

用于激光雷达的相干合成光束研究*

连天虹[†] 王石语 过 振 李兵斌 蔡德芳 文建国

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2010年12月21日收到; 2011年8月10日收到修改稿)

提高激光雷达对空间小目标探测能力的重要手段是增大发射到目标上的光强, 激光相干合成是在目标上获得较大光强的有效途径. 为了评价相干光束在目标上的合成效果, 引入了适合空间小目标探测的相干合成效果评价参数(合成效果因子), 在此基础上讨论了光束相干合成效果的影响因素. 研究表明: 合成效果因子随合成光束束腰间距的增大呈周期振荡变化, 振荡幅度逐渐减小; 达到理想合成效果需要的光束传输距离随光束间距的增大而增加, 这对设计相干合成系统光束束腰间距具有参考意义. 同时, 还研究了光束的相位控制精度与合成效果之间的关系. 结果表明: 当相位控制精度达到 $\pi/4$ 时, 合成效果可以达到理想效果的 80%; 当相位控制精度为 $\pi/2$ 时, 合成效果降为理想效果的 50%. 研究还表明, 激光偏振方向不平行对合成效果的影响不明显.

关键词: 相干合成, 激光雷达, 合成效果**PACS:** 42.60.Jf, 42.25.Hz, 42.62.-b

1. 引言

激光雷达对空间小目标的探测在军事领域具有重要意义. 提高对远距离小目标的探测能力是这类雷达的重要发展方向. 分析发现, 发射到目标上的光强是影响激光雷达对空间小目标探测能力的一个重要因素, 激光束相干合成是提高目标上光强的有效手段.

激光束的相干合成是近几年激光领域的一项热门技术^[1-4]. 光束的空间相干合成是指多束相同波长的光束在空间叠加, 由于干涉效应, 可能在目标上获得大的光强^[5]. 本文对影响相干合成效果的主要因素进行了研究, 目的是为相干合成光束的设计提供参考, 以便在空间远距离小目标上获得较大光强, 提高激光雷达对空间小目标的探测能力.

2. 激光雷达对空间远距离小目标的探测

激光雷达为了发现空间的小目标, 通常以一定的步长对空间的某个区域进行扫描搜索. 在扫描过程中, 向搜索位置同步发射激光脉冲, 若该方向有

目标存在, 则有反射光返回, 雷达通过探测反射光发现目标.

在激光雷达探测中, 光接收机接收到的回波功率可以表示为^[6]

$$P_r = \frac{AT}{\Omega_r z^2} R \int_S I_1(s, z) ds, \quad (1)$$

式中 P_r 是接收到的激光功率, A 是接收孔径面积, z 是激光雷达与目标间的距离, Ω_r 是反射光束立体角, T 是单程大气传输系数, S 是目标面积, R 是目标的反射率, $I_1(s, z)$ 是距离为 z 的目标上位置 s 处的光强, $\int_S I_1(s, z) ds$ 为发射到目标上的激光总功率.

图 1 所示为激光束照射远距离小目标对其进行探测. 由于激光光斑远大于目标, 因而目标上的光强可以看成是均匀的. 将目标上的光强用 I_1 表示, (1) 式可简化为

$$P_r = \frac{AT}{\Omega_r z^2} R S I_1. \quad (2)$$

(2) 式是在远距离小目标情况下光接收机接收到的激光功率表达式. 由 (2) 式可知, 对远距离小目标的探测, 影响接收激光功率的一个重要因素是照射到目标上的光强. 要提高激光雷达对远距离小目标的探测能力, 一个重要途径是增大发射到目标上的

* 固体激光国家重点实验室基金(批准号: 51438010201DZ01)资助的课题.

[†] E-mail: tianhongl@126.com

光强.

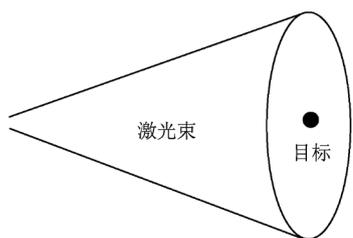


图1 激光束照射小目标

3. 合成效果的评价参数

提高目标上光强的一个重要方法是利用多束相干激光进行相干合成,目前对相干合成效果的评价尚没有统一的标准,只能根据不同的应用目的选取适当的评价参数.在文献[7]中,用光束质量因子评价相干合成效果.光束质量因子可表示为 $\eta = 1.19P_{in}/P_{total}$.这里 P_{in} 是远场半径为 $1.22\lambda z/D$ 大小的桶中功率,其中 λ 为光波长, D 为光束发射孔径的最小外接圆直径; P_{total} 为参与合成光束的总功率.光束质量因子反映的是合成光束在用瑞利判据得到的衍射极限桶中的能量与总能量之比,在能量传输、耦合型的应用场合评价合成效果是合适的.但是,相干合成技术中的光束数、排列形式、光束传播方向等具有很大的灵活性,我们可以利用这种灵活性获得不同光强分布的光束,以满足不同的应用需要.例如,可以通过光束相干合成获得光强在空间周期分布的光学格子,用于光子晶体的制备^[8].对这类非能量传输、耦合型的应用,用光束质量因子评价合成效果就显得不妥当.

