

相干测风激光雷达望远镜孔径及截断因子的优化分析

步志超, 郭 馨, 陈思颖, 张寅超, 陈 和, 陈胜哲, 葛宪莹

(北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100086)

摘 要: 基于相干多普勒测风激光雷达外差探测理论, 给出自由空间和光纤耦合两种模式下外差效率的解析表达式, 并通过参数替换使两者具有统一的形式; 结合此表达式以及湍流环境下的信噪比公式, 仿真给出了地基及星载相干测风激光雷达系统不同探测距离处的最优望远镜和截断因子。研究结果表明地基系统信噪比随着望远镜孔径变化比较陡峭, 存在最优望远镜孔径和截断因子, 如若取值不恰当, 会造成系统信噪比巨大损失; 而星载平台下回波信号的信噪比随着望远镜孔径先增加后保持平稳, 望远镜孔径可以综合成本和信噪比进行合理取值, 最优化的截断因子为 80%。此研究对相干多普勒测风激光雷达探测理论的发展及系统器件的最优化配置提供了重要的理论依据。

关键词: 相干测风激光雷达; 外差效率; 望远镜孔径; 截断因子

中图分类号: P412.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0694-06

Optimization analysis of telescope aperture and truncation factor of coherent LIDAR

Bu Zhichao, Guo Pan, Chen Siying, Zhang Yinchao, Chen He, Chen Shengzhe, Ge Xianying

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100086, China)

Abstract: Based on coherent Doppler LIDAR heterodyne detection theory, the heterodyne efficiency analytical expression under both free-space and fiber-coupled detect mode of the coaxial system were unified through the parameter substitution. Combined this formula with the signal-to-noise ratio under turbulent environment, the optimum values of the aperture and the truncation factor under different detection range were obtained for ground based and spaceborne system. The results show that the signal-to-noise ratio of the ground based LIDAR is relatively steep as the telescope aperture changes, the optimum truncation factor is 80% during the whole detect range, and if the aperture selected is not appropriate, it will cause losses of signal-to-noise huge in the system; For Spaceborne LIDAR the signal-to-noise ratio is first increased and then stable as the telescope aperture increased, the optimum telescope aperture can be balanced between the cost and signal-to-noise, and the optimum truncation factor is also 80%. The research has important theoretical significance and practical value both for the development of detection theory and optimal configuration of the coherent Doppler LIDAR.

Key words: coherent LIDAR; heterodyne efficiency; telescope aperture; truncation factor

收稿日期: 2013-07-20; 修订日期: 2013-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61178072); 气象局行业专项(GYHY201106002)

作者简介: 步志超(1985-), 女, 博士生, 主要从事测风激光雷达方面的研究。Email: buzhch@bit.edu.cn

导师简介: 张寅超(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光雷达方面的研究。Email: ychang@bit.edu.cn

0 引言

大气风场的精确性、持续性的测量对气象、飞行安全和数值天气预报等都具有很重要的意义。相干多普勒测风激光雷达作为一种高精度、高分辨率的风场遥感探测方法得到了广泛的研究和应用。

相干多普勒测风激光雷达早在上世纪70年代就已经出现,第一台相干多普勒测风激光雷达使用波长为10 μm的CO₂激光器^[1],系统非常庞大和笨重。固体激光器的发展带动了近红外波段相干探测系统的发展,探测方式也由原来的自由空间耦合探测^[1-2]发展到更加可靠的光纤耦合探测^[3-4],全光纤相干多普勒激光雷达系统也得到了广泛的研究应用。

相干测风激光雷达中望远镜孔径的优化选取是影响系统设计的关键因素。如果望远镜孔径太大,大于回波信号的相干面积,不仅会造成设计上的浪费,也会增加非相干信号带来的噪声;相反地,如果孔径太小,只能接收一部分回波信号,也会导致信噪比的损失。同时,望远镜的截断因子优化选取也是影响外差效率的重要因素,对输出激光束过小截断会造成输出能量的损失,而过大截断会降低外差效率,只有选择正确的截断因子,系统性能才会得到最大优化。国外已有文献分析了自由空间探测下湍流对望远镜孔径最优选取的影响^[5-6],但都没有考虑外差效率这个重要的影响因素。已有文献对望远镜截断因子进行最优分析^[7-8],但大都假定探测距离为无穷远,与实际某些相干测风激光雷达系统的探测距离能力不相符。此外,虽然现阶段光纤耦合模式逐渐成为发展趋势,相干测风激光雷达系统中光纤耦合模式下的外差效率和湍流对望远镜孔径选取的影响和对应的最优望远镜截断因子却鲜有研究报道。

