

相干检测星间跟踪技术方案的优化设计*

潘湖迪 金 韬

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘 要 采用高斯光束近似重构了相干检测星间跟踪技术方案的数学模型, 计算分析了探测器输出的中频电流与光束失配角之间的关系, 减小了以往平面波近似下的计算误差. 同时通过优化选择探测器直径和光束直径之比, 对输出中频电流表达式进行了简化, 提高了运算效率.

关键词 星间光通信; 相干检测; 高斯光束

中图分类号 TN929.14 0743+.1

文献标识码 A

0 引言

最近十几年来, 空间光通信技术越来越为人们所关注. 和传统的射频卫星通信相比, 光通信具有传输容量大、功耗小以及系统结构轻巧等优点^[1]. 但光通信中通信波束宽度远小于射频波束, 因此星间光通信对瞄准、捕获和跟踪(PAT)系统的对准精度提出了苛刻的要求. 传统的跟踪系统采用 CCD 阵列或者象限探测器来检测激光束偏角^[2-4], 文献[5]中提出了一种基于电光效应的空间相干检测技术, 借助该技术可获得极高的对准精度和检测灵敏度. 但该文中构建的关于该技术方案的数学模型中引入了平面波近似, 而实际的相干光束应为基模高斯光束, 高斯光束相干光场的振幅受到了高斯分布的调制, 同时相位分布又受到高斯球面的波面特性影响^[6,7], 因此将对相干检测的结果产生较大的影响. 在实际通信系统中, 相干光束中的一束信号光束由于经超远距离传输, 光束半径变得很大, 由光学天线所截取的一小部分光束可近似为平面波, 但本振光束仍为基模高斯光束. 因此, 研究高斯光束相干与平面波相干的差异对提高该检测方案的检测精度十分必要.

本文在高斯光束近似下导出了相干输出中频电流与光束失配角的关系, 并借助数值计算方法, 得到了探测器直径与光束直径的最佳比值, 为实验检测装置的构建提供理论依据.

1 高斯光束相干检测数学模型

假设入射的信号光和本振光均为基模高斯光. 如图 1, 信号光波前与本振光波前有一夹角 θ , 光探测器光敏面是边长为 d 的正方形, 记为 S .

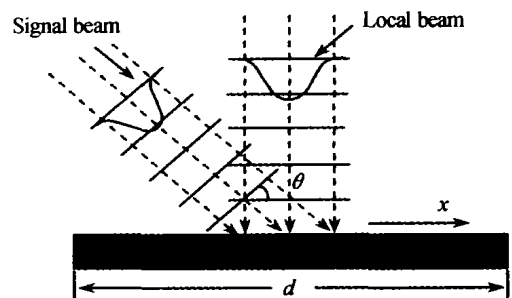


图 1 高斯光束空间相干关系

Fig. 1 Spatial relation of Gaussian beam for coherent detection

对于基模高斯光, 做如下近似处理. 高斯光的波前不再是平面, 但对于毫米量级的探测器而言, 在垂直于光束传播方向的横截面上相位分布差异很小, 可以近似作为平面波来处理^[6]. 考虑横截面上的光强分布, 假设横截面上信号光和本振光光斑的半径分别为 r_s 和 r_L , 光斑中心的场强值分别为 A_s 和 A_L .

在分析中, 假定本振光垂直入射, 则本振光电场表示为

$$E_L(t) = A_L e^{-2(x^2+y^2)/r_L^2} e^{i(\omega_L t + \varphi_L)} \quad (1)$$

由于信号光与本振光波前有一失配角 θ , 信号光斜入射到光探测器接收面, 同一波前到达接收面的时间不同, 可等效为信号光沿 x 方向以速度 V_x 传播, 在接收面不同点处形成波前相差. 在探测面上以本振光的光斑中心为坐标原点, 在失配角为 θ 时, 信号光光斑中心坐标记为 (x_0, y_0) , 相应的信号光场强可表示为

$$E_s(t) = A_s e^{-2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]/r_s^2} e^{i(\omega_s t + \varphi_s - \frac{\omega_s x}{V_x})} \quad (2)$$

式中 $V_x = c/\sin \theta$, c 为光速.

光探测器输出的中频电流可表示为

$$I_{IF} = \iint_S G \beta [E_s(t) E_L(t)^* + E_L(t) E_s(t)^*] dS \quad (3)$$

式中 G 和 β 分别是光电探测器的增益和响应度.

将式(1)和(2)代入式(3), 得到光探测器输出的中频电流积分式为

$$I_{IF} = \iint_S 2G\beta A_s e^{-2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]/r_s^2} A_L e^{-2(x^2+y^2)/r_L^2} \cdot$$

*国家自然科学基金资助(项目批准号 60307005)
Tel: 0571-8799494 Email: iceblue@zju.edu.cn
收稿日期: 2004-10-20

$$\cos [(\omega_s - \omega_L)t + (\varphi_s - \varphi_L) - \frac{\omega_s}{V_x}x] dX \quad (4)$$

而对于平面波相干情况, 最终光探测器输出的中频电流为^[1]

$$I_{IF} = 2G\beta d^2 A_s A_L \cos [(\omega_s - \omega_L)t + (\varphi_s - \varphi_L)] \frac{\sin (\omega_s d / 2V_x)}{\omega_s d / 2V_x} \quad (5)$$

式中 ω_s 为信号光角频率.

