

高能激光大气传输性能评估技术

朱文越¹, 钱仙妹¹, 饶瑞中¹, 王辉华²

(1. 中国科学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;
2. 中国人民解放军海军研究院, 北京 100055)

摘要: 激光在实际大气中的传输效果不仅与其自身传输机理有关, 还与大气因素密切相关, 因此, 准确评估激光大气传输的效果, 不仅需要开展激光传输机理的研究, 建立激光大气传输数理模型, 还需要对实际传输过程中的大气光学特性进行测量、分析和预测。鉴于实际大气环境的复杂性及多因素耦合的制约, 激光大气传输的机理研究大都采用大气参数可控的物理实验平台和数值仿真软件平台进行研究, 而大气光学特性的研究则在大量实地测量分析的基础上, 重点发展基于物理相关性分析和数学模型构建的光学湍流模式化表征研究。简要介绍了国内外高能激光大气传输性能评估技术的发展情况, 面向高能激光系统未来的实际应用, 指出了其发展趋势。

关键词: 激光大气传输评估; 湍流; 热晕

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1203002

Evaluation technology of high energy laser atmospheric propagation performance

Zhu Wenyue¹, Qian Xianmei¹, Rao Ruizhong¹, Wang Huihua²

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Naval Research Academy, People's Liberation Army of China, Beijing 100055, China)

Abstract: The actual effect of laser propagation in the atmosphere is not only related to its own propagation mechanism, but also closely related to atmospheric factors. Therefore, to accurately evaluate the effect of laser atmospheric propagation, it is not only necessary to carry out the mechanism research and establish the mathematical model of laser atmospheric propagation, but also necessary to carry out measurement, analysis and prediction of the optical characteristics of the atmosphere in the propagating process. Considering the complexity of the real atmospheric environment and the interaction of many factors, most of the researches adopt the physical experiment or the numerical simulation with controlled parameters to quantitatively reveal the influence of various atmospheric factors on laser propagation. Based on a large number of field measurements and the physical correlation analysis, the research of atmospheric optical characteristics focuses on the parametric modeling of optical turbulence. The development of the performance evaluation technology for the high energy laser was briefly

收稿日期: 2019-10-20; 修订日期: 2019-11-30

基金项目: 国防科技创新特区项目

作者简介: 朱文越(1976-), 男, 研究员, 主要从事激光大气传输方面的研究。Email: zhuwenyue@aiofm.ac.cn

introduced when propagating in the atmosphere at home and aboard, and its development trend for the practical application of high energy laser system in the future was pointed out.

Key words: laser atmospheric propagation evaluation; turbulence; thermal blooming

0 引言

高能/高功率激光束在地球大气中传输时,除了衍射效应造成的激光束空间几何展宽之外,其他所有影响激光大气传输效果的主要因素(包括线性效应和非线性效应)均与大气参数密切相关。大气温度场的随机起伏引起的折射率变化对激光束产生了扰动,造成了光波相位畸变,影响激光在传输路径上的强度分布变化即湍流效应;大气中的气体分子和气溶胶对高能激光束能量的吸收积累到一定程度导致大气显现出了“负透镜”效果,即产生了非线性热晕效应;与此同时,气溶胶和分子的散射和吸收也对传输的激光能量分布产生影响,直接导致光波能量的衰减^[1-3]。

对于高能激光系统的工程应用,判断其成功与否的关键是能否实现激光能量的高效定向传输。根据光传播原理可知:高能激光经过一定距离的大气传输通道,到达目标处的传输效果(用一定面积内的平均激光功率密度来衡量)取决于高能激光系统的物理参数(初始发射功率、光束质量、发射口径等)、传输机理(衰减效应、湍流效应、热晕效应、湍流-热晕相互作用等)和传输通道内的大气光学特性(湍流强度、吸收系数、衰减系数、风场等)。因此,高能激光大气传输性能评估就是以任务规划和传输效果评价为目标,采用设备实时测量、大数据分析、机器学习和智能预测等方法获取的大气光学特性参数作为输入项,以物理实验和数值仿真等技术手段建立的高能激光大气传输数理模型和定标规律为计算引擎,获得平均激光功率密度等输出项的过程。其技术体系主要包括以下三个方面的内容:其一是激光大气传输机理研究与数值仿真技术,这是高能激光大气传输性能评估的核心;其二是大气光学特性参数测量与建模技术,这是性能评估的前提;其三是基于系统物理参数、大气光学参数和传输模型的性能预测技术,这是性能评估的最终表现形式。

文中简要介绍了国内外高能激光大气传输性能

评估技术研究的发展现状,重点阐述了高能激光大气传输数值仿真和大气光学特性建模等研究工作。面向连续、脉冲等不同体制激光大气传输的实际工程应用,指出了高能激光大气传输性能评估技术发展的趋势,提出了高能激光辅助决策技术的概念,并阐述了其基本原理和应用示范情况。力图为高能激光系统的大气传输效果的评估提供了理论支撑,为激光大气传输研究的创新应用发展奠定基础。

1 高能激光大气传输机理和仿真研究

由高能激光毁伤效应原理可知,到达目标处的激光能量/功率密度大小基本上决定了毁伤效果的好坏。因此,国际上开展高能激光系统效能评估时都普遍先从高能激光大气传输研究开始。

