镜可绕正交两个转动轴转动，双面高反，可采用二维电动的精密调整架，也可采用电机或其他驱动器驱动拨杆旋转双面发射镜以实现二维的角度偏转。

本发明的技术效果：

本发明通过光学傅立叶变换加级联光学成像放大的方法实现了光束的远距离传输模拟，在空间频谱面采用双面反射镜进行双通道角度扫描实现了卫星终端的轨道平移相对运动模拟，这样可以在实验室有限的空间内保证两个卫星激光通信终端都一定处于对方的光学远场区域，并产生相互的平动以模拟卫星的相互运动，本发明可应用于卫星激光通信终端的光学捕获跟瞄性能

和通信性能的实验室检测与验证，对于空间激光通信终端的研制和发展具有很大的应用价值。

附图说明

图1为本发明系统总体光路示意图

图2为本发明小孔接收装置的结构示意图

图中：1.1 - 第一被测激光通信终端，1.2 - 第一傅立叶透镜，1.3 - 第一波分透反射镜，1.4 - 第一光学成像放大系统，1.5 - 扫描双面反射镜，1.6 - 第一反射镜，1.7 - 第二光学成像放大系统，1.8 - 第二反射镜，1.9 - 第二波分透反射镜，1.10 - 第二傅立叶透镜，1.11 - 第二被测激光通信终端，1.12 - 第三光学成像放大系统，1.13 - 第三反射镜，1.14 - 第四光学成像放大系统，1.15 - 第四反射镜。2.1 - 小孔，2.2 - 会聚透镜，2.3 - 光电探测器。

具体实施方式

本发明的原理图见图1的系统总体光路示意图：第一被测激光通信终端1.1发射的激光光束先通过第一傅立叶透镜1.2，再通过第一波分透反射镜1.3，再通过第一光学成像放大系统1.4，再由扫描双面反射镜1.5反射，再由第一反射镜1.6反射，再通过第二光学成像放大系统1.7，再由第二反射镜1.8反射到第二波分透反射镜1.9，经过反射后的光束再通过第二傅立叶透镜1.10抵达第二被测激光通信终端1.11；第二被测激光通信终端1.11发射的激光光束先通过第二傅立叶透镜1.10，再通过第二波分透反射镜1.9，再通过第三光学成像放大系统1.12，再由扫描双面反射镜1.5反射，再由第三反射镜1.13反射，再通过第四光学成像放大系统1.14，再由第四反射镜1.15反射到第一波分透反射镜1.3，经过反射后的光束再通过第一傅立叶透镜1.2抵达第一被测激光通信终端1.1。

第一波分透反射镜1.3可以放在第一傅立叶透镜1.2之前，即，第一被测激光通信终端1.1发射的激光光束先通过第一波分透反射镜1.3再通过第一傅立叶透镜1.2。同样，第二波分透反射镜1.9可以放在第二傅立叶透镜1.10之

后，即，第二被测激光通信终端 1.11 发射的激光光束先通过第二波分透反镜 1.9 再通过第二傅立叶透镜 1.10。

假设第一被测激光通信终端 1.1 发射口径上的激光光束分布为 $a_1(x, y)$ ，波长为 λ_1 ；第二被测激光通信终端 1.11 发射口径上的激光光束分布为 $a_2(x, y)$ ，波长为 λ_2 。第一波分透反镜 1.3 对于 λ_1 光束通光而对于 λ_2 光束反射，第二波分透反镜 1.9 对于 λ_2 光束通光而对于 λ_1 光束反射。第一反射镜 1.6 和第二反射镜 1.8 对于 λ_1 光束反射，第三反射镜 1.13 和第四反射镜 1.15 对于 λ_2 光束反射，扫描双面反射镜 1.5 的第一镜面对于 λ_1 光束反射，而第二镜面对于 λ_2 光束反射。