将相干合成光束应用于激光雷达对空间小目标探测的目的是提高目标上的光强,从而提高对远距离小目标的探测能力,所以本文用合成效果因子评价合成效果.定义实际合成的峰值光强 I_{max} 与理想合成的峰值光强 I_0 之比为合成效果因子,即

$$\beta = I_{max}/I_0. \quad (3)$$

β 的取值在 0 到 1 之间, β 越大,合成效果越好.对于 N 束完全相同的激光,若各光束的峰值光强均为 I ,则 N 束光相干合成后,该处的理想峰值光强 I_0 为 $N^2 I$,合成效果因子为

$$\beta = \frac{I_{max}}{N^2 I}. \quad (4)$$

相干合成技术中光束在空间上的重叠有赖于

光束传输过程中的发散特性,光束传输一定距离后才能空间充分重叠.光束在多远距离处能够充分重叠产生明显的相干合成是重要的,故引入合成距离 L 用以描述产生明显相干合成所需要的距离.合成距离 L 定义为合成效果因子 β 达到一定值 $\delta(0 < \delta \leq 1$,具体取值视实际应用情况而定)所需要的传输距离.

4. 计算模型

如图 2 所示,假设 9 束完全相同的基模高斯光束的束腰在 xOy 平面以对称性较好的正方形形状排布,束腰半径为 ω_0 ,束腰中心间距为 d ,各光束均沿 z 方向传输.各光束在 (x, y, z) 处的光场可以表示为^[9]

$$E_n(x, y, z) = C \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}{\omega^2(z)}\right) \times \exp\left(-i\left(k\left(\frac{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}{2R(z)} + z\right) - \psi + \phi_{n0}\right)\right) \quad (n = 1, 2, \dots, 9). \quad (5)$$

这里 C 是常数因子; k 是波数,

$$k = 2\pi/\lambda;$$

$\omega(z)$ 是输距离为 z 处的光斑半径,

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2},$$

其中 f 是高斯光束的共焦参数,

$$f = \pi\omega_0^2/\lambda;$$

$R(z)$ 是 z 处的高斯光束等相位面曲率半径,

$$R(z) = z + f^2/z;$$

ψ 是高斯光束在空间传输距离为 z 时相对于几何相移产生的附加相移,

$$\psi = \arctan(z/f);$$

ϕ_{n0} 是初相位; (x_n, y_n) 是光束束腰中心坐标.相干合

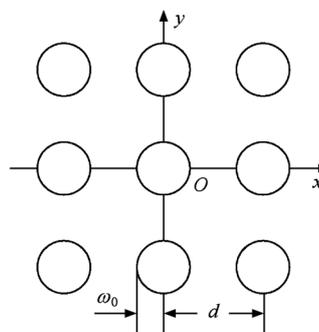


图2 光束束腰排布阵列

成中光束的叠加为光场的叠加, 叠加后的总光场可以表示为

$$E_{\text{total}}(x, y, z) = \sum_n E_n(x, y, z). \quad (6)$$

相干合成光强为^[10]

$$I_{\text{total}}(x, y, z) = \langle E_{\text{total}}(x, y, z) E_{\text{total}}^*(x, y, z) \rangle_t, \quad (7)$$

式中 $\langle \cdot \rangle_t$ 表示对时间求平均.

5. 计算结果及讨论

下面用(5)–(7)式计算合成光束的光强分布, 进而计算合成效果因子. 主要讨论阵列中光束排列间距对合成效果和合成距离的影响以及相位控制精度和偏振方向不平行对合成效果的影响.