过去的 40 余年,国内外诸多科研机构均开展了相似的高能激光大气传输理论和数值仿真研究,尤其是制约高能激光系统效能发挥的热晕效应的研究。1974 年 Bradely 等提出了热晕问题的解析方法,并且提出了热畸变参数来衡量高能激光大气传输热晕效应光斑畸变的严重程度^[4]。此后一段时间出现了大量关于热晕的理论和实验研究,尤其是美国麻省理工学院林肯实验室全面系统性开展了高能激光大气传输的室内外传输实验,获得了诸多参数可控条件下的高能激光大气传输定标规律。包括适用于连续波、单脉冲、多脉冲等不同体制激光的稳态热晕和瞬态热晕的研究结果,并且基于理论分析研究建立了与室内实验结果有较好符合度的数值模拟程序^[5-7]。然而,最近 20 年来高能激光传输基础理论研究方面鲜有崭新的、突破性的进展报道,但在高能激光大气传输数值仿真模型和定标规律的应用方面研究成果不断。而且,近几年来美国、德国等接连曝光其高能激光系统外场实验的结果。这表明,高能激光大气传输的研究已经基本走出了机理研究的“黑暗森林”,正逐步向实用推进。

从 20 世纪 80 年代中期起,美国就开始研发了 MOLLY、GRAND 等高能激光大气传输数值模拟程

序^[8-9],用于研究高能激光在大气中传输时的湍流效应、热晕效应及其自适应光学校正性能问题。有趣的是,MOLLY程序的命名来自于James Joyce的小说《尤利西斯》(Ulysses)中的人物Molly Bloom^[8],程序开发者大概认为热晕的特性与Molly Bloom的人物特征相类似。1995年,为了开展机载高能激光系统(ABL)研制过程中的性能评估,MZA公司基于Tempus仿真框架建立了高能激光系统全流程数值仿真软件平台WaveTrain。2011年,TimeLike System公司基于新一代的TimeLike框架构建了WaveTrain仿真平台的升级版本LightLike^[10-11]。近年来,随着高能激光系统的应用逐渐提上日程,在国防部高能激光联合技术办公室(DoD/HEL-JTO)的资助下,美国空军理工学院定向能研究中心(AFIT/CDE)、海军研究生院、诺-格公司等单位,开发了面向高能激光端对端操作仿真(High Energy Laser End-to-End Operational Simulation, HELEEOS)、高能激光战术决策辅助(High Energy Laser Tactical Decision Aid, HELTDA)、高能激光统一模型和作战仿真(High Energy Laser Consolidated Modeling and Engagement Simulation, HELCOMES)、海军研究生院高能激光大气传输代码(Atmospheric NPS Code for High energy laser Optical propagation, ANCHOR)、高能激光系统端对端模型(High Energy Laser System End-to End Model, HELSEEM)^[12-19]。

HELEEOS模型能够评估在权重约束条件下低空所有主要大气效应导致的高能激光系统应用性能的不确定性,这包括水云、雾、小雨和气溶胶等的物理表现;它还可用于由于空间、时间、昼夜和季节等不同导致大气影响发生了变化引起的不确定性及其概率。该模型可以模拟多个波长的高能激光系统,有许多面向实用的指标可用,包括有效距离和毁伤所需驻留时间。HELEEOS的结果可以表示为交互式列线图,允许用户详细浏览参数空间。HELEEOS的核心是由MZA公司开发的高能激光定标规律(Scaling the High energy laser And Relay Engagement, SHaRE)工具包和一个包含了全球多维实际大气相关参数及其概率的激光环境效应定

Definition and Reference, LEEDR)。在某种意义上,HELEEOS起到了高能激光系统“大脑”的作用,它可以辅助使用者进行任务规划和评估。SHaRE工具包基于一个大气光传输和光束控制结果的定标规律来支撑HELEEOS的远场光斑分布评估、湍流和热晕效应传输计算,该定标规律建立在波动光学数值仿真基础之上,经过广泛地实证分析、固化及优化后得到。

HELTDA模型与HELEEOS模型都是在高能激光联合技术办公室等的资助和引导下由定向能研究中心构建并不断升级完善的,它主要是用作高能激光系统任务事前规划工具。该模型支持任务需求的部署、任务部署的规划,以及总部领导层和负责实现预期任务效果的现场指挥员对“可能领域”的共同理解。HELTDA使用HELEEOS作为其计算引擎,在白天、夜晚或者世界各地的任何时间,操作者都能建立动态的、一对一的定向能任务方案。通过嵌入多维度的几何场景,包括“空—地”、“地—空”和“地—地”,灵活使用整合了感兴趣区域当前和预测天气条件的全球数值天气预报模型来适应“战争迷雾”。无论是目标拦截还是激光通信,HELTDA的图形用户界面和任务分析工具都能帮助操作员规划和优化战略战术。

HELCOMES是一种高能激光系统级的交战代码,与科学应用国际公司(SAIC)的大气补偿仿真波动光学代码(ACS)紧密相关,用于预测高能激光系统的性能。它的历史可以追溯到1983年左右的“系统性能代码”SPC,它本身就是根据SWATM合同编写的代码。SPC在1994年由SAIC进一步开发,使用定标规律来预测机载激光系统ABL的性能。在过去几年中,SAIC开发了陆基、空基和海基等高能激光系统的模型。在过去的两年中,HELCOMES发生了巨大的变化,解决了易用性,灵活性和可扩展性,这种转变对于解决激光领域的需求是必要的。HELCOMES的当前形式是基于Java的系统级激光传播代码,改进的HELCOMES最重要方面之一是可扩展性,使用户能够合并基本版本中未包含的特定大气廓线并导入可能在其他地方生成的任务约定文件。

诺-格公司开发的HELSEEM模型设计目的是

用作“消息代理”软件,允许使用多源数据,它还具有场景生成能力。本质上,HELSEEM 是一个仿真框架,它包含了动态瞄准点激光应用模块(DALE)、HELCOMES 模块、先进跟踪时间域分析仿真模块(TASAT)和大气补偿仿真模块(ACS),允许不同来源的激光器、传感器、目标和传播组件模型协同工作,用于模拟系统级、1 对 1 或 1 对 N 的高能激光系统应用。

