

文章编号:1001-5078(2018)07-0809-06

· 激光应用技术 ·

基于单光子的星载激光水下目标探测深度研究

彭志兴,周保琢,陈 华,张 志,谭 平
(四川航天系统工程研究所,四川 成都 610100)

摘 要:卫星对海探测具有大面积同步观测、全天时工作、不受领海领空限制等优点。为此,本文分析了卫星对海探测的激光链路损耗,构建了星载激光水下目标探测能量传输模型,探讨了基于单光子机制的星载激光对水下目标探测的极限深度。结果表明,在 I 类海区,对于水下等效直径为 2 m 的物体,星载激光在 200 km 高度对水下目标探测的最大深度为 212 m。因此,在中低轨道开展星载激光对深海水下目标进行探测是可能的。本文的研究工作为进一步开展星载激光深海水下目标探测提供支持。

关键词:激光;探测深度;水下目标;卫星;单光子

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.07.002

Study on detection depth of underwater target based on spaceborne laser single photon detection

PENG Zhi-xing, ZHOU Bao-zhuo, CHEN Hua, ZHANG Zhi, TAN Ping
(System Engineering Institute of Sichuan Aerospace, Chengdu 610100, China)

Abstract: Satellite-to-sea exploration has the advantages of large-area synchronous observation, full-day operation, and no restrictions on territorial waters and airspace. The laser link loss of satellite-to-sea observation was analyzed, and the energy transmission model of the spaceborne laser underwater target detection was built, and the corresponding limit detection depth based on single-photon detectors was discussed. The results show that in the case of the first class sea area and 200 km orbital height, the maximum detecting depth achieves 212 m to the underwater targets with an equivalent diameter of 2 m. Therefore, it is possible to detect the deep-sea underwater targets by spaceborne laser in the medium or low orbit. This research provides a support for further development of the deep-sea underwater target detection by spaceborne laser.

Key words: laser; detection depth; underwater target; satellite; single photon

1 引 言

水下目标探测是海洋国土监视、反潜战等环境下的关键技术。随着新型材料的研发和工艺水平的提高,现代水下航行器的噪声和磁性显著降低,下潜深度增大,其隐蔽性得到极大提高。同时,用于侦

察、探测、攻击等的各种小型水下武器平台也不断出现。这些对反制方的水下目标探测能力提出了更高的要求。

目前,水下目标探测主要是基于船载和机载平台;探测方式包括水声探测、磁异常探测、红外尾流

基金项目:四川省科技厅重点研发项目(No. 2017GZ0153);四川省科技厅应用基础研究重点项目(No. 2017JY0028);中国航天科技集团公司钱学森青年创新基金项目(No. 20160031)资助。

作者简介:彭志兴(1991-),男,硕士,研究方向为红外与激光信号处理、模型仿真。E-mail:scxhpzx@sina.com

通信作者:周保琢(1985-),男,博士,高级工程师,研究方向为信息系统架构,智能信息处理。E-mail:308718867@qq.com

收稿日期:2017-11-28

探测、激光雷达探测等^[1]。水声探测是利用舰船携带声纳和听响器,或利用在海底布设水听器构建网络来实现,通过计算目标发射声波到达不同水听器的时间差或相位差,再结合水听器本身的大地坐标来实现定位;磁异常探测是基于磁信号的目标探测技术,通过磁探仪对水下目标造成的地磁异常进行检测,从而发现水下目标;红外尾流探测是通过探测运动目标对周围水体加热后的水温异常来实现的;激光探测是利用海水对 532 nm 波段的蓝绿光的衰减要远小于对其他波段的电磁波的衰减开展蓝绿激光水下目标探测。现有探测方式受制于平台的限制,在探测范围、时效性、隐蔽性等方面存在显著不足。基于船载和机载的水下目标探测只能进行小范围区域的探测,且都需要近距离接近被探测目标海域,这给探测本身增加了被发现和被打击的风险。同时,对于不可到达区域,如别国海空域,以上两种探测方式无法进行探测。