假定积分区域是边长为 d 的正方形区域, 本振光中心与正方形中心重合, 通过数值计算, 可以分别得到归一化后的中频电流 I_{IF} 与失配角 θ 的关系曲线(见图 2), 图中实线代表两束高斯光束相干后的中频电流 I_{IF} 与失配角 θ 的关系曲线, 虚线代表两束平面波相干后的中频电流 I_{IF} 与失配角 θ 的关系曲线. 图中显示两条曲线有明显的差异, 因此, 采用平面波相干的近似处理方法将带来很大的原理性误差. 相比而言, 高斯光束相干时的中频电流 I_{IF} 随失配角 θ 的变化曲线没有出现振荡现象, 线性区域扩大, 预示着有更大的探测范围. 就图 2 对应的情况, 平面波相干探测的失配角范围约为 $0 \sim 100 \mu\text{rad}$, 而高斯光束相干探测的失配角范围则可达 $0 \sim 200 \mu\text{rad}$, 探测范围扩大了约一倍.

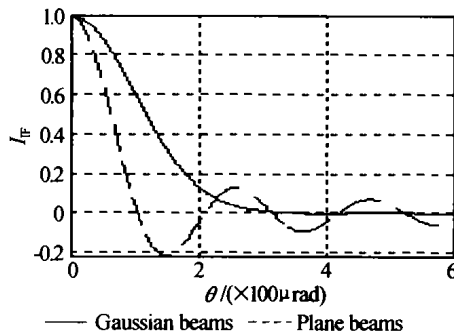


图 2 中频电流 I_{IF} 与失配角 θ 的关系曲线
Fig. 2 Intermediate frequency current I_{IF} versus mismatched angle θ

2 探测器与光束尺寸优化

在本设计方案中确定信号光束方向的原理是^[5]: 由偏转器对信号光束施加周期性扰动, 然后在一个扰动周期内测定二个或三个不同时刻的中频电流, 将它们代入方程(4), 联立后求得信号光方位角信息. 但对式(4)直接联立进行数值求解十分困难, 一般情况下可以认为不可能进行精确求解. 因此, 必须对该方程做进一步的简化处理.

首先, 假设探测器的探测面远大于光束直径, 于是式(4)的积分区间可近似为 $(-\infty, +\infty)$. 其次, 假设失配角 θ 很小, 信号光斑和本振光斑在探测面上的中心偏移足够小, 即 $x_0 \approx y_0 \approx 0$. 基于上述假设, 式(4)可简化为

$$I_{IF} = G\beta A_s A_L \cos [(\omega_s - \omega_L)t + (\varphi_s - \varphi_L)] (\sqrt{\pi}r_0)^2 e^{-\frac{1}{2}(\frac{\pi r_0}{\lambda_s})^2 \sin^2(\theta)} \quad (6)$$

式中

$$r_0^{-2} = r_s^{-2} + r_L^{-2} \quad (7)$$

上述两个假设条件其实是相互制约的. 在探测器尺寸确定的情况下, 若要求探测面远大于光束直径, 则光束直径越小越好; 但光束半径越小, 因忽略中心偏移 (x_0, y_0) 造成的误差就越大. 由式(4)和式(6)可得到两条归一化中频电流 I_{IF} 与失配角 θ 的关系曲线, 比较这两条曲线的差异, 就可以得到由于简化而引入的计算误差. 可通过优化探测器直径 d 与相干光束半径 r_s, r_L 参数值减小由于简化导致的误差.

记在某一失配角 θ 下式(4)和式(6)对应曲线归一化中频电流 I_{IF} 的差值为误差电流 ΔI_{IF} , 同时不妨假设 $r_s = r_L = r$, 令探测器直径和光束直径之比为 $N = d / (2r)$ (8)

图 3(a)、(b)分别给出了 $N=3$ 和 $N=1.5$ 时归一化中频电流 I_{IF} 与失配角 θ 的关系曲线, 其中曲线 a 对应式(4)的关系曲线, 曲线 b 对应式(6)的关系曲线. 图 3(b)中的两条关系曲线的吻合程度明显要好于图 3(a)中的情况, 这意味着 $N=1.5$ 时存在较小的误差电流 ΔI_{IF} .