文中针对自由空间和光纤耦合两种耦合模式,对最优望远镜孔径和截断因子进行了优化分析,推导了两种耦合模式下的外差效率公式,结合湍流下的信噪比,仿真给出地基及星载相干测风激光雷达的最优望远镜孔径取值和截断因子。此研究对相干多普勒测风激光雷达探测理论的发展及系统器件的最优化配置提供了重要的理论依据。

1 相干测风多普勒激光雷达系统信噪比和外差效率理论

相干测风激光雷达系统中,信噪比是衡量系统

性能的重要指标,而外差效率是信噪比中的一个重要参数,文中就基于信噪比和外差效率公式对望远镜孔径和截断因子进行分析和优化。

1.1 信噪比公式

量子探测极限下,相干测风激光雷达的信噪比可表示为信号平均功率与散粒噪声平均功率的比值,考虑湍流引起的相干度的衰减,信噪比公式为^[9]:

$$SNR = \frac{E_0 \eta \beta \lambda K^2 \pi D^2}{8hBR^2} \cdot \left[1 + \left(1 - \frac{R}{f} \right)^2 \left(\frac{\pi D^2}{4\lambda R} \right) + \left(\frac{D}{2S_0} \right)^2 \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: E_0 为出射激光的能量; η 为系统效率(包含光学透过率、探测器量子效率、退偏度、外差效率等); β 为气溶胶后向散射系数; λ 为激光的波长; K 为大气透过率; D 为望远镜的孔径; h 为普朗克常数; B 为系统的带宽; R 为大气探测距离; f 为望远镜的焦距(文中研究的望远镜系统聚焦在无穷远处); S_0 为横向相干长度^[9]:

$$S_0(R) = \left[Hk^2 \int_0^R C_n^2(R') \left(1 - \frac{R'}{R} \right)^{\frac{3}{5}} dR' \right]^{-\frac{3}{5}} \quad (2)$$

式中: H 为无量纲常数,其值近似为2.914383; C_n 是大气折射率结构常数,与温度、压力和湿度有关,湍流与大气的相互作用导致了这些参数的非均质变化,用于描述大气湍流的模型有很多,文中选取Hufnagel-Valley湍流模型^[10]进行横向相干长度数值计算。

1.2 外差效率公式

回波信号与本振信号的混频效率即为外差效率,根据Siegman^[11]的天线理论,信号光和本振光束的混频面可以选择在信号光传输过程中的任意界面而不仅仅是探测器接收面。为简化计算量,选择目标散射面为混频面,在极坐标系统下,外差效率可表示为^[9]:

$$\eta_{mix} = \frac{\lambda^2 R^2}{A} \left[2\pi \int_0^\infty I_{tx}(s, R) I_{nb}(s, R) s ds \right] \quad (3)$$

式中: A 是望远镜口径的有效面积; $I_{tx}(s, R)$ 、 $I_{nb}(s, R)$ 分别是发射激光和本振光在散射截面归一化后的光强分布。

将外差效率公式(3)代入信噪比公式(1)中,并去除与距离和望远镜孔径变化无关的量可以得到简化信噪比,即:

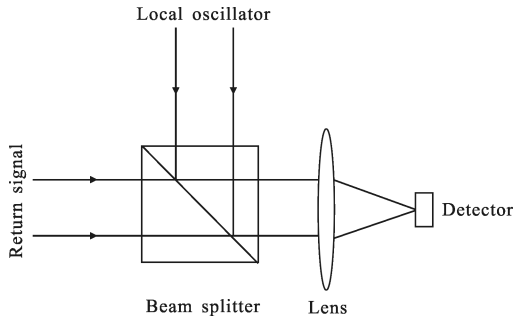
$$\text{SimpleSNR} \propto \frac{\eta_{mix} D^2}{R^2} \cdot \left[1 + \left(1 - \frac{R}{f} \right)^2 \left(\frac{\pi D^2}{4\lambda R} \right) + \left(\frac{D}{2S_0} \right)^2 \right]^{-1} \quad (4)$$

