

信号与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响

刘宏展^{1,2} 纪越峰² 许楠³ 刘立人³

¹ 北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876

² 华南师范大学光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006

³ 中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室, 上海 201800

摘要 星间相干光通信系统中, 信号光与本振光的不同分布将影响外差混频效率。在假设信号光与本振光偏振一致、相位匹配、几何中心重合的前提下, 详细推导了信号光振幅为平面波(Uniform)、高斯(Gauss)分布, 本振光为艾里斑(Airy)、Uniform 及 Gauss 分布时的 6 种外差混频效率关系式, 其中 4 种得到了精确的解析式。在此基础上, 通过数值仿真, 全面对比分析了各种组合的外差混频性能, 结果发现, Airy+Airy 和 Gauss+Gauss 具有最佳外差混频性能, 理论上可以达到 100% 外差混频效率; Uniform+Uniform 的最大外差混频效率为 72%, Gauss+Uniform 最大外差混频效率是 82%, 它们具有相似性; 而 Airy+Gauss 组合是系统中常用的分布模型, 其外差混频效率同时受探测器半径及 Gauss 束腰的制约。这将为设计星间相干通信系统提供必要的理论依据。

关键词 光通信; 星间相干光通信; 相干接收; 外差效率

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1006001

Effect of Amplitude Profile Difference of Signal and Local Oscillator Wave on Heterodyne Efficiency in the Inter-Satellite Coherent Optical Communication System

Liu Hongzhan^{1,2} Ji Yuefeng² Xu Nan³ Liu Liren³

¹ Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

² Key Laboratory of Photonic Information Technology Guangdong Province, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

³ Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The difference of amplitude profile between signal and local oscillator wave will affect the heterodyne efficiency of the inter-satellite coherent optical communication system. Based on the assumption that signal and local oscillator wave have the same polarization and geometric center, and that they are phase matching, the detailed derivation of heterodyne efficiency is given when the signal has uniform or Gauss distributions, and the local oscillator wave has Airy, uniform or Gaussian distributions. The accurate analysis formulas of heterodyne efficiency are presented for some different signal and local oscillator wave distributions. The performance of heterodyne photomixing for different signal and local oscillator wave distributions are completely given by using the numerical calculations and comparative analysis method. The results indicate that the Airy+Airy and Gauss+Gauss cases have the optimal heterodyne performance, the heterodyne efficiency can reach 100%; the values of heterodyne efficiency

收稿日期: 2011-04-02; 收到修改稿日期: 2011-05-11

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z256, 2009AA01Z253, 2009AA01A345)、中国博士后基金(20100470257)和中国科学院空间激光通信及检验技术重点开放实验室(KFKT2009-03)资助课题。

作者简介: 刘宏展(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事空间光通信、光学精密检测及传感等方面的研究。

E-mail: lhzhan@yahoo.com.cn

for the Airy+Uniform and Gauss+Uniform cases are 72% and 82%, respectively, which are similar. The Airy+Gauss case is restricted by the detector radius and the Gaussian beam's waist radius at the same time, and it is usually used in the actual system. These provide some theoretic principles for designing the inter-satellite coherent optical communication system.

Key words optical communications; inter-satellite coherent optical communication; coherent receiver; heterodyne efficiency

OCIS codes 060.4510; 060.1660; 060.2840; 050.2065

1 引 言

与传统的射频通信相比,星间光通信在传输带宽、传输速率、抗干扰能力和保密性等方面有不可比拟的优越性,是星间通信的重要发展方向^[1,2]。按照通信体制划分,星间光通信分为强度调制/直接检测方式以及相干光通信方式,二者相比较,相干光通信可以达到近量子极限的接收灵敏度,近年来它已成为星间激光通信领域的研究热点^[3~6]。在德国的 Terra-SAR-X 卫星与相隔 5000 km 的美国 NFIRE 卫星间已实现了相干光通信,其通信速率达到了 5.65 Gb/s^[7],这证明了远距离的星间相干光通信是完全可行的。

