

带前置光放大的卫星激光通信系统的优化

向劲松, 胡 渝

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】考虑接收端瞄准误差对空间光到单模光纤耦合的影响, 导出了带前置光放大的卫星激光通信系统中, 由瞄准误差引起的突发误码率的近似解析表达式, 并建立了基于突发误码率的系统优化模型。在给定突发误码率要求及发射端、接收端瞄准误差条件下, 对发射光束宽度、接收天线直径及空间光耦合参数进行了优化, 使所需发射功率最小, 分析了接收端瞄准误差引起的功率损耗。仿真表明: 在最优条件下, 当接收天线直径与接收端瞄准误差标准差之乘积小于0.15个波长时, 由接收端空间光耦合引起的功率损失小于2 μ rad。

关键词 卫星激光通信; 前置光放大; 突发误码率; 空间光耦合; 瞄准误差
中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

An Optimization of Optically Preamplified Laser Satellite Communication Systems

XIANG Jing-song, HU Yu

(School of Physical Electronics, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract This paper discusses the coupling loss induced by pointing error of receiver for coupling space light into single mode fiber in laser satellite communication systems with optical preamplifiers. An approximate analytical expression of burst error rate induced by pointing error is derived and an optimized model for the burst error is established. Given the desired burst error rate and the pointing error of transmitter and receiver, the transmitting beam width, receiving antenna diameter and space optical coupling parameter can be optimized so as to minimize the transmitted power, the power loss induced by pointing error of receiver is also analyzed. The simulation shows that, under the optimal conditions, the power penalty induced by space optical coupling of receiver is less than 2 dB when the product of receiving antenna diameter and the rms pointing error of receiver is less than 0.15 waves.

Key words laser satellite communication; optical preamplification; burst error rate; space optical coupling; pointing error

在卫星激光通信中, 瞄准误差会使接收到的光功率下降, 使系统误码率增加, 对于直接光电探测接收系统, 在一定的发射端瞄准误差下, 存在一个最优发射光束宽度使所需发射功率最小^[1-3], 而接收端的瞄准误差对系统性能基本无影响。但对于带前置光纤放大的卫星激光通信系统, 需要将空间光耦合进单模光纤。由于单模光纤芯径很小, 接收端的瞄准误差会使焦平面上的爱里斑偏离单模光纤位置, 耦合进单模光纤中的光功率下降, 并由于瞄准误差的随机性, 耦合功率产生随机起伏。为了使通信系统达到最优性能, 需要在同时考虑发射端、接收端的瞄准误差下进行系统的优化设计。文献[4]采用很粗略的接收端瞄准损耗模型, 根据平均误码率原则对带前置光放大的卫星激光通信系统进行了优化设计。本文根据突发误码率的要求, 采用准确的接收端瞄准损耗模型, 对带前置光放大的卫星激光通信系统进行优化设计。

1 空间光到单模光纤的耦合

远距离传输来的平行光经接收光学系统会聚在后焦面上, 后焦面上的光场分布是光瞳面处光场分布的

收稿日期: 2005-06-15

基金项目: 军用固体激光技术国防科技重点实验室基金资助项目(514380503DZ02)

作者简介: 向劲松(1975-), 男, 博士生, 主要从事空间光通信方面的研究。

傅里叶变换,在后焦面光斑处放置一单模光纤进行光耦合,耦合效率可在光瞳面计算:

$$\eta = \left| \iint_P E_i^* E_f ds \right|^2 / \left(\iint_P |E_i|^2 ds \iint_P |E_f|^2 ds \right) \quad (1)$$

式中 E_i 为光瞳面处的入射光场。如将单模光纤模场近似为高斯分布,则 E_f 为单模光纤高斯模场经反向传输到光瞳面处时的模场分布,仍为高斯形式^[5]:

$$E_f(r) = 1/(\sqrt{\pi}w_a) \exp(-r^2/w_a^2) \quad (2)$$

式中 $w_a = \lambda f / (\pi w_b)$, λ 为波长, f 为光耦合系统焦距, w_b 为单模光纤高斯模场半径; r 为光瞳面上距光瞳中心点的距离。

在接收端存在瞄准误差 ε_r 时,入射光波前与光瞳面之间有一夹角,此时光瞳面上与光轴距离为 r ,与 ε_r 的方向夹角为 θ 处的入射光场 E_i 的表达式为: $E_i(r, \theta) = 2/(\sqrt{\pi}D_r) \exp(-ik\varepsilon_r r \sin(\theta))$, 其中 D_r 为接收天线直径; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。引入耦合参数 $\beta = \pi D_r w_b / (2\lambda f)$, 得耦合效率为:

$$\eta = 8\beta^2 \left(\int_0^1 e^{-\beta^2 t^2} J_0(\pi(D_r \varepsilon_r / \lambda)t) dt \right)^2 \quad (3)$$