由公式(4)可以看出,一旦得到外差效率的解析

表达式, 就可以通过简化信噪比的优化得到最优的望远镜孔径和外差效率的信息, 下面首先对两种不同模式下的外差效率进行计算。

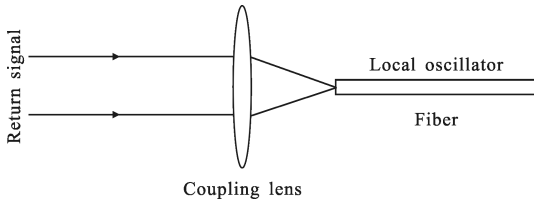
2 自由空间混频和光纤耦合后混频系统下的外差效率计算

对于相干多普勒测风激光雷达, 自由空间混频一般是指回波信号和本振光在分束器前相遇, 经聚焦透镜后汇聚到探测器的接收面(如图 1(a)所示); 光纤耦合混频是指回波信号和本振光分别耦合入光纤, 经 2×1 光纤耦合器进入探测器接收面, 由于单模光纤的特性, 本振光在光纤中电场分布与光纤基模分布相同, 光纤耦合混频也可以认为是回波信号耦合到光纤与光纤基模发生混频(如图 1(b)所示)。



(a) 自由空间模式

(a) Free-space detection



(b) 光纤耦合模式

(b) Fiber-coupled detection

图 1 外差探测原理图

Fig.1 Heterodyne detection diagram

2.1 自由空间外差效率计算

作者在参考文献[12]中对自由空间探测方式下同轴系统光束截断的外差效率进行了计算, 假定发射激光和本振光都为理想高斯光束, 经过望远镜截断, 在散射目标面发生相干探测, 并利用圆孔光阑函数展开为高斯函数相叠加的方法^[13], 给出了自由空间下的外差效率的解析表达式为:

$$\eta_{\text{mix}} = 128F^2C^2 \iint \left(\sum_{n=1}^N a_n \frac{1}{2(b_n+c-jF)} e^{-\frac{(2Fy)^2}{4(b_n+c-jF)}} \right)^2 dx dy \quad (5)$$

$$\left(\sum_{n=1}^N a_n \frac{1}{2(b_n+c-jF)} e^{-\frac{(2Fy)^2}{4(b_n+c-jF)}} \right)^2 dx dy \quad (5)$$

其中, 系数 a_n, b_n 为圆孔径函数展开的常系数; $F = \pi D^2/4\lambda R$ 为非涅耳数(F 数); $c = D^2/4\omega_T^2$, $x = r_0/\omega_T$, $y = r/\omega_T$, ω_T 是高斯光束的束腰半径; $b = D^2/4\omega_L^2$; ω_L 为本振激光的束腰半径。定义 $\rho_T = \frac{2\omega_T}{D}$ 为发射截断因子, $\rho_L = \frac{2\omega_L}{D}$ 为本振光截断因子, 参考文献[12]指出当本振高斯光束的束腰半径与发射激光高斯光束的束腰半径相同时, 外差效率取得极大值, 以后讨论中令 $\rho = \rho_T = \rho_L$ 。

2.2 光纤耦合外差效率计算

如图 1(b)所示, 光纤耦合系统与自由空间系统的区别在于混频的位置不同, 自由空间探测一般在耦合透镜的前表面混频, 而光纤耦合系统中在光纤端面发生混频。只需要计算出本振光在望远镜前的电场分布, 就可以按照自由空间探测相同的方法对光纤耦合系统进行外差效率计算。

已知本振光束在光纤中传播, 具有与光纤相同的基模形式, 束腰半径 ω_{Lo} 位于焦平面上, 归一化本振光的电场分布高斯基模分布为:

$$U_{Lo} = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_{Lo}^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_{Lo}^2}\right) \quad (6)$$

本振光经过后向传输到接收天线前表面时, 按照透镜变换理论电场分布变为:

$$U_{Lo} = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_{Lo,a}^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_{Lo,a}^2}\right) \quad (7)$$

其中 $\omega_{Lo,a} = \frac{\lambda f}{\pi\omega_{Lo}}$

从公式(7)可以看出, 望远镜前的电场仍然可以看成理想的高斯分布, 只是束腰中增加了耦合透镜的参数 f 和光纤基模束腰半径。

令 $a = \frac{d^2\pi^2\omega_{Lo}^2}{\lambda^2 f^2}$, 则易知当 $a = \frac{d^2\pi^2\omega_{Lo}^2}{\lambda^2 f^2} = c$ 时, 外差效率取得最大值, 光纤耦合混频下的外差效率具有与公式(5)相同的形式。