除要求本振光有较高功率外,星间相干光通信高灵敏度接收得以实现的前提是信号光与本振光的高效混频。目前,信号光与本振光的相干性匹配是制约高效混频的主因。这里的相干性匹配是指发生混频的信号光与本振光在偏振、相位以及振幅方面的匹配。采用“布儒斯特波片+ $\lambda/4$ 波片+ $\lambda/2$ 波片”等光学组件,较容易就能实现信号光与本振光偏振态匹配,所以研究者更多地关注相位匹配与振幅匹配。Chen 等^[8,9]发现跟瞄误差导致信号光与本振光的振幅失配和相位失配,使混频效率降低,并指出通过调整信号光的方位角及俯仰角可改善混频效率;王朝晖等^[10]分析了卫星振动对星间相干光通信混频效率的影响,发现混频效率对振动引起的接收天线瞄准角误差最敏感;向劲松等^[11]的研究表明接收天线的倾斜、离焦、球差、彗差和像散等像差将导致混频效率的严重降低。综上所述,他们的研究主要集中于振动、跟瞄误差和像差等所造成的相位失配对混频效率的影响,而要实现高灵敏度的接收,振幅匹配的作用是不容忽视的,必须进行深入的探讨。基于此,本文将详细讨论信号光与本振光振幅的不同分布对混频效率的影响。以外差混频为例,在理论分析光混频效率的基础上,按照星间相干光通信接收系统实际接收的信号光分布形式,分成平面波(Uniform)与高斯光(Gauss)两大类,并把本振光分成艾里斑(Airy)、Uniform 和 Gauss 三种形式,详细推导出相应的外差

混频效率表达式。以此为依据,通过数值仿真,全面对比分析不同组合的混频性能,找出最佳的组合,为设计星间相干接收系统提供理论依据。

2 光外差混频效率

在星间相干光通信系统中,信号光经过接收天线及相关变换透镜,聚焦到探测器表面,与本振光进行光学混频,并产生中频信号电流。光外差混频效率表示在相干探测中两光场实际混频得到的中频信号功率与理想状态下两光场混频得到的中频信号功率之比,而这里的理想状态是指两光场振幅、相位分布相同以及光场的几何中心完全重合。假设探测器具有圆形对称分布,则外差混频效率为^[10]

$$\eta = \frac{\left| \int_0^{2\pi r_0} \int_0^{2\pi r_0} U_s(r, \varphi) U_{lo}(r, \varphi) \exp[i\Delta\psi(r, \varphi)] r dr d\varphi \right|^2}{\int_0^{2\pi r_0} \int_0^{2\pi r_0} [U_{lo}(r, \varphi)]^2 r dr d\varphi \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{2\pi\infty} [U_s(r, \varphi)]^2 r dr d\varphi} \quad (1)$$

式中 r_0 为探测器的半径, $U_s(r, \varphi)$ 为探测器表面信号光场振幅分布, $U_{lo}(r, \varphi)$ 为探测器表面本振光场振幅分布, $\Delta\psi(r, \varphi)$ 为信号光与本振光之间的相位差。从(1)式可见,当存在相位差,即存在相位失配时将导致混频效率下降,本文假设此项的取值为零,即认为相位是完全匹配的;同样当信号光与本振光场振幅具有不同分布形式时也将影响混频效率,这是本文的讨论重点。不考虑相位的影响,并令信号光与本振光几何中心重合,则(1)式可简化为

$$\eta = \frac{\left| \int_0^{r_0} U_s(r) U_{lo}(r) r dr \right|^2}{\int_0^{r_0} [U_{lo}(r)]^2 r dr \int_0^{\infty} [U_s(r)]^2 r dr} \quad (2)$$

