

周视激光引信超低空探测地面回波特性研究

张 伟, 李玉钊, 汪哲思, 刘 岩

(北京遥感设备研究所, 北京 100854)

摘 要: 周视激光引信在超低空探测中采用距离波门压缩技术实现抗地杂波能力。针对波门压缩技术需利用地面回波精确、稳定测高的需求, 研究了周视激光引信超低空地面回波特性。建立了周视激光引信超低空对地探测模型, 利用双向反射分布函数, 推导了周视激光引信在时域上接收的地面回波功率方程。计算和分析了在导弹飞行高度、导弹俯仰姿态、地表反射特征等不同条件下的地面激光回波参数。结果表明, 周视激光引信对地测高固有绝对误差随着探测距离的增加而逐渐变大, 而测高固有相对误差逐渐变小。随着俯仰角的增大, 激光回波脉冲的脉宽展宽率增大。地表双向反射分布函数镜面反射分量越大, 地面回波功率对导弹俯仰角的变化越敏感。可为超低空条件下周视激光引信抗地杂波的研究提供理论支撑。

关键词: 周视激光引信; 功率方程; 地面回波; 超低空

中图分类号: TJ439.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0413008

Research on ground echo of ultra-low altitude detection by circumferential laser fuze

Zhang Wei, Li Yuzhao, Wang Zhesi, Liu Yan

(Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract: In the ultra-low altitude detection mode of circumferential laser fuze, range gate compression was used to achieve the ability of anti ground clutter. In order to meet the requirement of accurate and stable height measurement based on ground echo, the characteristics of ultra low altitude ground echo of circumferential laser fuze were studied. The ultra-low altitude ground detection model of circumferential laser fuze was established. Based on the bidirectional reflection distribution function, the power equation in time domain of the ground echo received by the circumferential laser fuze was derived. The laser echo characteristics of the ground were calculated and analyzed under different conditions of missile flight altitude, pitch attitude and ground reflection properties. The results show that the inherent absolute error of height detection by circumferential laser fuze increases with the increase of detection distance, while the inherent relative error decreases. With the increase of pitch angle, the pulse width broadening rate of laser echo pulse increases. The larger the specular reflection component of the bidirectional reflection distribution function of ground, the more sensitive the ground echo power varies with the missile pitch angle. Theoretical support was provided for the anti ground clutter research of circumferential laser fuze under the condition of ultra-low altitude.

Key words: circumferential laser fuze; power equation; ground echo; ultra-low altitude

收稿日期:2020-01-02; 修订日期:2020-02-25

作者简介:张伟(1989-),男,高级工程师,博士,主要从事近程激光探测和目标识别技术方面的研究。Email: zwnjust@163.com

0 引言

周视激光引信具有测距精度高、抗干扰能力强、体积小等优点,目前已经在面空导弹领域得到了较广泛的应用^[1-2]。随着现代战争攻防态势的不断升级,超低空进攻型导弹应运而生,面空导弹应对超低空作战能力的要求越来越高,而引信的超低空性能是衡量面空导弹超低空毁伤性能的关键。

导弹在超低空飞行时,引信不仅能接收到目标回波信号,还能接收到地面回波信号。地面回波还称为地杂波,文中的地面回波指陆地回波,包括沙地、草地、湖面等环境。周视激光引信在超低空探测中,地面可以看作扩展目标,相对于目标的反射截面,地面的反射截面通常比目标大得多,目标回波可能湮没在地杂波中。因此,在引信超低空工作模式中,为了能将目标与地面杂波有效区分出来,一般采用距离波门压缩技术实现^[3-4]。距离波门压缩技术的主要实现方式是,周视激光引信各个通道分别检测目标,朝向地面的通道检测目标和地面,根据引信实时测高数据,控制各个通道距离选通波门的宽度,从而控制引信的截止距离。随着导弹飞行高度的下降,引信截止距离不断减小,地面回波信号始终处于激光引信的作用距离之外,从而可以将地面和目标区分开来,防止引信对地面回波产生虚警。对地测高的准确度和稳定性是距离波门压缩技术实现的关键,取决于对激光地面回波特征的分析,因此研究周视激光引信的地面回波特性对于后续开展激光引信距离波门压缩技术的研究具有重要意义。特殊地,周视激光引信发射的激光光束是宽视场的,在对地探测模式中,光束照射在地面上形成具有相当尺度的光斑。陈杉杉等^[5]推导了窄视场激光引信对平面的回波信号在时域上的功率方程,但并不适用于宽视场激光探测系统。参考文献^[6-7]利用波束分解法和目标面元分解法等方法对宽视场激光引信的目标回波进行仿真计算,但均没有得到回波功率方程的计算式。