第一被测激光通信终端 1.1 发射口径上的激光光束 $a_1(x, y)$ 首先通过第一傅立叶透镜 1.2 进行傅立叶远场变换，第一傅立叶透镜 1.2 的焦距为 f_1 ，发射口径与傅立叶透镜的距离为 l_1 。第一傅立叶透镜 1.2 的焦面位于第一光学成像放大系统 1.4 的物面上，第一光学成像放大系统 1.4 由多级的单透镜成像放大器组成，总的放大倍数为 $\pm M_1$ ，其正号表示正像放大，负号表示倒像放大。第一光学成像放大系统 1.4 的像面位于第二光学成像放大系统 1.7 的物面上，第二光学成像放大系统 1.7 由多级的单透镜成像放大器组成，总的放大倍数为 $\pm M_2$ ，其正号表示正像放大，负号表示倒像放大。第二光学成像放大系统 1.7 的像面位于第二傅立叶透镜 1.10 之上。第二傅立叶透镜 1.10 与第二被测激光通信终端 1.11 的距离为 l_2 。扫描双面反射镜 1.5 处于第一光学成像放大系统 1.4 的像面上。设 $a_1(x, y)$ 的傅立叶变换为 $A_1(\frac{x}{\lambda_1 f_1}, \frac{y}{\lambda_1 f_1})$ ，

扫描双面反射镜 1.5 的转动角为 $\Delta\theta$ ，则在第二光学成像放大系统 1.7 的像面上将产生第一被测激光通信终端 1.1 发射的激光光束的放大的和线性相位移的傅立叶变换：

$$\begin{aligned}
A'_1(x, y) = & KA_1 \left[\frac{x}{(\pm M_1)(\pm M_2)\lambda_1 f_1}, \frac{y}{(\pm M_1)(\pm M_2)\lambda_1 f_1} \right] \\
& \times \exp \left[j\pi \left(1 - \frac{l_1}{f_1} \right) \frac{x^2 + y^2}{(M_1 M_2)^2 \lambda_1 f_1} \right] \exp \left[\pm j2\pi \frac{x \sin(2\Delta\theta)}{\lambda_1 (M_2)} \right] \exp \left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda_1 M_P^i f_P^i} \right)
\end{aligned} \quad (1)$$

其中： M_P^i 为第二光学成像放大系统 1.7 的最后一级单透镜光学成像放大器的放大倍数， f_P^i 为其透镜的焦距； K 为常数。

通过第二傅立叶透镜 1.10 后的光场为：

$$A''_1(x, y) = A'_1(x, y) \exp \left(-j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda_1 f_2} \right) \quad (2)$$

在 $l_1 = f_1$ 的条件下令 $M_P^i f_P^i = f_2$ 可以补偿 $A''_1(x, y)$ 中存在的相位二次项。

第二傅立叶透镜 1.10 后的光场将被第二被测激光通信终端 1.11 的主镜收集，在该主镜的焦面上产生光场 $A''_1(x, y)$ 的光学傅立叶变换，设激光通信终端主镜的焦距为 f_{r2} ，其孔径函数和傅立叶变换分别为 $a_{r2}(x, y)$ 和 $A_{r2} \left(\frac{x}{\lambda_1 f_{r2}}, \frac{y}{\lambda_1 f_{r2}} \right)$ 。当第二光学成像放大系统 1.7 的像面上的光斑足够大时，

第二被测激光通信终端 1.11 的主镜焦面上的光斑光强分布为：

$$I_{1 \rightarrow 2}(x, y) = \left| A_{r2} \left(\frac{x \mp \frac{f_{r2} \sin(2\Delta\theta)}{M_2}}{\lambda_1 f_{r2}}, \frac{y}{\lambda_1 f_{r2}} \right) \right|^2 \quad (3)$$

可见：这时第二被测激光通信终端 1.11 处于第一被测激光通信终端 1.1 的远场区域，接收光斑尺寸与本身的衍射口径有关；扫描双面反射镜 1.5 的偏转将导致接收光斑的移动。