3 不同分布的信号光和本振光的混频效率

星间相干光通信系统接收到的信号光通常是

Gauss; 考虑到信号光到达接收端后, 进入接收天线的光斑只是实际光斑的很小部分, 所以接收到的信号光也常被近似为 Uniform。而本振光根据需要可以是 Airy、Uniform 或者 Gauss。基于此, 将分成两大类进行讨论: 1) 信号光为 Uniform, 2) 信号光为 Gauss。并假设如下: Gauss 振幅为 $\exp(-r^2/\omega_0^2)$, 其中 ω_0 为其束腰半径; Airy 为 $2J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda}\right)\left/\left(\frac{\pi r}{F\lambda}\right)\right.$, 其中 J_1 表示第一类贝塞尔函数, F 是接收光学系统的 F 数, 波长为 λ ; 且 Uniform 的振幅为单位量 1。把这些关系式代入(2)式, 便可求得信号光与本振光在不同分布时的外差混频效率。

3.1 Uniform 信号光、不同本振光的混频效率

Uniform 信号光经透镜衍射后, 聚焦到探测器表面时光场振幅分布变成了 Airy, 即

$$U_s(r) = 2J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda}\right)\left/\left(\frac{\pi r}{F\lambda}\right)\right.,$$

而实际的本振光可能是 Airy、Uniform 和 Gauss, 则对应的本振光可以分别表示为

$$U_{lo}(r) = 2J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda}\right)\left/\left(\frac{\pi r}{F\lambda}\right)\right., \quad U_{lo}(r) = 1,$$

$$U_{lo}(r) = \exp(-r^2/\omega_0^2).$$

相应的外差混频效率可以用(2)式求取, 分别用 $\eta_{A-A}, \eta_{A-U}, \eta_{A-G}$ 表示。

当本振光为 Airy 时,

$$\eta_{A-A} = \left| \int_0^{r_0} [J_1(X)/X]^2 r dr \right|^2 / \left\{ \int_0^{r_0} [J_1(X)/X]^2 r dr \int_0^{\infty} [J_1(X)/X]^2 r dr \right\} = \int_0^{r_0} [J_1(X)/X]^2 r dr / \int_0^{\infty} [J_1(X)/X]^2 r dr = 1 - J_0^2(X_0) - J_1^2(X_0), \quad (3)$$

式中 $X = \frac{\pi r}{F\lambda}$, $X_0 = \frac{\pi r_0}{F\lambda}$, 令 X_0 为探测器的等效半径, 在积分过程中运用了 $\int_0^{X_0} \frac{J_1^2(x)}{x} dx = 0.5[1 - J_0^2(X_0) - J_1^2(X_0)]$ 和 $\int_0^{\infty} \frac{J_1^2(x)}{x} dx = 0.5$ 这两个关系式。

当本振光为 Uniform 时,

$$\eta_{A-U} = \left| \int_0^{r_0} [J_1(X)/X] r dr \right|^2 / \left\{ \int_0^{r_0} r dr \int_0^{\infty} [J_1(X)/X]^2 r dr \right\} = \left| \left(\frac{F\lambda}{\pi}\right)^2 \int_0^{X_0} \frac{J_1(X)}{X} X dX \right|^2 / \left\{ \left(\frac{F\lambda}{\pi}\right)^2 \int_0^{X_0} X dX \left(\frac{F\lambda}{\pi}\right)^2 \int_0^{\infty} \left[\frac{J_1(X)}{X}\right]^2 X dX \right\} = \left| \int_0^{X_0} J_1(X) dX \right|^2 / \left(\frac{1}{2} X_0^2 \cdot \frac{1}{2} \right) = 4[1 - J_0(X_0)]^2 / X_0^2, \quad (4)$$