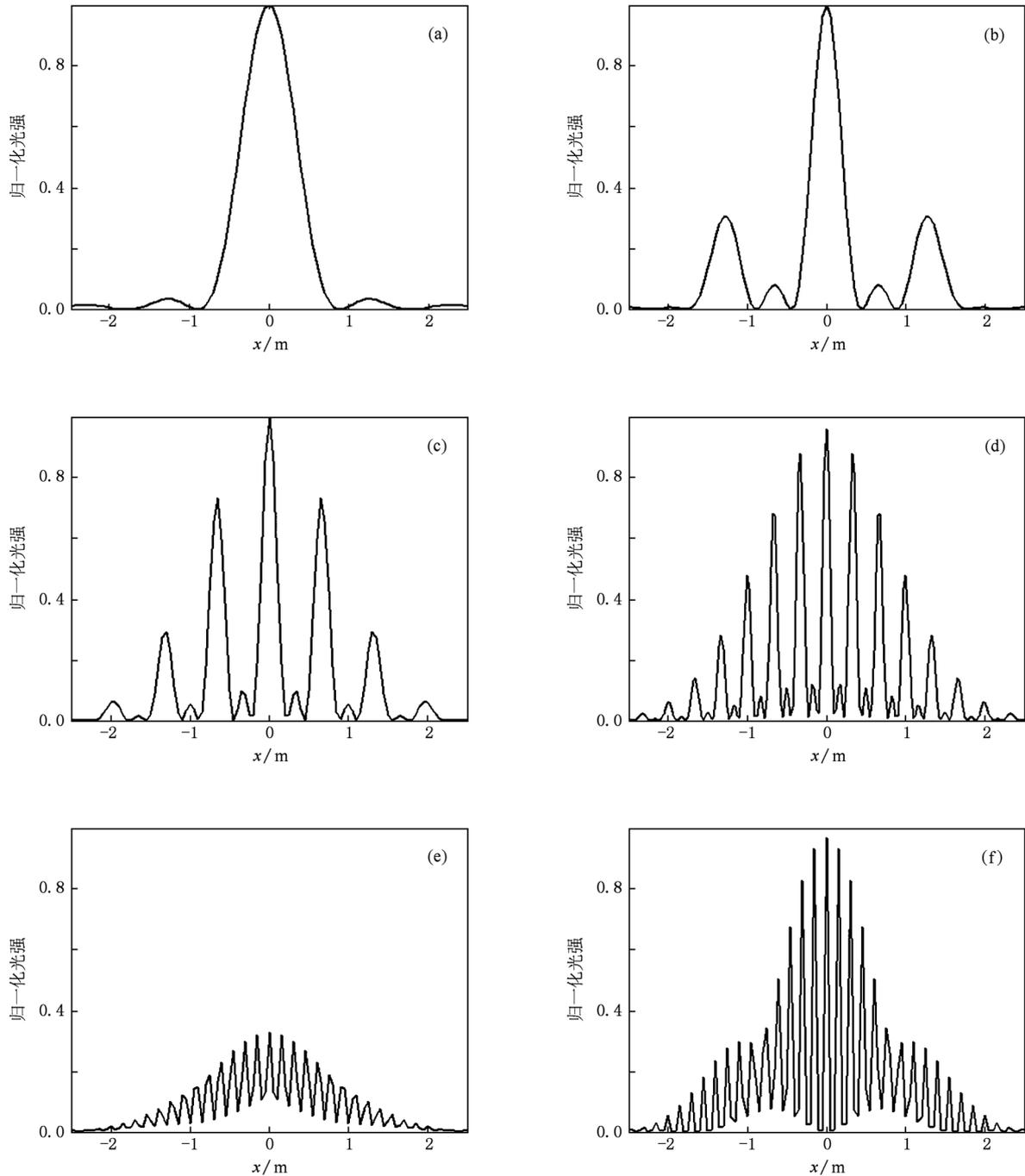


图3 相对光束间距 τ 取不同值时 x 方向的光强分布 (a) $\tau=1$, (b) $\tau=2$, (c) $\tau=4$, (d) $\tau=8$, (e) $\tau=18$, (f) $\tau=36$

5.1. 光束排列间距对合成效果的影响

在讨论光束排列间距对合成效果的影响时,不考虑初相位的影响($\phi_{i0} = 0$),此时(7)式中对时间求平均的运算可以不考虑. 用相对光束间距 $\tau(\tau = d/2\omega_0, \tau \geq$

1) 描述光束排列间距,相关参数的取值如下: $C = 1, \lambda = 1064 \text{ nm}, \omega_0 = 2 \text{ mm}, z = 10 \text{ km}$. 由于光强分布是关于 x, y 轴对称的,下面只给出 x 方向的光强分布和二维光强分布. 图3是相对光束间距 $\tau = 1, 2, 4, 8, 18, 36$ 时 x 方向的光强分布,图4是相应的二维光强分布.

