

不同相干光通信外差效率的数值计算与分析

赵中华¹, 辛海燕^{2*}

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林航天工业学院 电子信息与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 外差效率是衡量相干光通信性能的重要指标之一, 而本振光和信号光的振幅匹配问题将直接决定相干光通信系统的性能好坏。利用数值计算的方法, 分别以平行光束(P)、高斯光(G)和艾里光(A)作为信号光, 推导计算了信号光与本振光的相干外差效率, 并分析了在不同情况下, 外差效率与其主要影响因素之间的变化关系曲线。该研究结果为信号光和本振光的类型选择提供了理论依据, 同时, 也为相干光通信系统中的聚焦系统和探测器提供了参数优化方案。

关键词: 相干光通信; 外差效率; 平行光束; 高斯光; 艾里光

中图分类号: TN915.62 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2018)04-0059-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.04.016

Numerical calculation and analysis of heterodyne efficiency for different coherent optical communication

ZHAO Zhonghua¹, XIN Haiyan^{2*}

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic

Technology, Guilin Guangxi 541004, China; 2. School of Electronic Information and

Automation, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Heterodyne efficiency is one of the important indexes to measure the performance of coherent optical communication system. However, the amplitude matching between local oscillator and signal light will directly affect the performance of coherent optical communication system. Using the method of numerical calculation, the coherent heterodyne efficiency of local oscillator and signal light is derived by using parallel light beam (P), Gaussian light (G) and Airy light (A) as signal light respectively. This paper analyzes the curve change relationships between the heterodyne efficiency and the main influencing factors in different situation. The results of this study provide theoretical basis for the type selection of signal light and local light, and provide an optimized solution for the parameters of the focusing system and detector in coherent optical communication system.

Key words: coherent optical communication; heterodyne efficiency; uniform wave; Gaussian wave; Airy light

0 引言

激光相干通信技术是指采用不同的调制方式(改变光载波的频率、相位、偏振和振幅等)和相干探测方式(使本振光与信号光进行混频, 得到与信号光的频率、相位、偏振和振幅按相同规律变化的中频信号)完

成光通信任务。这种通信技术通过改变相干探测方式进而有效提高接收机的灵敏度^[1,2]。德国 Terra-SAR-X 搭载了 1.064nm 的星间和星地激光相干通信终端 TSX-LCT, 误码率可以达到 10^{-9} , 在相距 6000km 时的通信速度能达到 8Gb/s, 相距 20000km 时的通信速度为 1Gb/s, 相距 72000km 时的通信速度为 500Mb/s。由此可见, 采用激光相干通信技术完全可以实现中远程距离的星间通信任务。但是, 若想通过该技术实现高灵敏度的通信系统, 还需要特别注意本振光与信号光的相干性匹配程度, 一般包含偏振、相位以及振幅的

收稿日期: 2017-11-02。

基金项目: 国家自然科学基金(项目编号: 61661016)资助。

作者简介: 赵中华(1976-), 男, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为无线探测、光通信、通信系统和射频电路等。

* 通信作者: 辛海燕(E-mail: ikockoc@hotmail.com)。

匹配^[3]。针对这一问题, 国内研究学者大多将目光集中在目标振动、跟踪精度和接收天线像差等因素对外差效率的影响^[4]。然而, 本振光和信号光的振幅匹配和偏振匹配才是影响系统灵敏度的重要因素。对于偏振匹配, 利用偏振器件(如波片、波片组合或空间光调制器等)就能实现很好的匹配。因此, 本振光和信号光的振幅匹配问题, 将直接关系到整个相干光通信系统的性能好坏。本文以平行光束(P)、高斯光(G)和艾里光(A)作为本振光, 建立外差效率数值分析模型, 考察了当信号光和本振光的振幅分布在 6 种不同组合形式下, 对应的外差效率大小和影响外差效率的主要因素, 并进行了数据仿真分析。

1 外差相干探测原理

在相干光通信系统中, 外差相干探测接收的基本原理如图 1 所示。假设本振光与信号光的偏振和相位均匹配, 满足相干性要求。图 1 中, 由光学天线发射的信号光与本振光经过分光镜合束, 经过透镜会聚到光电探测器表面发生混频, 产生中频信号电流。在外差相干探测中, 中频信号电流可以同时传输信号的振幅、频率和相位信息。相比于非相干光通信, 相干光通信不仅可以实现更大信息量的传送, 而且还可以实现长距离空间光电传输中微弱光信号的检测。

