

海上激光低仰角大气传输研究

刘延武¹, 何友金², 任建存²

- (1. 山东工商学院 信息与电子工程学院, 山东 烟台 264005;
2. 海军航空工程学院 自动控制系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对激光武器中的一些关键问题, 研究了海上激光低仰角大气传输的特性。通过对海上激光大气传输特性的分析, 计算了 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的低仰角大气传输的大气透过率, 并对强激光大气传输作了定性的分析, 给出了激光大气传输的补偿技术。最后得出了关于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光海上低仰角大气传输的数据和结论。这对激光武器的研究具有一定的参考价值。

关键词: 激光; 大气传输; 激光武器

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0235-04

Research on laser atmospheric propagation in low elevation on the sea

LIU Yan-wu¹, HE You-jin², REN Jian-cun²

- (1. School of Information and Electronic Engineering, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China;
2. Department of Automatic Control Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the key problems of laser weapon, laser atmospheric propagation property in low elevation on the sea is researched. Firstly, laser atmospheric propagation property on the sea is analyzed, and atmospheric transmittance of $1.06 \mu\text{m}$ laser in low elevation is calculated. And then high power laser atmospheric propagation is qualitatively analyzed. In addition, the compensation technology of laser atmospheric propagation is given. Finally, some data and conclusions about $1.06 \mu\text{m}$ laser atmospheric propagation in low elevation on the sea are presented. It has some extent reference values for research on laser weapon.

Key words: Laser; Atmospheric propagation; Laser weapon

0 引言

目前, 新型反舰导弹越来越先进, 具有掠海飞行、末端机动、难于探测等特点, 对舰艇生存构成了严重

的威胁, 而现有的各种舰载反导系统又不能完全满足海战要求。因而, 寻求新的防空手段迫在眉睫, 舰载激光武器应运而生^[1]。激光武器以光速攻击目标的独特性能将使战场发生革命性变化, 它将是 21 世纪夺取制空权、制海权和控制空间的重要新概念武器。

收稿日期: 2003-08-26; 修订日期: 2003-10-11

作者简介: 刘延武(1977-), 男, 山东泰安人, 助教, 硕士, 主要从事光电信号与信息处理的教学与科研工作。

激光武器的主要缺点是性能受天气(尤其是浓雾、大雨、大雪等恶劣气象条件)影响较大。激光在大气中(尤其是在海洋上空盐雾、湿热条件下)传输特性的研究和技术难点的突破是实现激光武器的关键技术之一。因此,海上激光大气传输的研究对激光武器的研究具有重要意义。

1 大气层的结构和特性

大气根据温度、成分和电离状态等在垂直方向可分为五层,即对流层(< 10 km)、平流层(10 ~ 50 km)、中间层(50 ~ 80 km)、热成层(80 ~ 500 km)和逸散层(500 km 以上)。其中对激光传输特性影响最大的是对流层,它集中了大气含量的 80%,天气过程也主要发生在此层。表 1 示出了海平面大气的成分和含量^[2]。

表 1 海平面大气的成分和含量

Tab. 1 The ingredient and content of atmosphere on sea surface

Ingredient	Molecular weight	Content	
		%	10^{-6}
N ₂	28.0134	78.084	
O ₂	31.9988	20.948	
Ar	39.948	0.934	
CO ₂	44.010		322
Ne	20.183		18.18
He	4.003		5.24
O ₃	47.998		0.04
Kr	83.80		1.14
Xe	131.30		0.087
H ₂	2.016		0.5
H ₂ O	18.015		

2 激光大气传输特性

激光在大气中传输时会受到大气的各种影响。激光大气传输产生的效应可分为两大类,第一类是线性光学效应,包括大气折射、大气分子和大气气溶胶的吸收与散射、大气湍流等,其效应的大小与激光强度无关;第二类是非线性光学效应,主要有受激拉曼散射、热晕和大气击穿等,其效应的大小与激光强度密切相关^[3]。