基于卫星平台的水下目标探测具有覆盖范围广、探测效率高、探测隐蔽性好等优点,是全球或者大区域范围快速、远距离对水下目标进行探测的重要手段。在卫星遥感平台上,多光谱遥感探测水深较浅,仅适用于极浅水域;微波遥感探测能够进行较深水域的探测,但其受到海流和风速的影响较大^[2]。

由于星载平台载荷的限制和激光随距离快速衰减的特点,传统的大功率激光雷达在星载平台上部署存在较大困难。单光子探测器的灵敏度较传统线性光电探测器提高了近 3 个数量级,从而极大地降低了系统对激光功率的要求,在相同技术水平下,仅需约 1/100 的激光功耗^[3]。本文通过构建星载激光水下目标探测能量模型,分析了极限条件下探测器接收单个光子响应时能够探测的水下目标深度。

2 模型方法构建

星载激光器在进行水下目标探测时同时向海面发射红外激光(1064 nm)和蓝绿激光(532 nm)。激光到达海面后,红外光被水面反射,而蓝绿光穿透水面进入水中,直到遇到目标物后反射,最终两束光被探测器接收。通过计算两束激光往返的时间差来确定水下目标到海面的距离。利用单光子探测阵列可以获取水下目标多点扫描信息,从而确定水下目标的形状。基于单光子探测器的星载激光水下目标探

测示意图如图 1 所示。

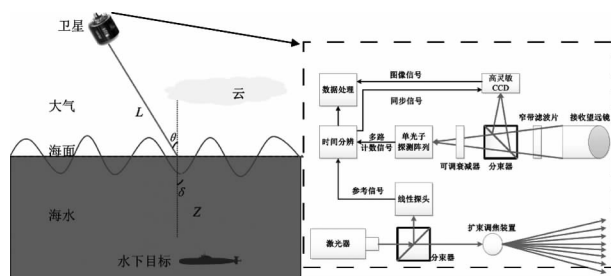


图 1 星载激光水下目标探测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underwater target detection based on spaceborne laser

以蓝绿激光为例,激光脉冲由激光器激发后到最终被探测器接收需要经过与大气、大气-海水界面、海水、探测目标等的一系列作用过程。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、探测器量子效率,以及叠加的背景光和各种内部噪声等。借鉴微波传输模型,激光能量传输的简单数学描述为^[4]:

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

式中, P_r 为探测器的接收功率; P_t 为激光器的发射功率; L_r 为距离损耗; η 为链路功率衰减。激光在发射和接收光学系统存在能量损耗。发射和接收光学系统能量转换率 τ_{t-r} 表示为

$$\tau_{t-r} = G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi l} \right) G_r \quad (2)$$

式中, G_t 为发射光学天线增益; G_r 为接收光学天线增益; l 为传输距离。其中:

$$G_t = G_r = \frac{4\pi}{\Omega} \quad (3)$$

对于发射天线,当发散角 θ_b 较小,立体角 $\Omega \approx \frac{\pi\theta_b^2}{4}$,则 $G_t = \frac{16}{\theta_b^2}$ 。对于接收天线面积 A_r , $\Omega = \lambda^2/A_r$,则 $G_r = (\pi D/\lambda)^2$, D 为接收光学系统口径,单位为 m。 τ_{t-r} 为:

$$\tau_{t-r} = \left(\frac{D}{\theta_b l} \right)^2 \quad (4)$$

2.1 链路衰减分析

链路功率衰减 η 比较复杂,主要考虑大气吸收和散射引起的衰减、大气与海水界面衰减、海水衰减、目标表面吸收衰减和自由空间衰减。白天天空背景辐射对激光探测有较大影响,晚上影响较小。本文主要探讨星载激光的极限探测深度,因此忽略