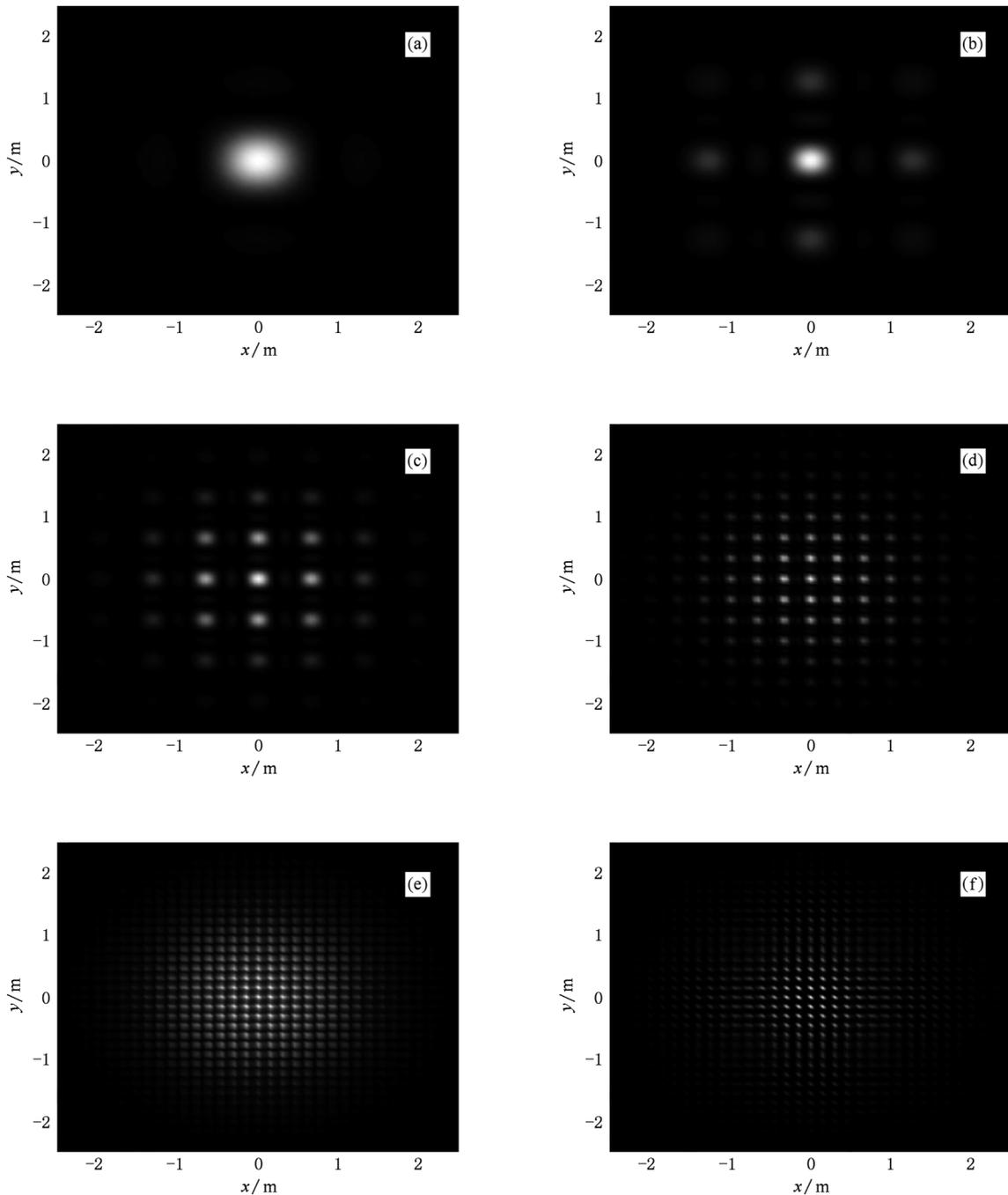


图4 相对光束间距 τ 取不同值时光束二维光强分布 (a) $\tau = 1$, (b) $\tau = 2$, (c) $\tau = 4$, (d) $\tau = 8$, (e) $\tau = 18$, (f) $\tau = 36$

从图3和图4可以看出:光束在远场相干合成后产生了若干个光强极大峰. 光束间距较小时,能得到明显的主峰,在目标上能获得很大的光强;随

着光束间距的增大,侧峰增加,主峰变窄,峰值光强减小,当相对光束间距增大到18时,无明显主峰,一维光强分布呈梳状形式,二维光强分布呈点阵形

式. 当相对光束间距增大至 36 时, 峰值光强又变大, 但此时主峰变得很窄, 有众多侧峰出现.

上述结果对激光雷达的相干合成光束设计具有重要意义. 在激光雷达应用中, 要用相干合成光束的主峰照射目标, 根据图 3 和图 4 所反映的规律, 设计中应尽量减小光束间距, 以获得比较宽的主峰. 这是因为激光雷达探测目标时要对目标可能存在的区域进行扫描, 为了确保扫描过程中不会遗漏目标, 扫描的空间步长不能大于光斑尺寸. 光斑越大, 扫描步长就可以越大, 扫描效率就越高; 主峰越窄, 激光雷达空间扫描的步长就越小, 在一定时间内的扫描范围就越小. 当相对光束间距 $\tau = 36$ 时合成光束主峰很窄, 扫描效率很低. 实际设计中应使光束间距尽可能小.

图 5 为合成效果因子 β 随相对间距 τ 的变化.

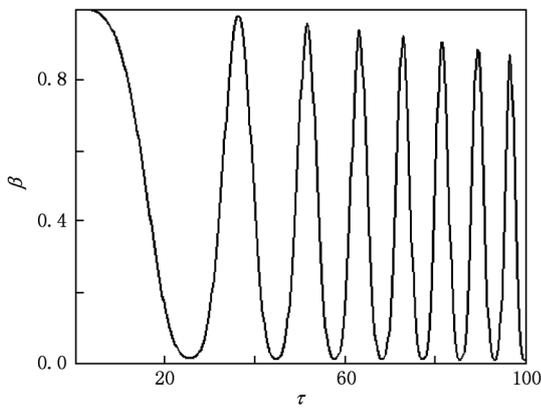


图 5 合成效果因子 β 随光束相对间距 τ 的变化

从图 5 可以看出, 合成效果因子随相对光束间距的增大呈周期性振荡变化, 振荡幅度逐渐减小. 产生这种现象的原因如下: 随着光束间距的增大, 各光束在中心点处的相位差周期性变化而产生相长或相消干涉, 而高斯光束沿横向光强的减小使光束间距增大时合成的峰值光强有减小的趋势, 总的效果是合成光束的峰值光强随光束间距的增大呈周期性振荡变化, 振幅逐渐减小. 相对光束间距较小时振荡周期比较大, 相对光束间距越大振荡周期越小. 将光束间距设计在周期比较大的区域, 系统比较稳定, 最好的选择是将相对光束间距设计在第一周期的峰值处.

5.2. 光束排列间距对合成距离的影响

图 6 所示为相对光束间距 $\tau = 5, 10, 20$ 时合成效果因子 β 随探测距离 z 的变化.

