

现代大气光学及其在光电工程应用中的问题分析与展望 (特邀)

饶瑞中

(中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所
中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 讨论分析了现代大气光学研究及其在光电工程应用中几个方面的常见问题,给出了下列主要观点:(1) 大气对光电工程应用的影响不容忽视;(2) 光电工程设计需要考虑大气光学特性;(3) 大气对光电工程的影响需要用概率来说明;(4) 不能根据天气状况直接来判断大气对光电系统影响的程度;(5) 作为统计平均量的大气光学参数不是唯一确定的;(6) 用一个参数 C_n^2 不能可靠地描述大气湍流的光学特性;(7) 有必要进一步提高光电仪器大气探测结果的可靠性;(8) 大气湍流对光电系统性能的影响难以完全被消除;(9) 不需要投入很大精力去研究一些理想的问题。根据现状,提出了一些值得深入研究的大气光学问题。

关键词: 大气光学; 光电工程; 大气吸收; 大气散射; 大气湍流

中图分类号: O439;P183.4;O436.2;O357.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210818

Analysis and prospect of modern atmospheric optics and its applications in optoelectronic engineering (*Invited*)

Rao Ruizhong

(Key Laboratory for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Some problems in modern atmospheric optics and its applications in optical engineering were discussed, and key points were given as follows: (1) Atmosphere could introduce severe troubles to advanced optical engineering systems; (2) It is necessary to consider optical properties of the atmosphere in the design of an optical engineering system; (3) It is necessary to use probability for describing the effect of atmosphere; (4) We could not estimate the effects of atmosphere on an optical engineering system directly from weather condition; (5) It is impossible to determine exactly an atmospheric parameter as a statistical average; (6) A single parameter C_n^2 is not enough to describe the optical property of atmospheric turbulence; (7) It is necessary to promote the accuracy of detection results of atmospheric parameters by optical instruments; (8) It is impossible to eliminate completely the effect of atmospheric turbulence on optical engineering systems; (9) It is not worth the effort to investigate some problems concerning ideal conditions for light sources and atmospheric conditions. Some valuable problems were proposed to investigate in the current stage of atmospheric optics.

Key words: atmospheric optics; optical engineering; atmospheric absorption; atmospheric scattering; atmospheric turbulence

收稿日期:2021-10-10; 修订日期:2021-11-20

作者简介:饶瑞中,男,研究员,博士生导师,主要从事大气光学方面的研究。

0 引言

传统意义上的大气光学是研究地球大气中自然出现的光学现象。我国的先民创造了悠久的大气光像观测史,《晋书》中的《天文志》对《周礼》归纳的十种大气光像进行了详细的描述。这些大气光学现象可以根据现代光学知识进行科学的解释。巴西里约热内卢大学 Nussenzveig 教授曾试图发掘球形粒子光散射 Mie 解无穷级数背后隐藏的物理机制,并利用复角动量方法得到一定精度的近似表达式,他对宝光形成机理的解释用到了量子隧穿效应,和所有的半经典理论一样,连接微观和宏观世界,混合电磁波理论和量子理论,但并未得到一个确切的答案^[1]。

有别于传统的大气光学,并与之存在着密切的联系,现代大气光学主要研究大气的光学性质和光波在大气中的传播规律、发展大气光学探测技术及其在相关学科中应用。作为光传播介质的光学性质是影响在大气中工作的光电系统性能的关键因素,而光在大气中的传播规律则是了解和解决这些影响效果的物理基础。利用这些传播规律可以发展各种有效的技术手段进行大气光学性质的研究和探测,从而成为现代光电工程不可缺少的组成部分^[2]。

现代大气光学无论是学科本身还是在天文观测、遥感、环境监测、激光工程等诸多先进光电系统中的应用都得到了越来越广泛的重视。但该领域之外的人士对此学科了解不多,有相当多的人对大气的影响或一知半解或不以为然。另一方面,越来越多的科研机构 and 科技工作者加入了相关研究,但研究工作的重点和方法需要结合学科发展和应用需求作进一步优化。文中通过对该学科及其在光电工程应用中十个常见问题的讨论分析,提出了对未来研究工作重点的建议,供相关科技工作者讨论参考。

1 大气对光电工程应用的影响不容忽视

作为一个整体的大气介质以对光传播的影响机理可以分为混浊大气介质和湍流大气介质。混浊大气介质主要由静态的大气分子和离散的大气颗粒物即气溶胶粒子构成(一般人可直观感受:如雾霾);湍流介质由作为流体的、速度和密度起伏的大气分子构成(一般人可间接感受,如飞机的颠簸)。混浊介质的

光散射导致能量衰减、背景信号增大、成像细节模糊,时间上比较稳定。湍流介质导致光强起伏(闪烁)、相位起伏(包括波前倾斜)和到达角起伏(光传播方向抖动)、图像扭曲和变形,具有较强的时间变化特征。

早在 16 世纪,牛顿就深刻理解了大气对天文观测的影响,他在其撰写的《光学》一书中明确提出了克服大气对天文观测影响的办法就是要把望远镜置于云端之上的高山之巅,这一直是现代天文台选择遵循的基本原则。目前世界上最佳的天文台台址都在地形非常有利的山巅,如:夏威夷莫纳凯亚山、智利安第斯山、大西洋加那利群岛的山顶、西藏阿里的物玛。这些天文台址上放置了现代最先进的大型望远镜,取得了非常重要的观测成果,但依然无法完全消除大气的影 响。为彻底摆脱地球大气的影响,哈勃太空望远镜(Hubble Space Telescope)被发射到地球大气层之外进行天文观测,它获得的天文图像显著优于地面天文望远镜观测到的图像。