针对以上不足,通过建立周视激光引信超低空对地探测模型,利用双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF),推导周视激光引信在时域上接收的地面激光回波功率方程。进一步计算和研究在导弹飞行高度、俯仰姿态、地表反

射特性等不同条件下的地面激光回波特性。

1 周视激光引信超低空对地探测模型

面空导弹为了能够有效地拦截来袭的空中目标,引信必须具备 360°全向探测能力。周视激光引信通过在弹体沿周向均匀布置数套激光探测系统,实现引信周向 360°无盲区探测^[8]。每套激光探测系统由一个激光发射系统和一个激光接收系统组成。激光引信工作时,激光发射驱动电路激励激光器发射 ns 级脉宽的激光光束,激光光束经发射光学系统整形扩束后照射到目标,接收光学系统捕获由目标反射或散射的激光回波脉冲,并将激光回波会聚到激光探测器上,激光探测器将光信号转换成电流信号,后经过跨阻放大电路形成电压信号,再进一步完成后续信号处理,利用飞行时间法(TOF),实现引信测距功能。

激光探测系统的视场由激光发射系统决定,激光接收系统的视场一般覆盖激光发射视场。探测视场中轴一般与弹轴方向成一定角度,且在子午方向为窄视场、在弧矢方向为宽视场,形成窄长条状视场。文中所采用的一种六通道周视激光引信探测视场示意图如图 1 所示, φ 为探测视场倾角, δ 为子午视场角, ζ 为弧矢视场角。该激光引信中每套激光探测系统的探测视场角均为 $2^\circ \times 60^\circ$,探测视场倾角为 50° 。

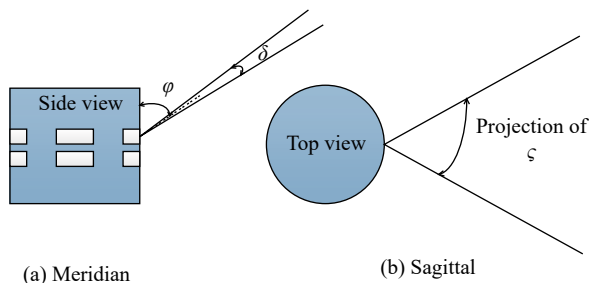


图 1 周视激光引信探测视场示意图

Fig.1 Field of view of circumferential laser fuze

周视激光引信在超低空飞行模式下的探测模型示意图如图 2 所示,图中阴影部分为正对地面的激光发射系统发出的光束所照亮的区域,探测区域为窄长条形状。由于激光发射系统和接收系统之间的间隔远远小于探测距离,因此可以认为该激光引信为单站激光雷达系统,激光探测系统简化为图中的 F 点。 Fo 为探测系统视场中轴,在光束发出方向建立 $o-xyz$

直角坐标系,坐标原点 o 点为视场中轴与地面的交点, z 轴为光束中轴发出方向, y 轴在地面上且与 z 轴垂直, x 轴由右手法则确定。 θ 为视场中轴与垂直方向的夹角,特别地当导弹水平飞行时有 $\varphi=90^\circ-\theta$ 。 β 为地面任意一点到 F 点的直线与垂直方向的夹角。 H 为导弹飞行高度, Fo 的长度为 R ,满足关系 $\cos\theta=H/R$ 。

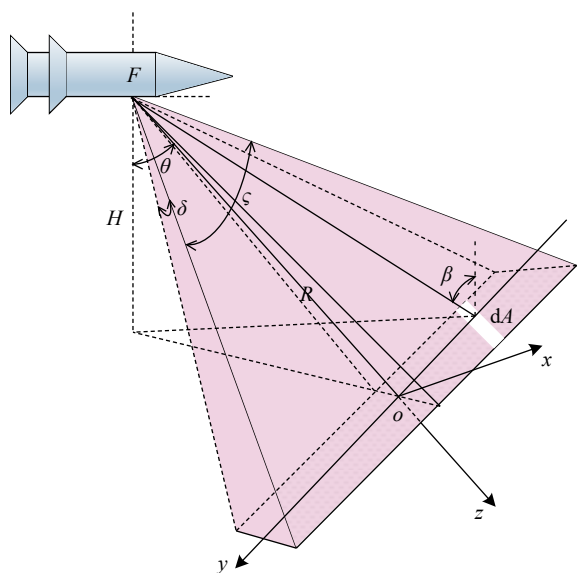


图 2 周视激光引信超低空探测模型示意图

Fig.2 Ultra low altitude detection model of circumferential laser fuze

2 超低空探测激光地面回波功率推导

周视激光引信朝向地面的激光探测系统可以接收地面回波,激光回波功率方程用下式表示^[9]:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} A_r \eta_{atm}^2 \eta_{sys}^2 \quad (1)$$

