

实现同步轨道(GEO)高分辨力对地观测的技术途径(下)

于前洋,曲宏松

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要 :在地球静止同步轨道(GEO)上实现高分辨力对地观测,具有一系列独特优点,远为其它轨道所不及。然而,对于36 000 km的远程高分辨力可见波段观测,要求望远镜必须具备20 m以上口径的主镜。传统的空间相机,如果要有如此大的口径,其总质量将超过1 000 t,无法发射到GEO上。无支撑薄膜望远镜和大口径衍射望远镜,可以大幅度降低主镜质量面密度,从而降低整个相机系统的总质量,可算是一种极好的技术途径。分步发射与在轨装配,则提供了可供此类观测系统实施从地面转运到GEO的技术手段。基于变换成像原理的傅里叶望远镜,将高分辨力的取得,由增大接收口径转变为加大发射间隔,用大面积回波能量探测加上傅里叶分量重构,取代常见的目标图像直接探测,突破了远程高分辨力观测的致命瓶颈。近完美透镜为突破衍射极限提供了可能性,从而为超分辨力观测开拓出一片科学的新天地。负折射率材料(左手型材料)可制成完美透镜,而光子晶体是负折射率材料的热门选择之一,基于表面等离子激元(SPP)的光子器件则是其另一种选择。

关键词 :同步轨道,高分辨力对地观测,傅里叶望远镜,综述

中图分类号:TP722;V243 文献标识码:A

Realization of high-resolution visible earth observation on geostationary earth orbit

YU Qian-yang, QU Hong-song

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract : High-resolution visible earth observation on the Geostationary Earth Orbit(GEO) has a series of unique advantages over that in the other orbits. However, long range and high-resolution visible observation requests a large primary mirror more than 20 m in the diameter. The traditional Space Telescope(ST) with such a large primary mirror can not be launched to GEO, for its total mass is more than 1 000 t. An unsupported membrane ST and a large-diameter diffraction ST can significantly reduce mirror surface density and lower down the total mass of the ST, which offers an excellent technologic approach to earth observation. Moreover, both the launching by module and the assembly in an orbit provide the technological means to

transport these kinds of observation systems from ground to GEO. Fourier telescope based on the theory of transform imaging changes the acquirement for high-resolution from increasing the receiving diameter into increasing the illumination interval ,and from detecting the object image directly into receiving the echo energy and reconstructing Fourier components. It breaks through the fatal bottleneck of the long range and high-resolution observation. Recently , a near perfect lens has been developed to provide the possibility for break-through of diffraction limit , so that a new science field will be set up for super-resolution observation. The perfect lens makes of negative refractive index materials(left-handed materials) and the negative refractive index materials come from both of the photonic crystals and the photonic devices based on Surface Plasmon Polariton(SPP).

Key words : Geostationary Earth Orbit(GEO) ;high-resolution earth observation ;Fourier telescope ;review

5 分步发射与在轨装配

2004 年美国航空航天局/哥达德航天中心 (NASA/GSFC)提出了一种紫外可见近红外波段 30 m 大规模分片孔径空间观测站(TMST)的概念设计^[30] ,清晰地描述了分步发射与在轨装配技术在甚大口径空间望远镜领域的应用前景。