第二被测激光通信终端 1.11 发射孔径上的激光光束 $a_2(x, y)$ 首先通过第

二傅立叶透镜 1.10 进行傅立叶远场变换, 第二傅立叶透镜 1.10 的焦距为 f_1 , 第二被测激光通信终端 1.11 的发射孔径与第二傅立叶透镜 1.10 的距离为 l_2 。第二傅立叶透镜 1.10 的焦面位于第三光学成像放大系统 1.12 的物面上, 第三光学成像放大系统 1.12 由多级的单透镜成像放大器组成, 总的放大倍数为 $\pm M_3$, 其正号表示正像放大, 负号表示倒像放大。第三光学成像放大系统 1.12 的像面位于第四光学成像放大系统 1.14 的物面上, 第四光学成像放大系统 1.14 由多级的单透镜成像放大器组成, 总的放大倍数为 $\pm M_4$, 其正号表示正像放大, 负号表示倒像放大。第四光学成像放大系统 1.14 的像面位于第一傅立叶透镜 1.2 之上。第一傅立叶透镜 1.2 与第一被测激光通信终端 1.1 的距离为 l_1 。扫描双面反射镜 1.5 处于第三光学成像放大系统 1.12 的像面上。设 $a_2(x, y)$ 的傅立叶变换为 $A_2(\frac{x}{\lambda_2 f_2}, \frac{y}{\lambda_2 f_2})$, 扫描双面反射镜 1.5 的转动角

为 $\Delta\theta$, 则在第四光学成像放大系统 1.14 的像面上将产生第二被测激光通信终端 1.11 发射的激光光束的放大的和线性相位移的傅立叶变换:

$$A'_2(x, y) = KA_2 \left[\frac{x}{(\pm M_3)(\pm M_4)\lambda_2 f_2}, \frac{y}{(\pm M_3)(\pm M_4)\lambda_2 f_2} \right] \times \exp \left[j\pi \left(1 - \frac{l_2}{f_2} \right) \frac{x^2 + y^2}{(M_3 M_4)^2 \lambda_2 f_2} \right] \exp \left[\pm j 2\pi \frac{x \sin(2\Delta\theta)}{\lambda_2 (M_4)} \right] \exp \left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda_2 M_S^i f_S^i} \right) \quad (4)$$

其中: M_S^i 为第四光学成像放大系统 1.14 的最后一级单透镜光学成像放大器的放大倍数, f_S^i 为其透镜的焦距; K 为常数。

通过第四傅立叶透镜 1.14 后的光场为:

$$A''_2(x, y) = A'_2(x, y) \exp \left(-j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda_2 f_1} \right) \quad (5)$$

在 $l_2 = f_2$ 的条件下令 $M_S^i f_S^i = f_1$ 可以补偿 $A''_2(x, y)$ 中存在的相位二次项。

第一傅立叶透镜 1.2 后的光场将被第一被测激光通信终端 1.1 的主镜收集, 在该主镜的焦面上产生光场 $A''_2(x, y)$ 的傅立叶变换, 设激光通信终端主镜的焦距为 f_{r1} , 其孔径函数和傅立叶变换分别为 $a_{r1}(x, y)$ 和 $A_{r1}\left(\frac{x}{\lambda_2 f_{r1}}, \frac{y}{\lambda_2 f_{r1}}\right)$ 。当即第四光学成像放大系统 1.14 的像面上的光斑足够大时, 第一被测激光通信终端 1.1 的主镜焦面上的光斑光强分布为:

$$I_{2 \rightarrow 1}(x, y) = \left| A_{r1} \left(\frac{x \mp \frac{f_{r1} \sin(2\Delta\theta)}{M_4}}{\lambda_2 f_{r1}}, \frac{y}{\lambda_2 f_{r1}} \right) \right|^2 \quad (6)$$

可见: 这时第一被测激光通信终端 1.1 处于第二被测激光通信终端 1.11 的远场区域, 接收光斑尺寸与本身的衍射口径有关; 扫描双面反射镜 1.5 的偏转将导致接收光斑的移动。

