

文章编号: 1672-8785(2015)06-0007-06

太赫兹波在 Kolmogorov 湍流大气中的水平传输特性研究

曾曙光¹ 但有全² 刘雁¹ 王飞¹

(1. 三峡大学理学院, 湖北宜昌 443002;

2. 中国民航飞行学院, 四川广汉 418307)

摘要: 太赫兹的大气传输特性对太赫兹的空间应用非常重要。对太赫兹波在 Kolmogorov 湍流大气中的水平传输特性展开了研究。分析了太赫兹平面波在湍流大气中传输时其闪烁指数、饱和距离等参数随频率、空间传输距离和湍流强弱程度等因素的变化。以高斯波束为例, 研究了太赫兹波束在湍流大气中传输时闪烁指数、束宽等参数随传输距离等物理量的演化规律。研究结果表明, 在太赫兹波段, 频率越高, 闪烁指数越大, 饱和距离就越小。总体上看, 太赫兹波在大气中传输时受大气湍流的影响程度介于光波和微波之间; 对于太赫兹大气通信和成像等短程应用, 太赫兹波在湍流大气中传输时一般都处于弱起伏状态; 但对于太赫兹雷达和遥感等应用, 由于传输距离较远, 可能会出现强起伏。

关键词: 大气光学; 太赫兹; 湍流大气; 传输; 闪烁指数

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.06.002

Transmission Characteristics of Terahertz Wave in Kolmogorov Turbulent Atmosphere

ZENG Shu-guang¹, DAN You-quan², LIU Yan¹, WANG Fei¹

(1. College of Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Department of Physics, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: The transmission characteristics of terahertz (THz) wave in turbulent atmosphere are very important for the application of THz wave in space. The horizontal transmission characteristics of THz wave in Kolmogorov turbulence atmosphere are studied. The variation of scintillation index and saturated distance of THz plane wave with the frequency, transmission distance and turbulence intensity in turbulent atmosphere is analyzed. Taking the Gaussian beam as an example, the variation of the scintillation index and beam width of THz wave beams with the transmission distance in turbulence atmosphere is studied. The results show that in the THz wave band, the higher the frequency of THz wave is, the greater the scintillation index is and the shorter the saturated distance is. In general, when THz wave is transmitting in atmosphere, the influence of turbulence on it is between that on optical wave and that on microwave. For the short-range applications such as communication and imaging, THz wave

收稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(11347117); 三峡大学优秀人才科研启动基金(KJ2011B066)

作者简介: 曾曙光(1984-), 男, 湖南浏阳人, 博士, 副教授, 主要从事激光光学方面的研究。

E-mail: zengshuguang19@sohu.com

is mostly in the state of weak fluctuation. But for the long-range applications such as THz radar and imaging, THz wave is in the state of strong fluctuation.

Key words: atmospheric optics; terahertz; turbulent atmosphere; propagation; scintillation index

0 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波通常是指频率为 0.1~10 THz(波长为 0.03~3 mm) 的电磁波。它的长波段与毫米波(亚毫米波)重合,短波段与红外线重合。因此,其在电磁波频谱中占有很特殊的位置^[1]。从二十多年前开始,随着太赫兹产生和探测技术的进步,THz 技术在物理、化学、天文学、分子光谱、生命科学和医药科学等基础研究领域以及医学成像、环境监测、材料检测、食品检测、射电天文、移动通讯、卫星通信和军用雷达等应用研究领域均有了一定的应用^[2]。鉴于 THz 技术的重要性,近年来,欧美等发达国家相继制订了国家支持的 THz 发展计划;中国对 THz 研究也给予了巨大支持,并已取得了一系列重要的成果和进展^[1,3]。

THz 波的空间应用,如空间 THz 通信^[4,5]、THz 成像^[6]、THz 遥感^[7]和 THz 雷达^[8]等,是 THz 应用的重要组成部分。这类应用与 THz 辐射的大气传输特性密切相关^[3]。影响 THz 大气传输的主要因素有水汽的吸收、气溶胶散射、大气辐射、大气湍流和大气折射等^[9]。另外,不同地区、不同季节、不同天气情况和不同高度下,THz 辐射的大气传输特性会有差异。以上这些因素决定了 THz 的大气传输是一个非常复杂的课题。目前,国内外已有一些学者就 THz 辐射的大气传输特性等展开了研究。国内方面,以天津大学姚建铨院士团队为代表做了一些探索性的工作^[9-13]。姚院士团队在文献^[9]中就 THz 辐射的大气传输的影响因素、基本原理、基本模型和研究现状等进行了较全面的介绍;文献^[10]给出了太赫兹大气传输的物理理论及传输模型,考虑了水汽的吸收、气溶胶的散射,但未考虑大气湍流等效应。国外方面, Yihong Yang 等人在 THz 辐射的大气传输方面做了一些出色的工作^[4,14-17]。俄克拉荷马州立大学的 Yihong Yang 等