在积分过程中运用了 $\int_0^a J_1(x) dx = 1 - J_0(a)$ 。

当本振光为 Gauss 时,

$$\eta_{A-G} = \left| \int_0^{r_0} [J_1(X)/X] \exp(-Q^2) r dr \right|^2 / \left\{ \int_0^{r_0} [\exp(-Q^2)]^2 r dr \int_0^{\infty} [J_1(X)/X]^2 r dr \right\} = \left(\frac{F\lambda}{\pi}\right)^2 \left| \int_0^{r_0} J_1(X) \exp(-Q^2) dr \right|^2 / \left[\omega_0^2 \int_0^{Q_0} \exp(-2Q^2) Q dQ \left(\frac{F\lambda}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \right] = \frac{8}{\omega_0^2} \left| \int_0^{r_0} J_1(X) \exp(-Q^2) dr \right|^2 / [1 - \exp(-2Q_0^2)], \quad (5)$$

式中 $Q = r/\omega_0$, $Q_0 = r_0/\omega_0$ 。此处采用的外差效率公式与文献[11]在积分域上有差异, 故得到的外差效率在表达形式上与文献[11]中的(5)式有所不同。

3.2 Gauss 信号光、不同本振光的混频效率

假设信号光 Gauss 以束腰参数 ω_{before} 从接收天线(这里假设为一凸透镜)的前焦点处入射,则在其后焦点处的探测器表面依然是 Gauss 分布,且束腰满足 $\omega_{\text{after}} = \frac{\lambda f}{\omega_{\text{before}}}$ 的变换关系。在不考虑相位的情况下,探测器探测到的信号 Gauss 光振幅可以表示为

$$\frac{E_0}{\omega(z')} \exp[-r^2/\omega^2(z')],$$

式中 $\omega(z') = \omega_{\text{after}} \sqrt{1 + (z'\lambda/\pi\omega_{\text{after}}^2)^2}$ 为 z' 点的光斑尺寸, $E_0/\omega(z')$ 为光束沿光轴不同点的电矢量振幅。本文中,探测器在后焦点,即 $z' = f$,令 $\omega(z') = \omega(f) = \omega_0$ 。计算外差效率时, $E_0/\omega(z')$ 在分子分母中同时出现,可以约分,为简单起见,信号光可用 $U_s(r) = \exp(-r^2/\omega_0^2)$ 的形式表示。当本振光为 Airy、Uniform 和 Gauss 时,对应的外差混频效率为 η_{G-A} 、 η_{G-U} 、 η_{G-G} 。仿照 3.1 节的步骤,得到外差混频效率如下:

$$\begin{aligned} \eta_{G-A} &= \left| \int_0^{r_0} [J_1(X)/X] \exp(-Q^2) r dr \right|^2 / \left\{ \int_0^{r_0} [J_1(X)/X]^2 r dr \int_0^\infty [\exp(-Q^2)]^2 r dr \right\} = \\ &= \left| \int_0^{r_0} [J_1(X) / \left(\frac{\pi}{F\lambda}\right)] \exp(-Q^2) dr \right|^2 / \left[\frac{\omega_0^2}{4} \int_0^{r_0} [J_1(X)/X]^2 r dr \right] = \\ &= \frac{8}{\omega_0^2} \left| \int_0^{r_0} J_1(X) \exp(-Q^2) dr \right|^2 / [1 - J_0^2(X_0) - J_1^2(X_0)], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\eta_{G-U} = \left| \int_0^{r_0} \exp(-Q^2) r dr \right|^2 / \left\{ \int_0^{r_0} r dr \int_0^\infty [\exp(-Q^2)]^2 r dr \right\} = 2 |1 - \exp(-Q_0^2)|^2 / Q_0^2, \quad (7)$$

$$\eta_{G-G} = \left| \int_0^{r_0} \exp(-2Q^2) r dr \right|^2 / \left\{ \int_0^{r_0} [\exp(-Q^2)]^2 r dr \int_0^\infty [\exp(-Q^2)]^2 r dr \right\} = 1 - \exp(-2Q_0^2). \quad (8)$$