式中: P_t 为激光发射功率; G_t 为发射光学增益; R 为激光探测系统与目标之间的距离; σ 为激光雷达散射截面(Laser Radar Cross Section, LRCS); A_r 为激光接收光学面积; η_{atm} 为大气透过率,近程探测时大气透过率近似不变; η_{sys} 为激光探测系统光学透过率。

公式(1)中第一项因子表示激光发射光束截面照度,单位为 W/m^2 。周视激光引信发射的激光是通过数个发光结向空间辐射激光,并经过光学整形形成的宽视场光束,可以认为在视场范围内光束能量服从均匀分布^[10],均匀分布光束照度表示为:

$$E(x, y, z) = \frac{P_t}{S(x, y, z)} \quad (2)$$

式中: $S(x, y, z)$ 表示光束在传播距离 z 处的横截面面积。

时域上,激光器的发射脉冲一般认为服从高斯分布^[11],表示为:

$$P_t(t) = P_0 e^{-\frac{t^2}{\tau^2}} \quad (3)$$

式中: P_0 为激光发射脉冲峰值功率; τ 为激光脉冲宽度,即高斯脉冲 $1/e$ 峰值处的脉冲宽度,当 $t=0$ 时,激光发射脉冲取峰值。脉冲的半峰宽度为 $FWHM=2\tau\sqrt{\ln 2}$ 。

由于地面足够广大,所以地面可以看作是扩展目标。地面探测区域面元的雷达散射截面方程为:

$$d\sigma = 4\pi f_r(\beta) \cos^2 \beta dA \quad (4)$$

式中: $f_r(\beta)$ 为面元的双向反射分布函数; dA 为散射面元面积; β 为面元的反射角。

双向反射分布函数 $f_r(\beta)$ 的定义为面元反射方向的辐射亮度与入射方向的辐照度之比,单位为 sr^{-1} ,可以用下式表示^[12]:

$$f_r(\beta) = \frac{M}{\cos^6 \beta} e^{-\frac{\tan^2 \beta}{m^2}} + N \cos^n \beta \quad (5)$$

式中:第一项和第二项分别为目标的镜面反射分量和漫反射分量; M 为镜面反射幅度; N 为漫反射幅度; m 为目标表面坡度; n 为漫反射系数。

考虑到激光探测系统的子午视场非常小,且导弹在超低空飞行时一般为俯冲姿态,因此在地面与 y 轴垂直的任一直线上,可以认为该直线上探测视场内的点形成的反射角 β 是不变的,满足如下关系:

$$\cos \beta = \frac{R \cos \theta}{\sqrt{R^2 + y^2}} \quad (6)$$

公式(6)表示了面元反射角 β 与坐标 y 的关系。

将地面探测区域沿着 y 轴方向划分为若干面元,面元内的反射角不变。由几何关系,近似有 $dA \cos \beta = dx dy$, $dx = 2R \tan \delta$,因此面元散射截面方程改写为:

$$d\sigma = 8\pi R \tan \delta f_r(\beta) \cos \beta dy \quad (7)$$

面元对应的激光传输单光程 R_r 为:

$$R_r(\beta) = \frac{H}{\cos \beta} = R \frac{\cos \theta}{\cos \beta} \quad (8)$$

同理,以地面为目标时,光束在地面上探测视场在 y 轴上的边界为 $-R \tan(\zeta/2)$ 和 $R \tan(\zeta/2)$,则将公式(2)改写为:

$$E(t') = \frac{P_r(t')}{2R \tan(\zeta/2) 2R \tan \delta} \quad (9)$$

激光探测系统接收面元回波的功率为:

$$dP_r(t) = \frac{1}{2R \tan(\zeta/2)} P_r(t') f_r(\beta) \cdot \cos \beta \frac{A_r}{R_r^2} \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}}^2 dy \quad (10)$$

式中: $t' = t - 2R_r/c$, c 为光速。

将公式 (10) 进行积分计算, 即可得到在时域上激光探测系统接收的功率, 有:

$$P_r(t) = A_r \eta_{\text{atm}}^2 \eta_{\text{sys}}^2 \frac{1}{2R \tan(\zeta/2)} \int P_r(t') f_r(\beta) \cos \beta \frac{1}{R_r^2} dy \quad (11)$$