基本上与美国同期,国内科研机构也开展了高能激光大气传输及其自适应光学校正的数值仿真研究。在国家 863 计划等的资助下,中国科学院安徽光学精密机械研究所先后开发了基于波动光学四维数值模拟算法的“高能激光大气传输”程序(High Energy Laser Propagation, HELP) 和基于新型改进算法的“激光大气传输代码”(Code for Laser Atmospheric Propagation, CLAP)软件^[20-21]。HELP 和 CLAP 程序均基于光场传播的抛物型方程和多层相位屏技术,实现了激光大气传输的湍流效应、热晕效应以及湍流和热晕相互作用等的波动光学数值模拟。HELP 还集成了湍流和热晕效应的自适应光学校正模块,能够实现不同信标情况下的校正性能模拟。相对于 HELP 程序的文件输入/输出型交互模式,CLAP 仿真软件采用了更加友好的图形化用户交互界面(如图 1 所示),计算参数的设置方便简单,具备“地—地”、“地—空”、“空—地”和“空—空”等 4 种可选的激光大气传输路径,内置了除美国标准大气模式之外的我国东部(合肥)和西北等多个地区大气模式以及 10 种光学湍流廓线等,可以在多种传输模式下对圆形、环形、方形和自定义形状等光束的传输过程和效应参数进行仿真计算,光传播的实时过程利用 OpenGL 技术能够三维动态显示。此外,CLAP 的计算内核充分利用了国际标准的科学计算程序集,仿真运行速度明显提升。HELP 主要面向高能激光大气传输性能的模拟计算,而 CLAP 的用途则进一步扩展,可以有效地为自由空间光通信、激光雷达探测以及随机介质中的光传输研究等提供理论分析和性能预测。除了在实验室内开展的一系列激光大气传输定标试验之外,大量的激光大气传输外场试验也在持续进行,这些实验结果不仅验证和完善了 HELP 和 CLAP 中仿真模型的准确性,



图 1 CLAP 用户操作界面

Fig.1 GUI of the CLAP program

也为软件算法的优化升级提供了可靠的验证数据。

近年来,针对高能激光系统研制过程中器件组合后的性能仿真需求,北京应用物理与计算数学研究所、国防科技大学和中国科学院软件研究所开发了类似美国 WaveTrain 软件的 EasyLaser、SeeLight 全流程仿真软件。

EasyLaser 仿真软件由通用的组件化建模仿真支撑平台 SciSimu 和传感器组件库、信号组件库、光学组件库、光源组件库、大气组件库、控制组件库、目标场景组件库和辅助组件库等 8 个仿真组件库构成。它能够对激光系统运行过程中的主要物理环节进行仿真,包括:虚拟场景生成、目标成像及运动模拟、光源模拟、光学元件模拟、光学元件间光束传输模拟、大气特性及湍流相屏模拟生成、大气光传输模拟、扩展目标大气传输及光学成像的模拟、望远镜系统对目标识别、捕获、提取和跟踪的模拟、自适应光学系统模拟等^[22]。图 2 是目前组件库中已开发完成的组件列表。

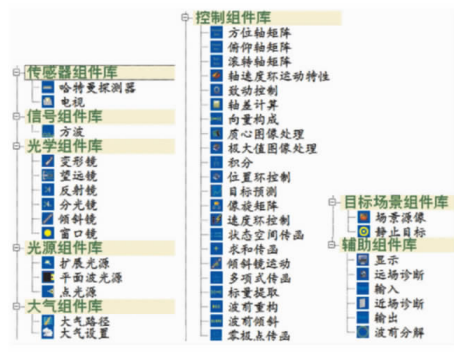


图 2 EasyLaser 的组件库^[22]

Fig.2 Component library of EasyLaser^[22]

SeeLight 平台是一套教学辅助的光学虚拟仿真

实验平台,以傅里叶光学、自动控制、大气光学和自适应光学等领域的基本原理为理论基础,以计算机仿真技术为手段,开发了涵盖光源、大气传输、光束定向控制、目标和环境等在内的 4 大类 24 个成熟的大型光学系统关键核心模型模块,且支持灵活的扩展定制模型,满足不同场景的仿真模拟需求。以“搭积木”形式构建相应的模拟仿真系统并快速获得仿真结果,从而达到支撑方案设计论证、关键参数指标确定、新概念新技术初步验证,以及辅助光学实验教学的目的。其能够提高光学教学实验质量、提升虚拟仿真实验的针对性、降低实验成本、发挥学生自主创新意识^[23-24]。图 3 是 SeeLight 平台的功能架构。



图 3 SeeLight 平台功能架构^[23]

Fig.3 Functional framework of SeeLight^[23]

EasyLaser 和 SeeLight 具备了国外全流程仿真平台 WaveTrain 类似的场景构建和生成能力,也能够对高能激光系统研制过程中的性能设计和优化进行仿真评估。

对比分析国内外高能激光大气传输的机理、建模和验证等方面的研究工作,其发展思路基本一致,模型的可靠性均取得了较大进展,用户可根据系统参数、应用场景和大气状态,对高能激光在指定典型地区大气环境下的传输性能进行仿真评估,总体上满足了实验室论证分析或试验场技术验证阶段的使用。

2 大气光学特性的测量、建模与预测

为了配合军用光电系统研制过程中的性能论证和部署应用后的效能评估,描述光电系统在不同大气条件下的性能表现,美国在全球热点区域开展了一系列涉及大气分子衰减、气溶胶散射/吸收等光学参数的测量实验,并建立了相应的大气光学模式。尤其是面向激光大气传输效应,建立了专门用于激光传播工程的光学湍流参数化模型,比如支持机载激