因此, 通过参数简单替换, 可以将光纤耦合模式与自由空间模式下的外差效率统一成相同的形式, 且通过选取相同的发射光束和本征光的回波光束光斑大小, 可以得到最大的外差效率的值, 由于文中不考虑光纤耦合透镜参数的影响, 将光纤耦合与自由空间模式在后续讨论中不予区分。

由公式(5)可知,相干多普勒测风激光雷达外差效率由截断因子 ρ 和菲涅耳数 F 共同决定,取 F 数的变化范围是 0~10,截断因子的变化范围是 0~2,可以得到外差效率随截断因子和菲涅耳数的变化曲线,如图 2 所示。

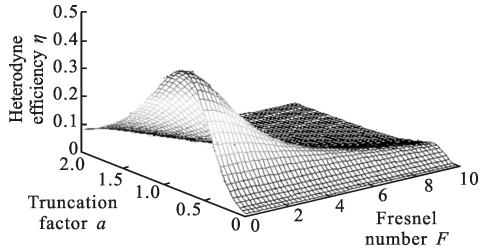


图 2 外差效率随着 F 数和望远镜截断因子的变化曲线

Fig.2 Curves of the heterodyne efficiency with the Fresnel number and truncation factor

从图2可以看出,对于相同的 F 数,外差效率随着截断因子先增大后减小,截断因子存在最优值,图3即为不同 F 数对应的最优截断因子。当 $F \approx 0$ 时,截断因子最优值为 80%,此时外差效率可以取得极大值 42.68%,此结果与参考文献[7]中探测距离为无穷远时的计算结果比较吻合,且从此图可以看出,当 $F < 1$ 时,最优截断因子始终保持在 80%,随着 F 数的进一步增大,对应的最优截断因子会迅速下降,因此,有必要针对不同 F 数来选择不同的最优截断因子参数。

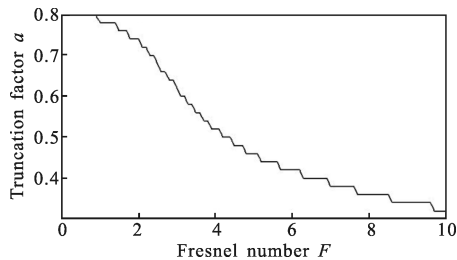


图 3 不同菲涅耳 F 数对应的最优截断因子曲线

Fig.3 Curves of the optimum truncation factor with the Fresnel number

2.3 望远镜最优孔径和望远镜最优截断因子的分析与计算

由简化信噪比的公式知,信噪比的可变参数有外差效率、探测距离、望远镜孔径、激光波长及横向相干长度,已知外差效率是 F 数和截断因子的函数, F 数与望远镜孔径的平方成正比,外差效率就可以表示为望远镜孔径和截断因子的函数,因此可以先

通过简化信噪比得到最优望远镜孔径,再通过外差效率得到对应的最优截断因子,下面就分别针对地基及星载相干测风激光雷达系统进行计算。

2.3.1 地基相干测风激光雷达系统最优望远镜孔径和截断因子的分析与计算

对于地基相干测风激光雷达系统,由于器件参数的限制,探测能力不尽相同,但一般远端探测距离在 5~25 km 范围内变化,文中选取截断因子 $\rho=76%$,望远镜孔径在 0.02~1 m 范围内连续变化。此时简化信噪比只与望远镜孔径和探测距离两个因素有关。

利用公式(4)、(5),可以得到信噪比随着望远镜孔径和远端探测距离的三维关系曲线,如图 4 所示。

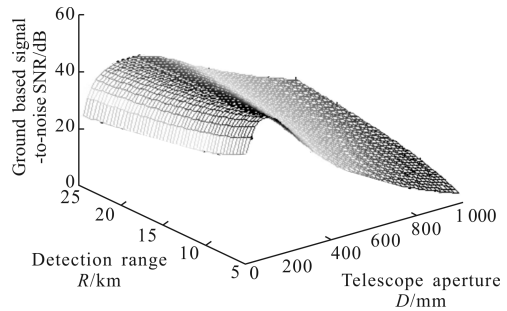


图 4 地基系统信噪比随望远镜孔径和远端探测距离的三维变化曲线

Fig.4 Curves of the ground based SNR with the detection range and telescope aperture

从图 4 中可以看出,不同的远端探测距离,地基系统信噪比随着望远镜孔径先增大后减小,存在最优望远镜孔径;且地基系统信噪比随着望远镜孔径变化比较陡峭,如若望远镜孔径选取不恰当,则会造成系统信噪比的急剧下降。图 5 给出了不同的远端探测距离处的最优地基系统望远镜孔径,当远端探测距离为