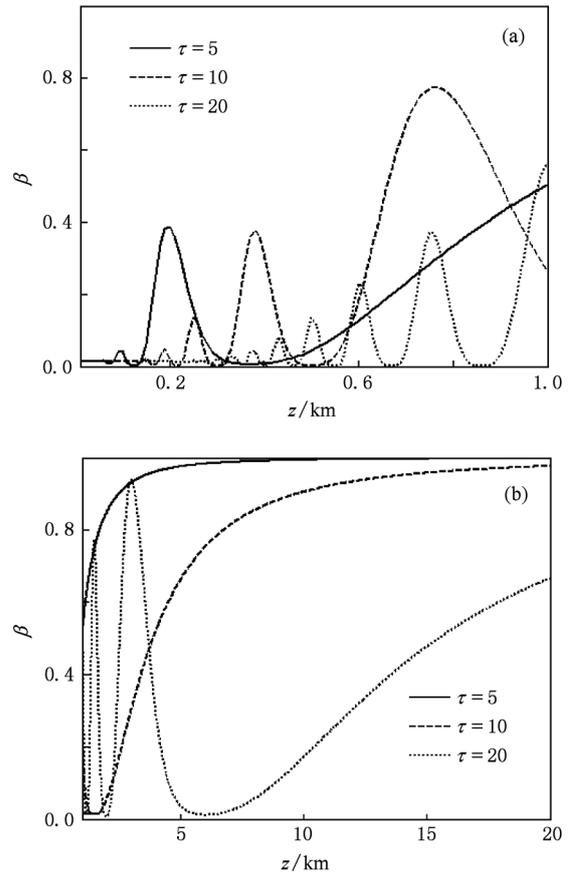


图 6 合成效果因子 β 随探测距离 z 的变化 (a) $z = 0-1$ km, (b) $z = 1-20$ km

从图 6(a) 可以看出, 当探测距离较小时, 合成效果因子随探测距离的增大呈振荡变化, 随着探测距离的增大, 最终趋近于理想值 1, 如图 6(b) 所示. 取合成效果因子 β 稳定达到 0.8 所需要的传输距离为合成距离 L , 图 7 是合成距离 L 随相对光束间距 τ 的变化.

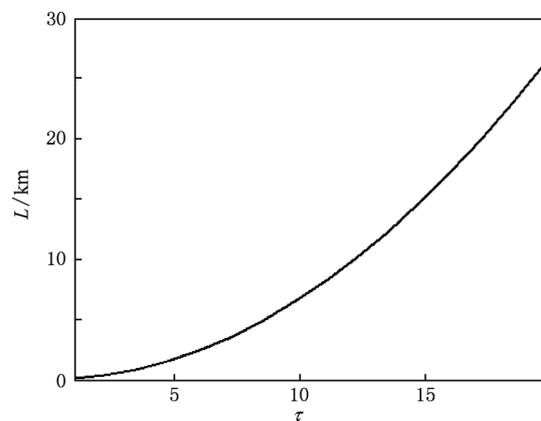


图 7 合成距离 L 随相对光束间距 τ 的变化

要在一定的探测距离处获得较好 ($\beta \geq 0.8$) 的合成效果, 可从图 7 中得到相对光束间距的取值. 在实际设计中, 可根据探测距离利用图 7 所示曲线确定所要求的光束间距范围.

5.3. 相位控制精度对合成效果的影响

相干合成系统中要对激光束的相位进行控制^[11], 使同一垂直面内各光束相位相同. 下面分析相位控制精度对相干合成效果的影响.

假定各光束的初相位 ϕ_{m0} 在相位控制精度 σ 内随机取值, 并在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 上服从均匀分布. (7) 式中对时间求平均值的运算是通过对不同相位下的光强求平均值实现的. 图 8 是相对光束间距 $\tau = 2$, 相位控制精度 $\sigma = \pi/10, \pi/2, \pi$ 时 x 方向的光强

分布, 图 9 是相应的二维光强分布.