式中 J_0 为零阶第一类贝塞尔函数; 优化 β 可使耦合效率达到最大。图1所示为瞄准误差对耦合效率的影响, 其中瞄准误差采用归一化参量 $D_r \varepsilon_r / \lambda$ 表示。由于焦平面上爱里斑光场分布与单模光纤的模场分布的差异, 使得在接收端正对准条件下, 最大耦合效率也只能达到81.45%(耦合损耗0.9 dB), 此时最优 β 值为1.12。而当存在瞄准误差时, 耦合效率还会降低, 相应的最优 β 值随瞄准误差的增大而增大。从图1中可看出耦合效率与瞄准误差的关系与高斯函数很接近, 为方便得到接收光功率的概率分布, 可用如下高斯函数来拟合式(3)表示耦合效率:

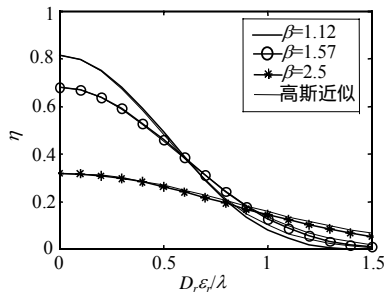


图1 瞄准误差对耦合效率的影响

$$\begin{cases} \eta \approx \frac{2(1 - e^{-\beta^2})^2}{\beta^2} \exp\left(-2\left(\frac{D_r \varepsilon_r}{\lambda W(\beta)}\right)^2\right) \\ W(\beta) = \exp(-0.16 + 0.11\beta^2) \quad \beta < 2.5 \end{cases} \quad (4)$$

其近似程度如图1中点线所示。

2 瞄准误差引起的突发误码率

将发射激光束近似为高斯分布, 光束半宽为 w_t (远场发散角), 则在距离为 L 的接收平面上偏离发射光束中心位置 $L\varepsilon_t$ 处, 接收天线接收到的光功率为:

$$P_r = P_t \frac{\eta_t \eta_r}{2L^2} \frac{D_r^2}{w_t^2} \exp(2\varepsilon_t^2 / w_t^2) \quad (5)$$

式中 ε_t 为发射端瞄准误差; P_t 为发射激光功率; η_t 、 η_r 为发射天线及接收天线效率。

令:

$$y = \left(\frac{\varepsilon_t}{w_t}\right)^2 + \left(\frac{D_r \varepsilon_r}{\lambda W(\beta)}\right)^2 \quad (6)$$

于是耦合进单模光纤的光功率可表示为:

$$P_c(y) = \eta P_r = \frac{\eta_t \eta_r P_t}{2L^2} \frac{2D_r^2 (1 - e^{-\beta^2})^2}{w_t^2 \beta^2} \exp(-2y) \quad (7)$$

设发射端及接收端的径向瞄准误差 ε_t 、 ε_r 相互独立, 它们在 x 和 y 方向的瞄准误差分量满足等标准差 σ_t 、 σ_r 的正态分布, 则 ε_t 、 ε_r 为瑞利分布随机变量, 概率密度函数为:

$$\begin{cases} f(\varepsilon_t) = \frac{\varepsilon_t}{\sigma_t^2} \exp\left(-\frac{\varepsilon_t^2}{2\sigma_t^2}\right) \\ f(\varepsilon_r) = \frac{\varepsilon_r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{\varepsilon_r^2}{2\sigma_r^2}\right) \end{cases} \quad (8)$$

根据概率论, 可由 ε_t 、 ε_r 的概率分布, 求出式(6)中变量 y 的概率密度函数为:

$$f(y) = \begin{cases} (e^{-y/a_t} - e^{-y/a_r}) / (a_t - a_r) & a_t \neq a_r \\ ye^{-y/a_t} / a_t^2 & a_t = a_r \end{cases} \quad (9)$$

式中 $a_t = 2\sigma_t^2 / w_t^2$; $a_r = 2\sigma_r^2 / (W(\beta)\lambda / D_r)^2$ 。当 $a_t = a_r$ 时, y 的分布为自由度为4的 χ^2 分布。