大气对光电工程的影响在大气科学研究、天文观测、光通讯、环境污染监测、航空与高速公路交通安全、目标探测、高能激光技术、光学遥感等领域都有涉及。大气影响的方式和程度因其光电系统的工作原理不同而不同。对于能量型的光电系统,大气将衰减光的能量,降低信号强度和信噪比;而对图像型的光电系统,大气将降低图像的清晰度,影响图像的分辨率,甚至扭曲图像;而对于信息型的光电系统,大气背景噪声将引入错误信息。

最能说明大气对现代光电工程影响的例子就是光通讯。自激光诞生以后,由于其优异的特点而得到了广泛的应用。在通讯领域,光纤通讯和自由大气激光通讯概念都被早早提出。起初由于光纤制造困难,光纤通讯不被看好。而大气光通讯不需要人为制造传播介质,技术简单,当时未充分意识到大气对激光传输的影响程度,得到了比较高的关注^[3]。而其后的发展历程是:随着光纤制作技术的不断完善,光纤通信成为地面有线通信最有发展潜力的重要手段,而由于大气信道光传输特性本身的不稳定性等诸多客观因素得不到很好的解决,自由大气光通讯的发展远不如预期,只在某些特殊场合应用。

另一个重要的例子是高能激光技术。高能激光武器可以说是史上研发难度最大的武器,大气对激光

武器影响之严重是史上任何其他武器都不曾遇到的。目前威力最大的核武器从概念提出、研发到用于实战不过数年,可是激光武器的研发已经超过半个世纪,真正意义上能够对军事目标进行硬杀伤的激光武器至今未见面世。激光武器和传统武器有一个本质的区别:作战性能并不主要取决于武器本身。大气构成的影响是不可避免的,有相当大的概率是致命的^[4]。

2 光电工程设计需要考虑大气光学特性

现代光电工程的应用场景大都位于大气层内或穿越大气层,在这些光电工程系统研发的初期,应该考虑到可能应用的场景,充分考虑大气影响的后果,在设计时就采取必要的措施。开展这项工作的前提是要了解大气的光学性质。

大气光学性质主要包括大气的折射特性、大气分子的吸收光谱特征、大气气溶胶粒子的散射特性、大气湍流的光学性质。根据这些光学特性,运用大气中光的传播规律,根据光电系统的工作原理,就可以正确判断大气对光电系统性能的影响效果,合理进行光电系统的设计。例如,考虑到高能激光在大气中出现的非线性热晕效应,选择大气吸收小的微窗口对高能激光工程应用极其重要。

不仅如此,利用大气光学原理可以研发出各种探测大气成分和光学、物理、化学性质的光电仪器。如大气分子的吸收光谱特征就是大气分子的“指纹”,它是利用光学方法探测大气污染气体和温室气体的依据。目前差分吸收等光谱技术已成为实时大范围大气监测的主要技术手段,可以进行大气或工业污染气体、大气温室气体、大气风场、大气湍流的有效监测,在地面、机载、星载立体平台上运行。全球性的污染气体和温室气体的区域分布已经依靠这种技术得到了重要结果。而大气气溶胶粒子的后向散射是激光雷达等大气光学探测技术赖以成立的前提^[5]。

在依据图像进行工作的光电系统中,必须考虑大气分子和气溶胶粒子、大气湍流的光学特性。大气分子的 Rayleigh 散射以及大气微粒的 Mie 散射不仅造成光的散射和吸收,直接导致光能量的衰减,而且散射光成为图像信号的背景噪声,导致信噪比的下降和图像模糊。图像在大气中的模糊导致成像质量恶化,降低了光学系统的分辨本领。大气中湍流与散射对

光学成像造成的影响可以分别考虑也可以同时考虑,大气湍流介质的光学传递函数 (MTF) 和混浊介质的 MTF 是影响大气介质成像质量的定量描述,二者的乘积即为总的大气介质的 MTF。在实际成像问题中,一般根据应用目的的不同常常分别考虑。大气散射造成的模糊图像一般随时间缓变或几乎不变。而大气湍流造成的图像扭曲快速变化,因此分短曝光图像和长曝光图像,分别有对应的 MTF。

Fried 研究了湍流大气中的成像分辨率问题,得到了短曝光和长曝光情况下的湍流大气介质的光学传递函数^[6],该函数涉及一个描述大气湍流对光传播影响程度的参量“大气相干长度”,即目前广泛流行的术语“Fried 参量” r_0 。该参量已成为现代光电工程中的一个基本参量。 r_0 最直观的意义就是当望远镜口径大于这个参数时,成像分辨率不随口径的增大而提高。而大气混浊介质的 MTF 受大气介质的吸收和散射光学厚度以及散射空间分布 (用散射相函数描述) 的影响,实际情况比较复杂^[7]。

3 大气对光电工程的影响需要用概率来说明

大气光学特性具有非常复杂的时空变化特征。处理大气的影响,需要知道光电系统工作时的大气吸收、散射特性和大气湍流特性。分析大气对光电系统的影响可以实时进行,而在进行光学系统设计、研制以及估计光学系统的性能时应该根据先期获得的大气统计特征使用概率的方法分析大气影响的范围和程度,才有可能比较可靠地指导具体的工程应用。