TMST 主镜由 占空比 73% ,14 环 916 个 $\phi 1\text{ m}$ 单元子镜构成 ,Airy 斑为 $0.005''$,见图 24。

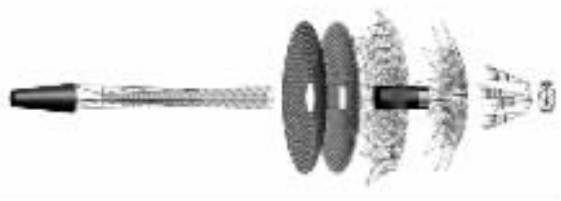


图 25 TMST 分布式结构

Fig. 25 Major assemblies of TMST

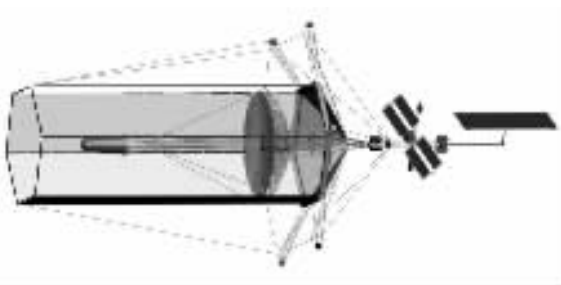


图 26 整套 TMST

Fig. 26 TMST observatory

发射后 ,在轨道上组装 ,如图 27 和 28 所示。

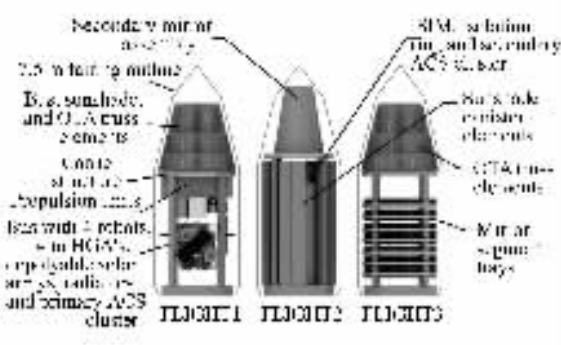


图 27 装在 3 个货运飞船内的 TMST

Fig. 27 Packaging of TMST into three heavy launch vehicles

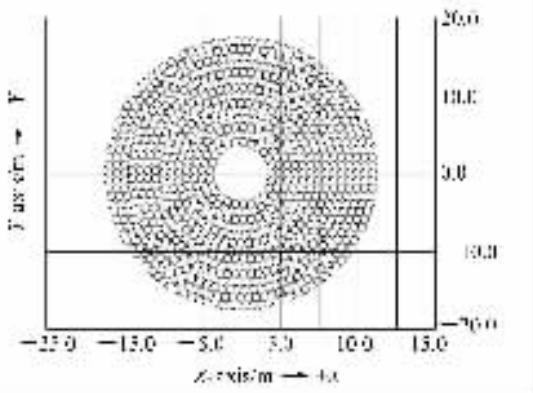


图 24 TMST 主镜

Fig. 24 Primary mirror segment of TMST

次镜为 $\phi 2.3\text{ m}$,与主镜间隔 64.3 m ,衍射极限成像 ,图像 Strehl 为 0.7 ,视场 $3'$ 。光学望远镜由 4 个组件构成 :次镜支撑、主镜、后护板、支撑桁架 ,如图 25 所示。

入轨后由机器人、航天员编组实施装配 ,最终构成的观测站如图 26 所示。

设计服务寿命为 100 a 的 TMST 的所有构件 ,可装在 3 个 $\phi 7.5\text{ m} \times 14\text{ m}$ 的货运飞船内 ,分 3 次

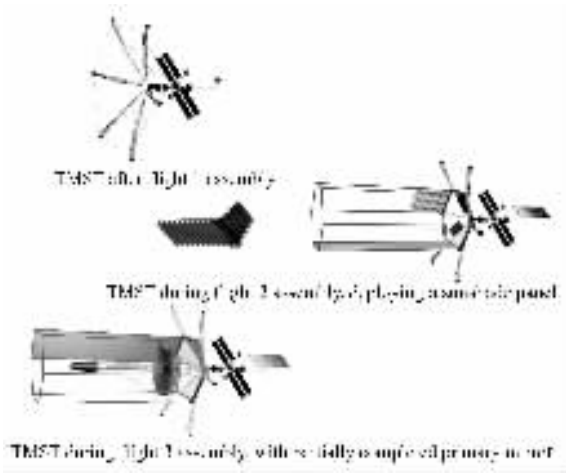


图 28 TMST 分步装配效果

Fig. 28 Step-by-step assembly of TMST

6 非常规成像

基于常规成像原理的光学设备,其成像清晰度首先取决于光学系统的口径,即符合图 2(见文一)所示的分辨力与口径的常规关系。采用自适应光学或子口径拼接技术,使设备进一步复杂化,并不能从根本上克服上述困难。

非常规高分辨力的获得,或许可用激光主动照明下的干涉成像,超远程接收能量信号,而不是图像信号,再靠傅里叶变换来获得目标图像。更奇妙,而又不失科学性的,则是借助左手性材料制作近完美透镜,以突破衍射极限,实现真正意义上的非常规高分辨力遥感。

6.1 激光主动照明下的干涉成像-傅里叶望远镜 FT

微波合成孔径雷达用合成孔径取代真实孔径,从本质上避开了波束角与发射口径倒数的相依关系,提高了雷达的分辨率,使微波段工作的雷达能得到分辨率足够的可视图像。“合成孔径”概念如果从微波向光波转移,则工作波长或相应的载波频率变化了 6 个数量级。由此而带来的技术困难,例如干涉条件的保证、样本数增大引起的计算量加大等,目前已不是无法解决^[40]。因此,光学合成孔径,即采用合成孔径代替真实孔径的光学设备,其有效口径达到 20 m 甚至更大,理论上并无困难,技术上也是可能的。

光学合成孔径的实质是将常规的“直接成像”代之以“变换成像”,即先获取类似干涉图的目标傅里叶空间频谱,然后用傅里叶变换重构目标可视图像。由于用到傅里叶变换,故也称其为傅里叶望远镜。

6.1.1 傅里叶望远镜工作原理

傅里叶望远镜工作原理见图 29。从地面发射阵列中各个分立地点有选择地向目标发射 3 束激光,在目标表面的相应光场相互干涉,并形成干涉条纹^[31],见图 30。在这 3 束激光的工作频率略