公式 (11) 中积分的区间为地面上被照射的探测视场在 y 轴上部分, 即 $[-R \tan(\zeta/2), R \tan(\zeta/2)]$ 。

3 对地探测激光回波参数计算

利用公式 (11) 可以计算在给定参数条件下的激光探测系统接收功率。式中的积分部分难以解析, 因此文中不进行积分公式推导, 而是采用数值积分的方法对积分部分进行计算。

激光引信激光探测系统参数如表 1 所示。

表 1 激光探测系统参数

Tab.1 Parameters of laser detection system

Parameters	Value
P_0/W	100
τ/ns	20
A_r/m^2	3.14×10^{-4}
$\varphi/(\circ)$	50
$\delta/(\circ)$	2
$\zeta/(\circ)$	60
η_{sys}	0.65 (Including filter)
η_{atm}	0.8 (Including design margin)

3.1 超低空探测过程中地面回波功率计算

在面空导弹激光引信超低空探测模式下, 导弹的飞行高度逐渐减小, 计算时飞行高度 H 设置为从 30 m 降到 5 m。设置导弹俯仰角为 0° , 此时激光探测系统视场中轴与垂直方向的夹角 θ 为 40° 。设置某一类型地面双向反射函数的系数^[9]为 $M=0.5, N=0.3, m=0.2,$

$n=1$ 。经过计算, 得到不同飞行高度的激光探测系统接收回波波形如图 3 所示, 不同飞行高度的激光回波脉冲半峰宽度与峰值延时 Δt 的变化趋势如图 4 所示。

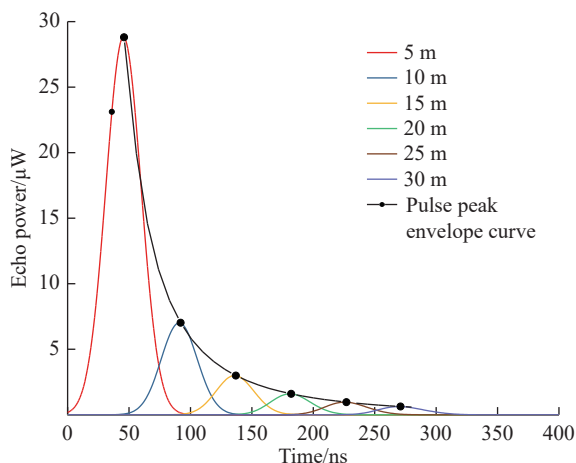


图 3 不同飞行高度的激光回波波形

Fig.3 Laser echo waveforms at different altitudes

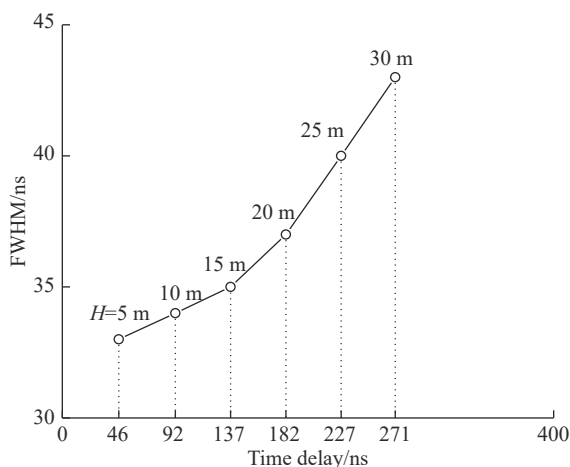


图 4 不同飞行高度激光回波脉冲半峰宽度与峰值延时变化

Fig.4 FWHM and delay of laser echo pulse at different altitude

由图 3 和图 4 可以得到,

(1) 激光回波脉冲信号在时域上仍然与高斯分布近似, 但存在脉冲宽度展宽的现象, 且随着探测距离的增大, 脉冲展宽程度越大。脉冲半峰脉宽表示为 ω_{FWHM} , 脉宽展宽率由下式表示:

$$\omega = \frac{\omega_{\text{FWHM}} - 2\tau \sqrt{\ln 2}}{2\tau \sqrt{\ln 2}} \times 100\% \quad (12)$$

当 $H=10$ m 时, $\omega_{\text{FWHM}}=34$ ns, $\omega=2\%$; 当 $H=30$ m 时, $\omega_{\text{FWHM}}=43$ ns, $\omega=29\%$ 。脉宽展宽的主要原因是激光发射光束在 y 轴方向进行扩束, 当照射到扩展目标