已详细推导了系统在各种可能分布情况下的外差混频效率,除了 Airy+Gauss 以及 Gauss+Airy 组合外,其他组合都有精确的解析表达式,这为快速判断各种组合的性能提供了理论依据。

4 不同分布的信号光和本振光的混频效率对比分析

仿照上节,依然分成两大类,即信号光为 Airy 和 Gauss。设 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$,探测器半径 $r_0 \leq 10 \mu\text{m}$,透镜的 $F = 2$, Gauss 的束腰 $\omega_0 = 1.6\lambda$ 。

4.1 信号光为 Uniform 的情形

Uniform 信号光经圆孔透镜衍射,在探测器上形成 Airy,图 1 是等效信号光为 Airy,本振光分别为 Airy、Uniform 和 Gauss 的外差混频效率。从中可以看出,对于 Airy+Airy,它们的振幅是 Airy 分布,可达到完全匹配, η 随着等效探测器半径 X_0 的增加而线性增长,在 Airy 的第一暗条纹处, $\eta_{A-A} = 84\%$,在第二暗条纹处为 91% ,因此当探测器足够大时,可以达到 100% 的外差混频效率。对于 Airy+Uniform,随着探测器半径的增大, η_{A-U} 先是线性增

长,当 $X_0 \approx 2.8$ 时取得最大值 72% ,随着探测器半径的继续增大,到达 Airy 的第一暗条纹处时, η_{A-U} 下降为 54% ,此后继续下降。由于存在严重的振幅失配,从提高外差混频效率的角度考虑,这种组合是不合适的。对于 Airy+Gauss,单从图 1 来看,在 Airy 斑的第一暗条纹内,随着探测器半径的增大,外差混

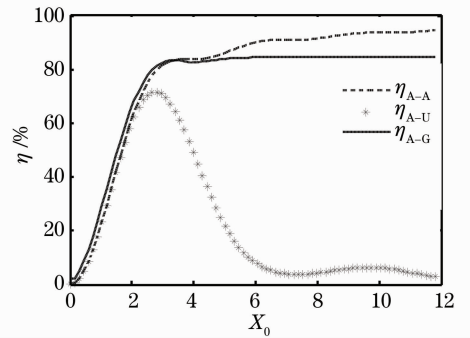


图 1 信号光为 Airy,本振光分别为 Airy、Uniform 和 Gauss 的外差效率

Fig. 1 Heterodyne efficiency for an Airy function signal and the Airy, Uniform or Gauss amplitude distributions of the local oscillator wave on a circular detector

频效率也线性增长,它可以达到 Airy+Airy 的外差效果,而随着探测器半径的进一步增大,外差混频效率基本保持不变。

由于 Airy+Gauss 是实际系统中常用的等效模型,而且当涉及到 Gauss 时, η_{A-G} 将受 r_0, ω_0 共同制约,因此,为了更全面了解 r_0, ω_0 对外差混频效率的影响,针对不同的 r_0, ω_0 , 其相应的外差混频效率如图 2 所示。

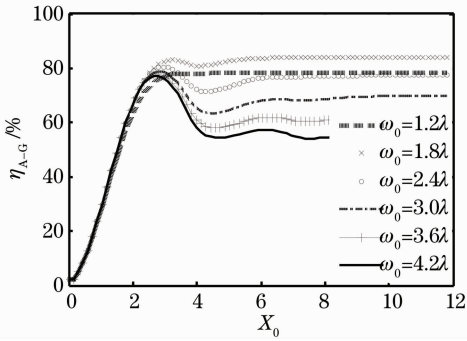


图 2 信号光为 Airy, 本振光为 Gauss, 且 ω_0 取不同值时的外差效率

Fig. 2 Heterodyne efficiency for an Airy function signal with different ω_0 and a local oscillator wave with Gauss amplitude on a circular detector

