

星载激光水下探测能量分析

李英超 胡源 王超 安岩

长春理工大学空地激光通信国防重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 采用星载平台进行水下激光探测,具有覆盖面积大,探测效率高、机动性好、自身隐蔽性好、信息传输快等优点,但是实现难度较大。为了使反映目标特征的信息能量能够被探测器有效响应,激光脉冲信号需要通过空间信道、大气信道和海水信道,而且双向往返传输,整个链路情况非常复杂。通过建立激光传输模型,分析链路能量损耗,对星载激光水下目标探测的能量可行性进行理论验证。

关键词 光通信; 激光探测; 星载; 水下

中图分类号 O436; TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.120601

Energy Analysis of Spaceborne Underwater Laser Detection

Li Yingchao Hu Yuan Wang Chao An Yan

National Defence Key Laboratory of Air to Ground Laser Communication, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Using spaceborne platform for underwater laser detection has many advantages, including a large coverage area, high detection efficiency, good mobility, good concealment, and fast information transmission, however its implementation is difficulty greatly. In order to detect the target information reflecting the characteristics effectively, laser pulse signal needs to be through space channel, atmospheric channel, and water channel, and that is all bidirectional transmission, the link is very complicated. Through the establishment of laser transmission model and analysis of the link energy loss, the theory feasibility of spaceborne underwater lasertarget detection is verified.

Key words optical communications; laser detection; spaceborne; underwater

OCIS codes 060.4510; 140.4780; 010.4450

1 引言

自激光问世以后,由于其在海水中具有一定的穿透能力,且方向性好,不易受到干扰,发达国家在激光水下目标探索方面做了大量的研究工作,开展了航空平台的探潜、探雷、浅海测绘等应用,已经形成装备。例如,美国海军的MH-60直升机上已经搭载了激光水雷探测系统(ALMDS)^[1-2]。而采用星载平台进行激光水下探测相比空基、陆基,具有覆盖面积大、探测效率高、机动性好、自身隐蔽性好、信息传输快等特点,在快速机动高效实施水下侦查测绘领域有着无可比拟的优势,但由于技术复杂,实现难度较大。因为整个探测过程实现的前提是反映目标特征的信息能量是否能够被探测器有效响应,而卫星平台激光脉冲信号通过空间信道、大气信道和海水信道,且对于目标探测而言是双向往返传输,目标表面情况非常复杂,所以研究开展的也相对滞后。

通过建立激光传输模型,分析整个链路经过大气信道、水-空交界面折射、海水信道的能量损耗,给出能够实现有效探测的发射源和探测器的指标量级,对星载激光水下目标探测的能量可行性进行理论验证,说明该方式探测具的技术可行性,并且随着飞秒激光器、单光子等新型光电器件的不断发展,星载激光水下探测还有着巨大的发展潜力。

收稿日期: 2015-04-10; 收到修改稿日期: 2015-06-20; 网络出版日期: 2015-11-25

基金项目: 总装预研基金(9140A21010114BQ03006)

作者简介: 李英超(1966—),男,博士,研究员,主要从事光电仪器应用方面的研究。E-mail: hslyc@126.com

2 激光能量传输数学模型

整个能量传输过程中涉及诸多环节,比如发射源功率、系统损耗或增益、链路损耗、信道衰减、探测单元的信号电平,以及叠加的背景光和各种内部噪声等。通常空间激光通信借鉴微波传输模型,对于能量传输的简单数学描述为^[3]

$$P_r = P_t \cdot L_r \cdot \eta, \quad (1)$$

式中 P_t 为发射单元的发射功率; P_r 为探测器的接收功率; η 为链路功率衰减; L_r 为距离损耗, $L_r = G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 G_r$, G_t 为发射光学天线增益, G_r 为接收光学天线增益。增益可以看作是通过光学天线将光束从全向空间 (4π) 压缩到指定空间 (Ω) 的比率, $G_t = G_r = \frac{4\pi^2}{\Omega}$ 。

实际发散角较小时,立体角与平面角(半角)的对应关系近似表达为 $\Omega \approx \frac{\pi}{4} \theta^2$ 。因此 $G_t = G_r = \frac{16}{\theta^2}$ 。