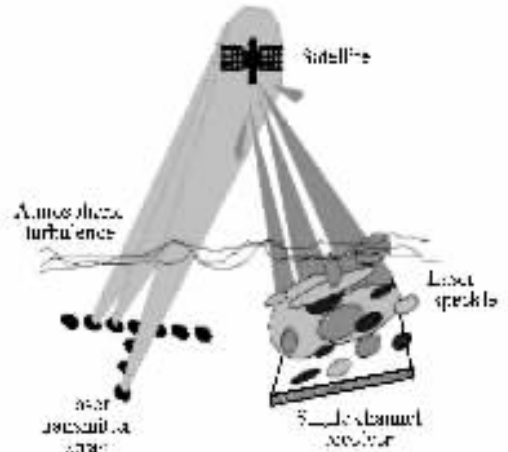


图 29 FT 产生的干涉图

Fig. 29 Interferogram from FT

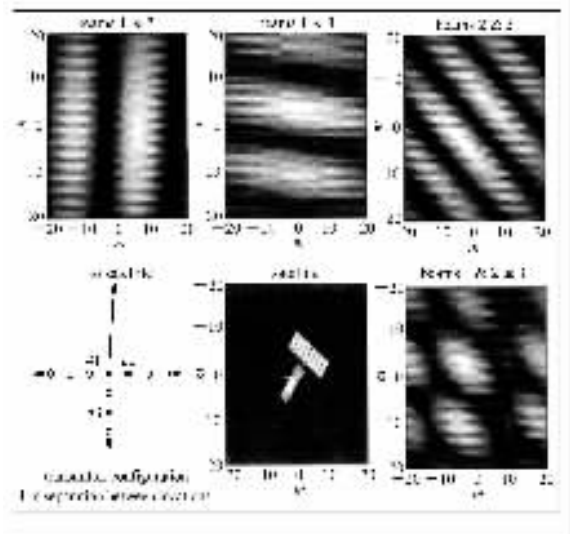


图 30 FT 原理

Fig. 30 Principle of FT

有偏移,使干涉条纹在目标表面移动。如此,产生“拍频”形式的时间调制激光,其回波中即含有目标反射率的傅里叶频谱分量。目标表面反射的激光回波,用大型太阳能汇聚镜阵列接收。这种大面积接收器,面形无相位要求,只要求能聚焦以汇聚能量,故有人称之为“光桶”。它使整套成像系统使用功率不很高的激光器照明,即可为每个傅里叶频谱分量提供足够高的信噪比。

在目标表面形成干涉条纹,本来只需要两束激光照射,增加第三束激光,是为了使用“相位闭合”算法,消除低频大气相位失真,保证所有条纹的相位相对固定,因此能精确恢复每一个分量的傅里叶相位。这样,每3个激光束为一组,可获得一个傅里叶频谱分量。在发射器阵列的不同位置,发射不同的激光三重组,即可得到其它的傅里叶频谱分量。得到足够多的分量后,利用傅里叶变换,即可重构目标图像。

6.1.2 同步轨道激光成像国家试验基地 (GLINT)及其系统设计

早在20多年前,美国空军实验室(AFRL)定向能武器部(DED)就开始进行地基空间目标观测的激光相干成像研究,期盼用激光主动照明的成像方式,能够对经过大气扰动的空间目标形成高分辨率的图像。这种激光成像系统的特殊性在于只需用低光学质量的能量接收器而不用图像接收器,对大气湍流的补偿,也无需自适应光学系统。最早讨论干涉成像的是 Aleksoff C C^[33],随后, Ustinov N D 提出了一种改进的成像方法^[34], Sica L 对傅里叶望远镜的信噪比和散斑噪声进行了分析^[35]。在对各种同步轨道目标地基成像技术进行深入研究后,AFRL高级光学与成像部(AFRL/DEB)的科学家和工程师们选择了傅里叶望远镜。总承包商Trex公司在新墨西哥州白沙靶场(WSMR)建造了GLINT,仅就分辨率而言,GLINT是当今最强大的地基成像系统,有效孔径可达100 m。其系统示意图见图31。

6.1.2.1 GLINT发射系统

GLINT发射系统包括激光器、声光调制器、激光束发射器和光学延迟器。

在原理验证阶段,激光器用Lawrence Livermore国家实验室研制的主动成像激光器。由

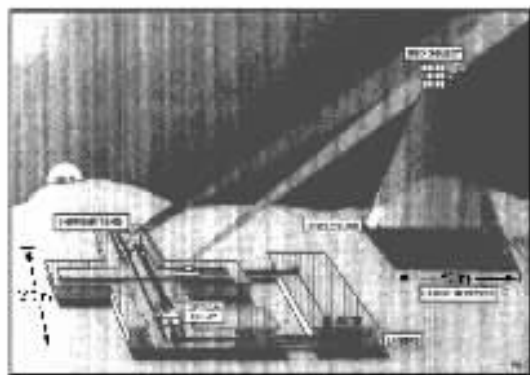


图31 GLINT系统示意图

Fig. 31 Schematic diagram of GLINT

Nd:YLF振荡器产生的光,被Nd玻璃板条放大器放大,得到波长1053 nm,脉冲能量120 J的脉冲激光。经倍频得到527 nm,脉冲能量40 J的脉冲激光。最终GLINT系统将升级为Textron公司研制的852 nm Cr:LiSAF激光器。声光调制器由射频信号调制,使三束激光频率稍微偏移。实验室验证时,拍频为50、100、150 kHz^[36]。