从图 2 可以看出,在起始阶段,随着探测器半径的逐渐增大,即使 ω_0 逐渐变大,外差混频效率也是线性增长的。这是由于随着探测器半径的增大,相应的有效探测面积增大,能接收到的能量将增多,所以外差混频效率增大。有趣的是,随着探测器半径的继续增大,出现了不同情况,即外差混频效率将逐步下降,然后保持在某一固定取值,令 ω_0 取 $2.4\lambda, 3.0\lambda, 3.6\lambda, 4.2\lambda$, 从图 2 都可以看到这种现象。这说明探测器有效探测面积增大到一定程度后,它的继续增大并不能带来外差混频效率的增大,相反地,由于更多的背景噪声同时也进入探测器,从而影响到混频效率;此外,由于系统的有效通光孔径是一定的,随着 ω_0 的逐步增大,势必造成实际透过孔径的 Gauss 光束能量不增反减,从而导致外差混频效率越来越小,对比 ω_0 取 $2.4\lambda, 3.0\lambda, 3.6\lambda, 4.2\lambda$, 清楚地看到这样的现象。基于以上两方面的原因,随着 ω_0 的增大,进一步增大探测器半径不能促使外差混频效率持续增加。

4.2 信号光为 Gauss 分布

假设信号光无损通过接收天线,当信号光为 Gauss,本振光为 Airy、Uniform 或 Gauss 的 η 如图 3 所示。从图 3 可看到,Guass+Airy 与图 1 中的

Airy+Guass 相类似,随着探测器半径的增大,会带来更多的背景噪声,使得 η 减小。事实上,从外差效率的理论推导也可看到,它们仅存在积分限的差异。同时还可看到,图 3 中的 Guass+Uniform 与图 1 中的 Airy+Uniform 类似,在实际的星间相干光通信接收系统中常把 Guass 信号光用 Uniform 来替代,而 Uniform 的衍射图样刚好是 Airy,所以说,在接收系统中用 Uniform 作为 Gauss 的近似是合理可行的。Guass+Uniform 的最大 $\eta_{G-U} = 82\%$, 比 Airy+Uniform 的 72% 稍大,这说明将 Gauss 近似为 Uniform 有少许能量损失。对于 Guass+Guass, 由于二者振幅完全匹配,随着探测器半径的增大,当等效探测器半径 $X_0 \approx 3.83$ 时, η_{G-G} 已达到 100% , 因此,Guass+Guass 的情形,只需要较小接收面积的探测器便能实现高效探测,而且还能有效抑制背景噪声。

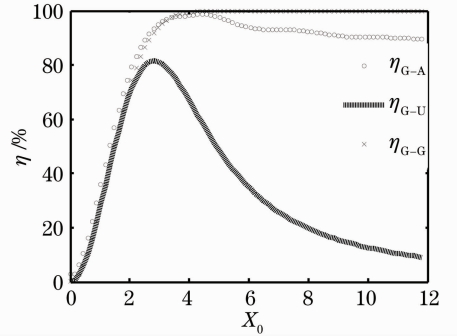


图 3 信号光为 Gauss, 本振光分别为 Airy、Uniform、Gauss 的外差效率

Fig. 3 Heterodyne efficiency for a Gaussian signal and the Airy, Uniform or Gauss amplitude distributions of the local oscillator wave on a circular detector

5 结 论

按照星间相干光通信接收系统的实际情况,把信号光分成 Uniform 和 Gauss 两类,并令本振光分别为 Airy、Uniform、Gauss,在假设相位完全匹配、信号光与本振光几何中心重合的前提下,详细推导出相应的 η 。除 Airy+Gauss 以及 Gauss+Airy 外,其他组合都得到了精确的解析式。在此基础上,通过数值仿真,全面对比分析了各种情况下的外差混频性能,结果发现,Airy+Airy 的 η_{A-A} 随着探测器半径的增加线性增长,Guass+Guass 理论上只需要很小的探测面积便能达到 $\eta_{G-G} = 100\%$, 这两种组合能实现振幅的完全匹配;而 Airy+Uniform 存在严重的振幅失配,最大 $\eta_{A-U} = 72\%$, Gauss+