光的光学湍流研究主数据库 (Master Database for Optical Turbulence Research in support of the Airborne Laser, MDOTRAL) 和海军表面层光学湍流模型 (Navy Surface Layer Optical Turbulence model, NSLOT), 以及用于激光大气通信和成像的 PAMELA 模型等^[14, 16, 25-28]。此外,还建立了用于高能激光大气传输性能评估的数据库,其中最具代表性的是 LEEDR^[29-30],这是一个覆盖全球地面到 100 km 高度大气特征的数据包,其集成使用了多种可用资源,包括全球 408 个地点的极端和百分位环境参考表 (the Extreme and Percentile Environmental Reference Tables, ExPERT)、表层海洋格点化气候数据库 (the Surface Marine Gridded Climatology database, SMGC)、全球气溶胶数据集 (the Global Aerosol Data Set, GADS)、海军先进气溶胶模型 (Advanced Navy Aerosol Model, ANAM) 以及光学湍流数据库 MDOTRAL 等。全球主要气候参数的季节、昼夜和地理时空变化都被组织到 LEEDR 的概率密度函数(PDF)数据库中,作为性能预测仿真软件平台的输入大气参数模型,它与空军气象局的 MM5 数值天气预报数据以及定向能环境模拟工具 (Directed Energy Environmental Simulation Tool, DEEST) 相结合,可以生成大气温度、气压、水汽含量、光学湍流和气溶胶的垂直分布廓线,以及云的分布情况,而这些参量与光波/微波大气逐层传输的消光特性密切相关。LEEDR 与 HELEEOS 等仿真平台或定标规律软件配合,能够评估高能激光在某一特定地区、特定时间的传输性能及其概率。

在大气光学特性预测研究方面,海军研究实验室海洋气象部开发了大气预测的海-气耦合的中尺度预测系统 (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System, COAMPS)^[31],基于气象观测、卫星遥感、船舶报告、海洋观测和水深测量等的数据,COAMPS 能够预测风场、温度、气压、气溶胶等。由于 COAMPS 的初始状态值是基于观测得到的,因此,它是可重定位的,可以在全世界范围内使用。与 LEEDR 数据库一样,COAMPS 的预报数据能够被输入 NSLOT 模型用于计算海洋表面层的折射率廓线。当 COAMPS 模型与 NSLOT 模型结合起来使用时,可以用于评估准实时环境下的激光传输性能以

及确定任务规划的窗口。

国内在大气光学特性数据库和建模方面也开展了卓有成效的研究工作。瞄准光学遥感和高能激光大气传输应用,中国科学院安徽光学精密机械研究所建立了大气与地物光学特性数据库和大气光学特性参数数据库^[32-35]。其中,大气光学特性数据库基于我国 91 个气象探空站近 20 年来的温湿压风等常规气象历史大数据,以及数十年来我国在大气光学特性参数测量结果的基础上构建而成,它可以根据需求生成逐月、逐日、逐年或分时平均的大气模式。数据库涵盖了 22 台(套)测量仪器,总共 33 类大气参数,可以自动导入大气参数和图像(含偏振图像与非偏振的强度图像)等多源异构海量数据,同时能对这些数据进行查询、提取、保存等。图 4 是大气光学特性参数数据库的运行界面。



图 4 大气光学特性参数数据库

Fig.4 Database of atmospheric optical characteristic parameters

在大气光学特性预测研究方面,目前国内学者重点开展了光学湍流的模型研究。在理论建模方面大都基于国外已有的参数化模型(比如 MOS 理论)并结合常规气象参数或天气预报模式进行大气光学湍流估算;在经验模式研究方面,国内开展了大量的测量工作并基于实测数据建立了一些典型地区的经验模式^[36-37]。目前,已得到了华北、华东、西北、西南、东南等内陆和沿海地区的光学湍流廓线模式。

由于在基础科学研究方面的巨大投入优势,美国建立的激光大气传输数据库的规模明显较大,尽管各模块相对独立,但彼此之间以及与其他数据库之间的交互性较好,充分借鉴利用了其国内科研机构 and 政府部门收集的大量基础数据,以及国际上公开的气象台站、气溶胶观测网和卫星遥感的数据及

模式,并且构建了诸如 LEEDR 这样的大规模集成化的大气概率模型,再结合天气研究与预报模型(Weather Research and Forecasting Model, WRF)中的天气参数预报能力,足以支撑其未来高能激光系统面向全球的规划、部署和应用。

3 高能激光系统辅助决策技术

高能激光大气传输性能评估技术从 20 世纪 70 年代开始,经历了三代发展。第一代是以 MOLLY 等为代表的高能激光大气传输效应的波动光学四维数值模拟程序,结合高能激光大气传输室内定标实验,不断完善高能激光大气传输的机理模型并修正数值模拟的精度,为高能激光系统的设计论证提供了科学数据支撑,这也是狭义的高能激光大气传输评估技术的内涵,国内开发的 HELP 和 CLAP 都属于这一代。第二代则是以 WaveTrain 为代表的高能激光系统全流程数字样机仿真平台,这是在高能激光大气传输效应数值模拟的基础上,面向系统研制,以降低高能激光系统昂贵的技术性能测试费用为目标,利用现代计算机数字化仿真技术的发展优势,拟建立完善的科学仿真工具,能够优化系统设计并外推数值仿真结果到其他的高能激光系统,避免或减少当前高能激光系统领域常用的通过不断新建实物系统来验证技术能力的昂贵方式,EasyLaser 和 SeeLight 也属于这一类。第二代评估技术已经从单纯的高能激光大气传输效应评价扩展到高能激光系统研制过程的仿真和系统性能优化迭代的评估,被视为广义的高能激光大气传输评估技术。目前,随着高能激光系统的应用逐步提上日程,以高能激光系统论证中传输效应分析为主要目标的第一代评估技术和以系统研制中的性能优化为目标的第二代评估技术已经无法满足实际应用环境和使命任务规划的需求,高能激光大气传输性能评估技术迫切需求进一步发展。需要评估出系统的原有设计性能在实际大气光学特性环境中的效能表现及其概率,并且能够具备一定的性能预测功能,便于任务的提前规划。在这种需求的牵引下,以 HELEEOS 等为代表的第三代高能激光大气传输性能评估技术在国际上开始崭露头角。这一代技术是指以高能激光系统的执行任务规划和实际效能评估为目标,结合大