激光束发射器以 $\phi 400$ mm口径的无焦、离轴F/5 Cassegrain望远镜为基础,用方位/俯仰常平架上的瞄准平台选择/跟踪目标,见图32。跟踪回路利用目标反射的太阳光,接收器用Pixelvision公司的低噪声致冷CCD,跟踪精度1 μ rad,灵敏度15等星。跟踪回路用快速反射镜精瞄,用常平架粗瞄。在T形基线的不同臂可同时发射两束激光,同一臂上则只能发射一束,由回转镜切换。

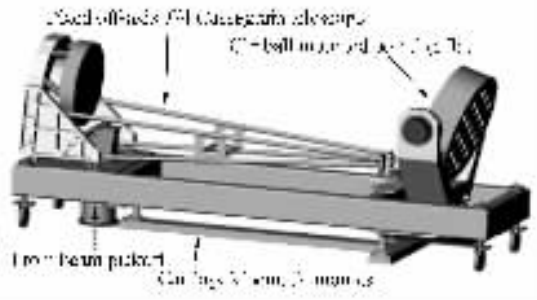


图32 激光发射器

Fig. 32 Laser transmitter

光学延迟器(见图33)为不同的输出光束提供适当的延迟,使其在目标表面产生干涉。延迟量取决于光束三重组的选择,最终系统的最大光

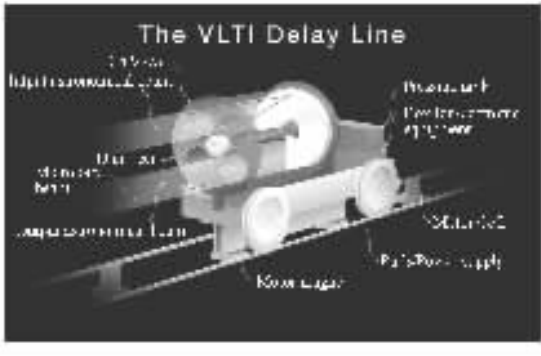
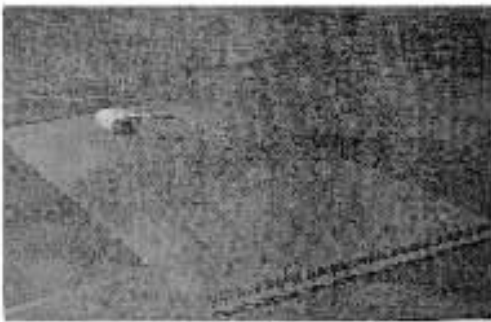


图 33 光学延迟器
Fig. 33 Optical delay line

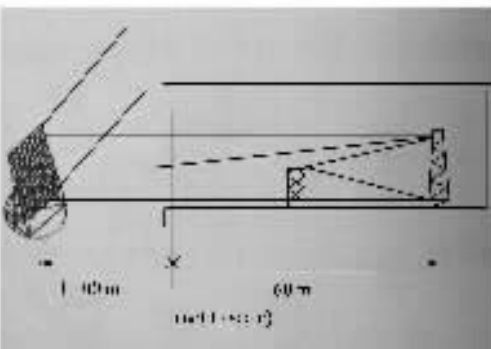
路延迟可能为 90 m。

6.1.2.2 GLINT 接收系统

GLINT 接收系统由太阳能定日镜、聚光镜、探测器和数据采集部件构成,见图 34。



(a) 接收系统布置
(a) Layout of receiving system



(b) 接收光路
(b) Optical path of receiving system

图 34 GLINT 接收系统
Fig. 34 Receiving system of GLINT

定日镜收集来自 GEO 目标的激光回波,汇聚到大聚光镜上,再由聚光镜汇集到探测器阵列。

用大飞机棚结构,将聚光镜和探测器阵列都放进室内,使其不受天气的影响,见图 35。初期, GLINT 采用面积为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的定日镜 40 个,反射的激光回波经大棚通光门进入到大聚光镜上,再聚焦到光电倍增管(PMT)。每个定日镜对应一个 PMT,其靶面前放置准直透镜以使回波垂直入射,放置光谱滤光片以抑制背景光。每个定日镜配备一个数据采集通道,由高速 A/D 采集的数据需经延迟以适应目标与定日镜间的传输延迟。