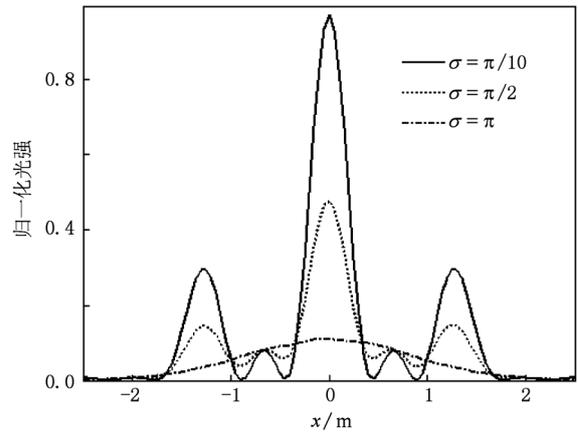


图 8 相位控制精度 σ 取不同值时 x 方向的光强分布

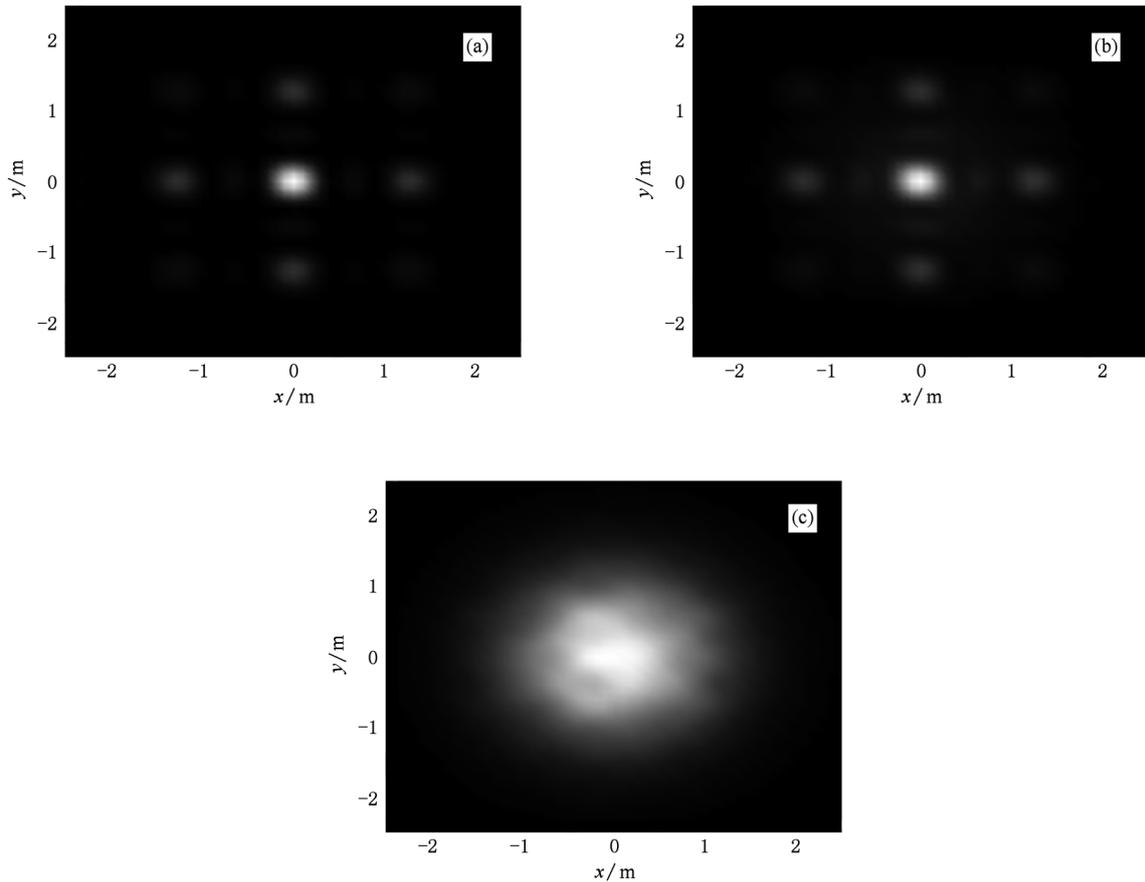


图 9 相位控制精度 σ 取不同值时二维光强分布 (a) $\sigma = \pi/10$, (b) $\sigma = \pi/2$, (c) $\sigma = \pi$

合成效果因子 β 随相位控制精度 σ 的变化如图 10 所示.

从图 10 可以看出: 相位控制精度不同时, 合成

效果因子变化很大. 要使合成效果因子达到 0.8, 相位控制精度需要达到 $\pi/4$; 相位控制精度为 $\pi/2$ 时, 合成效果因子能达到 0.5; 当相位控制精度为 π , 即

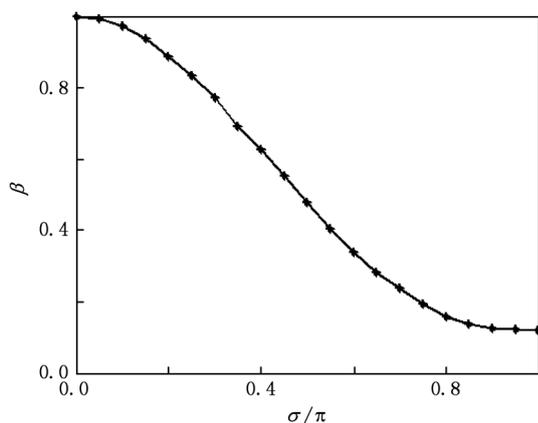


图 10 合成效果因子 β 随相位控制精度 σ 的变化

不进行相位控制时,合成效果因子约为 0.1. 从相位控制精度为 π 时的光强分布图上也观察不到干涉条纹. 这是由于此时各光束间相干效应程度减弱,干涉效果变得不明显,光束叠加已经由相干合成过渡到了非相干合成.

5.4. 偏振方向对合成效果的影响

光的干涉条件要求光束的偏振方向平行才能产生明显的干涉现象. 在以上讨论中,没有考虑光束偏振方向不平行对合成效果的影响. 在实际相干合成系统中,由于各种因素的影响,光束的偏振方向不能完全平行^[12]. 下面讨论光束偏振方向不平行对相干合成效果的影响.

假设参与合成的光束均是线偏振光,偏振方向在 uOv 面内,第 n 束光的偏振方向与 u 轴的夹角为 θ_n ,如图 11 所示. 将光束的光场矢量沿 u 轴和 v 轴作分解,第 n 束光的光场矢量在 u, v 方向的分量分别为 $E_n \cos \theta_n, E_n \sin \theta_n$. 分解后,可用(6)式求得 u, v 方向上各自的总光场. 同方向上的光场进行相干叠加,可用(7)式分别计算 u, v 方向上光场的光强 I_u, I_v . 总光强为 I_u, I_v 的非相干叠加,即

$$\begin{aligned}
 I_{\text{total}}(x, y, z) &= I_u(x, y, z) + I_v(x, y, z) \\
 &= \sum_n [E_n(x, y, z)E_n(x, y, z)^*] \\
 &\quad + \sum_{m \neq n} [E_m(x, y, z)E_n(x, y, z)^*] \\
 &\quad \times \langle \cos(\theta_m - \theta_n) \rangle_t. \quad (8)
 \end{aligned}$$

各光束的偏振方向通常是在 Θ 范围内随机分布的,假设 θ_n 在 $[0, \Theta]$ 上服从均匀分布. 当 $\Theta = 0$

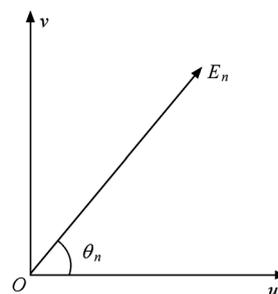


图 11 光束偏振方向

时,各光束偏振方向完全平行;当 $\Theta = \pi/2$ 时, θ_n 在 $\pi/2$ 角度内随机均匀分布. 计算时,(8)式中对时间求平均值的运算是通过对不同 θ_n 取值下的光强求平均值实现的. 图 12 是光束偏振方向分布范围 $\Theta = \pi/10, \pi/4, \pi/2$ 时 x 方向的光强分布,图 13 是相应的二维光强分布.