为什么必须采用概率观点来考虑大气的影响呢? 因为对于同一个光电系统,在不同的地方使用、在不同的时间使用,大气的影响程度会发生改变,变化的范围常常是很大的。在极端情况下大气湍流介质甚至能提高成像光学系统的性能,超衍射成像曾经被观察到,但这种情况出现的概率是非常小的。新兴光电系统的演示验证多选择在最优大气条件下进行,往往需要耗费较长的时间。实际应用不可能任意选择大气条件,使用效果往往不如演示验证时的状态好。

晴朗无云的大气状况是少数,全球平均来看,有云存在的概率可达 50%~70%。大气的温度、气压、湿度、吸收气体含量、气溶胶粒子浓度和其他光学性质随高度而变化;水平方向上的大气也常常受地表的影

响而复杂多变。不同类型的地表反射或辐射特性不同, 每时每刻太阳的几何位置都在发生改变。因此, 光在大气中的传播问题牵涉到许多大气参数、地理参数和太阳几何参数, 是非常复杂的。

鉴于大气光学特性复杂的空间和时间变化特性, 必须全面地分析各种可能的大气状态, 使用概率方法评价光电系统在使用地区受大气的影响程度。在不同地区和不同时间内, 由于大气特性的变化, 大气分子吸收、大气气溶胶粒子散射和大气湍流效应对光电系统总的效果的分量是不同的^[8]。在各种应用中, 包括工程可行性分析、光学系统的设计、以及系统效能的预期, 都应该要透彻地了解应用地区的大气光学特性、全面地分析各种可能的大气状态对工作效果的影响。

4 不能根据天气状况直接来判断大气对光电系统影响的程度

一般公众和大部分非大气科学相关领域的科研人员对天气状态的认识主要依据气象知识和气象学的视角。好天气和恶劣天气主要是气象上的判断。因此, 当涉及大气状态对光电工程系统的性能影响时, 往往认为好的天气也适合光电系统性能的发挥。虽然有一些情况与此思维结果相符合, 但很多情况下并非如此。

以高能激光技术为例来分析, 大气对高能激光传输的影响主要体现在 3 个方面^[4]:

(1) 气体分子和气溶胶粒子对激光吸收和散射, 导致激光能量的衰减。气溶胶粒子的种类、来源、成分复杂, 包括水滴(云、雾)、尘埃(种类繁多)以及二者结合形成的霾等。这种影响对应的天气状态通常以洁净程度来衡量, 定量参数是气象观测时所用的“能见度”。张召忠所说的雾霾能防御激光仅仅指这个方面, 也是最易观察到的。如果激光向天空发射, 无疑云层是最重要的障碍。

(2) 大气湍流。大气湍流造成激光束随机抖动、光斑弥散、破碎、能量集中度(作用在一定面积上的能量密度)大大降低。大气湍流比大气衰减的影响更普遍、更严重, 因为雾霾等恶劣天气只是以一定的概率出现, 而大气湍流在任何时间、任何地方始终存在。晴好天气下大气湍流往往更强, 与之相反, 阴云

密布的天气下, 水平能见度可能很高, 大气湍流也较弱, 如果激光在云层下传输, 效果有可能会很好。

(3) 大气和激光的相互作用。由于空气分子和气溶胶粒子吸收一定的激光能量, 当吸收的激光能量足以加热空气时, 折射率空间分布形成类似于负透镜的结构, 导致激光束发散。垂直于光传播路径的风有助于转移受热的空气, 因此大风天气不是恶劣天气。

高能激光在大气环境中使用, 不是能量越高威力越大。对于一定技术参数的系统和一定的目标距离, 在一定的大气条件下, 存在着一个最优的发射功率。有必要强调, 影响激光传输的仅仅是传输路径上的大气介质的光学性质, 它们并不等同于宏观天气状态。

5 作为统计平均量的大气参数不是唯一确定的

由于大气状态的时间演化, 随机大气介质能在多长时间内保持统计意义上的平稳状态是很难确定的, 在该时间内湍流起伏是否满足各态历经更加难以确定。在大气湍流参数的实际测量中怎样进行统计分析, 或者说获得的统计量究竟在何种程度上反映了湍流的真正的统计特征是值得认真思考的。我们测量并统计得到的湍流参数的真正含义和笔者的测量和统计方式有关。对有限时间内在模拟湍流池相同状态下多次测量的 Fried 常数 r_0 的分析结果表明: 有限时间内统计得到的 r_0 也是随机量, 其均值或最可几值才有可能作为可靠的参数看待^[9]。

随机变量有限样本数的统计方差符合一定的概率分布。对于一般随机变量, 在已知均值的情况下, 其方差的计算值的概率分布是确定的。描述大气湍流及光传播效应的各种物理量, 如大气温度、对数光强、到达角等随机变量的均值一般是可以比较可靠地测量获取的, 我们关心的是这些物理量的起伏方差, 对应于折射率结构常数 C_n^2 、闪烁指数、到达角起伏方差或相关的 Fried 参数 r_0 等。设上述各随机变量的系综统计平均得到的方差真值(理论值)为 σ^2 , 根据各随机变量的 n 次测量计算得到的方差值为 v , 则在上述随机变量服从正态分布的情况下, 随机变量 $x = nv/\sigma^2$ 服从 $\chi^2(n)$ 分布^[10]。该分布下随机变量 x 的均值和方差分别为 n 和 $2n$, 则 v 的均值为 σ^2 、均方根值为 $\sqrt{2/n}\sigma^2$ 。