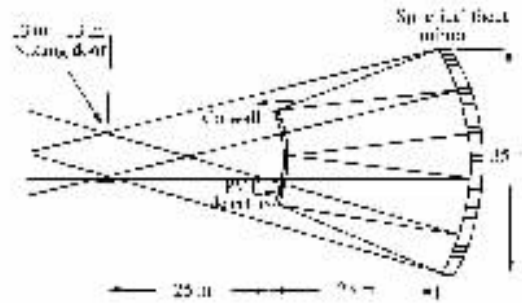


图 35 室内聚光镜及探测器阵列
Fig. 35 Mirror and detector

6.1.2.3 GLINT 工作过程

工作日傍晚,系统自检,天黑后采集数据。在选定的三重组位置,发射器跟踪回路跟踪预定的 GEO 目标后发射激光。互有频移的各光束在目标表面产生干涉,形成扫描的条纹。定日镜接收时间调制的目标回波,并发送到各自的探测器靶面上。计算机接收到后,解调 3 路拍频信号,给出与选定的三重组对应的 3 个傅里叶分量。通过相位闭合三重积,消除大气柱塞误差。选择下一个三重组位置,重复上述过程。采集完足够多的傅里叶分量后,通过傅里叶逆变换,重构目标图像。

6.1.2.4 GLINT 最新进展

2005 年, Trex 公司的研究人员,在 SPIE 的

“非常规成像”专集 (Vol. 5896)上 ,发表了两篇文章^[36,37] ,公布了他们所做的傅里叶望远镜实验室和现场实验结果。

E. L. Cuellar 等人介绍的扩展实验 ,是为解决 GLINT 系统在实际工作时遇到的光子噪声、散斑噪声和大气抖动的影响 ,也研究了“相位闭合”算法中三重积存在的噪声偏置项消除后 ,对图像质量的改善。实验中使用的参数均与 GLINT 系统的设计值对应。

图 36 表明 ,经过 1.5 km 大气的水平传输前 (a) / 后 (b) 重构的图像 ,SRN = 82 ,Image Strehl = 0.97。比较 (a)、(b) 两图可见 ,经过 1.5 km 大气的水平传输后 ,重构图像的质量与本地图像比较 ,无明显区别。这说明大气扰动对图像重构无显著影响。

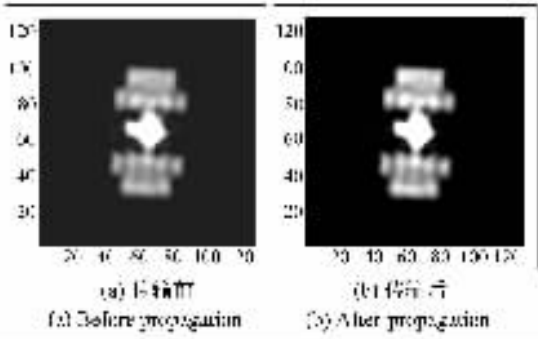


图 36 1.5 km 大气水平传输前、后的重构图像
Fig. 36 Reconstructed image before and after 1.5 m atmospheric level propagation

表 2 说明 GLINT 的现有设计和预期的改

表 2 GLINT 现有设计和将来的扩展参数

Tab.2 Present and future parameters of GLINT

GLINT	现有参数	改进后的参数
Transmitter aperture	40 cm	40 cm
Spacing	< 1.2 m	< 1.2 m
Span	60 m × 42 m	100 m × 70 m
Resolution@ GEO	72 cm	34 cm
Number of transmitters	14 + 7	32 + 16
Triplet collection time	100 s	20 s
Observation time	8 h	< 6 h
Laser	45 J 0.527 μm , 90 J 0.85 μm , 3 Hz	5 Hz
Field-of-view	15 m	25 m
Receiver area	4 000 m ²	4 000 m ²

进^[1]。当每个臂上的发射点个数为 16 ,最大发射间隔为 100 m ,发射口径为 400 mm 时 ,可在同步轨道上获得 0.34 m (相当于 9 mrad) 的分辨率。

GLINT 项目的设计方案测量与重构过程耗时过长 ,不适于对快速运动目标的成像。因此 ,继 GLINT 项目之后 ,AFRL 又于近期启动了卫星主动成像国家实验基地 (SAINT) 项目 ,研究利用傅里叶望远镜技术实现对低轨目标的高分辨率成像探测。针对快速运动的目标 ,SAINT 项目扩展了 GLINT 项目的设计方案 ,采用多束激光同时照明 ,可在数秒内实现快速成象。根据 SPIE 2007 年发表的文献^[39] ,SAINT 项目目前仍处于概念设计阶段。