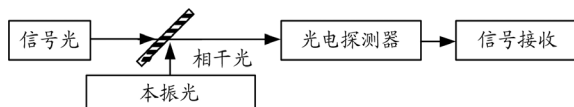


图 1 外差相干探测原理示意图

通过对中频信号电流进行相应的解调, 光波所携带的振幅、频率和相位信息均可被探测出来。外差效率定义为信号光和本振光混频之后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, 即:

$$\eta_h = \frac{\left| \int_{\sigma} |U_s(r)| |U_l(r)| \exp(i\Delta\varphi) d\sigma \right|}{\int_{\sigma} [U_s(r)]^2 d\sigma \cdot \int_{\sigma} [U_l(r)]^2 d\sigma} \quad (1)$$

其中, η_h 为信号光和本振光的外差效率, $U_s(r)$ 为信号光的振幅分布, $U_l(r)$ 为本振光的振幅分布, $\Delta\varphi$ 为信号光与本振光的位相差, σ 为探测器光敏面的面积大小, r 为光敏面上某一点的径向坐标。从式(1)中可以看出, 外差效率是衡量总入射积分光强中能被外差相干接收所探测到的光强百分比, 其大小直接与本振光和信

号光的振幅分布有关。 $\eta_h=1$ 表示本振光与信号光二者完全匹配, $\eta_h=0$ 表示本振光与信号光二者完全失配。

2 外差效率数值计算模型

相干光通信中接收到的信号光通常为平行光束, 但对传输数据的通信支路可采用无焦系统或聚焦系统接收, 此时到达探测器上的光束分别为平行光束和高斯光束, 根据实际需要, 本振光可以是高斯光束、艾里光束或平行光束中的一种。由于本振光和信号光的振幅分布将直接决定相干探测外差效率的大小。因此, 本文主要分析在 6 种不同振幅分布组合形式下, 本振光和信号光的振幅分布类型对外差效率的影响。

2.1 平行光束和平行光束(P-P 型)

当信号光和本振光都为平行光束时, 化简式(1)后可得此时的外差效率表达式为:

$$\eta_{P-P} = \left| \frac{2J_1(kr_0\theta)}{ka_s\theta} \right|^2 \quad (2)$$

其中, J_1 为第二类贝塞尔函数, r_0 为探测器光敏面半径, θ 为信号光与探测器法线之间的夹角, 被称为探测器的失配角, k 为波数, a_s 为信号光的振幅。从式(1)可以看出, 在不考虑两光束振动方向、传播方向以及探测器失配角度时, 外差效率与探测器光敏面大小和信号光的振幅有关。

2.2 平行光束和艾里光束(P-A 型)

平行光束作为本振光, 艾里光束作为信号光, 化简式(1), 可得此时的外差效率表达式为:

$$\eta_{P-A} = \left| \frac{2}{r_0} \int_0^{r_0} J_1(\pi r/\lambda F) \cdot J_0(kr\theta) r dr \right|^2 \quad (3)$$

其中, J_0 为第一类贝塞尔函数, λ 为光波长, $F=f/2a$ 为聚焦系统的参数 $F\#$, f 为聚焦系统的焦距, a 为聚焦系统的口径大小。当本振光和信号光为 P-A 型相干探测时, 外差效率与信号光的聚焦系统参数 $F\#$ 、探测器光敏面半径 r_0 和探测器失配量 θ 有关。

2.3 艾里光束和艾里光束(A-A 型)

当信号光和本振光都为艾里光束时, 采取和前文推导同样的方法。同时, 为了方便分析, 我们假设信号光和本振光的 $F\#$ 大小相同, 并利用贝塞尔函数的相关性质, 化简得到 A-A 型外差效率的表达式为:

$$\eta_{A-A} = \frac{\left| 2 \int_0^{r_0} J_1^2(\pi r/\lambda F) J_0^2(kr\theta) r dr \right|^2}{1 - J_1^2(\pi r_0/\lambda F) - J_0^2(\pi r_0/\lambda F)} \quad (4)$$

2.4 平行光束和高斯光束(P-G 型)