对于接收天线面积 A_1 , 有 $\Omega = \frac{\lambda^2}{A_1}$, 则 $G_t = 4\pi \frac{A_1}{\lambda^2} = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$, D 为接收光学口径的直径。将 G_t 和 G_r 带入 L_r , 可以得到

$$L_r = \left(\frac{D}{\theta \cdot L} \right)^2, \quad (2)$$

其物理含义可以理解为目标被照射到的面积与激光光斑面积之比。

由于目标物体和信道环境的复杂性,功率损失 η 也是非常复杂的。激光在链路传输过程中,会经过大气散射、云层的散射和吸收、海平面的反射以及海水的吸收散射,照射在海下目标表面的同时,还需要考虑水下目标表面的反射、散射以及吸收系数,且整个传输链路是双向往返的,路径上所产生的衰减是双倍效应,这些都是对有效信号的极大衰减因素。因此 η 的分析主要考虑目标表面吸收衰减、大气信道吸收和散射引起的衰减、海水与大气界面衰减、海水信道衰减。

因为巨大的信道和空间衰减,将星载平台定位在低轨道较为现实可行;目前已实现的机载平台水下探测深度不超过 100 m,因此将水下目标的深度也定位在浅海较为现实可行。

3 大气、海水链路能量损耗分析

3.1 自由空间衰减

自由空间衰减要考虑上行和下行的双向衰减。

1) 下行发射自由空间衰减

星载平台搭载能力有限,光学口径难以做大。选取 400 mm 相对较大口径的发射天线进行分析,衍射极限束散角为 3.25 μrad 。考虑到光源面积、加工、装调等误差,以及大气对发散角的弥散作用,将发射激光的束散角压缩到 10 μrad 是可行的^[4]。

设低轨卫星的轨道高度 $H=200$ km,在激光发射角为 10 μrad 的前提下,计算到地面时的光斑直径 $d=10 \times 10^{-6} \times 200 \times 10^3 = 2$ m。水下目标顶部沿艇身有一直径约为 2 m 的区域,光斑可以被目标接收到。发射自由空间功率衰减系数为二者面积之比:

$$\tau_{\text{sp}} = \frac{d_1^2}{d^2}, \quad (3)$$

式中 d 为水面光斑直径, d_1 为目标被照射到的直径。假设光斑在扫描过程中,有 1/2 面积照射到目标即为发现目标,衰减为 -6 dB。

2) 上行反射自由空间衰减

目标表面向各个不同方向的反射分量不同,方位角为 0° 时最高,为 90° 时最低。设反射能量沿径向呈高斯分布:

$$I = \exp(-H \cdot \sin \alpha), \quad (4)$$

式中 H 为轨道高度, α 为反射方位角。因反射能量沿各天顶角是不同的,本文采用高斯模型。则接收天线的能量利用率为

$$\tau_r = \frac{\int_0^{\arcsin(D/2H)} \sin \alpha \exp(-H \sin \alpha) d\alpha}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha \exp(-H \sin \alpha) d\alpha}, \quad (5)$$

式中 D 为接收光学系统口径。(5)式代表光学天线接收到的能量和潜艇表面向整个自由空间发射的总能量的比值。

3.2 目标表面吸收衰减系数

潜艇表面一般涂有对可见光高吸收率的黑色有机涂料。以美国 3M-101-C10Velvet 黑色涂料为例,其表面在可见光波段的吸收率约为 95%。因此,选取激光照射目标吸收系数为 $\tau_a = 95\%$ ^[5]。

3.3 吸收和散射衰减

由于大气中存在着各种气体分子和微粒,使部分光辐射能量被吸收而转变为其他形式的能量。部分能量被散射而偏离原来的传播方向(即辐射能量在空间的重新分配)。吸收和散射的总效果是使传输光辐射强度衰减。532 nm 激光在大气中传播时,由于大气作用产生的能量衰减主要来自大气气溶胶的吸收与散射。大气衰减主要发生在近地 8 km 范围内,离地面距离超过 8 km 之后衰减变得十分微弱,可以忽略。其能量衰减为

$$T_\lambda = I/I_0 = \exp(-\beta_\lambda L), \quad (6)$$

式中 I_0 为通过大气前的光强; I 为通过大气后的光强; L 为传输距离; T_λ 为波长为 λ 的光在大气中传输路程 L 的透过率; β_λ 为波长为 λ 的光的衰减系数。

在大气水平均条件下,衰减系数可写成工程上的经验公式:

$$\beta_\lambda = \frac{3.91}{V} \times \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q}, \quad (7)$$