SAINT 系统的外观和发射孔径的分布如图 37 所示 :发射器由 21 个 1 m 口径的望远镜构成 ,见图 38。每个包括 7 个 10 cm 口径的发射孔

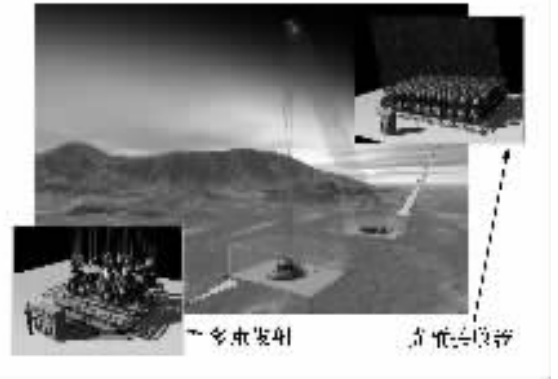


图 37 SAINT FT 成像系统概念图
Fig. 37 Conceptual drawing of SAINT FI image system

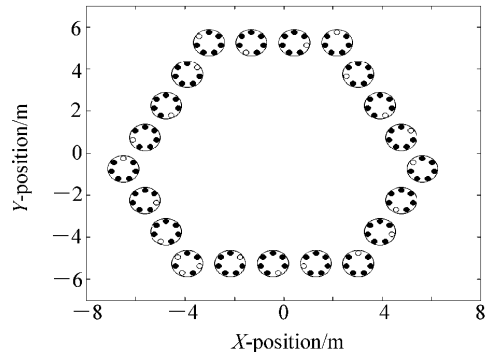


图 38 21 个扩束孔径中 ,每 7 个束位置只激活一个超孔径
Fig. 38 Normal transmitter layout showing 21 apertures

径,按照圆形基线配置排列。连续式激光器的输出光束通过光纤耦合到各个发射孔径,光束波长 $1.08 \mu\text{m}$,发射功率 100 W。发射器同时发射 23 束激光,测量 253 个傅里叶分量,经过 50 次不同的基线配置,最多可以测量 12 650 个傅里叶分量,测量过程仅仅耗时数秒。接收器由低成本的小口径望远镜阵列构成,接收面积为 100 m^2 。

6.1.3 傅里叶望远镜展望

傅里叶望远镜具有一系列明显特点:

- 用能量接收代替图像接收,可用高灵敏度 PMT 取代 CCD、CMOS、MCP。
- 空间分布的图像信号,变换为时间调制的能量信号,降低了接收器的面形要求。
- “合成孔径”技术由微波向光波扩展,波长从米波缩短到微米,短了 6 个数量级,带来的计算量增长,已被 IT 技术克服
- 抑制大气扰动影响的相位闭合算法,已经过多年理论、仿真和实验研究,并由现场试验所证明。
- 地基 FT 向空基 FT 转移,并无原理困难。

6.2 完美透镜与超分辨力

含完美透镜的望远镜或显微镜,可突破衍射极限。负折射率材料(左手型材料)可制成完美透镜。光子晶体是负折射率材料的热门选择之一,基于表面等离子激元(SPP)的光子器件是其另一种选择。

2004 年,洛斯罗普-格鲁曼公司 Jack May 等人在 SPIE 的“创新技术与新概念”会议上,发表的用负折射率材料改善望远镜分辨力的文章^[41]明确提出,使用负折射率材料(NRI),可以设计出分辨力明显高于衍射极限的抛物面反射望远镜。其核心是“完美 NRI 透镜”,见图 39。由人工合成

的 NRI 平板,当其介质损耗为零时,其分辨力达到最大,且远超过衍射极限,点源经过它,可得到理想的零直径焦点,或产生零宽度点扩散函数。

实际上,任何 NRI 材料都会有损耗,但这种损耗可用渐逝波(evanescent waves)的有源放大所补偿,这种含 NRI 透镜的反射望远镜见图 40。有源 NRI 透镜的结构如图 41。

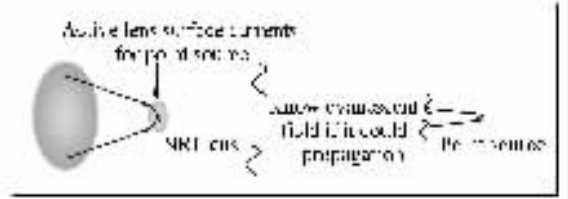


图 40 含有源 NRI 透镜的抛物面反射镜
Fig. 40 Parabolic reflector with active NRI lens

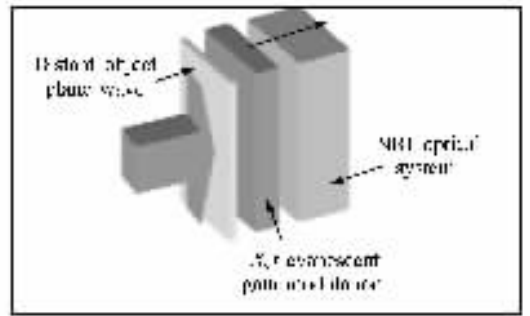


图 41 有源 NRI 透镜的结构
Fig. 41 Active NRI lens structure

文章明确指出,使用 NRI 透镜,可让空间望远镜获得最高的、远超过衍射极限的分辨力。

7 结束语

高分辨力对地观测要求 20 m 以上的大口径,其常规相机已很难实现。薄膜望远镜和衍射望远镜是两种很好的选择,但要付诸实现必须克服一系列技术难关。傅里叶望远镜可克服大口径的技术瓶颈。基于近完美透镜的超分辨力观测,提出了另一条,或许是更诱人的技术途径。