扫描双面反射镜 1.5 的偏转将可以同时产生第一被测激光通信终端 1.1 的接收光斑尺寸的移动和第二被测激光通信终端 1.11 的接收光斑尺寸的移动, 即可以模拟两个激光通信终端之间的相对运动。

该装置也可以对于一个自由空间激光通信终端进行远距离激光通信检测, 如果仍然保持第一被测激光通信终端 1.1 为被测终端, 则第二被测激光通信终端 1.11 应当被图 2 所示的小孔接收系统所替代。图 2 中, 从第二傅立叶透镜 1.10 发出的光束将首先被小孔 2.1 限制接收口径, 再通过会聚透镜 2.2 集光, 然后被光电探测器 2.3 探测。这时等效传输距离为:

$$L = \frac{M_1 M_2 f_1}{d_h} d_t \quad (7)$$

其中, d_h 为小孔的直径, d_t 为激光通信终端的真实口径的数值。

第一光学成像放大系统 1.4, 第二光学成像放大系统 1.7, 第三光学成像放大系统 1.12 和第四光学成像放大系统 1.14 可以是单透镜的单级光学成像

放大器，也可以是由单级光学成像放大器接联而成的多级光学成像放大器，也可以不用放大器成为放大倍数为 +1 的直接传递。

如果第 n 级单级光学成像放大器的透镜的焦距为 f_n^i ，物距为 $l_{n,1}^i$ ，像距为 $l_{n,2}^i$ ，放大倍数为 M_n^i ，则有：

$$\frac{1}{l_{n,1}^i} + \frac{1}{l_{n,2}^i} = \frac{1}{f_n^i}, \quad (8)$$

$$M_n^i = \frac{l_{n,2}^i}{l_{n,1}^i}. \quad (9)$$

该单级光学成像放大器的输入为发散球面波，光斑直径为 $d_{n,1}^i$ ，中心距离为 $L_{n,1}^i$ ，则其放大后的发散球面波的光斑直径为 $d_{n,2}^i$ 和中心距离为 $L_{n,2}^i$ 为：

$$d_{n,2}^i = M_n^i d_{n,1}^i, \quad (10)$$

$$L_{n,2}^i = \frac{M_n^i f_n^i L_{n,1}^i}{\frac{f_n^i}{M_n^i} + L_{n,1}^i} \approx M_n^i f_n^i. \quad (11)$$

在第 n 级单级光学成像放大器的像面上的上述球面波是第 $(n+1)$ 级单级光学成像放大器的物面输入。

第 n 级单级光学成像放大器为了保证不挡光，透镜的最小口径 $\phi_{n,\min}^i$ 为：

$$\phi_{n,\min}^i = \frac{d_{n,1}^i}{L_{n,1}^i} (l_{n,1}^i + L_{n,1}^i). \quad (12)$$

由于扫描双面反射镜的扫描，第 n 级单级光学成像放大器的输入可能存在偏转角度 α_n^i ，其产生光斑在透镜上的移动，因此为了保证通光，透镜的最小口径应当修正为 $\phi_{n,\min}^i$ 为

$$\varphi_{n,\min}^i = \frac{d_{n,1}^i}{L_{n,1}^i} (l_{n,1}^i + L_{n,1}^i) + 2 \tan \frac{\alpha_n^i}{2} l_{n,1}^i. \quad (13)$$

假定第 N 级单级光学成像放大器是第二光学成像放大系统的第一级，则：

$$\alpha_N^i = 2\theta, \quad (14)$$

$$\alpha_{N+s}^i = \frac{2\theta}{M_N^i M_{N+1}^i \dots M_{N+s-1}^i}. \quad (15)$$

因此，每个放大器的透镜口径必须远远大于上述定义的最小口径：

$$\varphi_n^i \gg \varphi_{n,\min}^i \text{ or } \varphi_{n,\min}^i. \quad (16)$$