上时,造成探测系统接收的激光反射回波在时域上混叠,且当探测距离越大时,混叠的绝对程度更大,脉宽展宽率更大。

(2) 脉冲信号峰值功率随着探测距离的增大而减小,由峰值功率包络曲线,峰值减小的趋势是先大后小。经过数据拟合,近似地有,脉冲峰值功率与飞行高度的平方成反比。

(3) 同样由于地面回波在时域上的混叠,相较于窄视场激光探测系统,周视激光引信地面回波脉冲峰值在时域上出现后移的现象。如果周视激光引信采用峰值测距法对地进行高度测量,由于脉冲展宽、峰值时域后移等因素的影响,理论上存在固有的相对测高误差 ε ,用下式表示:

$$\varepsilon = \frac{c \frac{\Delta t}{2} \cos \theta - H}{H} \times 100\% \quad (13)$$

式中: c 表示光速。由公式 (13) 计算激光引信对地测高固有相对误差曲线如图 5 所示。当 $H=30$ m 时,测高绝对误差为 1.14 m,相对误差为 3.8%;当 $H=5$ m 时,测高绝对误差为 0.29 m,相对误差为 5.7%。因此对地测高固有绝对误差随着探测距离的增加而逐渐变大,而测高固有相对误差逐渐变小。

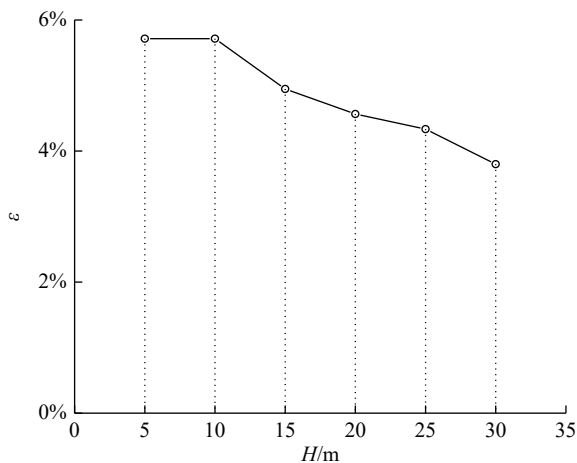


图 5 激光引信对地测高固有相对误差

Fig.5 Inherent relative error on height detection of laser fuze

3.2 不同飞行俯仰情况地面回波功率计算

导弹在超低空飞行时,一般是平飞-俯冲状态,同时考虑到飞行中存在的弹体姿态扰动,因此需要分析激光引信在不同俯仰角情况下的回波特征。设置导弹俯仰角为 -10° 、 -5° 、 0° 、 5° 、 10° 五种飞行姿态,此

时激光引信探测视场中轴与垂直方向的夹角 θ 为 30° 、 35° 、 40° 、 45° 、 50° 。设置地面双向反射函数的系数为 $M=0.5$ 、 $N=0.3$ 、 $m=0.2$ 、 $n=1$ 。设置飞行高度 $H=20$ m。经过计算,得到不同俯仰姿态情况下激光探测系统回波波形如图 6 所示,导弹不同俯仰姿态情况下激光探测系统回波功率相对平飞时的变化率、脉宽展宽率及峰值测距法相对误差如图 7 所示。