设在正常通信的情况下, 接收端所需的最小接收光功率为 P_{th} , 则系统突发误码率为:

$$P_E^* = \text{Probability}(P_c(y) < P_{th}) \quad (10)$$

令 $\gamma = \frac{\lambda\sqrt{\eta_t\eta_r}}{(L\sigma_t\sigma_r)} \frac{P_t}{P_s} \frac{1 - \exp(-\beta^2)}{\beta} \frac{(D_r\sigma_r/\lambda)}{(w_t/\sigma_t)}$, 其中 w_t/σ_t 表示归一化发射光束宽度; $D_r\sigma_r/\lambda$ 表示归一化接收天线直径。则可得突发误码率为:

$$P_E^* = \begin{cases} (a_t\gamma^{-1/a_t} - a_r\gamma^{-1/a_r}) / (a_t - a_r) & a_t \neq a_r \\ (1 + (\ln \gamma) / a_t) \gamma^{-1/a_t} & a_t = a_r \end{cases} \quad (11)$$

根据上式, 可在给定发射端、接收端的单轴瞄准精度 σ_t 、 σ_r , 突发误码率 P_E^* 的条件下, 优化 w_t/σ_t 、 $D_r\sigma_r/\lambda$ 、 β 等参数使所需的发射功率 P_t 最小, 或在给定瞄准精度, 天线直径及突发误码率下, 优化发射光束宽度及空间光耦合参数使所需的发射功率最小。

定义瞄准误差及接收端空间光耦合引起的光功率损耗为: 耦合进单模光纤中的光功率 $P_c(y)$ 与发射端正对准接收端时接收天线平面所接收的光功率 $P_r(\varepsilon_t = 0)$ 之比: $L_{p,c} = P_c(y) / P_r(\varepsilon_t = 0)$ 。

3 仿真结果

根据式(11), 对在不同突发误码率要求下的归一化发射光束宽度 w_t/σ_t , 归一化接收天线直径 $D_r\sigma_r/\lambda$ 及耦合参数 β 进行了优化, 如表1所示。不同突发误码率要求下, 最优耦合参数 β 值均为1.57左右, 而最优发射光束宽度随突发误码率要求的减小而增大, 最优接收天线直径随突发误码率要求的减小而减小。最优接收天线直径表示在该尺寸时所需的发射功率已达到最小, 继续增加天线直径并不能降低对发射功率的要求(假设瞄准精度 σ_t 、 σ_r 不变)。在该最优条件下, 由瞄准误差及接收端光耦合引起的功率损耗为10.36 dB左右, 此时在发射端、接收端正对准时($\varepsilon_t = 0, \varepsilon_r = 0$), 由接收端光耦合引起的静态耦合损耗为1.68 dB, 比 $\beta = 1.12$ 时的0.9 dB的耦合损耗增加约0.78 dB, 而由瞄准误差引起的动态功率损耗约为8.68 dB。当系统工作在此状态下时, 式(9)中有 $a_t \approx a_r$ 。

表1 前置光放大卫星激光通信系统的最优参数

突发误码率	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
w_t/σ_t	3.64	4.30	4.84	5.30
$D_r\sigma_r/\lambda$	0.31	0.26	0.23	0.21
β	1.57	1.57	1.57	1.57
$L_{p,c}/\text{dB}$	10.36	10.36	10.36	10.36

提高瞄准精度, 则采用更窄的发射光束及更大的接收天线直径, 可降低对发射光功率的要求。但天线直径越大, 卫星的功耗及体积也越大。为降低卫星的功耗、体积、成本, 在一般卫星激光通信系统中, 发射、接收天线直径一般不超过0.25~0.3 m, 因而在更普遍的情况下, 系统并不会工作在表1的状态下。图2所示为在接收端瞄准精度 σ_r 不变的条件, 接收天线直径变化对所需发射功率的影响, 此时最优发射光束宽度及最优 β 值应根据式(11)重新优化。从图中可以看出, 在对准精度不变的情况下, 随着接收天线直径的增大, 通过增加接收天线直径的方式所获得的光功率增益逐渐减弱, 当接收天线直径超过表1中的值后, 继续增大接收天线直径, 并不能使所需的发射功率更低。由于小的接收天线对降低卫星通信系统的功耗和成本非常重要, 因此接收天线直径可以比表1中的值适当小一些。

图3、4所示为发射光束宽度, 空间光耦合参数 β 偏离最优值对所需发射功率的影响。当 $D_r\sigma_r/\lambda \rightarrow 0$ 时, 最优 $\beta \rightarrow 1.12$, 随着 $D_r\sigma_r/\lambda$ 的逐渐增大, 最优 β 值增大, 当 $D_r\sigma_r/\lambda$ 达到表1中的值时, 最优 β 值为1.57, 由于使 $D_r\sigma_r/\lambda$ 比表1中的值更大的 D_r 并不能降低对发射功率的要求, 因此 β 的最优值在1.12~1.57之间。