6 用一个参数 C_n^2 不能可靠地描述大气湍流的光学特性

大气光学湍流是指大气密度的微弱变化造成的大气介质折射率的微弱起伏。湍流是物理学最大的难题之一。目前对大气湍流的认识还很粗浅,虽然有各种理论,但只有 Kolmogorov-Obuhov 统计理论才在大气光传播研究中有应用价值。

Tatarskii 奠定了大气湍流中的光传播理论,该理论的基础是采用 Rytov 近似(对数光场的 Born 近似)和 Kolmogorov 大气湍流模型^[1]。所谓的 Kolmogorov 大气湍流是局地均匀、各向同性的,大气折射率结构函数满足 $2/3$ 幂律,其结构常数 C_n^2 常用来描述湍流的强度,一维功率谱符合 $-5/3$ 幂律,三维谱幂律为 $-11/3$ 。任何偏离局地均匀、各向同性的湍流都可称为非 Kolmogorov 湍流,大气湍流的一般状态是非 Kolmogorov 湍流占更大比例。初始符合 Kolmogorov 特征的大气也会因某种机制而改变湍流状态,如大能量激光束加热空气。

在通常应用中, C_n^2 及其高度廓线分布都是在大气湍流符合 Kolmogorov 理论的假设下对观测量进行统计分析的结果。测量通常在一定距离上的两点进行。依据局地均匀各向同性假设,不同位置上两点测量的统计结果应该是一致的。实际测量结果表明,同一高度上在水平和垂直方向上相同距离测量的折射率结构函数也常常明显不同。无论是在受地面因素影响明显的大气边界层还是在高空自由的大气中,大气湍流都不严格符合各向同性。大气湍流功率谱在很多情况下不严格符合 $-5/3$ 幂律。大气湍流功率谱幂指数的实际测量结果仅局限于近地面或对流层顶等有限的高度,数据量有限且起伏明显,尚不足以建立应用模式。

一些理论工作研究一个量纲依赖于功率谱幂律 α 的等效折射率结构常数 $C_n^2(\alpha)$ 。包含这样一个等效常数的功率谱解析表达式被用于光传播理论研究。对各向异性非 Kolmogoro 湍流,除了一个变化的功率谱幂律外,还需要引入描述各个方向相对权重的参量。实际大气湍流可能更为复杂,功率谱并不是具有一个单一幂值的函数,可能是几种幂律的混合。大气气溶胶粒子的吸收和散射的起伏也会引起功率谱型

的复杂变化。

对各向同性的非 Kolmogorov 湍流,折射率结构常数的量纲与幂律相关,成为一个量纲不固定的参数,显然不适合用于描述湍流强度。对于普遍的非 Kolmogorov 大气湍流,全面准确地描述湍流特性需要使用折射率起伏方差、功率谱幂指数和湍流外尺度 3 个独立的参量^[2]。无量纲的折射率起伏方差 σ_n^2 ,不受任何其他因素影响、不依赖于理论假设,它才是真正的大气光学湍流强度,将它与功率谱幂指数和湍流外尺度联合起来,就可以全面描述光传播的大气湍流效应。光传播效应可以非常直观地表示为几个物理意义明确的相位起伏参量的函数。该描述方法在光传播理论和实验研究中并没有得到广泛采用。实验上可能源于测量技术的缺乏,而理论上则可能是研究传统的惯性作用。

7 有必要进一步提高光电仪器大气探测结果的可靠性

现代大气探测光电仪器一般比较复杂,整个系统由多个环节组成,包括发射、接收光学系统,光电探测元件、信号放大单元、信号处理单元等。信号需要精确的标定,标定并非一次性的,常常根据工作地域的改变、使用时间的增加而多次进行。除了对仪器本身进行标定外,要想根据测量的信号推得所要的大气参数,则需要对大气介质的特性做一些假定,这些假定有些是比较可靠的,有些却是不可靠的。只有一些特殊的情况下,采用巧妙的方法可以消除掉仪器参数,直接获得大气参数。比如,利用太阳辐射计采用 Langley-Plot 方法获得大气层的光学厚度。

大气光学特性的测量越来越多地采用光学技术,其中激光雷达的应用最为广泛。不同种类的激光雷达用于各种常规大气参数、大气气体和颗粒物成分、以及大气光学特性参数的测量。以弹性散射激光雷达为例,定量分析激光雷达探测结果要依据激光雷达方程,在该方程中消光系数、后向散射系数两个未知量的路径分布是未知的。一般情况下,无法准确求解激光雷达方程。只有在路径均匀的条件下,不需要仪器定标,可准确定量获得路径上的大气透过率,进而得到大气能见度。为求解激光雷达方程,常将激光雷达比即后向散射系数与消光系数二者的比值假定为

一常数,根据均匀球形粒子的 Mie 散射理论的计算结果选取一定的数值,这样激光雷达方程就只包含一个未知量。实际各种大气气溶胶粒子的激光雷达比变化很大,求解激光雷达方程必须采取多种假设^[13]。

目前,世界上一些零星地点出于科研或应用的目的进行了短期或长期的大气光学特性参数的间断或连续的测量,而在广大的地区实际测量的参数缺乏。不论是光电系统的设计或实际应用都对各种地区的大气光学特性提出了迫切的需求。为此,一系列大气光学参数的应用模式被提出。这些模式的建立一般依据一定的物理模型,辅以实测数据的统计分析,其适用性有限。