人在考虑频率有关的大气中水蒸气的吸收和相应的折射率色散的情况下,对宽带 THz 脉冲在大气中的传输特性进行了理论和实验研究^[14,15]。文献^[4]中, M. Mandehgar 等给出了太赫兹大气通信的两种最佳链路。以上研究主要考虑了大气中水汽的吸收和色散、气溶胶的散射等因素,未考虑大气湍流对 THz 大气传输特性的影响。

大气湍流是指由大气本身的运动、温差、压强差和密度差等引起折射率改变的随机现象。光波在湍流大气中的传输理论和方法已经比较成熟^[18,19]。然而,太赫兹的频率仅在 0.1~10 THz 范围,比通常的光波频率低了约 3 个数量级,且其脉宽很窄,带宽很宽(与中心频率可比拟)。这些独特的性质决定了太赫兹波在湍流大气中的传输特性与光波相比会有所不同。基于以上考虑,本文对太赫兹波在湍流大气中的水平传输特性展开了研究。与已有工作不同的是,我们忽略大气中水汽的吸收和色散、气溶胶的散射等因素,重点研究大气湍流对 THz 大气传输的影响。

1 理论模型

按照 Kolmogorov 的湍流理论,大气湍流可用大气折射率起伏功率谱密度来描述,已经得到理论与实验支持的几个主要谱模型有 Kolmogorov 谱、von Karman 谱、Tatarskii 谱和 Hill 谱等。本文以 Kolmogorov 谱为例,对太赫兹平面波和太赫兹高斯波束在湍流大气中的水平传输特性展开研究。

闪烁指数是研究电磁波在湍流大气中传输的重要参数。Kolmogorov 谱下平面波闪烁指数的通用公式可表示为^[19]

$$\sigma_{I,pl}^2(L) = \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \quad (1)$$

式中, $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 为所谓的 Rytov 指数。Rytov 指数只能用于计算弱起伏状态下的平面波闪烁指数, 而式 (1) 对强、弱起伏条件均适用。

饱和距离 L_S 可以用来界定强起伏和弱起伏这两种传播条件^[20]。Kolmogorov 谱下平面波的饱和距离 L_S 可表示为

$$L_S = (1.46C_n^2)^{-6/11} k^{-7/11} \quad (2)$$

当电磁波在大气中的传输距离小于饱和距离 L_S 时为弱起伏状态; 反之则为强起伏状态。

当电磁波在空间上不是无限大而是具有有限尺寸时, 其表现为一波束。实验数据表明, THz 波束在自由空间的传输行为与高斯波束类似^[21]。因此, 本文中, 我们假定 THz 波束为高斯波束。Kolmogorov 谱下的高斯波束轴上点的闪烁指数可表示为^[19]

$$\sigma_{I,i}^2(L) = \exp\left[\frac{0.49\sigma_B^2}{[1 + 0.56(1 + \Theta)\sigma_B^{12/5}]^{7/6}} + \frac{0.51\sigma_B^2}{(1 + 0.69\sigma_B^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \quad (3)$$

$$\sigma_B^2 = 3.86\sigma_R^2 Re\left[i^{5/6} {}_2F_1\left(-\frac{5}{6}; \frac{11}{6}; \frac{17}{6}; \bar{\Theta} + i\Lambda\right) - \frac{11}{16}\Lambda^{5/6}\right] \quad (4)$$

Kolmogorov 谱下的高斯波束的束宽 (通用公式) 可表示为^[22]

$$W_{LT} = W\sqrt{1 + 1.63\sigma_R^{12/5}\Lambda} \quad (5)$$

式 (3)~ 式 (5) 采用 L. C. Andrews 等人的符号体系描述了高斯波束的传输与变换^[23]。式中, $\Theta = 1 + \frac{z}{F}$, $\bar{\Theta} = 1 - \Theta$, $\Lambda = \frac{2z}{kW^2}$, z 为传输距离, W 和 F 分别为距离初始面 z 处的束宽及等相面曲率半径。