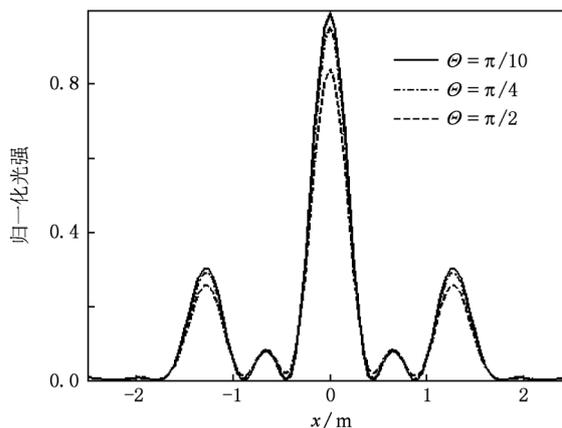


图 12 光束偏振方向分布范围 Θ 取不同值时 x 方向的光强分布

图 14 是合成效果因子 β 随光束偏振方向分布范围 Θ 的变化.

从图 12 和图 13 可以看出,光束偏振方向分布在不同的范围时,合成光束光强分布变化不明显. 从图 14 可以看出,当参与合成光束的偏振方向在 $\pi/2$ 角度内随机分布时,也能获得 0.8 以上的合成效果因子,说明光束偏振方向不平行对相干合成效果影响不明显. 光束偏振方向不平行不会对目标上的光强产生很大影响,将相干合成光束应用于激光雷达探测时,偏振方向不平行不是影响雷达探测能力的主要因素.

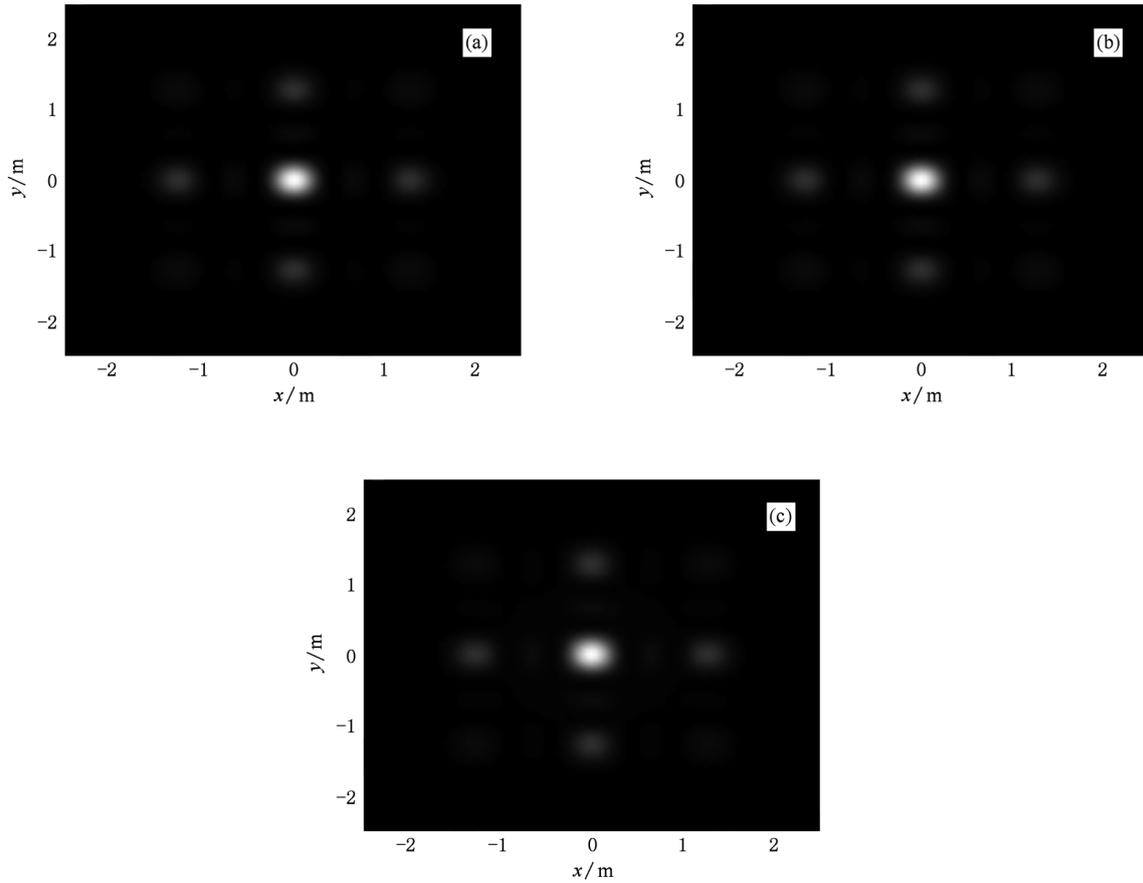


图 13 光束偏振方向分布范围 θ 取不同值时二维光强分布 (a) $\theta = \pi/10$, (b) $\theta = \pi/4$, (c) $\theta = \pi/2$