第一傅立叶透镜 1.2 的口径为 φ_1 第一被测激光通信终端 1.1 的口径为 $\varphi_{r,1}$ ，第二傅立叶透镜 1.10 的口径为 φ_2 第二被测激光通信终端 1.11 的口径为 $\varphi_{r,2}$ ，为了尽量减少光学傅立叶变换的传递函数的影响应当满足如下条件：

$$\varphi_1 \gg \varphi_{r,1}, \quad (13)$$

$$\varphi_2 \gg \varphi_{r,2}. \quad (14)$$

下面通过实施例对本发明作进一步说明。

假设：激光通信链路是高轨卫星和低轨卫星之间，星间距离为 40000km，激光通信终端的口径为 $\phi 250\text{mm}$ ，主镜焦距为 1m，激光发散度为 $20\mu\text{rad}$ ，跟瞄精度为 $1\mu\text{rad}$ 。设定检测验证的扫描角度为 180mrad ($\sim 10^\circ$)。

考虑双向光路的对称结构安排：第一傅立叶透镜 1.2 和第二傅立叶透镜 1.10 的设计完全相同，口径相同 ($\varphi_1 = \varphi_2$)，焦距相同 ($f_1 = f_2$)；第一光学成像放大系统 1.4 和第三光学成像放大系统 1.12 均为单级成像放大器，其结构完全相同 ($M_1 = M_3$)；第二光学成像放大系统 1.7 和第四光学成像放大系统 1.14 均为双级成像放大器，其结构完全相同 ($M_2 = M_4$)。

设计傅立叶透镜的焦距 $f_1 = 10\text{m}$ ，设计 $M_1 = -20$ ，设计 $M_2 = +400$ （即 -20×-20 ），因此等效传输距离 $f_1 M_1 M_2 = 80\text{km}$ 。两个傅立叶透镜的口径设计为 $\varphi_1 = \varphi_2 = \phi 500\text{mm}$ ，远大于激光通信终端的口径，傅立叶透镜的衍射极限为 $4\mu\text{rad}$ 。

因而，第一级单级成像放大系统 1.1 的物面上的发散球面波直径为 $\phi 0.2\text{mm}$ ，第二级单级成像放大系统 1.7 的物面上的发散球面波直径为 $\phi 4\text{mm}$ ，第三级单级成像放大系统 1.12 的物面上的发散球面波直径为 $\phi 80\text{mm}$ ，

第一光学成像放大系统 1.1 为单级成像放大器，设计焦距为 50mm ，口径为 $\phi 40\text{mm}$ ，放大倍数为 20。第二级学成像放大系统 1.7 由两个单级成像放大器组成，前一个单级成像放大器，焦距为 50mm ，口径为 $\phi 40\text{mm}$ ，放大倍数为 20。后一个单级成像放大器，焦距为 500mm ，口径为 $\phi 250\text{mm}$ ，放大倍数为 20，其焦距的设计也满足补偿条件。所有的单级成像放大器均满足口径关系。

扫描双面反射镜 1.5 的偏转对于激光通信终端接收光斑的角度偏转率为 $5\mu\text{rad} \times (\Delta\theta / \text{mrad})$ ，激光通信终端的跟瞄精度相当于反射镜转动 0.2mrad 。