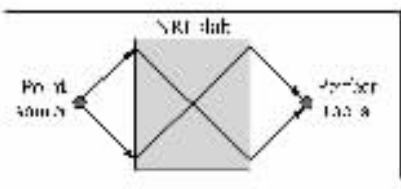


图 39 完美 NRI 透镜
Fig. 39 Perfect NRI lens

参考文献：

- [1] OLSEN R C. *Remote Sensing from Air and Space* [M]. Washington :SPIE Press 2006.
- [2] KOCZOR R J. Technology needs for geostationary remote sensors[J]. *SPIE* ,1993 ,1952 :134-140.
- [3] JEFFERY J P ,PERRY T. Imaging spectrometers for future earth observing systems[J]. *SPIE* ,1997 ,3117 :36-48.
- [4] RONALD J K. NASA's Geostationary Earth Observatory and its optical instruments[J]. *SPIE* ,1991 ,1527 :98-109.
- [5] National Image Interpretability Rating Scales[Z]. www.fas.org/irp/imint/niirs.htm ,January 16 ,1998.
- [6] 张育林 ,吴建军. 航天器 [M]. 北京 :国防工业出版社 2006.
ZHANG Y L ,WU J J. *Spacecraft* [M]. Beijing :National Defence Industry Press 2006.(in Chinese)
- [7] 郝晓宁 ,王威. 近地航天器轨道基础 [M]. 北京 :国防科技大学出版社 2003.
XI X N ,WANG W. *Fundamentals of Near-earth Spacecraft Orbits* [M]. Beijing :National University of Defense Technology Press 2003.(in Chinese)
- [8] 徐福祥. 卫星工程概论(上) [M]. 北京 :中国宇航出版社 2003.
XU F X. *Satellite Engineering* [M]. Beijing :China Astronautic Publishing House 2003.(in Chinese)
- [9] CHOBOTOV V A. *Orbital Mechanics* [M]. Reston :American Institute of Aeronautics and Astronautics ,Inc. 2002.
- [10] RANDY A. Kimble , Status and performance of HST wide field camera 3[J]. *SPIE* 2004 5487 :266-280.
- [11] BEKEY I. Very large yet extremely lightweight space imaging system[J]. *SPIE* 2002 4849 :17-27.
- [12] STAMPER B. Stretched membrane with electrostatic curvature(SMEC) mirrors for extremely large space telescopes[J]. *SPIE* 2001 4451 :105-113.
- [13] ANGEL R. Stretched Membrane with Electrostatic Curvature(SMEC) :A new technology for ultra-lightweight space telescopes[J]. *SPIE* 2000 4013 :699-705.
- [14] PATRIC B G ,MOORE J D. Manufacturing and evaluation of membrane optical elements for ultra-light optics[J]. *SPIE* , 2001 4451 :96-104.
- [15] DIMAKOV S A. Membrane primary mirror for telescope with real-time holography corrector[J]. *SPIE* 2000 3951 :150-157.
- [16] GEOFF P A ,RANDALL J K ,ARTHUR L P *et al.* . Large-aperture holographically corrected membrane telescope[J]. *Opt. Eng.* 2002 41(7) :1603-1607.
- [17] MOORE J D ,PATRICK B ,GIEROW P A *et al.* . Design , test , and evaluation of an electrostatically figured membrane mirror[J]. *SPIE* 2004 5166 :188-196.
- [18] YANG E H ,WIBERG D V ,DEKANY R G. Design and fabrication of electrostatic actuators with corrugated membranes for MEMS deformable mirror in space[J]. *SPIE* 2000 4091 :83-89.
- [19] ROTGE J R ,MARKER D K ,CARRERAS R A *et al.* . Large optically flat membrane mirrors[J]. *SPIE* ,1999 3760 : 207-212.
- [20] ROTGE J R ,DASS S C ,MARKER D K *et al.* . Progress toward large-aperture membrane mirrors[J]. *SPIE* 2000 4091 : 74-82.
- [21] DAYDON D C ,GONGLEWSKI J D ,BROWNE S L *et al.* . Air force research laboratory MEMS and LCM adaptive optics testbed[J]. *SPIE* 2002 4825 :24-33.
- [22] DAYDON D C ,GONGLEWSKI J D ,RESTAINO S R *et al.* . MEMS adaptive optics for high resolution imaging of low earth orbit satellites[J]. *SPIE* 2004 5490 :1514-1525.
- [23] CHODIELLA S ,MOORE J D ,PATRICK B G *et al.* . Design , fabrication , and validation of an ultra-lightweight membrane mirror[J]. *SPIE* 2005 5894 :589416/1-9.
- [24] MOORE J D ,PATRICK B G ,CHODIMELLA S *et al.* . Design and testing of a one-meter membrane with active boundary control[J]. *SPIE* 2005 5899 :58990Z/1-7.
- [25] DAYTON D C ,MANSELL J ,GONGLEWSKI J D *et al.* . Characterization and closed-loop demonstration novel electrostatic membrane mirror using COTS membranes[J]. *SPIE* 2007 6711 :671108/1-9.