2.1 线性光学效应

(1) 大气折射。激光通过大气传输时,因大气密度分布不均匀而出现传输路径弯曲的现象称为大气折射。折射率与光波波长、空气温度、湿度、压强和高度有关。

(2) 大气吸收。激光在大气中传输时,因与大气相互作用而衰减。在线性光学范围内,光强 $I(\nu, z)$ 随传输距离 z 的变化满足著名的比尔定律:

$$I(\nu, z) = I_0(\nu) \exp[-(\alpha + s)z] \quad (1)$$

式中 $I_0(\nu)$ 为 $z=0$ 时参考面上的光强; α, s 分别为吸收和散射系数; $\alpha + s$ 称为消光系数; ν 为频率。若有气溶胶粒子,式中还应加上气溶胶的消光系数。大气分子对激光的吸收是由分子吸收光谱特性决定的。

(3) 大气散射。激光在大气中传输时,由于大气分子、气溶胶粒子和湍流不均匀性会产生散射。当散射光的频率和入射光的频率相同时称弹性散射,如分子散射和微粒散射等。

(4) 大气湍流。大气湍流是指大气中局部温度、压强等参数的随机变化而引起折射率随空间位置 and 时间的随机变化。湍流主要引起光束随机漂移、光束强度起伏、相位起伏和光束扩展,湍流还可使光束截面随机偏转,形成到达角起伏等^[2]。理论和实验研究证明^[4,5],自适应光学技术对光波大气传输湍流效应相位校正一定条件下是非常有效的。

2.2 海上大气透过率

激光通过大气传输时由于气体分子和大气气溶胶的吸收和散射作用引起的能量损失称为大气衰减。当功率为 P 的激光在大气中传输时,因为吸收和散射而衰减。由于吸收和散射对辐射衰减的相对值都与通过的距离 dx 成正比,则:

$$\frac{dP}{P} = -[\alpha(\nu) + s(\nu)]dx = -\mu(\nu)dx \quad (2)$$

式中 $\alpha(\nu)$ 是吸收系数; $s(\nu)$ 是散射系数; $\mu(\nu)$ 是衰减系数。

将上式积分得:

$$P(x) = P_0 \exp[-\mu(\nu)x] \quad (3)$$

式中 P_0 是 $x=0$ 处的辐射功率; $P(x)$ 是辐射在大气中传输 x 距离后的功率。由此可得大气透过率:

$$T(x) = \frac{P(x)}{P_0} = \exp[-\mu(x)x] = \exp[-\mu_a(x)x] \cdot \exp[-\mu_s(x)x] \quad (4)$$

式中 $\mu_a(x)$ 和 $\mu_s(x)$ 分别是大气吸收和散射所产生的透过率。

大量实验表明大气透过率与波长有着密切关系。这是因为大气对辐射的吸收和散射均与波长有关。从整个大气透过率谱(海平面)^[3]来看,激光在大气中传输时,在吸收带间存在透射率较高的波段,称为大气窗口。其中可见光波段、 $1 \mu\text{m}$ 附近、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 是激光大气传输中常用的几个大气窗口。

2.3 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的海平面低仰角大气传输

$1.06 \mu\text{m}$ 激光的传输特性与多种因素有关,其中包括温度、气压、水汽含量、能见度、气溶胶类型、路径长度及仰角、高度等。理论和实验表明:光辐射的衰减因子主要是大气气溶胶的吸收和散射,诸如水汽、 CO_2 等分子的吸收和大气分子的散射在大多数情况下仅占总衰减的 1% 左右,完全可以忽略不计。大气气溶胶光学厚度取决于大气气溶胶粒子的尺度分布、复折射指数和浓度及其高度分布等物理特征。由于这些特征具有明显的时空变化,并且难于现场测量,因此通常的做法是依据观测结果总结出一定的模型。常用的与地面有关的模型有:乡村气溶胶、城市气溶胶、海洋气溶胶和沙漠气溶胶。对于 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的激光,大气透过率可以用以下公式计算^[6]:

$$T = \exp[-\sec \theta \cdot K/V_M [1 - \exp(-0.835 H)]] \quad (5)$$

该式适用于从地面传输到高度 H (或相反传输)的情况。其中 K 为常数,取决于大气气溶胶类型,在海洋气溶胶中 $K=4.543 \text{ km}$; V_M 为能见度; θ 为天顶角,海平面低仰角($5^\circ \sim 90^\circ$)传输时 $85^\circ \sim 90^\circ$ 。下面以水平传输距离 5 km 和 8 km 为例,得出了大气透过率,见表 2 和表 3。

对于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光海平面低仰角大气传输,由表 2 和表 3 分析得出:能见度一定时,随仰角的变化,大气透过率的变化不明显;仰角一定时,随能见度的变大,大气透过率明显提高;当仰角和能见度不变时,

表 2 $x=5 \text{ km}$ 时 $1.06 \mu\text{m}$ 激光大气传输的大气透过率(%)

Tab. 2 The atmospheric transmittance of $1.06 \mu\text{m}$ laser atmospheric propagation, when $x=5 \text{ km}$ (%)

H/km	V_M/km						
	1	2	5	8	10	15	23
0.4	0	0	3.94	13.24	19.84	34.02	49.50
0.3	0	0	3.47	12.23	18.62	32.61	48.15
0.2	0	0	3.03	11.25	17.41	31.18	46.76
0.1	0	0	2.63	10.28	16.21	29.72	45.33
0.05	0	0	2.43	9.80	15.60	28.97	44.58
0.03	0	0	2.37	9.65	15.41	28.74	44.35
0.01	0	0	2.30	9.47	15.18	28.45	44.06
0.005	0	0	2.20	9.21	14.84	28.03	43.62

表 3 $x=8 \text{ km}$ 时 $1.06 \mu\text{m}$ 激光大气传输的大气透过率(%)

Tab. 3 The atmospheric transmittance of $1.06 \mu\text{m}$ laser atmospheric propagation, when $x=8 \text{ km}$ (%)

H/km	V_M/km						
	1	2	5	8	10	15	23
0.4	0	0	0.57	3.96	7.56	17.87	32.53
0.3	0	0	0.46	3.48	6.81	16.68	31.10
0.2	0	0	0.37	3.04	6.11	15.51	29.66
0.1	0	0	0.30	2.63	5.44	14.36	28.20
0.05	0	0	0.26	2.43	5.11	13.78	27.46
0.03	0	0	0.25	2.37	5.02	13.60	27.23
0.01	0	0	0.24	2.30	4.90	13.39	26.94
0.005	0	0	0.22	2.20	4.72	13.06	26.52

随着传输距离的增大,大气透过率显著下降; $1.06 \mu\text{m}$ 激光海平面低仰角大气传输的大气透过率较低,特别是当能见度较小时,激光透过率更低,此时不适合激光的传输,激光武器几乎失效。

因此,在能见度较高的情况下,激光大气透过率高,激光武器能发挥其优势。在能见度较低的情况下,激光大气透过率较低。为了发挥激光武器自身的优势,可以通过缩短打击距离和提高激光器发射的能量等手段实现。但是,高能量激光的大气传输会引起非线性光学效应。

3 强激光大气传输特性

对于强激光大气传输而言,由于大气吸收了激光能量,导致光路上的加热,从而改变了其折射率的分布,而折射率的变化反过来又影响了激光束的传播特性,所以大气和激光的非线性作用会使激光发生漂移、扩展、畸变或弯曲效应。因此,在地面或低空使用高能激光武器时,不仅需考虑线性效应,还需要考虑热晕、受激拉曼散射和大气击穿等非线性效应。