数据分析、机器学习及智能预测等技术获取的大气光学特性概率化参数,以物理实验和数值仿真等技术建立的高能激光大气传输机理和规律为核心,构建支撑决策相关的高能激光大气传输应用模型,形成不断完善的、辅助指挥员进行任务决策的高能激光辅助决策系统。考虑到实际应用时任务规划对运行速度的需求,这一代评估模型都采用了基于波动光学数值模拟算法的拟合公式或简化物理模型的快速定标规律模型(the scaling law model)^[38-44],因此,第三代高能激光大气传输性能评估技术也被称为辅助决策技术。

依据上述基本内涵,可以看出,高能激光大气传输的机理、规律及其数值仿真模型依然是高能激光系统辅助决策技术的核心内容。

目前,中国科学院安徽光学精密机械研究所在原有基础上升级开发的 CLAP Plus 已经初步具备了第三代高能激光大气传输性能评估技术的基本特征。CLAP Plus 在原有波动光学四维数值模拟算法的基础上,集成了经过试验验证的高能激光大气传输定标规律算法和大气光学特性数据库。其中的热晕定标规律采用了如下的拟合形式^[42]:

$$\beta_{ib}^2 = a(N_D/N_0)^b + c(N_D/N_0)^d \quad (1)$$

式中: β_{ib} 为热晕效应导致的光斑扩展倍数; a 、 b 、 c 、 d 为拟合系数; N_0 为无量纲参数,可以由波动光学四维数值模拟程序计算拟合得到。对于配备了自适应光学校正单元的高能激光系统,CLAP Plus 还集成了如下的基于残差模型的定标规律形式^[45]:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{if}^2 + \sigma_{bf}^2 + \sigma_{CT}^2 + \sigma_{CW}^2 + \sigma_{\theta T}^2 + \sigma_W^2 + \sigma_{wfs}^2 \quad (2)$$

式中: σ_{total}^2 为系统校正后的总残余方差; σ_{if}^2 为湍流效应的拟合校正残差; σ_{CT}^2 为湍流倾斜校正带宽受限残差; σ_{CW}^2 为湍流波面校正带宽受限残差; σ_{bf}^2 为热晕效应的拟合校正残差; $\sigma_{\theta T}^2$ 为提前角非等晕倾斜校正残差; σ_W^2 为探测信噪比影响的校正残差;对于目标照明信标, σ_W^2 为提前角非等晕波面校正残差,对于激光导星信标, σ_W^2 为聚焦非等晕湍流校正残差。自适应光学校正残差 σ_{total}^2 和光束校正性能的斯特列尔比

(Strehl ratio) S 存在如下的关系,其中 A 、 B 为系统有关的系数。

$$S = \begin{cases} e^{-\sigma^2} & \sigma \leq 1 \\ A(\sigma_{total}^2)^{-B} & \sigma > 1 \end{cases} \quad (3)$$

利用基于快速定标规律的 CLAP Plus 模型,以及实时或准实时获取的大气光学特性参数,就可以快速评估出高能激光的大气传输性能;与高能激光目标毁伤数据库、大气光学特性数据库及预报模型相结合,就可以对指定参数的高能激光系统在特定地区应用的效能进行仿真预测,实现辅助决策模式。

4 应用示范

目前,高能激光系统辅助决策技术的实效性虽尚未在实际任务部署和应用中得到验证,但已开始进行任务规划和专项技术试验中进行了初步尝试。

下面将给出利用高能激光大气传输评估技术进行辅助任务规划的应用范例。表 1 是用于仿真分析的某船载激光系统的基本参数。

表 1 某船载 HEL 系统的基本参数

Tab.1 Basic parameters of the ship-based HEL system

Parameters of the HEL system	Value
Laser power/kW	100
Wavelength/ μm	1.064
Beam quality(M^2)	3
Jitter error/ μrad	5
Beam director diameter/m	0.3
Beam type	Uniform
Beam director height/m	10

图 5 是利用该高能激光系统参数由美国 ANCHOR 模型基于 LEEDR 数据库中的台湾海峡冬季大气参数仿真给出的到达指定距离、方位目标处的激光功率密度分布;图 6 是硬毁伤给定材料的目标所需的激光驻留时间(这里的硬毁伤定义为 3 mm 厚度、100 cm² 面积的铝材被激光熔穿)^[18]。显然,系统指挥员可以根据任务需求,结合激光功率密度分布和激光驻留时间,对高能激光的发射路径、任务执行与否等进行规划判断。

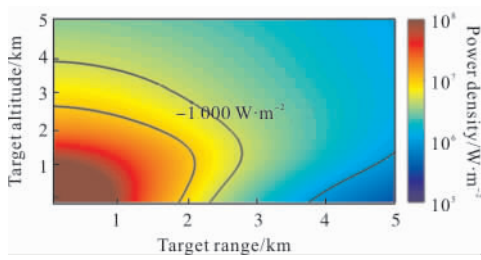


图 5 平均激光功率密度和目标距离和高度^[18]

Fig.5 Time-averaged power density vs. target range and altitude^[18]

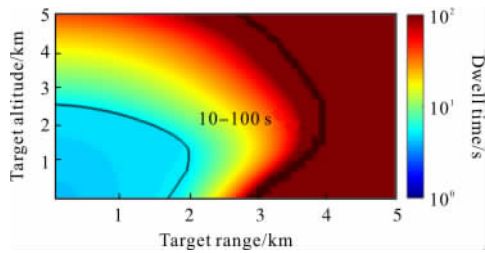


图 6 所需的驻留时间和目标距离和高度^[18]

Fig.6 Required dwell time vs target range and altitude^[18]