采用图 2 的结构进行远距离激光通信性能测试，下表给出了等效传播距离和小孔 2.1 直径的关系：

小孔直径	20mm	5mm	1mm	0.5mm
等效传播距离	500km	4000km	20000km	40000km

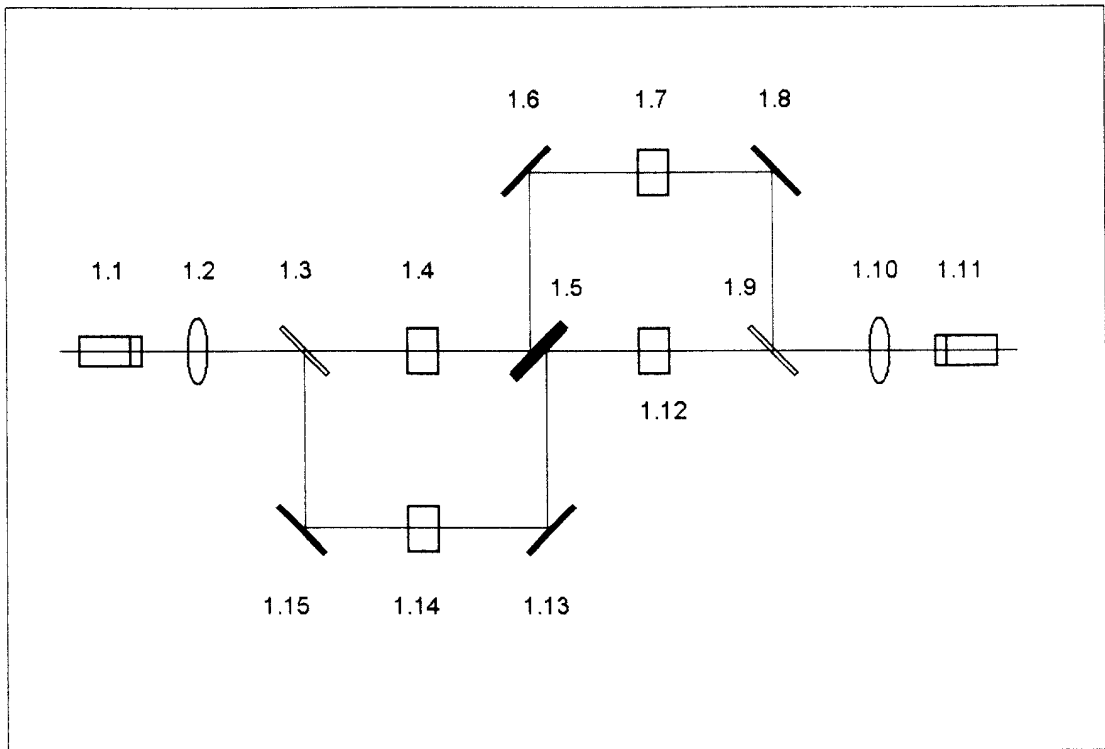


图 1

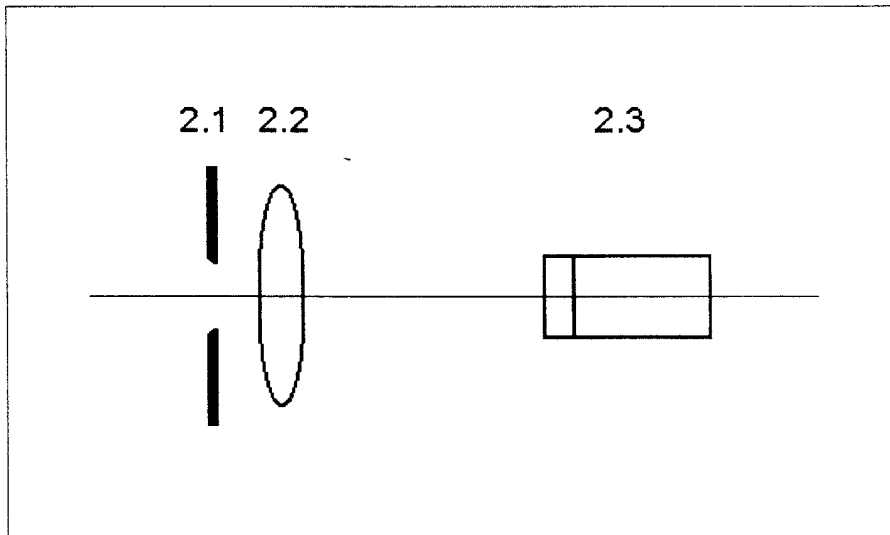


图 2