(1) 热晕:强激光在大气中传输时,大气中的分子和气溶胶吸收激光能量导致发射激光束横截面上的空气折射率的变化,从而使激光束发生弯曲、畸变等。

热晕效应对高能激光大气传输的影响不仅导致高能激光束质量严重退化,更重要的是由于它是一种非线性效应,当激光功率增大到一定值时,到达目标的功率密度达到最大值,而当激光功率进一步增加时,到达目标的功率密度不仅不会增加,反而会减小。因此,它已成为强激光大气传输研究领域中最重要研究课题之一^[7]。

(2) 受激拉曼散射:拉曼散射是指分子在入射光照射下产生电磁极化,引起多极子电磁振动或转动而形成的散射。发生受激拉曼散射时,散射光强按指数规律随传输距离增加,从激光中带走大量能量。抑制受激转动拉曼散射的方法有增大发射激光束口径以减少激光功率密度,用长波长、短脉冲和宽频带的激光等。

(3) 大气击穿:当激光功率密度很高时,可使气体电离形成等离子体,并发出爆炸波,激光大部分能量被等离子体“屏蔽”,称为大气击穿。通常大气击穿阈值在 10^8 W/cm^2 以上,比 N_2 的受激转动拉曼散射阈值(约 10^6 W/cm^2) 大得多,不会成为强激光大气传输的严重障碍^[2]。

4 激光大气传输补偿

研究表明,利用光学相位共轭技术可以补偿大气湍流、热晕等因素给激光传输造成的波前畸变,使得激光大气传输更有实用价值。目前,利用光学相位共轭技术实现激光大气传输主要有两种方法:自适应光

学技术和非线性光学技术^[8]。

自适应光学技术是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新技术,它赋予了光学系统能动可控、克服动态干扰的能力,使光学系统能适应外界变化而保持最佳状态。自适应光学技术迄今最成功的应用是在天文学上。自适应光学在强激光技术领域也有十分诱人的应用前景。对于湍流和热晕效应所造成的有害影响,可采用自适应光学技术予以抵消,选择适当的激光脉宽和重复频率也可减少此种影响。对于大气击穿,美国人提出用低强度、高重复频率的先行光脉冲驱除光路上的气溶胶质点,实验表明,可把击穿阈值提高 4~19 倍^[9]。

5 结束语

随着激光武器技术难点的解决,特别是激光在海洋上空盐雾、湿热条件下传输特性的研究和技术难点的突破,作战模式必将发生变化。激光武器以其反应时间短、灵活性强、命中精度高和对付多批次目标能力强等特点,对来自空中和海面上的威胁如飞机、导弹等进行有效地拦截攻击,与舰载火力系统相辅相成,构成一个先进的有机整体。在 21 世纪,激光武器必将成为海军舰载防空武器系统的重要组成部分。

参考文献:

- [1] 蒋鸿旺. 舰载激光武器[J]. 舰载武器, 2002, 10(3): 30-33.
- [2] 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 236-273.
- [3] 孙晓泉, 吕跃广. 激光对抗原理与技术[M]. 北京: 解放军出版社, 2000. 7-93.
- [4] Tyson R K. Principles of adaptive optics[M]. Boston: Academic Press, 1991.
- [5] Rodney L C. Adaptive optics aims for earthly applications[J]. Photonics Spectra, 1997, 27(4): 100-106.
- [6] 宋正方. $1.06 \mu\text{m}$ 激光的斜程大气衰减[J]. 激光技术, 1997, 21(6): 343-345.
- [7] 龚知本. 激光大气传输研究若干问题进展[J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 114-133.
- [8] Lawrence E S. Hartman sensors detect optical fabrication errors[J]. Laser Focus World, 1996, 24(4): 111-117.
- [9] 何友金, 陆斌, 韩艳丽, 等. 光电对抗[M]. 北京: 海潮出版社, 2000. 154-179.