了天空背景辐射和内部信号噪声对传感器探测的影响。

2.1.1 大气吸收与散射衰减

激光在大气中传输时主要受到大气吸收、散射、湍流、折射等效应的影响^[5-6]。其中,大气的吸收和散射对激光能量传输的衰减最为显著。相对气溶胶散射对激光能量的衰减,气溶胶的吸收、大气分子的吸收和散射对激光能量的衰减可以忽略不计。因此,大气对激光的能量衰减主要考虑气溶胶的散射效应的衰减。对于水平均匀光程,根据朗伯-比尔定律,波长为 λ 的激光在大气中传输的透过率 $\tau_{\text{atm}}(\lambda)$ 可以表示为^[7]:

$$\tau_{\text{atm}}(\lambda) = e^{-\beta_{\lambda} L_{\text{atm}}} \quad (5)$$

式中, β_{λ} 为气溶胶对波长为 λ 的激光的散射系数; L_{atm} 为激光传输距离,单位为km。

大气气溶胶粒子包括云、雾等,在海上影响激光传输的主要是云。激光在云中传输发生散射的过程比较复杂,需要考虑云层的衰减系数、云层物理厚度、散射角、云层上面光线天顶角等因素的影响^[8]。因此,工程上多采用以下公式计算气溶胶散射系数 β_{λ} :

$$\beta_{\lambda} = \frac{3.91}{U} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^q \quad (6)$$

式中, U 为能见度,单位为km; λ 为波长,单位为 μm ; q 为与波长和能见度相关的常数。其中 q 的取值如下:

$$q = \begin{cases} 0.585U^{1/3} & (U \leq 6 \text{ km}) \\ 1.3 & (6 \text{ km} < U < 50 \text{ km}) \\ 1.6 & (U \geq 50 \text{ km}) \end{cases} \quad (7)$$

2.1.2 大气-海水界面衰减

激光穿透大气-海水界面时受到激光入射角、海水折射率、波浪的高度和方向等的影响,激光会发生反射和折射过程。激光通过大气-海水界面总的透过率 τ_{aw} 可以表示为^[9]:

$$\tau_{\text{aw}} = \tau_{\text{aw1}} \tau_{\text{aw2}} \quad (8)$$

式中, τ_{aw1} 表示激光入射角、海水折射率决定的界面透过率; τ_{aw2} 表示海面波浪等其他因素决定的界面透过率。 τ_{aw1} 、 τ_{aw2} 计算方法如下:

$$\tau_{\text{aw1}} = \frac{1}{2} \left| \frac{\sin 2\theta \sin 2\delta}{\sin^2(\theta + \delta)} \frac{1 + \cos^2(\theta - \delta)}{\cos^2(\theta - \delta)} \right| \quad (9)$$

$$\tau_{\text{aw2}} = \begin{cases} 1 - 1.2 \times 10^{-5} V^{3.3} & (V \leq 9 \text{ m/s}) \\ 1 - 1.2 \times 10^{-5} V^{3.3} (0.225V - 0.99) & (V > 9 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, θ 、 δ 分别表示入射角、折射角; V 为海面风速,单位为m/s。

与下行激光通过界面不同,上行激光通过大气-海水界面时可能发生全发射,此时将没有能量透射。一般 τ_{aw1} 经验值取0.9^[10]。

2.1.3 海水衰减

激光在海水中传播时受到海水吸收、海水的瑞利散射和米氏散射的影响。海水对激光总的衰减系数等于三者的总和。激光通过海水的透过率 τ_w 为:

$$\tau_w = e^{-kZ/\cos\delta} \quad (11)$$

式中, k 为海水总的衰减系数, $k = k_a + k_{dR} + k_{dM}$, k_a 、 k_{dR} 、 k_{dM} 分别为海水吸收衰减系数、海水的瑞利散射衰减系数和米氏散射衰减系数, Z 为激光在海水中传输的距离,单位m; δ 为信道视轴角,垂直时 $\delta = 0$ 。

海水对激光的衰减受到海水深度以及海水各种物理化学特性影响。由于海水水质、悬浮物大小和含量、海面波浪变化等影响,在不同海区相同时间,海水的衰减系数存在差异;在相同海区不同时间,海水的衰减系数也会存在显著差异。当探测目标接收到的光斑面积足够大时,海水衰减系数近似等于海水的漫射衰减系数(如表1所示)。

表1 海水衰减系数^[11]

Tab. 1 Attenuation coefficient of sea water

	I类海区		II类海区		III类海区	
漫射衰减系数	0.070	0.133	0.144	0.250	0.270	0.350
有效衰减系数	0.231	0.479	0.575	1.013	1.316	1.500