为了提高大气光学参数模式的可靠性和应用范围,像其他学科一样,深度学习方法也被引入到这项工作中。这种方法的可靠性存在 3 方面的问题:(1)是深度学习应该建立在明确因果关系的基础上,在这个领域应用的深度学习方法的输入参数往往并不能影响光学特性,而真正影响的因素往往比所关心的大气光学参数还难以获得,比如求散射系数时应该给出的气溶胶成分;(2)是样本数有限,环境特性复杂,很难获取充分的实测数据,同时实测的数据也难以分类,以气溶胶粒子为例,实际的气溶胶粒子的成分多种多样,现在还缺乏清楚的认识,也没有针对某种成分或结构的气溶胶粒子的系统的光学参数;(3)是深度学习的结果的可靠性严重依赖于源数据的精度,许多实测数据的精度不明,而对于像气溶胶粒子吸收系数这样的小量值参数,数据的起伏远大于参数本身的量值,深度学习能否应用成为问题。因此,深度学习方法在该领域的应用还有漫长的路要走。

8 大气湍流对光电系统性能的影响难以完全被消除

8.1 自适应光学相位校正技术

大气湍流影响光电系统的性能,既然无法躲开大气,就必须主动寻找克服大气湍流影响的方法,一些新颖的大气校正光学技术应运而生,其中只有自适应光学相位校正技术得到了持续发展,并投入实际应用。若要对大气湍流的影响进行全面的校正,就必须考虑相位和振幅二者的变化,进行所谓的场校正。但自适应光学技术仅仅只能进行相位校正,因此其校正

效果并非一般人期望的在各种情况下都那样好。

自适应光学系统需要利用来自目标的信标光以获得相位起伏信息作为校正的依据,信标光的准确性是整个系统工作可靠性的关键。信标光的波长、光场分布、强度、位置等都会对系统性能产生影响。此外,系统的各个环节都有一定的响应时间,相位测量器件和校正器件(变形镜)的空间分辨率是有限的,再加上相位、控制算法和控制系统的误差,都使得自适应光学系统不可能得到完全的相位校正效果^[14]。

即使自适应光学系统中的各部分的能力都达到理想状态,也无法完全消除大气的影响。这是因为:随着光传播起伏条件的增大,光场振幅起伏的影响不能忽略,单纯的相位校正不能完全消除光场畸变;在较强的起伏条件下,还会进一步出现相位不连续点,此时已无法可靠地探测和复原相位,从而不能有效地进行相位的校正。自适应光学技术一直朝着提高反应速度和增加空间分辨率的方向不断发展,甚至利用多组校正器件进行分级校正,对相位测量和相位复原的算法也不断改进并引入无探测器件的相位复原技术,但由于根本原理性的限制,我们不能指望依赖它来完全消除大气湍流的影响。

8.2 光学涡旋在湍流大气中的传播

光学涡旋由于和光子的轨道角动量相联系,从而在光学微操控技术(包括光镊技术)等方面有重要的潜在应用价值,它不随传播而丧失本身携带的固有信息等特性,引起了信息传递领域的关注。对光学涡旋的研究已成为光学前沿热点之一。

光学涡旋在湍流大气中传播时,虽然光学涡旋附近的光场(振幅和相位)随机起伏,但在从弱起伏到中等强度的起伏条件下,光学涡旋的特点未被抹杀,得以保存下来。涡旋光束的拓扑荷是一个相当稳定的量,可以在大气中传播相当长的距离而不发生改变,因而具有充当信息载体的潜在功能。然而当光传播起伏条件很强时,湍流大气中的光场自发产生光学涡旋,并且随着起伏条件的增强,光学涡旋的数目也在增加,拓扑荷的量值变得越来越不稳定^[15]。

因此,若要实现光学涡旋充当信息传递载体,就必须采取措施克服大气湍流的影响,保持拓扑荷量值稳定。光学涡旋是沿着光传播方向来看的相位涡旋,从垂直于光传播方向的平面来看,就是出现了相位不

连续性,存在相位奇点,相邻区域的相位差超出一个周期 2π 。这恰恰是基于自适应光学的相位校正技术无能为力的,必须探索新的技术途径。

8.3 大气介质中的鬼成像(关联成像)

鬼成像(又称关联成像等)技术以其完全不同于传统的光学成像原理引起了学术界的关注,开展了积极探索,从最初的简单原理实验到现在各种变型的技术方案^[16]。一个进化版本是计算成像,即定量控制照明光源的空间结构,从而省去参考光束及其成像器件,硬件上只需要一个能量器件或单像素感光器件,该技术所对应的成像系统因之被称为单像素相机。连续改变入射光场的空间结构,获得一系列物体散射光(或透射光)的总能量数据,据此反演得到物体的像。从计算成像的原理可以看出:(1)鬼成像的本质不是参考光与目标光之间的相关性,反演出图像不但与光场的量子特性无关,而且也与光场的经典特性如时空相关性(correlation)等无关;(2)鬼成像的过程只需要入射光场与接收能量的对应关系(correspondence),从这种对应的系列数据中推求物体的透射或反射图像,因此是一个典型的基于积分方程的数学反演问题。

测量总存在误差,即使没有误差,反演问题一般也是一种病态的数学问题,反演结果总会失真,结果的非理想性应该主要来自反演(使用了有噪声的数据),在相关文献中没有考虑反演本身带来的误差。为获得准确可靠的图像,理想的初始光场分布应该是每次照明对应一个像素的狄拉克函数,在以散斑图像作为照明光源的鬼成像中很难取得满意效果。各种版本的鬼成像技术所获得的粗糙图像的质量显然和常规图像无法相提并论,很多成像结果很难确认就是原物体的像。如果把它应用到人脸识别系统,不知能否通过考核。此外,该技术声称的一些优点,如能克服大气湍流的影响等,实际上并未真正表现出来,为提高成像质量还需要引入自适应光学技术^[17]。