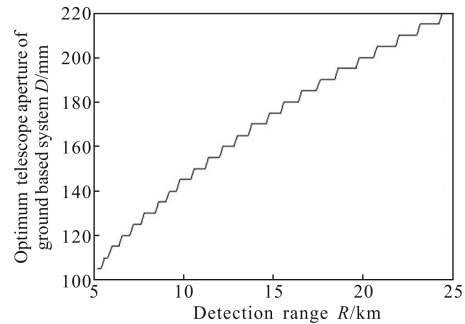


图 5 地基系统不同远端探测距离处的最优望远镜孔径

Fig.5 Curves of the optimum telescope aperture of ground based system with the detection range

10 km 时,望远镜最优孔径只需 140 mm 即可,这与国内外实际系统的设计参数基本保持一致,上述分析对地基系统望远镜孔径的设计有重要参考意义。

根据地基系统不同的远端探测距离处的最优望远镜孔径,可以进一步得到不同的远端探测距离处的最优菲涅耳数,如图 6 所示。

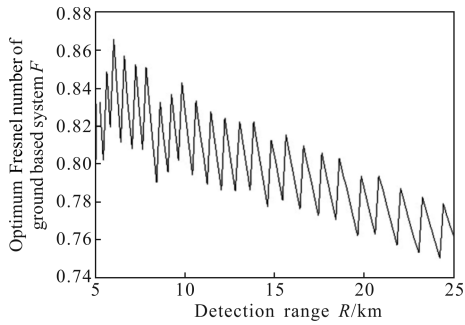


图 6 地基系统不同远端探测距离处的最优菲涅耳数

Fig.6 Curves of the optimum Fresnel number of ground based system with the detection range

由图 6 可知,当远端探测距离 5~25 km 范围内连续变化时,对应的地基系统的最优菲涅耳数在 0.7~0.8 范围内波动变化。参考图 3 可知,地基相干测风激光雷达选取最优望远镜孔径条件下,对应的最优截断因子为 80%。

2.3.2 星载相干测风激光雷达系统望远镜最优孔径和截断因子的分析与计算

对于星载相干测风激光雷达系统,卫星轨道高度一般在 350 km 到 850 km 范围内变化,可认为菲涅耳数 $F \approx 0$,对应的最优截断因子为 80%^[7]。

选取截断因子 $\rho=80\%$,望远镜孔径在 0.02~1 m 范围内连续变化,可以得到星载系统信噪比与望远镜孔径和探测距离的三维变化曲线,如图 7 所示。

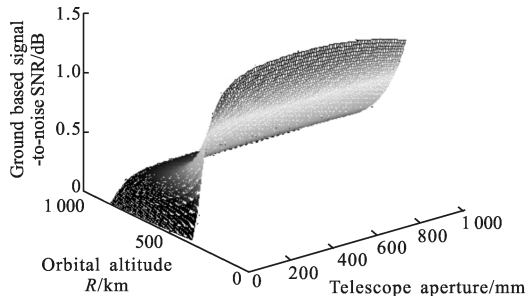


图 7 星载系统信噪比随望远镜孔径和不同轨道高度的三维变化曲线

Fig.7 Curves of the spaceborne system SNR with the orbital attitude and telescope aperture

从图 7 中可以看出,对于同一轨道高度上的星载系统,其信噪比随着望远镜孔径先增加后缓慢变化,图 8 给出了星载系统在不同轨道高度时望远镜的最优孔径数值,在 350~850 km 轨道高度范围内,望远镜孔径的最优取值在 490~660 mm 之间,这与星载相干激光雷达 HDWL (hybrid Doppler wind lidar)^[13] 的 350 km 轨道高度,选择 500 mm 的望远镜孔径相一致。对于星载系统,考虑到望远镜孔径增加到一定数值后,信噪比增加比较缓慢,实际设计中可以综合权衡望远镜成本和信噪比变化量因素,选择合理的望远镜孔径数值。

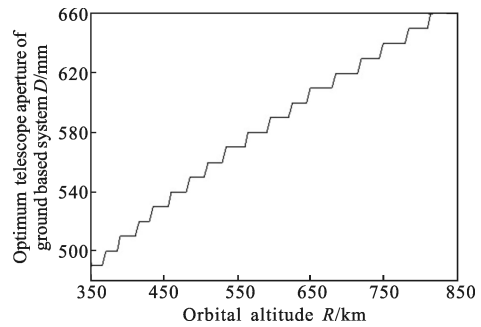


图 8 星载系统不同轨道高度的最优望远镜孔径

Fig.8 Curves of the optimum telescope aperture of spaceborne system with the orbital attitude