2.1.4 目标表面吸收与自由空间衰减

为了提高隐身性能,目标表面大多涂有吸波材料以减少对电磁波信号的反射。目前,吸波材料(如3M-101-C10Velvet黑色涂料)对可见光的吸收率可以达到95%^[12]。

激光从激光器发出后到达目标表面时,当激光光斑面积大于被探测目标物时,部分激光不能被目标反射,从而导致能量衰减;被探测目标反射的激光到达接收器表面时,如果接收器面积小于反射光斑面积,也将存在能量衰减。发射自由空间能量传输系数 τ_{down} 、接收自由空间能量传输 $f(\phi)$ 为:

$$\tau_{\text{down}} = \frac{d^2}{d_1^2} \quad (12)$$

$$f(\phi) = \frac{\int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^\phi N(\alpha, \beta) \cos\alpha \sin\beta d\beta}{\int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^\pi N(\alpha, \beta) \cos\alpha \sin\beta d\beta} \quad (13)$$

式中, d 为被目标接收到的光斑等效直径, 单位为 m; d_1 为激光光斑直径, $d_1 \approx (L + Z)\theta_b$, 单位为 m; α 为目标反射激光的方位角, β 为目标反射激光的天顶角, $N(\alpha, \beta)$ 为激光强度随激光反射角度的变化函数, 一般采用高斯函数。

2.2 星载激光探测能量传输模型

根据式(1)、(4)、(5)、(8)、(11)、(12), 星载蓝绿激光探测器的水下目标探测深度 Z 可以表示为:

$$Z = \frac{\cos\delta}{2k} \ln \left(\frac{P_t D^2 d_{\tau_i}^2 \tau_{atm}^2 \tau_{aw}^2 \rho \theta_b f(\phi) \tau_r \eta_{det}}{P_r (L + Z)^4 \theta_b^4} \right) \quad (14)$$

式中, δ 为信道视轴角, 垂直时 $\delta = 0$; k 为海水总的衰减系数; P_t 为激光发射脉冲功率, 单位为 W; D 为探测器接收口径, 单位为 m; d 为目标被激光光斑照射到的等效直径, 单位为 m; τ_i 为发射光学系统透过率; τ_{atm} 为大气透过率; τ_{aw} 为气水界面透过率; ρ 为目标表面反射率; θ_e 为星潜激光系统跟瞄误差; $f(\phi)$ 为与光强分布和视场角有关的因子; τ_r 为接收光学系统透过率; η_{det} 为探测器量子效率; P_r 为探测器接收到的激光功率, 单位为 W; L 为激光器到海面的距离, 单位为 km; θ_b 为激光束散角, 单位为 rad。

当 θ_b 较小时, 例如 $\theta_b = 10 \mu\text{rad}$, $Z = 100 \text{ m}$ 时, $(L + Z)\theta_b - L\theta_b = Z\theta_b = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$, 故 $(L + Z)\theta_b \approx L\theta_b$ 。激光垂直射入水中时, $\delta = 0$ 。不考虑跟瞄误差 θ_e , 星载蓝绿激光探测器的水下目标探测深度 Z 可以表示为:

$$Z = \frac{1}{2k} \ln \left(\frac{E_t \lambda D^2 d_{\tau_i}^2 e^{-\frac{7.82}{U} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{y_{L_0}}} \tau_{aw1}^2 \tau_{aw2}^2 \rho f(\phi) \tau_r \eta_{det}}{hc N_r L^4 \theta_b^4} \right) \quad (15)$$

式中, E_t 为激光发射脉冲能量, 单位 J; λ 为激光波长, 单位 m; U 为能见度, L_0 为大气等效距离, 单位为 km; h 为普朗克常量; c 为光速; N_r 为探测器接收到的光子数。其中, $\left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^q \approx 0.96$; τ_{aw1} 取值为 0.9。