9 一些理想问题不值得投入很大精力去研究

9.1 光在非 Kolmogorov 大气湍流中的传播及其对光电工程的影响

早期 Tatarskii 采用 Rytov 近似建立的 Kolmogorov 大气湍流中的光传播理论可以求解弱起伏条件下光传播的各种效应;不少学者尝试了多种方法进行强起

伏条件下的传播效应研究,但没有获得多少有效的理论结果,数值模拟成为求解具体条件下传播问题的主要手段。后来 Andrews、Phillips 等人基于闪烁理论提出了修正的 Rytov 近似,提出了依赖于传播条件的等效湍流功率谱^[18],将该功率谱应用于 Tatarskii 理论求解一般起伏条件下的传播问题,从此大量理论工作研究了各种可能的传播问题。这类研究工作对于一些适用条件的运用大都没有深究,可能会存在疏忽和误解^[19]。根据强起伏条件下数值模拟结果提出的简单模型则无人问津^[20]。

另一方面的工作则是在(修正的)Rytov 近似下,把可变幂律的湍流功率谱(所谓的非 Kolmogorov 湍流)代入相关理论公式中求得各种湍流效应随功率谱幂值的变化。Stribling 系统地推导了传播路径上湍流功率谱幂律恒定的非 Kolmogorov 湍流传播效应的理论结果^[21],以后的大量类似工作针对不同光源的传播问题对此思路加以运用。也有人采用各向异性非 Kolmogorov 湍流大气湍流模型应用于光传播理论,得到了一些传播效应的结果。

各种类型的特殊光源,包括部分相干平顶涡旋光束、拉盖尔-高斯光束、厄米-高斯光束、平顶光束、偏心环状光束、(余弦)高斯-谢尔光束、sinc-谢尔光束、超连续谱光源;各种类型的部分相干光,包括部分相干双曲正弦高斯涡旋光束、部分相干贝塞尔高斯光束、截断部分相干双曲余弦高斯光束、携带光学涡旋的部分相干光束、部分相干厄米高斯光束、部分相干平顶光束;各种阵列光源,包括直线阵列、轴对称阵列、相干合成阵列、自分割光束,它们在大气湍流中的传播效应得到了广泛探讨。研究一般采用扩展的 Huygens-Fresnel 原理、或在交叉谱密度函数的基础上求取传播效应的统计平均值,结果反映不出起伏特征。这些特殊形态的光源目前多属于理论概念,研究结果无法得到实验验证,实际光源及其在湍流大气中的应用尚难预测何时能够到来。阵列光源目前有重要的潜在应用,有关它们在湍流大气中的传播问题的研究很有必要,重要的不在于大气湍流是否符合 Kolmogorov 特征,而是阵列光源和单一光源传播特性的区别。

也有一些工作研究非 Kolmogorov 大气湍流对光电工程的影响,包括自适应光学技术、无线光通讯中

的误码率和信道容量、用于信息传递的光束纠缠角动量特性、光束轨道角动量特性等。2000~2014年 OSA 的 Optics Infobase 中收录的非 Kolmogorov 大气湍流中光传播问题的几十篇论文除零星几篇外,大多数来自中国^[22]。

9.2 Bessel 光束、Airy 光束在大气湍流中的传播

Bessel 光束、Airy 光束因其具有独特的传播特征,诸如非衍射、自修复等,近年来引起了极大的关注,得到了不少研究机构的重视。不但开展了传播特征的理论数值模拟研究^[23],而且也在实验室内探索了光场产生和短距离的传播研究。理论上,这两种光束都是具有无限大空间分布的光场,虽然光场强度随离开原点的距离的增大而迅速减弱,但在任何尺度上的截断一定会影响整个光束的传播特征,衍射不可避免地出现。目前研究工作似乎出现了停滞现象,这主要是由于存在一些严重的技术问题。在光源的产生方面:目前仅限于实验室内使用,光源的有限尺度、有限能量、较短的传播距离等,限制了可能的实际应用。对这两种光束的大气传输的研究仅限于理想光源的理论研究,缺乏在实际大气中开展的传输实验。

9.3 海洋湍流中的光传播

近年来,海洋中的光传播问题也得到了一定程度的关注。由于海水对光的吸收效应显著,光在海水中的传播距离很短,除了蓝绿光能传播一定距离(约百米量级),其他波段基本难以传播出去。尽管如此,海洋湍流对光传播的影响也得到了一些研究。研究采用大气湍流中光传播的处理方法,不同之处在于海洋湍流功率谱和大气湍流功率谱的差别,多了一个因盐分引起的附加项,因而这方面的理论研究只是增加了数学处理的难度^[24]。

令人欣慰的是,目前已经有研究机构开始在海水中直接探测不同深度的湍流特性^[25],也有实验室用含盐的水槽模拟海洋湍流的特征^[26]。在实际海洋中和模拟的海洋环境中开展实际的光传播实验,其结果可以检验理论结果的可靠性,也是实际应用所必须的。

10 一些值得深入研究的大气光学问题

在大气光学特性和新兴光学技术的大气影响两个大的方面都有一些需要深入研究和前沿探索的工作,目前开展的还远远不够。

10.1 大气光学特性的深入研究

大气光学特性研究方面有 3 个方向可以深入研究:大气湍流廓线的可靠获取及数据处理和建模方法、气溶胶粒子的弱吸收特性的准确测量、以及云的宏观物理与光学特性的定量描述。