2 数值计算与模拟

本节中, 我们对太赫兹波在湍流大气中的水平传输特性进行了数值模拟。本节中, 不加以特别提及时, 计算条件如下: 大气折射率起伏功率谱为 Kolmogorov 谱, 大气折射率结构常数

$C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, 传输距离 $L=10 \text{ km}$, 高斯波束初始腰斑半径为 3 cm 。下面我们分别对太赫兹平面波和太赫兹高斯波束在湍流大气中的传输特性展开数值模拟。

2.1 太赫兹平面波

图 1 给出了采用式 (1) (通用公式) 计算得到的平面波的闪烁指数 (实线) 和平面波 Rytov 指数 (虚线) 随频率的变化。由图 1 可以看出, 平面波的 Rytov 指数随着频率的增大而增大。当频率大于某一值时, Rytov 指数会超过 1。这说明, THz 平面波在大气中传输时有可能进入强起伏状态。为此, 我们采用平面波闪烁指数的通用公式来进行计算。如图中实线所示, 在太赫兹波的频率范围内, 平面波的闪烁指数亦随着频率的增大而增大, 但其增速越来越小, 在 10 THz 处达到极大值 1.182。

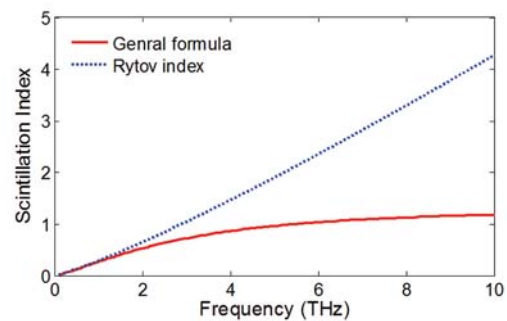


图 1 太赫兹平面波的闪烁指数和 Rytov 指数随频率的变化

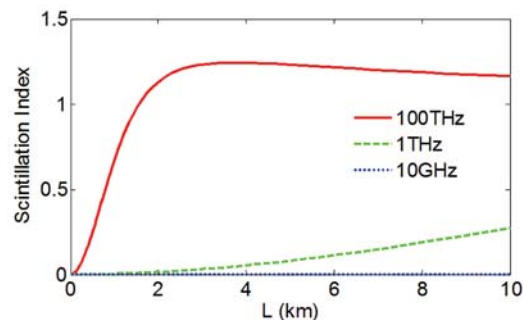


图 2 光波、微波及太赫兹平面波在湍流大气中的传输情况的对比

图 2 给出了光波、微波及太赫兹三种频率的平面波的闪烁指数随湍流大气中传输距离的变化。闪烁指数同样是由式 (1) 计算得到的。光波、微波及太赫兹波的频率分别为 100 THz 、 10

GHz 和 1 THz。由图 2 可以看出, 随着传输距离的增加, 光波的闪烁指数先增大, 在 3 km 左右处达到最大值后缓慢减小; 对于太赫兹波, 在 10 km 的传输范围内, 其闪烁指数不断增大, 但其值均比光波的小; 对于微波, 通过计算可以发现其闪烁指数同样随着传输距离的增加而不断增大, 但其值远比光波和太赫兹波的小。由此可知, 太赫兹波在大气中传输时受大气湍流影响的程度介于光波和微波之间。另外, 当传输距离不超过 2 km 时, 太赫兹波的闪烁指数和微波的比较接近, 且均远小于光波的相应值。这说明太赫兹波在短距离传输时受大气湍流的影响不明显, 基本都处于弱起伏状态。