3 影响探测深度的因子分析

3.1 因子对探测深度的贡献分析

根据式(10)、(15)可知, 探测深度 Z 与卫星离海面高度 L 、海面风速 V 、大气能见度 U 、海水散

射系数 k 等因素紧密相关。为了分析因子对探测深度的贡献, 各个因子对 Z 求偏导数。假设单光子探测器在极限条件下 ($N_r = 1$) 也能响应激光信号。选取典型参数: $E_t = 6 \text{ mJ}$, $L = 200 \text{ km}$, $L_0 = 8 \text{ km}$, $U = 15 \text{ km}$, $V = 4 \text{ m/s}$, $D = 1 \text{ m}$, $d = 2 \text{ m}$, $\rho = 5\%$, $k = 0.07$, $\tau_i = \tau_r = 0.8$, $\eta_{det} = 30\%$, $f(\phi) = 0.4$, $\theta_b = 10 \mu\text{rad}$ 。

$$\frac{\alpha Z}{\alpha L} = -\frac{2}{kL}$$

$$\frac{\alpha Z}{\alpha V} = \frac{\alpha \tau_{aw2} / \alpha V}{k \tau_{aw2}}$$

$$\frac{\alpha Z}{\alpha U} = \frac{30}{kU^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\alpha Z}{\alpha k} &= -\frac{1}{2k^2} \ln \left(\frac{E_t \lambda D^2 d_{\tau_i}^2 \tau_w^2 \tau_{aw}^2 \rho f(\phi) \tau_r \eta_{det}}{hc N_r L^4 \theta_b^4} \right) \\ &= -\frac{15}{k^2} \end{aligned}$$

$$\frac{\alpha Z}{\alpha D} = \frac{1}{kD} \frac{\alpha Z}{\alpha d} = \frac{1}{kd} \frac{\alpha Z}{\alpha \theta_b} = -\frac{2}{k\theta_b} \frac{\alpha Z}{\alpha E_t} = \frac{1}{2kE_t}$$

$$\frac{\alpha Z}{\alpha \tau_i} = \frac{1}{2k\tau_i} \frac{\alpha Z}{\alpha \tau_r} = \frac{1}{2k\tau_r} \frac{\alpha Z}{\alpha \rho} = \frac{1}{2k\rho} \frac{\alpha Z}{\alpha \eta_{det}} = \frac{1}{2k\eta_{det}}$$

根据以上分析, 在各个变量可能的取值范围内, $\alpha Z / \alpha k$ 、 $\alpha Z / \alpha \theta_b$ 、 $\alpha Z / \alpha U$ 变化速率较快且显著高于探测深度 Z 随其他因子的变化速率。因此, 选择海水散射系数 k 、激光束散角 θ_b 、大气能见度 U 作为主要的变量用以分析其对探测深度的影响。由于卫星高度对激光照射到目标表面的光斑大小产生较大影响, 分析卫星离海面高度 L 对探测深度 Z 的影响也是有必要的。

3.2 大气能见度 U 与探测深度 Z 的关系

根据第3.1节中选取的典型参数值, 海水漫射衰减系数 k 分别为 0.07 (I类海区)、0.144 (II类海区)、0.270 (III类海区), 则根据式(15)计算大气能见度 U 与探测深度 Z 的关系如图2所示。结果表明, 当大气能见度小于 10 km 时, 探测深度随能见度增加快速增加; 当大气能见度大于 10 km 后, 大气能见度的增加对探测深度影响几乎可以忽略不计。对于不同的海区, 由于海水散射系数不同导致探测深度随大气能见度的变化速率也不同。对于 I 类海区, 探测深度可以达到 215 m; 对于 II 类海区, 探测深度可以达到 104 m; 对于 III 类海区, 探测深度可以

达到 56 m。

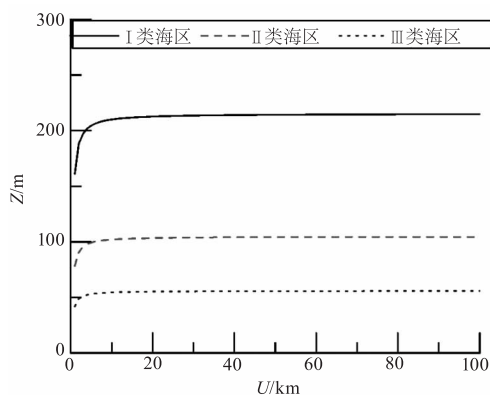


图2 大气能见度 U 与探测深度 Z 的关系

Fig. 2 The relationship between visibility U and detected depth Z

3.3 海水散射系数 k 与探测深度 Z 的关系

海水散射的衰减对激光能量的损失是所有链路中最大的部分,水质不同导致散射系数不同,从而激光能够穿透的海水最大深度也不同。探测深度 Z 随海水衰减系数变化的关系如图3所示。从I类海区到III类海区,随着衰减系数的增大,探测深度从210 m减少到40 m。