大气湍流廓线的定量获取与建模工作已经开展了很长的时间,积累了大量数据,提出了不少模式。廓线的测量方法大致可分为两类:一类是气球搭载温度脉动仪进行原位直接测量。气球上升过程中仪器的位置不断发生纵向和横向的改变,在一定位置上难以得到足够的样本数,测量结果是时间上和空间上的平均,一般有量级的起伏。如何对廓线进行平均和拟合存在很大不确定性,也很难检验其可靠性。另一类是依据星光(或人造光源)穿越整层大气后的光传播效应的测量。这种方法得到的廓线的高度分辨率很低,整层大气也仅有(十)几个数据点,由于测量误差的存在,将这种低分辨率廓线拟合到一定形式的廓线模式上有很大的不确定性。因此,无论是大气湍流的直接测量技术,还是对廓线测量结果的统计分析、建模都还需要深入研究,而不能满足于现有技术,不考虑测量结果的局限性而套用各种模式。

大气气溶胶粒子对光的微弱吸收的准确测量长期以来就是老大难问题,早期美国的多家研究机构在同一场景下运用不同技术设备进行同时测量,所得结果差异明显。由于在整个消光中,吸收远小于散射,如何提高测量精度一直是个困难的问题,虽然目前已有不少新颖的技术手段,但要做到原位的高精度测量依然是很困难的。技术的突破还要期待新的测量原理。

大气中的云几乎无处无时不在,云的光学特性对大气中光的传播具有巨大的影响是毋庸置疑的。但由于云的宏观结构的极端复杂性,研究工作者有意无意冷落了对它的研究。在大气光学特别是大气辐射学相关领域,长期以来的处理方法就是把它当作一定高度上均匀分布的层状结构,赋予一定的光学厚度,这与实际情况相距甚远。虽然已经有科学家运用分形理论对云的结构进行比较接近实际形态的三维描述,但三维结构的云中光的传播或辐射传输问题只有运用 MonteCarlo 进行模拟,这种方法远远达不到实际应用的目的^[27]。可以说,无论是在大气科学还是在光电工程应用中,云的影响都是最不确定的因素。

10.2 新兴光学技术中的大气影响研究

近年来,基于光的量子特性以及单光子探测技术的光电技术蓬勃发展,量子通信、鬼成像(单像素成像)、单光子成像激光雷达等新兴光学技术、量子技术的相关进展被当作重大科研成果进行了大力的宣传,形成了学科热点,吸引了社会的关注,唤起了社会、学术界和产业界的期望。目前在这些新兴的光学技术研究中,基本忽视了大气的影响。实际上,这些技术由于信号都非常微弱,大气对它们的影响应该远大于对传统光电技术系统的影响。

虽然近年来以单光子作为主要载体的各种量子技术处于关注的焦点,但从 20 世纪 70 年代开始的激光测月技术,其接收信号就是亚光子量级,信号的判断与处理依赖信号的概率分布特征,其噪声特性及来源从未给予明确的分析,更不用说大气引起的噪声和其它影响了^[28]。量子通信特别是墨子号实验卫星的发射得到了社会的极大关注。对于严格的量子特性要求以及极低的信号接收率,无疑大气的影响特别是大气背景噪声的影响要比一般的光电工程严重的多。遗憾的是除了简单的引入一个大气透过率外,相关研究工作并未真正考虑大气的影响^[29]。

单像素成像或单光子成像类的新兴技术声称具有一些显著的优点:比如能在恶劣天气条件下远距离有效工作,可以在其他波长上工作等。实际上这些声称的优点恰恰也对应着显著的缺点,获取一幅模糊不清的图像不知要耗费多长时间,而在其他波长上获得的图像因物体的透过率或反射率不同,所得结果并非所关心的图像,等等。相关文献大部分篇幅用于描述成像硬件系统组成、单元器件性能、图像处理的数学方法和流程,缺乏大气条件的定量描述。主要的精力放在了图像处理的算法,而十分关键的物理问题往往避而不谈。有待澄清的物理和技术问题包括:十分微弱的接收信号的信噪比特性及其信号的确认原理;成像需要的光照射次数及其决定因素;图像分辨率的决定因素;大气湍流造成的图像扭曲,大气散射造成的图像模糊,等等。要将这些技术投入实际应用,应该认真研究上述物理问题,着手解决大气的影响,包括大气湍流、大气散射、吸收的影响。

单光子成像激光雷达本质上是使用了光子探测器件的距离选通成像技术,常规距离选通成像的信噪

比和成像质量应该远优于单光子成像。距离选通成像技术控制信号接收时间,最大限度地回避传播路径上大气介质的后向和前向散射光,以提高接收信号的信噪比^[30]。对于单光子成像技术,即使回避了其他时间内传播途中的大气散射噪声,与信号光同时接收的大气散射噪声也是无法回避的。这种噪声在常规距离选通成像中可能比信号光弱,但可能比单光子信号强。在信噪比远小于 1 (如~1/30) 的情况下依靠算法获得图像的物理基础有待阐明。为实现单光子成像的实用化目标,应在一定的大气条件下探索提高成像性能的方法,或研究成像质量与大气条件的定量关系,而不是忽略其它条件把提高成像距离作为主要研究目标^[31]。