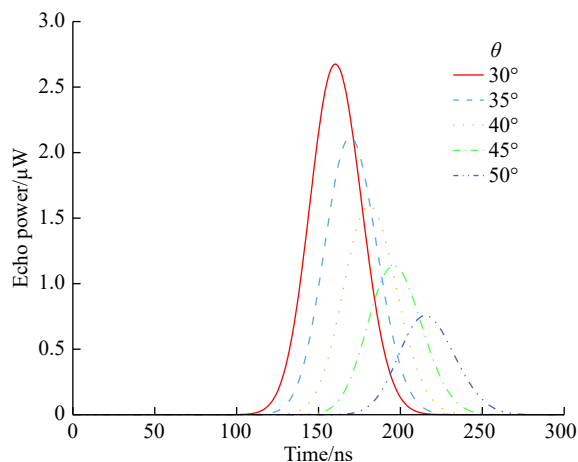


图 6 不同俯仰姿态的激光回波波形

Fig.6 Laser echo waveforms with different pitch attitudes

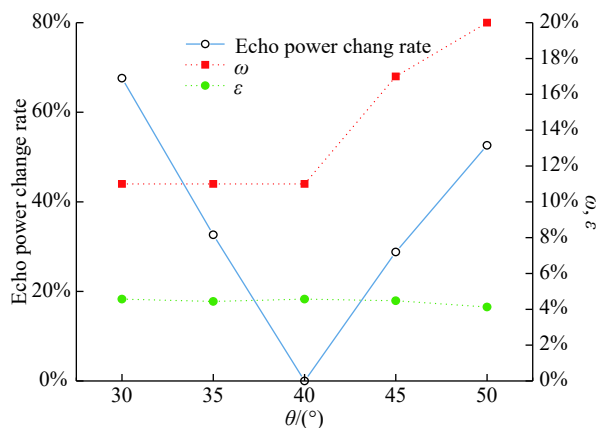


图 7 不同俯仰姿态的激光回波参数

Fig.7 Parameters of laser echoes with different pitch attitudes

由图 6 和图 7,当 $H=20$ m 时,在不同俯仰姿态的条件下,激光回波脉冲信号的峰值功率随着俯仰角的增大而减小,且在俯仰角大于 0° 时峰值功率变化程度小于俯仰角小于 0° 的情况,经过计算,相对导弹平飞时,导弹俯仰角为 -10° 时回波峰值功率增大 1.7 倍,俯仰角为 -20° 时回波峰值功率增大 2.4 倍,俯仰角为 -30° 时回波峰值功率增大 3.8 倍;激光回波脉冲的脉

宽展率随着俯仰角的增大而增大,在俯仰角大于 0°的时候变化程度更大,当俯仰角为 50°时, $\omega=20\%$;采用峰值测距法对地进行距离测量时,探测系统存在的对地测高固有相对误差 ε 随着俯仰角增大而呈现减小的趋势,但变化并不明显,均约为 4.5%,可以认为轻微的俯仰角变化不影响激光引信探测具有此类反射特性的地面的测高精度。

3.3 不同地面反射特性的地面回波功率计算

地面类型的反射特性,认为与目标的双向反射分布函数相关。在一些复杂地面环境中,例如草地、沙地、水泥地等,地面的反射兼顾漫反射和镜面反射的混合反射特性,而且更多地表现出漫反射的特性;而当探测湖面、较平稳的河面时,目标的反射大部分地表现出镜面反射的特性。前面两节中,双向反射分布函数参数的选取兼顾了漫反射和镜面反射,属于混合反射特性。下面计算漫反射、混合反射、偏向镜面反射的混合反射三种不同的地面反射条件对激光回波的影响。

当目标反射为漫反射时,双向反射分布函数 f_r 是一个常数,目标表面反射率 ρ_r 与 f_r 的关系满足:

$$\rho_r = \pi f_r \quad (14)$$

三种计算条件的双向反射分布函数参数选取如下:条件 1,漫反射, $f_r=0.2$;条件 2,混合反射, $M=0.5$, $N=0.3$, $m=0.2$, $n=1$;条件 3,偏向镜面反射, $M=0.7$, $N=0.1$, $m=0.1$, $n=10$ 。由条件 2 和条件 3 计算的双向反射分布函数 f_r 如图 8 所示。由图可见,随着反射角的增加,双向反射分布函数均呈现先急剧下降后缓慢下降的趋势,但是在偏向镜面反射的条件下,该变化趋势更为明显,当反射角为 40°时, f_r 已经非常接近 0。

设置导弹俯仰角为 -30°、-20°、-10°、0°、10° 五种飞行姿态,对应的激光探测系统视场中轴与垂直方向的夹角 θ 为 10°、20°、30°、40°、50°。设置导弹飞行高度 H 为分别为 4、8、12、16、20 m。计算三种条件下,激光引信探测系统接收的回波峰值功率随 θ 和飞行高度 H 的变化如图 9 所示。

由图 9 可知,例如取 $H=12$ m 时,条件 1、条件 2、条件 3 在 $\theta=10^\circ$ 时与 $\theta=50^\circ$ 时的地面回波峰值功率之比分别为 3.75、7.6、290.6,可见,地面的镜面反射分量越大,回波功率随着反射角的变化越剧烈,甚至呈几个数量级的变化,即条件 3 对 θ 角敏感程度很高。