3 结论

文中对相干多普勒测风激光雷达同轴系统中望远镜孔径和截断因子的优化选取进行了研究。通过参数替换,将光纤耦合模式与自由空间模式下的外差效率统一成相同的形式;根据外差效率的解析表达式,数值模拟计算得到了外差效率随菲涅耳数和截断因子的三维变化曲线以及不同菲涅耳数下最优截断因子的取值。分析表明,当菲涅耳数 $F < 1$ 时,最优截断因子始终保持在 80%,随着 F 数的增大,对应的最优截断因子会迅速下降,因此,有必要针对不同 F 数来选择不同的最优截断因子参数。

结合湍流环境下的信噪比公式和外差效率的解析表达式,给出了只与望远镜的孔径和探测距离相关的简化信噪比公式,并由此分析了地基及星载相干测风激光雷达最优望远镜孔径和最优截断因子。研究表明,地基系统信噪比随着望远镜孔径变化比较陡峭,如若望远镜孔径选取不恰当,则会造成系统信噪比的急剧下降。系统应严格按照最优望远镜孔

径取值,当远端探测距离 5~25 km 范围内连续变化时,地基系统选取最优望远镜孔径在 100~220 mm 之间,对应的最优望远镜截断因子均为 80%。星载平台信噪比随着望远镜孔径先增加后缓慢变化,可以综合成本和信噪比大小选择合理的望远镜孔径,此外由于星载系统距离地面远,菲涅耳数接近为 0,最优截断因子亦为 80%。

文中的研究为自由空间探测和光纤耦合下的地基及星载相干多普勒测风激光雷达的理论及器件参数选型提供了重要的理论依据。

参考文献:

- [1] Huffaker R M. Laser Doppler detection systems for gas velocity measurement [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(5): 1026–1039.
- [2] Yang Yanling, Li Yanchao, Gao Long, et al. Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1918–1922. (in Chinese)
杨彦玲,李彦超,高龙,等.相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J].*红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1918–1922.
- [3] Qu Zengfeng, Jin Chenfei, Zhao Yuan, et al. Theoretical analysis of structure and operation range calculation of a novel fiber lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(02): 300–303. (in Chinese)
屈增风,靳辰飞,赵远,等.新型光纤激光雷达的结构理论分析与作用距离计算[J].*红外与激光工程*, 2009, 38(02): 300–303.
- [4] Sun Yang, Yuan Shuai, Wu Qian, et al. Laser coherent detection on Micro-Doppler effect of rotational target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 38(6): 1054–1058. (in Chinese)
孙洋,原帅,吴婧,等.转动目标微多普勒效应的激光相干探测[J].*红外与激光工程*, 2011, 38(6): 1054–1058.
- [5] Kin P C, Dennis K K, Nobuo S. Heterodyne Doppler 1- μm lidar measurement of reduced effective telescope aperture due to atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(18): 2617–2627.
- [6] Schwiesow R L, Calfee R F. Atmospheric refractive effects on coherent lidar performance at 10.6 μm [J]. *Applied Optics*, 1979, 18(23): 3911–3917.
- [7] Wang J Y. Optimum truncation of a lidar transmitted beam [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(21): 4470–4474.
- [8] Zhao Yanzeng, Post M J, Hardesty R M. Receiving efficiency of monostatic pulsed coherent lidars. 1: theory [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(28): 4111–4119.
- [9] Targ Russell, Kavaya M J, Huffaker R M, et al. Coherent lidar airborne windshear sensor: performance evaluation [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(15): 2013–2026.
- [10] Sasiela R J. Electromagnetic Wave Propagation in Turbulence: Evaluation and Application of Mellin Transforms [M]. Bellingham: SPIE Press, 2007: 96–100.
- [11] Siegman A E. The antenna properties of optical heterodyne receivers [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, 54(10): 1350–1356.
- [12] Bu Zhichao, Chen Siying, Zhang Yinchao, et al. Numerical analysis and calculation of heterodyne efficiency of coherent Doppler wind Lidar [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(8): 824–843. (in Chinese)
步志超,陈思颖,张寅超,等.相干多普勒测风激光雷达外差效率的数值计算与分析 [J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(8): 824–843.
- [13] Emmitt G D. Combining direct and coherent detection for Doppler wind lidar [C]//SPIE, 2004, 5575: 31–37.