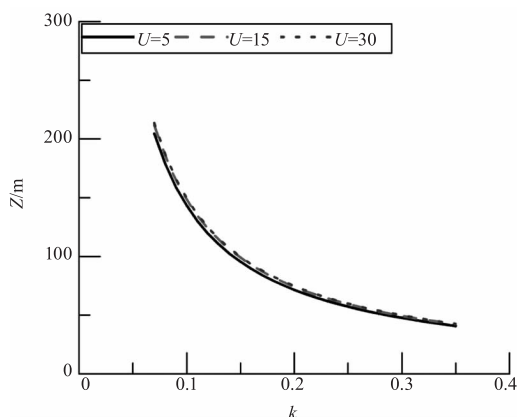


图3 海水散射系数 k 与探测深度 Z 的关系

Fig. 3 The relationship between scattering coefficient of sea water k and detected depth Z

3.4 激光束散角 θ_b 与探测深度 Z 的关系

探测深度 Z 随激光束散角 θ_b 变化的关系如图4所示。激光束散角在 $1 \sim 20 \mu\text{rad}$ 时,随着激光束散角的增大,探测深度不断降低;探测深度的变化速率随激光束散角的增大而减少;不同海区相同束散角条件下,变化速率不同且与海水散射系数有关。对于I类海区,探测深度 $190 \sim 270 \text{ m}$;对于II类海区,探测深度 $90 \sim 130 \text{ m}$;对于III类海区,探测深度 $50 \sim 70 \text{ m}$ 。

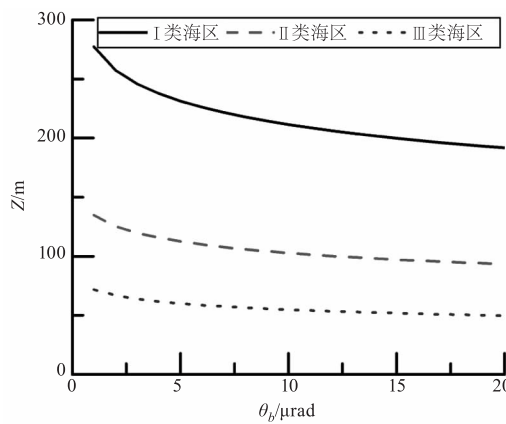


图4 激光束散角 θ_b 与探测深度 Z 的关系

Fig. 4 The relationship between beam divergent angle θ_b and detected depth Z

3.5 卫星高度 L 与探测深度 Z 的关系

卫星高度 L 的变化对距离衰减和向下的空间自由衰减有显著影响。分析卫星高度从 100 km 到 36000 km 变化时,星载激光探测深度的变化规律,如图5所示。结果表明,探测深度 Z 随卫星距离海面高度 L 增大而不断减小。对于 $100 \sim 2000 \text{ km}$ 的极轨轨道,探测深度随轨道高度增加急剧下降;轨道高度大于 2000 km 后,探测深度差异较小。不同海区相同卫星高度,探测深度不同。卫星主要分布在 200 km 和 800 km 的极轨轨道和 36000 km 的地球同步轨道。三种卫星高度下,星载激光对水下目标的探测的极限深度分别为I类海区: 212 m 、 103 m 、 55 m ; II类海区: 172 m 、 84 m 、 45 m ; III类海区: 63 m 、 31 m 、 16 m 。