平行光束作为信号光, 高斯光束作为本振光时, 化简式(1)可得此时对应的外差效率为:

$$\eta_{P-G} = \frac{2 \left| 2 \int_0^{r_0} r \cdot \exp(-r^2/\omega_s^2) \cdot J_0(kr\theta)/r_0 \omega_l dr \right|^2}{1 - \exp(-2r_0^2/\omega_l^2)} \quad (5)$$

其中, ω_s 为信号光的宽度, ω_l 为本振光的束腰宽度。

2.5 艾里光束和高斯光束(A-G 型)

采用类似上述的分析过程, 信号光和本振光为 A-G 型时的外差效率为:

$$\eta_{A-G} = 2 \left| \frac{2 \int_0^{r_0} \exp(-r^2/\omega_l^2) J_1(\pi r/\lambda F) J_0(kr\theta) dr / \omega_l}{1 - \exp(-2r_0^2/\omega_l^2)} \right|^2 \quad (6)$$

当探测器失配角 $\theta=0$ 时, A-G 型的外差效率主要与 3 个变量有关, 即光敏面半径 r_0 、本振光宽度 ω_l 和聚焦系统的 $F\#$ 。

2.6 高斯光束和高斯光束(G-G 型)

当信号光和本振光均为高斯光束时, G-G 型对应的外差效率可以表示为:

$$\gamma_{G-G} = \frac{\left| 4 \int_0^{r_0} J_0(kr\theta) \exp\left[-(\omega_l^2 + \omega_s^2) r^2 / (\omega_l^2 \omega_s^2)\right] r dr \right|^2}{\omega_l^2 \omega_s^2 [1 - \exp(-2r_0^2/\omega_l^2)]} \quad (7)$$

其中, ω_s 为信号光的宽度, ω_l 仍为本振光的束腰宽度。当探测器失配角 $\theta=0$ 时, G-G 型的外差效率主要与变量本振光的束腰宽度 ω_l 、高斯光束的宽度 ω_s 和光敏面半径 r_0 有关。

3 数值仿真分析

由前文的理论分析可知, 相干探测外差效率的大小与本振光和信号光的振幅分布类型、光束自身参数和探测器参数有直接关系。在不考虑光学天线像差对相干外差效率影响的前提下, 本文对本振光和信号光在上述 6 种不同振幅分布组合形式下的外差效率进行了数值仿真分析。

3.1 信号光为平行光束

当本振光也为平行光束时, 结合式(2)可得 $r_0=20\mu\text{m}$ 时信号光宽度 a_s 对 P-P 型外差效率的影响曲线, 如图 2 所示。假设本振光宽度和探测器大小一致, 由图 2 可知, 当探测器

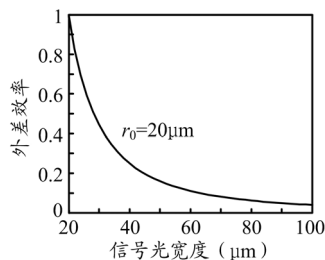


图 2 $r_0=20\mu\text{m}$ 时, P-P 型外差效率和信号光宽度之间的关系曲线

光敏面半径、信号光宽度和本振光宽度 3 者相等时, 外差效率几乎可以接近于 100%; 当信号光很宽, 探测器光敏面很小时, 外差效率非常低, 同时, 信号光光功率损失严重。

当本振光为高斯光束, 其宽度 ω_l 分别等于 $20\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 时, 结合式(5)可得探测器光敏面半径 r_0 对 P-G 型外差效率的影响曲线, 如图 3 所示。可以看出, 当探测器的光敏面大小一定时, 本振高斯光束的束腰宽度 ω_l 越大, 外差效率越高; 当束腰宽度 ω_l 大小不变时, 外差效率会随着探测器光敏面的增大而迅速下降, 其下降曲线呈高斯形式; 当 $r_0 \leq \omega_l$, 可以得到一个相对很好的外差效率, 此时 $\eta \geq 0.942$ 。因此, 为了使得星间相干光通信系统有较高的外差效率, 应该尽量选择探测器光敏面半径小于本振高斯光束的束腰宽度 ω_l 。