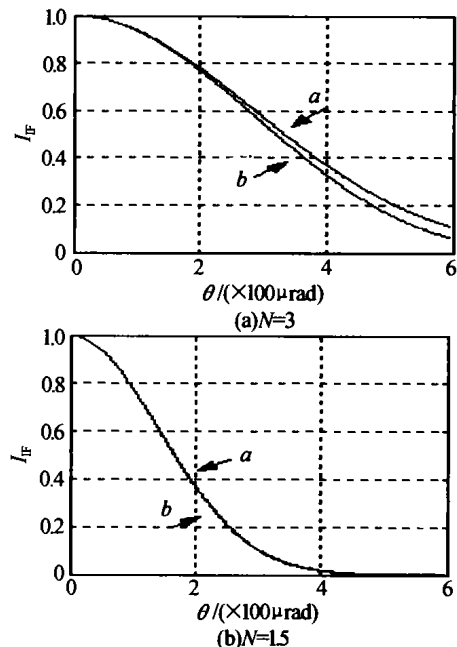


图 3 中频电流 I_{IF} 与失配角 θ 关系曲线, 曲线 a 对应式(4), 曲线 b 对应式(6)
Fig. 3 Frequency current I_{IF} as a function of mismatched angle θ derived from equation 4 (curve a) and equation 6 (curve b)

取失配角 $\theta = 200 \mu\text{rad}$, 计算误差 $\Delta I_{IF} / I_{IF}$ (单位为%) 与 N 的关系曲线如图 4. 由图可见, 要获得最小的计算误差, 探测器直径和光束直径比 N 应取 1.5 左右, 此时计算误差 $\Delta I_{IF} / I_{IF}$ 约为 0.5%.

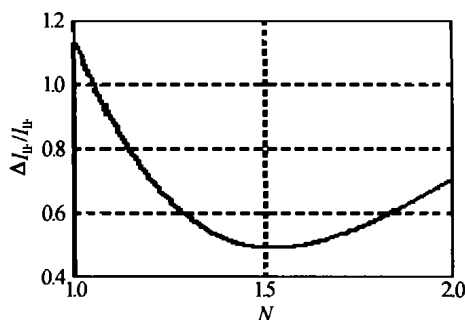


图4 计算误差 $\Delta I_{IF}/I_{IF}$ 与 N 的关系曲线

Fig. 4 Calculated error $\Delta I_{IF}/I_{IF}$ as a function of N

因此,当失配角 $\theta = 200 \mu\text{rad}$, $N = 1.5$ 时,完全可以用简化式(6)代替积分式(4)来描述中频电流与失配角的关系,从而大大缩减计算量。

3 结论

计算了两束高斯光束相干后探测器输出的中频电流和失配角的关系,并与两束平面波相干时得到的结果进行了分析比较。结果表明,更接近实际情况的高斯近似数学模型使探测系统的探测范围增大了一倍。

通过优化选择探测器直径和光束直径之比 ($N = 1.5$),得到了简化的高斯近似下的中频电流和失配角的关系式,可快速实现了联立方程的求解,提高检测速度。

参考文献

- 1 Begley D L. Global trends and the future of laser communications. *Proc SPIE*, 1997, **2990**: 134 ~ 141
- 2 Takashi J, Masaahiro T, Keizo N, *et al.* Acquisition, tracking, and pointing systems for OICETS for free space laser communications. *Proc SPIE*, 1999, **3692**: 41 ~ 50
- 3 Kazuhiko A, Hidehiko K, Satoshi Y, *et al.* Wide and fine pointing mechanism with flexible supports for optical intersatellite communications. *Proc SPIE*, 1999, **3615**: 222 ~ 229
- 4 Scheinfeld M, Kopeika N S, Melamed R. Acquisition system for microsattellites laser communication in space. *Proc SPIE*, 2000, **3932**: 166 ~ 175
- 5 金韬. 基于电光效应的相干检测星间跟踪技术. 光子学报, 2003, **32**(10): 1185 ~ 1188
Jin T. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1185 ~ 1188
- 6 陈元培, 李展, 陈献忠, 等. 基模高斯光束轴向相干叠加驻波场的研究. 光电子·激光, 2001, **12**(11): 1193 ~ 1195
Chen Y P, Li Z, Chen X Z, *et al.* *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(11): 1193 ~ 1195
- 7 张锦, 冯伯儒, 郭永康. 四激光束干涉光刻制造纳米级孔阵的理论分析. 光子学报, 2003, **32**(4): 398 ~ 401
Zhang J, Feng B R, Guo Y K. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 398 ~ 401

Optimization of Coherent Detection Technology for Inter-satellite Tracking

Pan Hudi, Jin Tao

Dept. of Information & Electronic Engineering, Zhejiang University, Zhejiang 310027

Received date: 2004-10-20

Abstract The mathematical model of coherent detection for inter-satellite tracking is rebuilt under Gaussian approximation. The intermediate frequency current from a detector as a function of a beam mismatched angle is calculated under this model which can get a smaller error compared with the one under plate wave approximation. The expression of the intermediate frequency current is simplified by choosing a right ratio between the detector diameter and the beam diameter, which can improve the calculation efficiency.

Keywords Inter-satellite optical communication; Coherent detection; Gaussian beam

Pan Hudi was born on August 15, 1979, in Zhejiang, P. R. China. He received the B. E. degrees in information technology from Zhejiang University. In 2002, he began his research for his M. S. degree in physical electronics. His research work focuses on new technology for optical communication system.