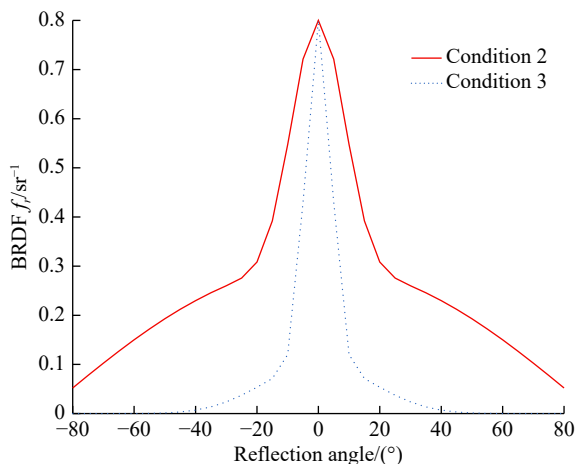
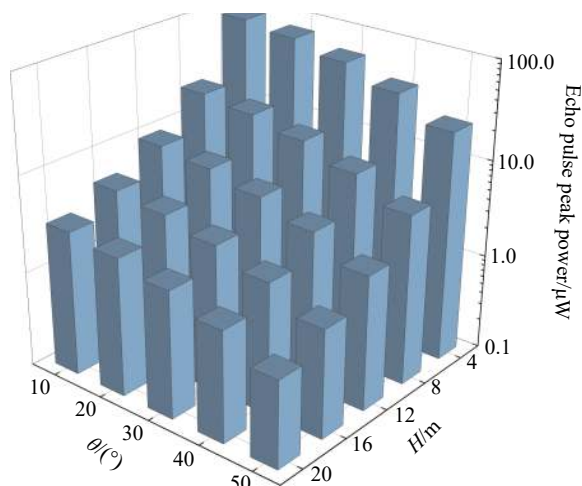
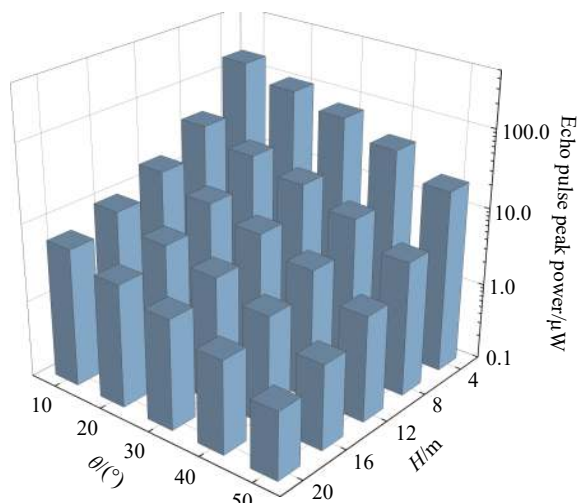


图 8 条件 2 和条件 3 的双向反射分布函数

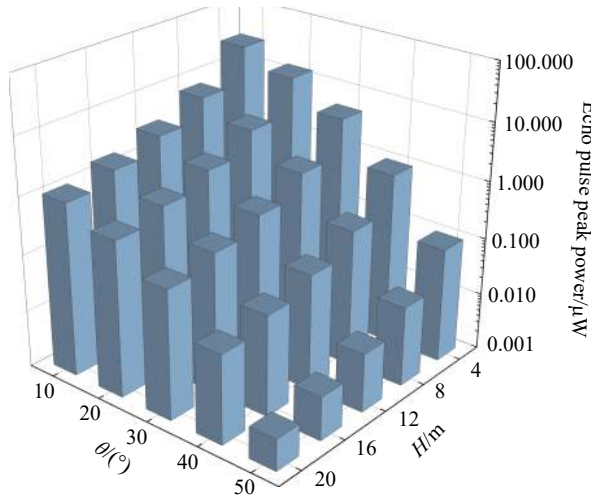
Fig.8 BRDFs under the conditions of 2 and 3



(a) 漫反射
(a) Diffuse reflection



(b) 混合反射
(b) Compound reflection



(c) 偏向镜面反射
(c) Mostly specular reflection

图 9 激光引信接收的脉冲回波峰值功率

Fig.9 Peak power of echoed laser pulse received by laser fuze

这是由于在小反射角下,偏向镜面反射的双向反射分布函数还处于较高水平,则回波功率也处于较高水平;而随着反射角增大,偏向镜面反射的双向反射分布函数急剧减小,直至接近 0,则回波功率也表现出剧烈下降的趋势。

由于目前的激光引信的回波探测阈值一般在 $1 \mu\text{W}$ 左右水平,根据条件 3,在大反射角、大距离的情况下,可能会造成回波功率低于探测阈值,导致探测失效。当超低空探测采用波门压缩技术时,导弹下降过程中由于姿态摆动导致 θ 角产生抖动,如果地面环境为湖面或较平稳的河面时,则可能发生瞬时探测失效的情况,此时激光引信不能获取对地测高数据,导致波门压缩技术失效。因此,目前波门压缩技术并不适用于现有激光引信探测偏向镜面反射的地面环境,如果大幅提高周视激光引信的发射功率,或大幅提高探测灵敏度,则可以解决该问题。

4 结 论

文中通过建立周视激光引信超低空对地探测模型,利用双向反射分布函数,推导了周视激光引信在时域上接收的激光地面回波功率方程,并计算了地面回波相关参数和特性。结果表明,周视激光引信地面激光回波脉冲信号在时域上与高斯分布近似,但存在脉冲宽度展宽的现象,且随着探测距离的增大,脉冲展宽程度越大,当导弹俯仰角为 0° 、 $H=30 \text{ m}$ 时,脉宽