当高能激光系统进行任务部署时，为充分发挥系统使用效能，需要对部署站点进行预先评估。图 7 是利用 HELEEOS 模型和 LEEDR 数据库对指定高能激光系统参数、传输路径等条件的 COIL 激光在全球应用时激光毁伤特定材质目标所需驻留时间的分析评估^[13]。



图 7 全球驻留时间分析^[13]

Fig.7 World wide analysis of dwell time^[13]

对比到达目标处的激光功率密度和毁伤所需的驻留时间，高能激光系统的操作指挥员能够在极短的时间内获得激光系统对一系列目标作用有效性的清晰提示，这样就能让操作指挥员快速进行任务部署的决策。

除了能够给出目标处的平均激光功率密度和目标毁伤激光驻留时间之外，HELEEOS 模型还可以利用 LEEDR 数据库大气参数的模型预报功能，对不同波长激光在世界各地不同传输路径条件下的传

输性能的不确定性进行评估，以目标处桶中功率 PIB 与发射功率的比值为衡量指标，评估结果如图 8~10 所示^[46]。基本的评估参数为：激光波长为 0.355~10.6 μm，站址为 ExPERT 数据库中的 216 个中纬度陆地站点和 38 个沙漠站点，夏季大气模式，50% 相对湿度，地-空传输路径，6 000 m 斜程距离，目标高度 3 000 m，发射口径为 0.5 m，环形平顶光束，中心遮拦比为 0.1，仅考虑倾斜校正后无抖动，PIB 的约束直径为 5 cm。

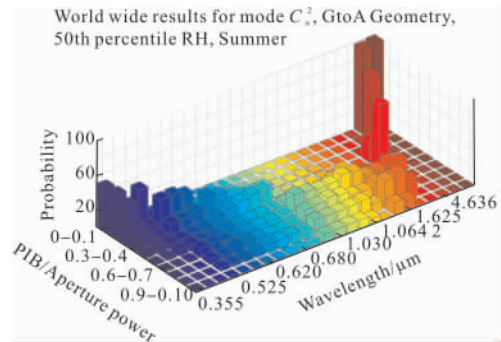


图 8 气候模型 C_n^2 性能对比^[46]

Fig.8 Comparison for climatological mode C_n^2 ^[46]

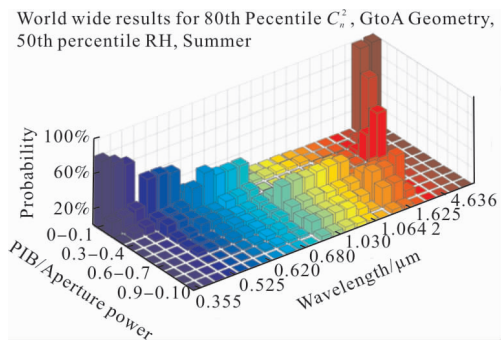


图 9 80% 概率气候模型 C_n^2 性能对比^[46]

Fig.9 Comparison for 80% climatological mode C_n^2 ^[46]

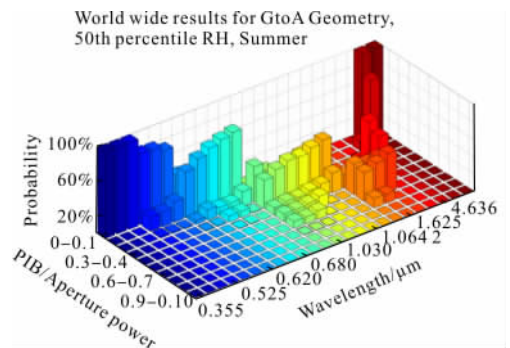


图 10 HV-5/7 模型 C_n^2 性能对比^[46]

Fig.10 Comparison for HV-5/7 model C_n^2 ^[46]

通常情况下,高能激光系统的实际运行状态并不总是与设计参数保持一致,高能激光大气传输评估技术不仅可以用于指定参数的高能激光系统性能的预测即正向评估,还能够基于高能激光大气传输的效果(仿真值和试验测量结果)对系统的工作状态或性能发挥进行诊断即反向评估。图 11 是 HELP 模拟软件利用当地实时获取的大气光学特性参数对特定高能激光系统的传输效果进行仿真的结果。在发射功率、口径等其他参数已知的情况下,图中仿真得到了目标处的归一化功率密度随瞄准误差的变化(瞄准误差分别为 1、2、3 μrad 情况下的结果),并与试验测量得到的平均功率密度进行了对比。据图分析可知,试验结果与瞄准误差为 2 μrad 时仿真值的平均相对偏差小于 10%;与瞄准误差为 3 μrad 时仿真值的平均相对偏差也不超过 20%。考虑到试验测量中的误差,可推断,该高能激光系统运行时的瞄准误差值最可能在 2~3 μrad 之间。

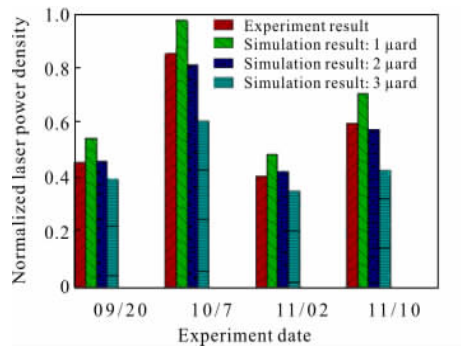


图 11 平均功率密度试验值与仿真结果对比

Fig.11 Experimental results vs simulated value of normalized average power density

通过对比试验测量结果与仿真值,可以对高能激光系统的状态进行诊断评估。只有对系统状态进行确认后,方可开展高能激光大气传输性能的预测。

5 展望与发展趋势

高能激光大气传输评估技术历经 40 余年的发展,伴随着高能激光系统的发展逐步前行,从初始的传输效应模拟到性能优化,再到实际应用的规划和辅助决策。与传统的动能和化学能的定向应用不同,