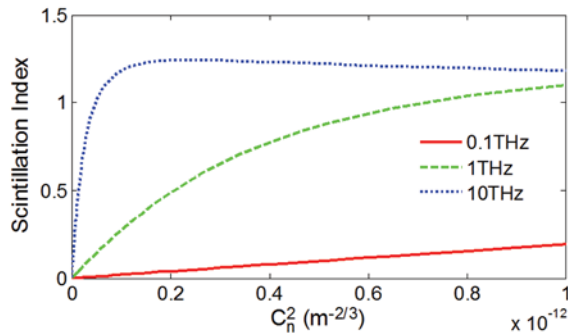


图 3 太赫兹平面波闪烁指数随大气折射率结构常数的变化

图 3 给出了三种不同频率的太赫兹平面波的闪烁指数随大气湍流强弱程度的变化。由图 3 可见, 对于 0.1 THz 的太赫兹平面波, 其闪烁指数几乎与 C_n^2 成正比; 对于频率为 1 THz 的太赫兹平面波, 其闪烁指数亦随着折射率结构常数的增大而增大, 但其增速慢慢变小; 对于频率为 10 THz 的太赫兹平面波, 随着折射率结构常数的增大, 其闪烁指数先迅速增大后缓慢减小。由上可知, 不同频率的太赫兹波受大气湍流影响的程度不同; 频率越大, 受大气湍流的影响越大; 当传输距离不超过 10 km 时, 只有在 $C_n^2 > 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ 时, 太赫兹波才有可能进入强起伏状态。

饱和距离 L_S 可以用来界定强起伏和弱起伏这两种传播条件^[20]。图 4 给出了太赫兹平面波的饱和距离随频率的变化。由图 4 可见, 平面波的饱和距离随着频率的增大而减小; 且折

射率结构常数的越大, 平面波的饱和距离越小。这可由式 (3) 来解释。当 $C_n^2 \geq 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ 时, 太赫兹平面波的饱和距离至少在 4.12 km 以上; 当 $C_n^2 \geq 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ 时, 太赫兹平面波的饱和距离至少在 14.47 km 以上。这说明, 在太赫兹大气通信等短程应用中 (一般在 1 km 以内), 太赫兹波在湍流大气中传输时一般都处于弱起伏状态; 但在太赫兹雷达和遥感等应用中, 由于传输距离较远, 太赫兹波可能会出现强起伏。

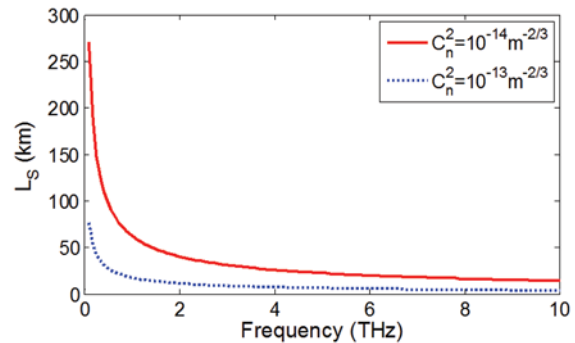


图 4 太赫兹平面波饱和距离随频率的变化

2.2 太赫兹高斯波束

图 5 给出了不同频率的太赫兹高斯波束的闪烁指数随湍流大气中传输距离的变化。由图 5 可以看出, 不论频率如何, 高斯波束的闪烁指数均随着传输距离的增大而增大; 频率越大, 闪烁指数越大。频率不超过 1 THz 时, 在 10 km 的传输范围内, 高斯波束都处于弱起伏状态; 当传输距离不超过 1 km 时, 太赫兹波段范围内的高斯波束均处于弱起伏状态。

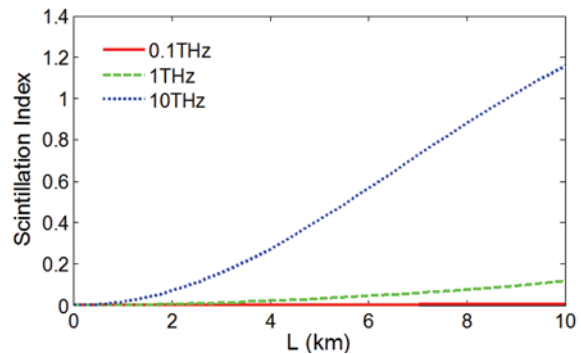


图 5 太赫兹高斯波束的闪烁指数随传输距离的变化

图 6 给出了高斯光束经过自由空间和湍流大气中传输 10 km 后在接受面上的平均光强分

布, 其中光强以接受面上自由空间传输轴上的光强为基准。图 6 中的曲线是根据扩展的惠更斯-菲涅耳原理计算得到的^[19]。由图 6 可以看出, 太赫兹波束在经过湍流大气中传输后, 其平均光强分布仍然为高斯分布, 且与自由空间的光强分布几乎完全重合。这说明大气湍流对 THz 频段高斯光束的平均光强分布影响甚小。