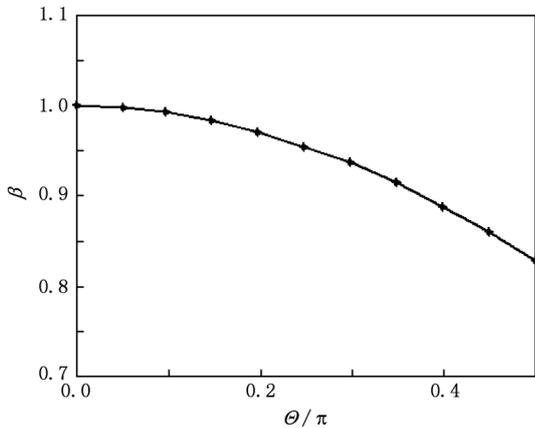


图 14 合成效果因子 β 随光束偏振方向分布范围 θ 的变化

6. 结 论

本文分析了影响激光雷达对空间小目标探测能力的主要因素,发现影响激光雷达对空间小目标探测能力的一个重要因素是发射到目标上的光强,

激光束相干合成是提高目标上光强的有效手段. 进一步分析了影响相干合成效果的主要因素,以便为相干合成光束的设计提供参考,以达到提高激光雷达对空间小目标探测能力的目的. 引入了适合空间小目标探测的合成效果评价参数——合成效果因子,讨论了光束间距对合成效果和合成距离的影响,同时还讨论了相位控制精度和光束偏振方向不平行对合成效果的影响. 在一定的探测距离上,合成效果因子随相对光束间距的增大呈周期性振荡变化,振荡幅度逐渐减小;合成效果因子随探测距离的增大最终趋向于理想值 1,给出了合成距离随相对光束间距的变化关系. 在假定各光束的相位在控制精度内随机变化并服从均匀分布的情况下,给出了合成效果因子随相位控制精度的变化关系. 要使合成效果因子达到 0.8,相位控制精度需要达到 $\pi/4$,当相位控制精度为 $\pi/2$ 时,合成效果因子为 0.5,要提高激光雷达的探测能力,必须提高相干合成系统的相位控制精度. 光束偏振方向不平行对合成效果影响不明显,不是影响雷达探测能力的主要因素.

- [1] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 853 (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福 2008 物理学报 **57** 853]
- [2] Jia X J, Liu F N, Fu S G, Liu Y G, Yuan S Z, Dong X Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 2993
- [3] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Ma H T, Xu X J, Liu Z J, Zhao Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5474 (in Chinese) [王小林、周朴、马阎星、马浩统、许晓军、刘泽金、赵伊君 2010 物理学报 **59** 5474]
- [4] Wang J M, Duan K L, Wang Y S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5627 (in Chinese) [王建明、段开棕、王屹山 2008 物理学报 **57** 5627]
- [5] Fan T Y 2005 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11** 567
- [6] An Y Y, Zeng X D 2004 *Principles of Photoelectric Detection* (Xi'an: Xidian University Press) pp7,8 (in Chinese) [安毓英、曾晓东 2004 光电探测原理 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第7, 8 页]
- [7] Liu Z J, Zhou P, Xu X J 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 773 (in Chinese) [刘泽金、周 朴、许晓军 2009 中国激光 **36** 773]
- [8] Lei M, Yao B L 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 757 (in Chinese) [雷铭、姚保利 2006 光学学报 **26** 757]
- [9] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, Chen J H 2004 *Principles of Lasers* (4th ed) (Beijing: Defense Industry Press) pp69, 70 (in Chinese) [周炳琨、高以智、陈侗嵘、陈家骅 2004 激光原理 (第四版) (北京: 国防工业出版社) 第69, 70 页]
- [10] Lauterborn W, Kurz T, Wiesenfeldt M 1998 *Coherent Optics-Fundamentals and Applications* (Beijing: World Publishing Corporation) p32
- [11] Yang R F, Yang P, Shen F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8297 (in Chinese) [杨若夫、杨 平、沈 锋 2009 物理学报 **58** 8297]
- [12] Cao J Q, Lu Q S, Chen S P, Hou J, Xu X J 2009 *Opt. Lett.* **34** 133

A coherently combined laser beam for lidar*

Lian Tian-Hong[†] Wang Shi-Yu Guo Zhen Li Bing-Bin Cai De-Fang Wen Jian-Guo

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 21 December 2010; revised manuscript received 10 August 2011)

Abstract

A fundamental way to improve the ability of lidar to detect the small target far away is to increase the light intensity on it, and the coherent combination of laser beams is an effective way to obtain a large intensity on the target. A parameter named combining effect factor is introduced to evaluate the combining effect on small target. On this basis, the factors influencing combining effect are discussed. The combining effect factor becomes oscillatory as the spacing between the waists of laser beams increases, and its amplitude decreases gradually. The distance at which an ideal combining effect can be achieved increases with the increase of the spacing between the waists of laser beams, which is a reference for the determination of the spacing between the waists of laser beams in the design of coherent combining system. The dependence of combining effect on the phase control accuracy is also studied. The combining effect can reach 80 percent of its ideal value when the phase control accuracy reaches $\pi/4$, and the combining effect decreases to 50 percent of its ideal value when the accuracy is $\pi/2$. The influence of unparallel polarization direction between beams on combining effect is not very obvious.

Keywords: coherent combining, lidar, combining effect

PACS: 42.60.Jf, 42.25.Hz, 42.62.-b

* Project supported by the Foundation of National Key Laboratory of Solid-State Laser, China (Grant No. 51438010201DZ01).

[†] E-mail: tianhong@126.com