光能的定向传输应用受大气环境的影响较大,相当一部分能量在传输的过程中被衍射效应、衰减效应、湍流效应和可能出现的热晕效应“消耗”殆尽,导致到达目标上实际起作用的有效面积内的能量或功率仅处于目标毁伤阈值的“临界”状态。因此,对于高能激光系统的应用而言,预先准确评估其传输性能变得至关重要。

目前,高能激光器技术发展日新月异,从传统的高能化学激光逐渐发展到高能固体板条激光、高能光纤激光、高能固体液冷激光以及高能碱金属激光等,发射体制覆盖连续型、准连续型、脉冲型等,波长范围既有传统的单波长激光、多谱线激光,也有宽谱合成激光以及超连续谱激光等。因此,为了准确衡量未来高能激光系统大气传输的性能特征,在机理研究方面,需要全面开展连续、脉冲等多体制、多波长高能激光大气传输机理研究,建立激光大气传输机理模型和定标规律;在大气光学特性研究方面,需要全方位获取大气光学特性参数,建立网格化、概率化、动态化的大气光学特性数据库和预报模型,结合实时或准实时的大气光学参数测量技术,实现高能激光大气传输性能评估技术朝着高能激光系统辅助决策系统(High Energy Laser Assistant Decision System, HELADS)的方向发展,成为高能激光系统必不可少的重要组成部分。因此,为适应我国高能激光计划的规划发展,系统性地建立全球区域大气光学特性参数数据库及预测模式非常必要。

参考文献:

[1] Tatarski V I. Wave Propagation in a Turbulent Medium [M]. Translated by Wen Jingsong, Song Zhengfang, Zeng Zongping, et al. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese)
塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩, 宋正方, 曾宗泳, 等. 译. 北京: 科学出版社, 1978.

[2] Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Media [M]. Translated by Huang Runheng, Zhou Shijian. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
石丸. 随机介质中波的传播和散射 [M]. 黄润恒, 周诗健,

- 译. 北京: 科学出版社, 1986.
- [3] Strohbehn J W. Laser Beam Propagation in the Atmosphere[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978.
- [4] Bradley L C, Herrmann J. Phase compensation for thermal blooming[J]. *Appl Opt*, 1974, 13(2): 331-334.
- [5] Fleck J A, Morris J R, Feit M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere[J]. *Appl Phys*, 1976, 10: 129-160.
- [6] Fleck J A, Morris J R, Feit M D. Time-dependent propagation of high-energy laser beams through the atmosphere II[J]. *Appl Phys*, 1977, 14: 99-1157.
- [7] Johnson B. Thermal-blooming laboratory experiments [J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1992, 5 (1): 151-170.
- [8] Schonfeld J F. The theory of compensated laser propagation through strong thermal blooming [J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1992, 5(1): 131-150.
- [9] Mehta N C. GRAND: a 4-D wave optics code for atmospheric laser propagation [C]//Proc of SPIE, 1991, 1487: 10.1117/12.46553.
- [10] Steve Coy. WaveTrain: A user-friendly wave optics propagation code[EB/OL]. [2019-10-31]. <https://www.mza.com/publications/wtspiepaper.htm>.
- [11] LightLike User's manual[EB/OL]. [2019-10-31]. <http://www.timelikesystems.com/htmldocs/LightLikeHelp/index.html>.
- [12] Coy S, Panthaki M. Multidisciplinary model based engineering for laser weapon systems: recent progress [C]//Proc of SPIE, 2013, 8840: 10.1117/12.2030195.
- [13] Fiorino S T, Bartell R J, Perram G P, et al. The HELEEOS atmospheric effects package: a probabilistic method for evaluating uncertainty in low-altitude high energy laser effectiveness [J]. *Journal of Directed Energy*, 2006, 1(4): 347.
- [14] Fiorino S T, Bartell R J, Krizo M J, et al. Worldwide mission planning tool for tactical laser systems [J]. *Journal of Aerospace Computing Information and Communication*, 2009, 6(8): 491-505.
- [15] Burley J L, Fiorino S T, Randall R M, et al. High-energy laser tactical decision aid (HELTDA) for mission planning and predictive avoidance [C]//Proc of SPIE, 2012, 8381: 10.1117/12.919046.
- [16] Steve Doss-Hammel, Tsintikidis D, Merritt D, et al. Atmospheric characterization for high energy laser beam propagation in the maritime environment [C]// Proc of SPIE, 2004, 5552: 10.1117/12.562302.
- [17] Fussman C R. High energy laser propagation in various atmospheric conditions utilizing a new accelerated scaling code [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2014.
- [18] Collins J C. An improved thermal blooming model for the laser performance code ANCHOR [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2016.
- [19] Needham D, Eckstrand E. Analyzing a high energy laser modeling and simulation framework [C]//Proceeding of the International Conference on Software Engineering Research and Practice, 2004: 580-586.
- [20] Huang Yinbo. Study on HEL propagation and its phase compensation in the dense atmosphere near the ground [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
黄印博. 高能激光近地面稠密大气传输及其相位校正的若干分析 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005.
- [21] Zhu Wenyue, Huang Yinbo, Qian Xianmei, et al. Code for laser atmospheric propagation and its applications [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 6(2): 451-458. (in Chinese)
朱文越, 黄印博, 钱仙妹, 等. 激光大气传输模拟程序 CLAP 及其应用 [J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 6(2): 451-458.
- [22] Xie Xiaogang, Zhang Jianzhu, Yue Yufang, et al. EasyLaser: Component-based laser system simulation software [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(10): 2536-2540. (in Chinese)
谢晓刚, 张建柱, 岳玉芳, 等. 激光系统组件化仿真软件 EasyLaser [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25 (10): 2536-2540.
- [23] SeeLight 光学系统虚拟仿真真实验平台介绍 [EB/OL]. [2019-10-31]. <https://mp.weixin.qq.com/s/YsEA2dxoPvKA8HIjWHkWSw>.
- [24] Sun Quan, Lv Pin, Ning Yu, et al. Application of optical system simulation software SeeLight in adaptive optics [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 180077. (in Chinese)
孙全, 吕品, 宁禹, 等. 光学系统仿真软件 SeeLight 在自适应光学上的应用 [J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 180077.