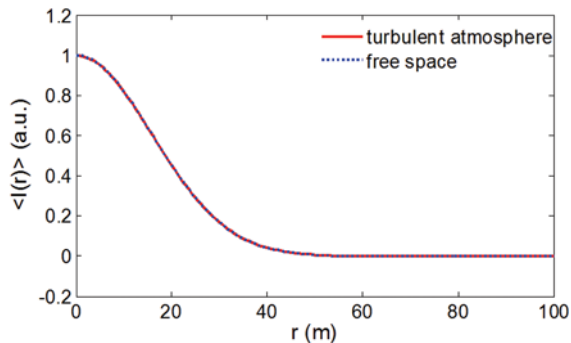


图 6 接受面上太赫兹高斯光束的平均光强分布

图 7 给出了太赫兹高斯波束经过自由空间和湍流大气中传输后的束宽随传输距离的变化。由图 7 可以看出, 不论频率如何, 高斯波束的束宽均随着传输距离的增大而增大, 且频率越大束宽越小。这可由式 (5) 来解释。另外, 太赫兹高斯波束湍流大气中的束宽和自由空间的几乎完全一样。这进一步说明大气湍流对 THz 频段束宽的影响可以忽略不计。

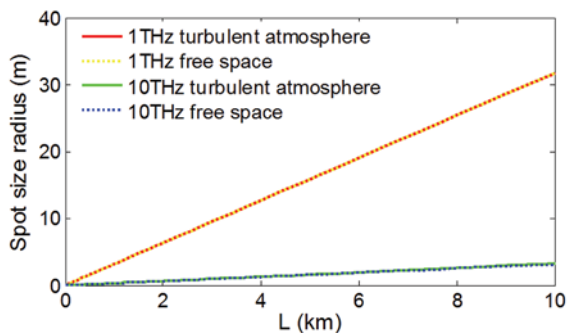


图 7 太赫兹高斯光束的束宽随传输距离的变化

3 结论

以平面波和高斯波束为例, 对太赫兹波在 Kolmogorov 湍流大气中的水平传输特性展开了研究。研究结果表明:

(1) 在太赫兹波段, 频率越高, 闪烁指数越大, 饱和距离就越小;

(2) 太赫兹波在大气中传输时受大气湍流的影响程度介于光波和微波之间;

(3) 在 10 km 范围内, 太赫兹波的闪烁指数随着传输距离的增加而增加;

(4) 大气湍流对 THz 频段的高斯波束的束宽及接受面上平均光强分布的影响可以忽略不计;

(5) 对于太赫兹大气通信、成像等传输距离不超过 1 km 的短程应用, 太赫兹波在湍流大气中传输时一般都处于弱起伏状态;

(6) 对于太赫兹雷达、遥感等应用, 由于传输距离较远, 太赫兹波可能会出现强起伏。

以上结论是根据 Kolmogorov 湍流模型得到的。太赫兹波在其它类型湍流大气中的传播特性有待进一步研究。

参考文献

- [1] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2010, 22(6): 703-707.
- [2] 张开春. 太赫兹频段扩展相互作用振荡器研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [3] 姚建铨, 汪静丽, 钟凯, 等. THz 辐射大气传输研究和展望 [J]. 光电子·激光, 2010, 21(10): 1582-1588.
- [4] Mandehgar M, Yang Y, Grischkowsky D. Atmosphere Characterization for Simulation of the Two Optimal Wireless Terahertz Digital Communication Links [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3437-3440.
- [5] Song H, Nagatsuma T. Present and Future of Terahertz Communications [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 256-263.
- [6] 张显斌, 施卫. 基于可调谐准高斯波束太赫兹源的成像系统研究 [J]. 物理学报, 2008, 57(8): 4984-4890.
- [7] Brown E R. Fundamentals of Terrestrial Millimeter Wave and THz Remote Sensing [J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2003, 13(4): 995-1097.
- [8] Cooper K B, Dengler R J, Chattopadhyay G, et al. A High-resolution Imaging Radar at 580 GHz [J]. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2008, 18(1): 64-66.
- [9] Yao J, Wang R, Cui H, et al. Atmospheric Propagation of Terahertz Radiation [J]. *Remote Sensing-advanced Techniques and Platforms*, 2012, 21(2): 371-375.