图5所示为接收端空间光耦合引起的耦合损耗, 它为考虑空间光耦合时的所需的最小发射功率, 与不考虑空间光耦合时所需的最小发射功率之比。注意在这两种情况下最优发射光束宽度是不同的, 考虑空间光耦合时最优发射光束宽度更窄, 由图5可更全面地比较前置光放大接收与直接光电探测接收的灵敏度优势。 $D_r\sigma_r/\lambda$ 越小, 空间光耦合损耗越小, 但最低耦合损耗为0.9 dB, 当 $D_r\sigma_r/\lambda < 0.1$ 时, 由接收端瞄准误差引

起的耦合损耗已经可以忽略(约0.2 dB), 继续提高接收端瞄准精度对系统性能改善不大。而当 $D_r \sigma_r / \lambda > 0.2$ 时, 由接收端瞄准误差引起的耦合损耗将会迅速增加, 为充分发挥前置光放大接收的灵敏度优势, 最好使 $D_r \sigma_r / \lambda < 0.15 \sim 0.2$ 左右。如取波长 $1.55 \mu\text{m}$, 接收天线直径 20 cm , 则 $D_r \sigma_r / \lambda < 0.15$ 对应的单轴瞄准精度 σ_r 约 $1.2 \mu\text{rad}$ 。

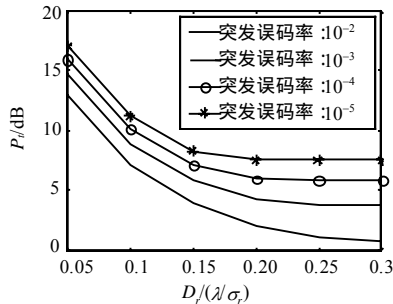


图2 接收天线直径对所需发射功率的影响

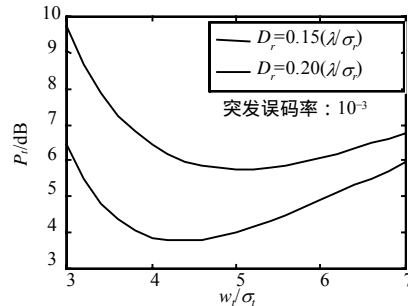


图3 发射光束宽度对所需发射功率的影响

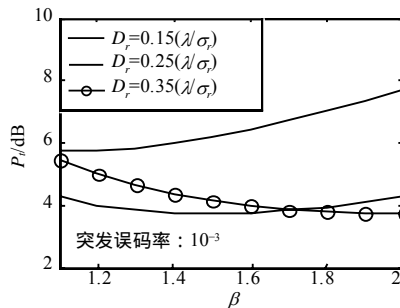
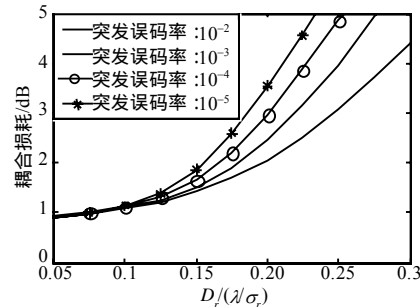
图4 耦合参数 β 对所需发射功率的影响

图5 接收端的空间光耦合损耗

4 结 论

本文在考虑接收端瞄准误差引起的空间光到单模光纤的耦合损耗的条件下, 根据突发误码率原则建立了带前置光放大的卫星激光通信系统的优化模型。研究表明, 在给定的瞄准误差条件下, 存在一个最优发射光束宽度, 接收天线直径及空间光耦合参数使所需发射功率最小。根据本文的结果可以更准确地比较空间光通信中前置光放大接收与直接光电探测接收的性能。

参 考 文 献

- [1] Barry J D, Mecherle G S. Beam pointing error as a significant design parameter for satellite-borne, free-space optical communication systems [J]. Opt.Eng, 1985, 24(6): 1 049-1 054.
- [2] 张秉华, 熊金涛, 胡 渝. 光通信中光束瞄准的误差分析[J]. 电子科技大学学报, 1998, 27(5): 478-481.
- [3] Toyoshima M, Jono T, Nakagawa K, et al. Optimum intersatellite link design in the presence of random pointing jitter for free-space laser communication systems [C]//SPIE, Sanjose 2002, 4 635:95~102.
- [4] Polishuk A, Arnon S. Optimization of laser satellite communication system with an optical preamplifier [J]. J. Opt. Soc.Am. A, 2004, 21(7): 1 307-1 315.
- [5] Wallner O, Winzer P J, Leeb W R. Alignment tolerances for plane wave to single-mode fiber coupling and their mitigation by use of pigtailed collimators [J]. Appl.Opt, 2001, 41: 637-643.

编 辑 孙晓丹