式中 V 为能见距离(km); λ 为波长(μm); q 为与波长和能见距离相关的常数。对于可见光波段, $\lambda/0.55 \approx 1$, 则有

$$\beta_\lambda = \frac{3.91}{V}, \quad (8)$$

在较好天气条件下,垂直能见距离为 15 km,衰减系数为 -0.585 dB/km。

3.4 海水-大气界面衰减

激光在海水-大气界面处产生复杂的反射与折射过程。界面能量的损失不仅与光束的入射角度有关,而且与气候条件有关。光辐射由海水进入大气层时,能量的界面传输效率为

$$T_{wa} = T_{wa1} \times T_{wa2}, \quad (9)$$

式中 $T_{wa1} = 1 - \int_{-48.5}^{48.5} R(\phi, n) \sin \phi d\phi$ 为由折射率的不连续性决定的界面传输率, ϕ 为天顶角, n 为折射率, R 为表面反射率,是 ϕ 、 n 的函数,采用经验值,约为 0.9^[6]。 T_{wa2} 为由海水泡沫及条纹决定的界面传输率,是海风的函数^[7]:

$$T_{wa2} = \begin{cases} 1 - 1.2 \times 10^{-5} \times v^{3.3} \times (0.0225v - 0.99) & (v > 9 \text{ m/s}) \\ 1 - 1.2 \times 10^{-5} \times v^{3.3} & (v < 9 \text{ m/s}) \end{cases}, \quad (10)$$

T_{wa2} 与海面风速的关系如图 1 所示。

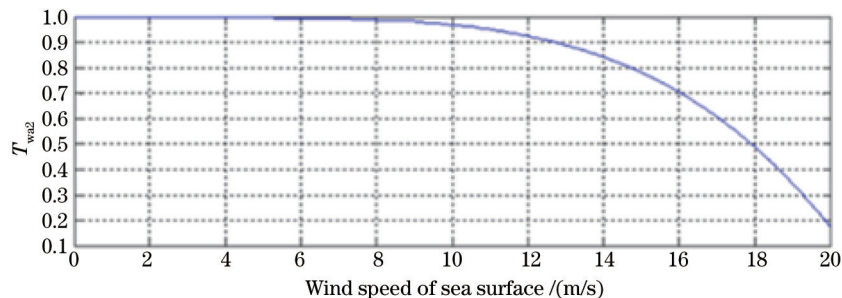


图 1 海水-空气界面激光衰减与风速对应关系

Fig.1 Relationship between sea-air interface laser attenuation and wind speed

3.5 在海水中的衰减

海水的衰减系数与水中的浮游生物浓度、水中的悬浮粒子、盐分及温度有关。因此,不同海域、不同气候特征,衰减系数值可能不同。计算海水对激光的散射和衰减,总的衰减系数为吸收系数和散射系数之和,其值取决于水质, $k = k_a + k_d$, 总的散射系数 $k_d = k_{dr} + k_{dm}$, 则海水衰减率可转化为

$$\tau_{oc} = \exp[-(k_a + k_{dr} + d_{dm})D / \cos \phi], \quad (11)$$

式中 k_a 为海水吸收衰减系数; k_{dr} 为海水瑞利散射系数; k_{dm} 为海水米耶散射系数; D 为海水深度(m); ϕ 为信道视轴角(垂直为零)。海水衰减率与海水质量、海水深度的关系如图2所示,对于Ⅲ级海水浅水区,对应的衰减系数为-0.56 dB/m;对于Ⅰ级海水,对应的衰减系数为-0.22 dB/m。

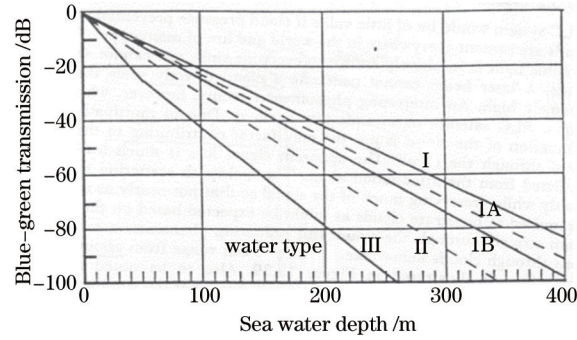


图2 532 nm 激光在海水中衰减与海水质量、海水深度的关系

Fig.2 Relationship between the sea water attenuation of 532 nm laser and quality and depth

4 分析结果

根据以上分析,选定低轨卫星高度为200 km,环境条件为大气等效距离8 km,大气能见度15 km,无云状态下,海面风速4 m/s,目标反射部分直径2 m,反射率5%,海水浑浊度为Ⅰ级,探测深度50 m计算,得到如表1所示的链路功率衰减表。

表1 链路功率衰减详表

Table 1 Table of link power attenuation

Attenuation factor	Attenuation degree	Attenuation factor	Attenuation degree
Transmit power	118 dBm	Target surface absorption	-13 dB
Free space (downlink)	-6 dB	Sea water (up)	-22 dB
Atmospheric absorption and attenuation	-9 dB	Interface of sea-air	-0.46 dB
Interface of sea-air	-0.46 dB	Free space (uplink)	-9.47 dB
Sea water (down)	-22 dB	Atmospheric absorption and attenuation	-9 dB
Total attenuation	-170.39 dB	Sensitivity of receiving system	-60 dBm
Link margin	3 dB		