展宽率达到 29%。周视激光引信对地测高固有绝对误差随着探测距离的增加而逐渐变大,而测距固有相对误差逐渐变小,当导弹俯仰角为 0° 、 $H=30 \text{ m}$ 时,理论上测高绝对误差达到 1.14 m 。 $H=20 \text{ m}$ 时,随着导弹俯仰角的增大,地面激光回波脉冲的脉宽展宽率增大,而测高固有相对测距误差的变化并不明显。地表双向反射分布函数的镜面反射分量越大,回波功率对导弹俯仰角的变化越敏感,当 $H=12 \text{ m}$, $\theta=10^\circ$ 与 $\theta=50^\circ$ 时偏向镜面反射类型的地面回波峰值功率之比高达 290.6,提高引信的发射功率或探测灵敏度将有助于改善超低空探测波门压缩技术在偏向镜面反射的地面环境中的应用。文中的研究可为超低空条件下周视激光引信抗地杂波的研究提供理论支撑。

参考文献:

- [1] Cai Kerong, Qiu Likuan, Gao Ruilin. Feature extraction methods and applications of signal feature for pulse laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0303004. (in Chinese)
蔡克荣, 仇理宽, 高瑞林. 脉冲激光引信的信号特征提取方法及应用[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0303004.
- [2] Li Yuzhao, Liu Yan, Chen Xi, et al. Precision analyses of point-of-burst control based on laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1206004. (in Chinese)
李玉钊, 刘岩, 陈曦, 等. 激光引信炸点控制精度分析[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 1206004.
- [3] Lu Ming, Lin Tao, Zhao Xi. Analysis of the technology of radio fuze anti-jamming sea clutter [J]. *Journal of Detection & Control*, 2007, 29(2): 35-37. (in Chinese)
路明, 林涛, 赵曦. 无线电引信抗海杂波干扰技术分析[J]. *探测与控制学报*, 2007, 29(2): 35-37.
- [4] Qi Zhao, Guangyu Du, Bin Zhang, et al. Simulation design of fuze warhead system of air defense missile at very low altitude [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2017, 28(3): 572-584.
- [5] Chen Shanshan, Zhang He, Xu Xiaobin. Echo characteristic of planar target in pulsed laser fuze detection [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(6): 1095-1102. (in Chinese)
陈杉杉, 张合, 徐孝彬. 脉冲激光引信探测平面目标的回波特性研究[J]. *兵工学报*, 2018, 39(6): 1095-1102.
- [6] Yu Haishan, Ren Hongguang, Huo Lijun, et al. Laser fuze target scattering echo modeling in considering of time factor [J]. *Journal of Detection & Control*, 2015, 37(4): 11-15. (in Chinese)

- Chinese)
- 于海山, 任宏光, 霍力君, 等. 考虑时间因子的激光引信目标散射回波建模方法[J]. 探测与控制学报, 2015, 37(4): 11-15.
- [7] Li Zhe, Zhang Jingguo, Gao Chong. Characteristics of laser fuze scattering from ground background in the near field [J]. *Aero Weaponry*, 2015(6): 27-30. (in Chinese)
- 李喆, 张京国, 高宠. 激光引信地面背景近场散射特性研究[J]. *航空兵器*, 2015(6): 27-30.
- [8] Han Chao, Deng Jiahao, Gao Jing, et al. Design of simulation software for laser fuze target detection and recognition [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(2): 149-153. (in Chinese)
- 韩超, 邓甲昊, 高静, 等. 激光引信目标探测与识别仿真软件的设计[J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(2): 149-153.
- [9] Xu Xiaobin Zhang He, Zhang Xiangjin, et al. Effect of plane target characteristics on ranging distribution for pulse laser detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(21): 210601. (in Chinese)
- 徐孝彬, 张合, 张祥金, 等. 脉冲激光探测平面目标特性对测距分布的影响[J]. *物理学报*, 2016, 65(21): 210601.
- [10] Zheng Xiang, Zhao Baiqin. Design of aspheric cylindrical lens of uniform light distribution for circumferential detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 289-296. (in Chinese)
- 郑翔, 赵柏秦. 用于周向探测的均匀配光非球面柱透镜设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 289-296.
- [11] Li Hongpeng, Li Guoyuan, Cai Zhijian, et al. Full waveform LiDAR echo decomposition method [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(1): 89-98. (in Chinese)
- 李洪鹏, 李国元, 蔡志坚, 等. 全波形激光雷达回波分解方法[J]. *遥感学报*, 2019, 23(1): 89-98.
- [12] Ove Steinvall. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(24): 4381-4391.