Uniform 与 Airy + Uniform 相似, 最大 $\eta_{G-U} = 82\%$, 这恰好从侧面证明了在星间相干光通信接收系统中用 Uniform 替代 Gauss 光是合理可行的。Airy + Gauss 是设计、分析系统时常采用的分布形式, 此时 η_{A-G} 是探测器半径 r_0 以及 Gauss 束腰 ω_0 的函数, 不管 ω_0 如何变化, 刚开始随着 r_0 的增大, η_{A-G} 线性增长, 当达到最大值后, r_0 的继续增大并不能带来 η_{A-G} 的持续增长。究其原因有二, 一是因为随着 r_0 的增大背景噪声也增大; 二则由于接收系统有效通光孔径的限制, 当 ω_0 不断增大时, 实际透过孔径达到探测器表面的光能量不增反减, 二者的共同作用, 导致了这一现象。Gauss + Airy 与 Airy + Gauss 情况类似。以上这些结论为设计星间相干光通信接收系统提供了必要的理论依据, 为深入讨论星间相干通信性能提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Tong Shoufeng, Jiang Huilin, Zhang Lizhong. High data-rate space laser communication system and its application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 649~654
佟首峰, 姜会林, 张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用 [J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 649~654
- 2 Liu Hongzhan, Sun Jianfeng, Liu Liren. Analyzing the trends of space laser communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2010, **34**(8): 39~42
刘宏展, 孙建锋, 刘立人. 空间激光通信技术发展趋势分析 [J]. *光通信技术*, 2010, **34**(8): 39~42
- 3 Liying Tan, Yuqiang Yang, Jing Ma *et al.*. Pointing and tracking errors due to localized deformation in inter-satellite laser communication links [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13372~13380
- 4 Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Optical phase locked loops in inter-satellites coherent optical communications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(4): 25~33
许楠, 刘立人, 刘德安等. 星间相干光通信中的光学锁相环 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(4): 25~33
- 5 Zhou Yu, Wan Lingyu, Zhi Ya'nan *et al.*. Polarization-splitting 2×4 90° free-space optical hybrid with phase compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3291~3294
周煜, 万玲玉, 职亚楠等. 相位补偿偏振分光 2×4 90° 自由空间光学桥接器 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3291~3294
- 6 Xu Nan, Liu Liren, Wan Lingyu *et al.*. Coherent detection of position errors in space laser coherent communications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 347~351
许楠, 刘立人, 万玲玉等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 347~351
- 7 S. Buckreuss, R. Werninghaus, W. Pitz. The German satellite mission TerraSAR-X [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2009, **24**(11): 4~9
- 8 C. Chen, C. S. Gardner. Impact of random pointing and tracking errors on the design of coherent and incoherent optical intersatellite communication links [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**(3): 252~260
- 9 Yao Zhoushi, Deng Ke, Li Xiaofeng. The effect of pointing error on performance of satellite coherent laser communication link [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(6): 868~870
幺周石, 邓科, 李晓峰. 卫星相干光通信跟瞄误差对链路性能的影响 [J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(6): 868~870
- 10 Wang Zhaohui, Zhao Changzheng, Chen Wenxin *et al.*. Effect of vibration on intersatellite coherent laser communication [J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(3): 336~340
王朝晖, 赵长政, 陈文新等. 振动对星间相干激光通信的影响 [J]. *应用光学*, 2007, **28**(3): 336~340
- 11 Xiang Jingsong, Pan Lechun. Heterodyne efficiency and the effects of aberration for space coherent optical communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(11): 53~57
向劲松, 潘乐春. 空间相干光通信外差效率及天线像差的影响 [J]. *光电工程*, 2009, **36**(11): 53~57