由表1可知,链路损耗为-170.39 dBm,链路余量为4.61 dBm,激光器发射功率至少为118 dBm(相当于脉冲激光器发射的峰值功率为 6×10^8 W),接收系统灵敏度至少为-60 dBm时,才能满足链路信号能量需求系统,实现探测。

目前探测灵敏度达到-60 dBm的探测器,无论是光电倍增管(PMT)还是雪崩二极管(APD)均有相关器件。脉冲重复频率在千赫兹以上,脉冲宽度为10~20 ns,单脉冲峰值功率为100 MW量级以上的激光器也已经研制出来,可采用比较主流和相对成熟的固体激光器实现^[8-10]。现有的发射源和探测器在理论上均可实现该探测链路的能量闭环,虽然目前器件上还有体积、功耗、寿命等一系列需要走出实验室的工程问题;同时计算只是保证探测的底线,在具体实现上,还要考虑到光学系统衰减、云层衰减等因素,需要更高功率的激光器和更灵敏的探测器,但是可以肯定的是,该种探测方式是具有技术可行性和发展潜力的。

5 结 论

采用星载平台进行激光水下探测是在快速机动高效实施水下侦查测绘领域有着无可比拟的优势,但由于技术复杂、研制难度大,目前国内外的研究进度都比较缓慢。通过对大气海水信道、物体表面吸收反射等模拟计算,说明该技术手段具有一定的可行性。模拟结果说明,要实现星载激光水下探测,提高激光器的性能是提高星载激光水下探测能力的关键,激光单脉冲发射能量越大,单位时间内脉冲的重复频率越高,探测深度和水平扫描分辨率也就越高。

参 考 文 献

- 1 Chen Wenge, Huang Tiexia, Lu Yiming, Survey of airborne oceanic lidar[J]. *Laser Technology*, 1998, 22(3): 147-152.
陈文革, 黄铁侠, 卢益民. 机载海洋激光雷达发展综述[J]. *激光技术*, 1998, 22(3): 147-152.
- 2 Zhao Changming, Huang Jie. Development of laser-submarine communication and detection technology in the future[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(1): 53-56.
赵长明, 黄杰. 未来激光探潜和对潜通信技术的发展[J]. *光学技术*, 2001, 27(1): 53-56.
- 3 Dong Keyan, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Submarine laser communication[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2012, 33(7): 127-130.
董科研, 姜会林, 佟首峰. 对潜激光通信[J]. *四川兵工学报*, 2012, 33(7): 127-130.
- 4 Liu Houtong, Wang Zhenzhu, Li Chao, *et al.* Numerical simulation analysis for detectability of spaceborne lidars[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 614-617.
刘厚通, 王珍珠, 李超, 等. 星载激光雷达探测能力的数值模拟分析[J]. *激光技术*, 2008, 32(6): 614-617.
- 5 Zhai Guojun, Wu Taiqi, Ouyang Yongzhong, *et al.* The development of airborne laser bathymetry[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2012, 32(2): 67-71.
翟国君, 吴太旗, 欧阳永忠, 等. 机载激光测深技术研究进展[J]. *海洋测绘*, 2012, 32(2): 67-71.
- 6 Xu Qiyang, Yang Kuntao, Wang Xinbing, *et al.* Blue-Green Lidar Ocean Survey[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
徐啟阳, 杨坤涛, 王新兵, 等. 蓝绿激光雷达海洋探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- 7 Xu Qiang, Zhang Wei, Liu Yang, *et al.* Properties of uplink laser propagation through sea interface[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(5): 615-621.
徐强, 张玮, 刘洋, 等. 上行激光在海水界面传输特性的研究[J]. *量子电子学报*, 2012, 29(5): 615-621.
- 8 Wu Qinglin, Liu Yun, Chen Wei, *et al.* Advanced single-photon detector technologies[J]. *Progress in Physics*, 2010, 30(3): 296-306.
吴青林, 刘云, 陈巍, 等. 单光子探测技术[J]. *物理学进展*, 2010, 30(3): 296-306.
- 9 Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The System and Technology of the Free Space Laser Communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- 10 Shi Qinyin. Study of Submarine Detection by Modulated Lidar on Optical Carrier[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004.
石钦崧. 载波调制脉冲激光雷达对潜探测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.

栏目编辑: 张 雁