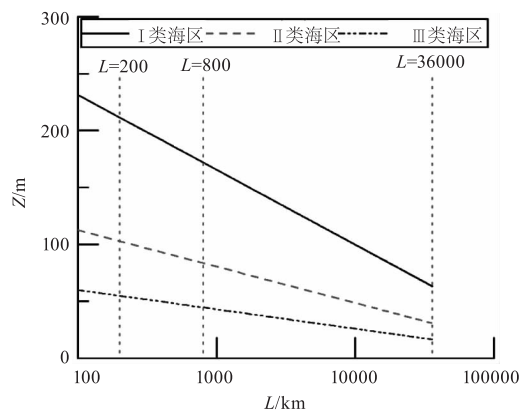


图5 卫星高度 L 与探测深度 Z 的关系

Fig. 5 The relationship between satellite altitude L and detected depth Z

4 结论

星载激光探测能够实现远距离、无接触式探测,具有隐蔽性好、全天时工作、不受领海领空限制等优

点。本文探讨了基于单光子机制的星载蓝绿激光对水下目标探测的极限深度。通过构建星载激光探测能量传输模型,分析不同因子对探测深度的影响。结果表明,在 I 类海区,对于水下等效直径为 2 m 的物体,星载激光在地球同步轨道对水下目标探测的最大深度为 55 m;轨道高度在 200 km 对水下目标探测的最大深度为 212 m;轨道高度在 800 km 对水下目标探测的最大深度为 103 m。因此,在中低轨道开展星载激光对深海水下目标进行探测是可能的。本文的研究工作为进一步开展星载激光深海水下目标探测提供支持。

参考文献:

- [1] LI Yingchao, WANG Chao, AN Yan, et al. Research of laser and infrared polarization detection technology for underwater moving stealth target [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(2): 209–213. (in Chinese)
李英超,王超,安岩,等. 水下隐身目标激光与偏振红外探测技术研究[J]. *激光与红外*, 2016, 46(2): 209–213.
- [2] HAN Jing, ZHAO Chaofang. Application of ocean remote sensing technology in submarine detection[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(3): 67–70. (in Chinese)
韩晶,赵朝方. 海洋遥感技术在探测潜艇中的应用[J]. *装备环境工程*, 2008, 5(3): 67–70.
- [3] Wallraff A, Schuster D I, Blais A, et al. Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics[J]. *Nature*, 2004, 431(7005): 162–167.
- [4] LI Yingchao, HU Yuan, WANG Chao, et al. Energy analysis of spaceborne underwater laser detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 38–42. (in Chinese)
李英超,胡源,王超,等. 星载激光水下探测能量分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 38–42.
- [5] CHEN Hailong, LIU Bin, Gao Baojun, et al. Research on characteristics of laser transmission in near space[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(5): 548–552. (in Chinese)
陈海龙,刘斌,高保军,等. 临近空间激光传输特性研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(5): 548–552.
- [6] ZHAO Jing, ZHAO Shanghong, LI Yongjun, et al. Analysis about the influence of high altitude atmosphere turbulence on airborne laser communication [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(6): 663–668. (in Chinese)
赵静,赵尚弘,李勇军,等. 高空湍流影响下航空激光传输性能分析[J]. *激光与红外*, 2017, 47(6): 663–668.
- [7] GENG Rui, CHEN Fangfang, LV Yong. Research on influencing factors of transmittance for laser transmission in atmosphere[J]. *Laser Journal*, 2016, (12): 13–17. (in Chinese)
耿蕊,陈芳芳,吕勇. 激光大气传输透过率影响因素研究[J]. *激光杂志*, 2016, (12): 13–17.
- [8] DU Zhufeng, HUANG Tiexia, LU Yimin. The calculation of signal energy transmission in submarine laser communication [J]. *Journal of Huazhong University: Science and Technology edition*, 1997, (8): 66–68. (in Chinese)
杜竹峰,黄铁侠,卢益民. 激光对潜通信的信号能量传递计算[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 1997, (8): 66–68.
- [9] 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. (in Chinese)
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.
- [10] XU Qiyang. Blue-Green lidar ocean survey [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
徐啟阳. 蓝绿激光雷达海洋探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [11] LI Xin, QIAN Yong, ZHU Weige, et al. Research on downlink communications performance of satellite-submarine based on single photon detection [J]. *Hans Journal of Wireless Communications*, 2016, 6(6): 133–141. (in Chinese)
李鑫,钱勇,朱维各,等. 基于单光子探测体制的星潜下行链路通信性能研究[J]. *无线通信*, 2016, 6(6): 133–141.
- [12] Smith S M. Specular reflectance of optical-black coatings in the far infrared [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(14): 2311.