- [26] HYDE R A. Eyeglass. 1. very large aperture diffractive telescopes[J]. *Appl. Optics* ,1999 ,38(19) #198-4212.
- [27] HYDE R A ,DIXIT S N ,WEISBERG A H *et al.* . Eyeglass 2 a very large aperture diffractive space telescope[J]. *SPIE* , 2002 ,#849 28-39.
- [28] EARLY J T ,HYDE R ,BARON R L *et al.* . Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens[J]. *SPIE* , 2004 ,5166 148-156.
- [29] HAWARDEN T G ,CLIFFE M C ,HENRY D M *et al.* . Design aspects of a 30 m giant infrared and submillimetre observatory in space(“ GISMO ”):A new “ flavour ” for SAFIR[J]. *SPIE* 2004 ,5487 1054-1065.
- [30] OEGERLE W R ,PURVES L R ,BUDINOFF J G *et al.* . Concept for a large scalable space telescope in-space assembly [J]. *SPIE* 2006 ,6265 62652C/1-12.
- [31] CHANDLER S M ,LUKESH G W ,LONG S M *et al.* . The impact of dynamic solar panels on long exposure Fourier telescope[J]. *SPIE* 2003 ,#884 130-134.
- [32] SVERDRUP L H ,BRUNS Jr D G ,BRINKLEY T J *et al.* . Measurements of geosynchronous – satellite spectral brightness due to solar illumination[J]. *SPIE* 2001 ,#490 200-211.
- [33] ALEKSOFF C C. Interferometric two-dimensional imaging of rotating objects[J]. *Opt. Lett.*[J] ,1997 ,1 54-55.
- [34] USTINOV N D. Active aperture synthesis when observing objects through distorting media[J]. *Sov. J. Quantum Electron.* ,1987 ,17 108-110.
- [35] SICA L. Image speckle contrast reduction resulting from integrative synthetic aperture imaging[J]. *Appl. Opt.* ,1992 , 31 120-125.
- [36] CUELLAR E L ,SAPP J ,COOPER J *et al.* . Laboratory and field experimental demonstration of a Fourier telescope imaging system[J]. *SPIE* 2005 ,5896 58960D/1-13.
- [37] MATHIS J ,STAPP J ,CUELLAR E L *et al.* . Field experiment performance of the receiver elements for a Fourier telescope imaging system[J]. *SPIE* 2005 ,5896 58960F/1-9.
- [38] FORD S D ,VOELZ D G ,GAMIZ V L *et al.* . Geo Light Imaging National Testbed(GLINT) past ,present ,and future[J]. *SPIE* ,1999 ,3815 2-10.
- [39] STAPP J ,SPIVEY B ,CHEN L *et al.* . Simulation of a Fourier telescope imaging system for objects in low earth orbit[J]. *SPIE* 2006 ,6307 630701/1-11.
- [40] LEHUREAU J-C ,COLINREAU J. Optical synthetic aperture imagery[J]. *SPIE* 2005 ,5816 54-65.
- [41] MAY J ,JENNETT T. Telescope resolution using negative refractive index material[J]. *SPIE* 2004 ,5166 220-227.
- [42] PENDARY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Lett.* 2000 ,85(18) 3966-3969.
- [43] FANG N ,LEE H ,SUN C ,ZHANG X *et al.* . Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science* , 2005 ,308 534-537.
- [44] BARRETT E ,TYLEE D W ,PAYTON P M *et al.* . New approaches to image super-resolution beyond the diffraction limit [J]. *SPIE* 2007 ,6712 6712POD/1-14.
- [45] 顾本源. 表面等离子体亚波长光学原理和新型效应[J]. *物理* 2007 ,36(4) 280-287.
GU B Y. Surface plasmon sub-wavelength optics :principles and novel effects[J]. *Physics* 2007 ,36(4) 280-287.(in Chinese)
- [46] 马中团 ,鲁拥华 ,王沛等. 左手性材料研究进展[J]. *物理* 2004 ,33(7) 497-502.
MA ZH T ,LU Y H ,WANG P *et al.* . Advance in research on left-handed materials[J]. *Physics* 2004 ,33(7) 497-502. (in Chinese)
- [47] 徐耿钊 ,张伟华 ,朱星. 奇妙的左手材料[J]. *物理* 2004 ,33(11) 801-808.
XU G ZH ,ZHANG W H ,ZHU X. Magic left-handed materials[J]. *Physics* 2004 ,33(11) 801-808.(in Chinese)

作者简介 :于前洋 (1941—) ,男 ,湖北洪湖人 ,研究员 ,博士生导师 ,主要研究领域为光学工程、图像处理与跟踪、电气控制及微弱信号检测与处理等。E-mail :yuqy@ciomp.ac.cn