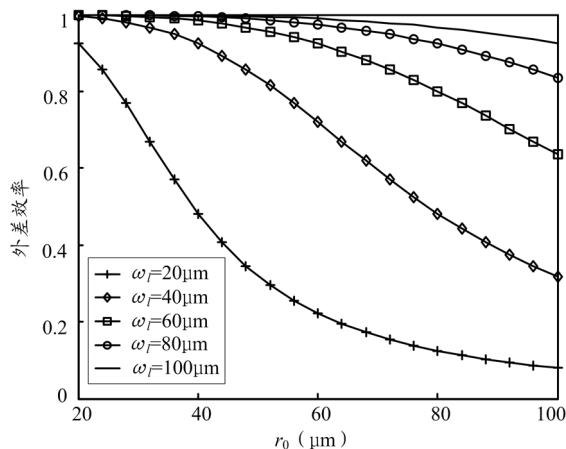
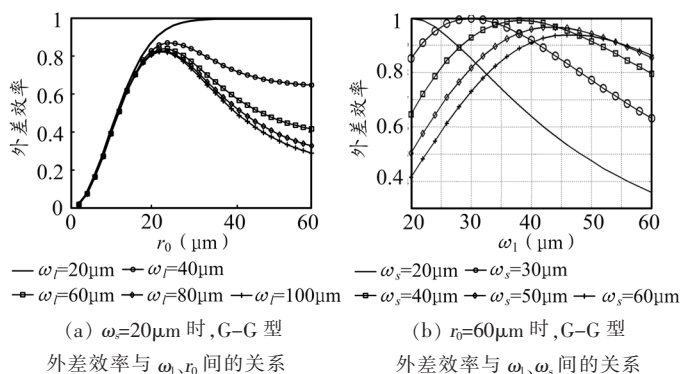
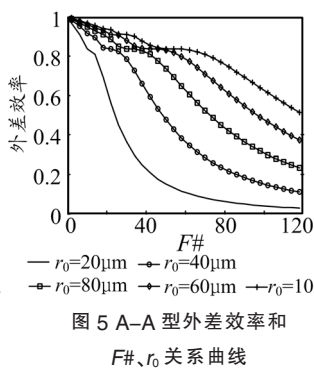
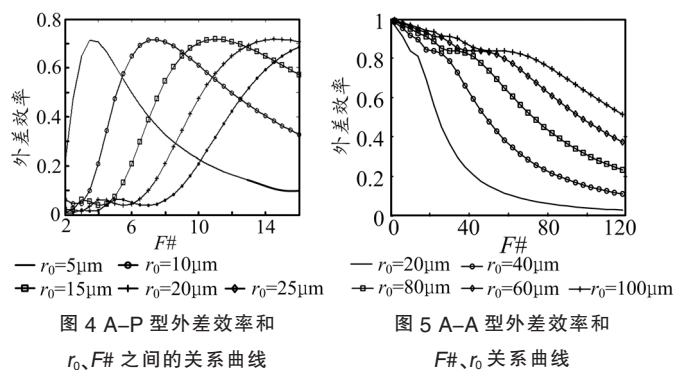


图 3 P-G 型外差效率和 r_0 、 ω_l 之间的关系曲线

3.2 信号光为艾里光束

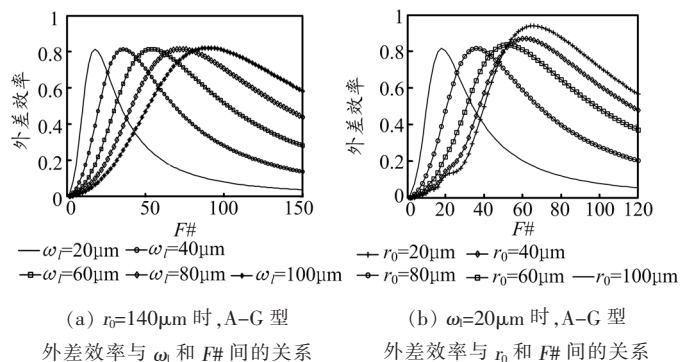
若本振光为平行光束, 在不考虑探测器失配角 θ , 探测器光敏面半径大小 r_0 分别为 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 和 $25\mu\text{m}$ 时, 结合式(3)可得聚焦系统 $F\#$ 对 P-A 型外差效率的影响曲线, 如图 4 所示。从图 4 可知, 当 $F\#$ 或 r_0 一定时, 只要选取合适的参数, 都存在一个最大外差效率值, 约为 0.72, 此时 $F\#/r_0 \approx 0.81$ 。因此, 若采用此种相干探测方式, 可通过选择探测器光敏面半径 r_0 和聚焦系统 $F\#$ 使外差效率达到最大值。