- [25] Frederickson P A, Davidson K L, Zeisse C R, et al. Estimating the refractive index structure parameter (Cn₂) over the ocean using bulk methods [J]. *J Appl Meteorology*, 2000, 39:1770–1783.
- [26] Smith R W, Ricklin J C, Cranston K E, et al. Comparison of a model describing propagation through optical turbulence (PROTURB) with field data[C]//Proc of SPIE, 1994, 2222: 10.1117/12.177955.
- [27] Eun Oh, Ricklin J C, Gilbreath G C, et al. Optical turbulence model for laser propagation and imaging applications [C]//Proc of SPIE, 2004, 5160: 10.1117/12.504556.
- [28] Oh Y H, Ricklin J C, Oh E, et al. Estimating optical turbulence effects on free-space laser communication: Modeling and measurements at ARL's A_LOT facility [C]//Proc of SPIE, 2004, 5550: 10.1117/12.562362.
- [29] Fiorino S T, Bartell R J, Krizo M J, et al. A first principles atmospheric propagation & characterization tool—the laser environmental effects definition and reference (LEEDR) [C]//Proc of SPIE, 2008, 6878: 10.1117/12.763812.
- [30] Fiorino S T, Randall R M. Validation of a UV-to-RF high spectral resolution atmospheric boundary layer characterization tool [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53: 10.1175/JAMC-D-13-036.1.
- [31] COAMPS Model [EB/OL]. [2019-10-31]. <https://www.cencoos.org/data/models/coamps>.
- [32] Peng Nina, Zhou Jianmin, Luo Jun, et al. Optical characteristic database of atmosphere and typical object [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(2): 92–96. (in Chinese)
彭妮娜, 周建民, 罗军, 等. 大气及典型地物光学特性数据库[J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(2): 92–96.
- [33] Yi Weining, Peng Nina, Du Lili, et al. Introduction to the optical characteristic database of atmosphere and object [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 440–445. (in Chinese)
易维宁, 彭妮娜, 杜丽丽, 等. 大气与地物光学特性数据库介绍[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 440–445.
- [34] Cheng Min. Design and implementation of the atmospheric optical parameter database based on B/S and C/S architecture[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- 程敏. 基于 B/S 和 C/S 架构的大气光学参数数据库设计与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [35] Wu Pengfei. The database of atmospheric optical characteristics [R]. Hefei: Laboratory of Atmospheric Optics, the Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
武鹏飞. 大气光学特性参数数据库[R]. 合肥: 中国科学院大气光学重点实验室, 2012.
- [36] Wang Hongshuai, Yao Yongqiang, Liu Liyong. A review of atmospheric optical turbulence modeling research[J]. *Progress in Astronomy*, 2012, 30(3): 362–377. (in Chinese)
王红帅, 姚永强, 刘立勇. 大气光学湍流模型研究进展[J]. 天文学进展. 2012, 30(3): 362–377.
- [37] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, et al. Vertical distribution characteristics and models of atmospheric turbulence in representative area [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, 13(6): 425–435. (in Chinese)
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明, 等. 典型地区大气湍流高度分布特性与模式研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(6): 425–435.
- [38] Zhang Feizhou, Li Youkuan. The scaling laws for thermal blooming of the high-energy laser propagation [C]//Proc of SPIE, 2005, 5832: 10.1117/12.619503.
- [39] Van Zandt N R, Fiorino S T, Keefer K J. Enhanced fast-running scaling law model of thermal blooming and turbulence effects on high energy laser propagation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 10.1364/OE.21.014789.
- [40] Huang Yinbo, Wang Yingjian. Numerical analysis of the scaling laws about focused beam spreading induced by the atmosphere [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006(12): 6715–6719. (in Chinese)
黄印博, 王英俭. 聚焦光束大气传输光束扩展定标规律的数值分析[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6715–6719.
- [41] Rao Ruizhong. Combined effect of turbulence and thermal blooming of laser propagation in atmosphere[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 130–134. (in Chinese)
饶瑞中. 激光大气传输湍流与热晕综合效应[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 130–134.
- [42] Qiao Chunhong, Fan Chengyu, Huang Yinbo, et al. Scaling laws of high energy laser propagation through atmosphere[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2):

- 433–437. (in Chinese)
乔春红, 范承玉, 黄印博, 等. 高能激光大气传输的定标规律[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 433–437.
- [43] Zhang Pengfei, Fan Chengyu, Qiao Chunhong, et al. Analysis of scaling laws for phase compensation of focused beam under thermal blooming conditions [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0213002. (in Chinese)
张鹏飞, 范承玉, 乔春红, 等. 聚焦光束热晕效应相位补偿定标规律研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0213002.
- [44] Zhang Pengfei, Qiao Chunhong, Feng Xiaoxing, et al. Scaling laws of thermal blooming effect of repetitively long pulse laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1001001. (in Chinese)
张鹏飞, 乔春红, 冯晓星, 等. 序列长脉冲激光热晕效应的定标规律[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001001.
- [45] Robert Tyson. Principles of Adaptive Optics [M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [46] Fiorino S T, Bartell R J, Perram G P, et al. Worldwide estimates and uncertainty assessments of laser propagation for diverse geometries for paths in the altitude regime of 3 km and below at wavelengths 0.355 to 10.6 μm [C]//Proc of SPIE, 2007, 6551: 10.1117/12.718404.