采用类似技术路线的还有所谓的非视线成像,即依靠主动激光照射漫反射屏产生漫反射光,再照射到视线被阻挡的物体,其反射光又照射漫反射屏后的漫反射光被成像器件接收^[32]。从这个复杂的三次漫反射过程可知要获得清晰可靠的图像是不可能的,在此过程中无论是物体和反射屏的漫反射特性、还是该路径中的大气传播特性都添加了比有用信号强得多的背景噪声。经过漫长、复杂的图像处理工作有可能获得一些似是而非的图形,但要获得基本可供识别的信息应该是十分困难的^[33]。

11 结束语

文中讨论了现代大气光学研究及其在光电工程应用中经常遇到的十个问题,澄清了该学科内外对一些关键问题的认识,阐述了对该学科发展的一些粗浅思考,对大气光学特性和新兴光学技术的大气影响两个方面的研究工作提出了一些建议,供广大读者参阅。

参考文献:

- [1] Nussenzveig H M. The science of the glory [J]. *Scientific American*, 2012, 6: 32-37.
- [2] Rao Ruizhong. Contemporary Atmospheric Optics [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [3] Feng Zhichao. On the vistas of the development of 10.6 μm CO₂ laser communications [J]. *Journal of Chengdu Radio Engineering Institute*, 1980(1): 38-43. (in Chinese)
- [4] Rao Ruizhong. Rough road for the development of laser weapons [J]. *Science*, 2020, 72(5): 59-62. (in Chinese)

- [5] Hinkey E D. Laser Monitoring of the Atmosphere [M]. Berlin: Springer Verlag, 1976.
- [6] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures [J]. *J Opt Soc Am*, 1996, 56(10): 1372-1379.
- [7] Rao Ruizhong. General characteristics of modulation transfer function of turbid atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900125. (in Chinese)
- [8] Rao Ruizhong. Probability analysis of effects of optical properties of atmosphere on laser engineering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 583-587. (in Chinese)
- [9] Wang Yingjian, Wu Yi, Gong Zhiben. The statistics of atmospheric coherence length and Strehl ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(8): 1109-1112. (in Chinese)
- [10] Papoulis A, Pillai S U. Probability, Random Variables and Stochastic Processes [M]. Boston: McGraw-Hill, 2002.
- [11] Tatarskii V I. Wave Propagation in a Turbulent Medium [M]. New York: McGraw-Hall, 1961.
- [12] Rao R. Optical properties of atmospheric turbulence and their effects on light propagation [C]// Proc SPIE, 2005, 5832: 1-11.
- [13] Kovalev V A, Eichinger W E. Elastic LIDAR: Theory, Practice, and Analysis Methods [M]. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004.
- [14] Tyson R K. Principles of Adaptive Optics [M]. Boston: Academic Press, 1997.
- [15] Rao Ruizhong, Wang Haiyan. Optical Vortices Propagation in the Atmosphere [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2015. (in Chinese)
- [16] Erkmen B I, Shapiro J H. Ghost imaging: from quantum to classical to computational [J]. *Adv Opt Photon*, 2010, 2: 405-450.
- [17] Shi D, Fan C, Zhang P, et al. Adaptive optical ghost imaging through atmospheric turbulence [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 27992-27998.
- [18] Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y, et al. Theory of optical scintillation [J]. *J Opt Soc Am A*, 1999, 16(6): 1417-1429.
- [19] Charnotskii M. Common omissions and misconceptions of wave propagation in turbulence: Discussion [J]. *J Opt Soc Am*, 2012, 29(5): 711-721.
- [20] Rao R. Scintillation index of optical wave propagating in turbulent atmosphere [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(2): 581-587.
- [21] Stribling B E. Laser beam propagation in non-kolmogorov atmospheric turbulence [DB/OL]. [1999-02]. https://www.researchgate.net/publication/2735636_Laser_Beam_Propagation_In_Non-Kolmogorov_Atmospheric_Turbulence.
- [22] Rao Ruizhong, Li Yujie. Light propagation through non-Kolmogorov-type atmospheric turbulence and its effects on optical engineering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0501003. (in Chinese)
- [23] Nelson W, Palastro J P, Davis C C, et al. Propagation of Bessel and airy beams through atmospheric turbulence [J]. *J Opt Soc Am A*, 2014, 31(3): 603-609.
- [24] Baykal Y. Expressing oceanic turbulence parameters by atmospheric turbulence structure constant [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1228-1231.
- [25] Nootz G, Jarosz E, Dalgleish F R, et al. Quantification of optical turbulence in the ocean and its effects on beam propagation [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(31): 8813-8820.
- [26] Yuan R, Mei J, Liu H, et al. Simulation of the microstructural characteristics of saltwater turbulence in a water tank [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 844-854.
- [27] Marshak A, Davis A B. 3 D Radiative Transfer in Cloudy Atmospheres [M]. Berlin: Springer, 2005
- [28] Rao Ruizhong. Discussion on some key physical and technical problems about lunar laser ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112002. (in Chinese)
- [29] Yin J, Cao Y, Liu S, et al. Experimental quasi-single-photon transmission from satellite to earth [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20032-20040.
- [30] Repasi E, Lutzmann P, Steinvall O, et al. Advanced short-wavelength infrared range-gated imaging for ground applications in monostatic and bistatic configurations [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(31): 5956-5969.
- [31] Li Z, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3 D imaging at 45 km [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(9): 1532-1540.
- [32] Faccio D. Non-line-of-sight imaging [J]. *Optics & Photonics News*, 2019, 30(1): 36-43.
- [33] Dove J, Shapiro J H. Speckled speckled speckle [J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 22105-22120.