若本振光为艾里光束, 不考虑探测器失配角 θ , 当探测器光敏面半径大小 r_0 分别为 $20\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 时, 结合式(4)可得 A-A 型外差效率随聚焦系统 $F\#$ 的变化情况, 具体的数值分析结果如图 5 所示。可以看出, 当 $F\#$ 和 r_0 都较小时, 外差效率相对都比较大, 但是当 $F\#$ 增大时, 外差效率将会迅速降低, 若此时 r_0 较大, 下降速度会相对减小。理论上

图 7 G-G 型相对外差效率和 r_0 、 ω_l 、 ω_s 之间的关系曲线

讲, $F\#$ 越小能量越集中, 小范围接收面内强度越高, 则外差效率损失就越小。但是, 在相同孔径大小下, $F\#$ 越小, 其光学系统实现难度越大。因此, 在相干光通信探测系统中很少采用上述两种光束作为相干光源。

若本振光为高斯光束, 当探测器光敏面半径大小一定, 即 $r_0=140\mu\text{m}$, 本振光宽度 ω_l 分别等于 $20\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 时, 结合式(6)可得 A-G 型外差效率和聚焦系统 $F\#$ 之间的关系如图 6(a) 所示。当本振光宽度一定, 即 $\omega_l=20\mu\text{m}$, 探测器光敏面半径大小 r_0 分别等于 $20\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 时, A-G 型外差效率和聚焦系统 $F\#$ 之间的关系曲线如图 6(b) 所示。从图 6 可知, 主要有 3 个变量(即 r_0 、 ω_l 和 $F\#$)影响着最终的外差效率, 当 $1.4\omega_l < r_0$, 且 r_0 一定时, 选取合适的 $F\#$ 可以获得相对较高的外差效率, $\eta \approx 0.81$ 。这种相干方式是激光通信终端(LC-T)中经常采用的相干方式。

图 6 A-G 型外差效率和 $F\#$ 、 ω_l 、 r_0 之间的关系曲线

3.3 信号光为高斯光束

当本振光也为高斯光束时, 结合式(7), 当 ω_s 一定, ω_l 取不同的值时, r_0 对 G-G 型外差效率的影响如图 7(a) 所示。当 r_0 一定, ω_s 取不同的值时, ω_l 对 G-G 型外差效率的影响如图 7(b) 所示。结果表明: 当 r_0 较大, 且 ω_l 、 ω_s 取值相同时, 外差效率较大, 趋近于 1; 当 r_0 取定值时, 若 ω_l 和 ω_s 都比较小, 且大小相等时, 外

差效率也趋近于 1, 随着 ω_l 和 ω_s 增大, 外差效率会出现一个峰值点, 且峰值会随着 ω_l 和 ω_s 的增大而逐渐减小, 通过推导发现最大外差效率处满足 $2\omega_s=2\omega_l=r_0$ 。

4 结束语

本文以平行光束(P)、高斯光(G)和艾里光(A)作为信号光的振幅分布, 对本振光和信号光在不同振幅分布组合形式下的外差效率进行了理论分析, 对于 6 种不同组合形式, 我们对本振光和信号光的外差效率建立了理论分析模型, 并进行了数值仿真分析。结果显示: 当信号光和本振光振幅分布为 A-P 型时, 只要选取合适的聚焦系统 $F\#$ 和探测器光敏面半径大小 r_0 , 外差效率就能达到最大值 0.72; 当信号光和本振光振幅分布为 A-G 型时, 在保证本振光束腰宽度和探测器光敏面半径满足 $1.4\omega_l < r_0$ 的情况下, 只要选取合适的 r_0 值和 $F\#$, 外差效率就可以获得最大值 0.81; 当信号光和本振光振幅分布为 P-P 型、P-G 型、A-A 型和 G-G 型时, 只要对相应的参数选取合适的值, 外差效率理论上都可以达到 100%。本文的理论分析结果为星间相干光通信系统中本振光和信号光振幅分布类型、光束自身参数、探测器光敏面半径大小以及聚焦系统参数的选择提供了可靠的理论依据。

参考文献:

- [1] 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] 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] 肖石林, 曾庆济. 光相干探测的应用技术研究[J]. 光通信技术, 2003, 27(11): 28-31.
- [4] 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.