- [10] Wang R, Yao J Q, Xu D G, et al. The Physical Theory and Propagation Model of THz Atmospheric Propagation [C]. IOP: Conference Series (Journal of Physics), 2011.
- [11] 陈敏, 肖体乔, 徐洪杰. 超短 THz 脉冲在随机散射介质中的传播 [J]. *物理学报*, 2003, **52**(11): 2807–2810.
- [12] 周逊, 李贻宇, 罗振飞, 等. 太赫兹大气传输特性实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(6): 1573–1576.
- [13] 朱连燕, 廖成, 杨丹, 等. 110GHz 太赫兹波大气击穿阈值及最大传输能量密度 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(6): 1435–1439.
- [14] Yang Y, Mandehgar M, Grischkowsky D. Broadband THz Pulse Transmission through the Atmosphere [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, **1**(1): 264–273.
- [15] Yang Y, Mandehgar M, Grischkowsky D. Understanding THz Pulse Propagation in the Atmosphere [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, **2**(4): 406–415.
- [16] Melinger J S, Yang Y, Mandehgar M, et al. THz Detection of Small Molecule Vapors in the Atmospheric Transmission Windows [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(6): 6788–6807.
- [17] Yang Y, Mandehgar M, Grischkowsky D. Time Domain Measurement of the THz Refractivity of Water Vapor [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(24): 26208–26218.
- [18] Strohbehn J W. Laser Beam Propagation in the Atmosphere [M]. New York: Springer-Verlag, 1978.
- [19] Andrews L C, Phillips R L. Laser Beam Propagation through Random Media [M]. Bellingham: SPIE, 2005.
- [20] 饶瑞中. *现代大气光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [21] Gurtler A, Winnewisser C, Helm Hanspeter, et al. Terahertz Pulse Propagation in the Near Field and the Far Field [J]. *J Opt Soc Am A*, 2000, **17**(1): 74–83.
- [22] Wilbur P, Brown J. Second Moment of a Wave Propagating in a Random Medium [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, **18**(8): 1051–1059.
- [23] Andrews L C, Miller W B, Ricklin J C. Geometrical Representation of Gaussian Beams Propagating through Complex Paraxial Optical Systems [J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(30): 5918–5929.

(上接第 6 页)

6.2 总结与展望

虽然国产电阻阵列的研制水平与国外相比还有不小差距,但是随着非均匀性校正技术的发展以及相关工艺的改进,帧频低和均匀性差的问题会逐步得到解决,第三代电阻阵列也肯定会成为国产电阻阵列的主流技术,为日后生产 512×512 元和 1024×1024 元等大规模电阻阵列打下坚实基础。

参考文献

- [1] 冯晓晨, 陈乐平, 李奇, 等. 基于光纤阵列图像转换器的可见光生成系统 [J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(9): 2376–2379.
- [2] 朱岩, 苏德伦, 廖守亿, 等. MOS 电阻阵列驱动控制器设计 [J]. *红外技术*, 2009, **31**(7): 377–379.
- [3] 黄勇, 吴根水, 赵松庆, 等. 256×256 元 MOS 电阻阵列驱动方法研究 [J]. *航空兵器*, 2013, **12**(1): 490–492.
- [4] 李卓, 李平. 动态红外图像生成技术综述 [J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(3): 284–292.
- [5] 何江玲, 金惠松, 陈隆生. IR-CRT 材料及靶屏测试用动态真空系统电子枪 [J]. *红外技术*, 2008, **30**(8): 472–474.
- [6] 姚园. 红外成像制导目标仿真器的设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [7] 张凯, 孙嗣良. 红外动态场景目标模拟器系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(1): 13–14.
- [8] 常虹. 基于 DMD 的双色红外成像制导仿真系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [9] 李延彬, 韩四宁, 于天河. 红外景象模拟器 [J]. *红外技术*, 2006, **28**(11): 661–663.
- [10] 李卓, 钱丽勋, 李平, 等. 动态红外场景生成技术及其新进展 [J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(3): 378–380.
- [11] 范晋祥, 谢文龙. 弹道导弹防御动能拦截弹红外成像导引头仿真系统与技术的发展 [J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(6): 941–945.
- [12] Saylor R G, Bowden M, Buford J. New Scene Projector Developments at the AMREDC's Advanced Simulation Center [C]. *SPIE*, 2006, **6208**: 62080K.
- [13] Cole B E, Higashi R. Honeywell Resistor Array Development and Future Directions [C]. *SPIE*, 2005, **4027**: 350–367.