DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2209427

# 周期扫描磁信号特征对光磁复合方位 探测统计分布的影响<sup>\*</sup>

甘霖<sup>1,2</sup>,王科<sup>2</sup>,许子涵<sup>2</sup>,张凝希<sup>2</sup>,张合<sup>2</sup>

(1.南京理工大学工程训练中心 南京 210094; 2.南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室 南京 210094)

**摘 要:**针对超近程来袭目标方位探测统计分布问题,研究了光磁复合方位测量方法周期扫描磁信号对探测精度的影响机理。 建立了永磁体旋转扫描空间磁场数学模型,推导出周期扫描磁信号方程,结合磁信号特征和恒阈值时间测量方法,推导出周期 扫描磁信号时间测量概率统计分布函数解析式。研究了扫描周期、磁场强度、阈值电压和噪声对时间测量概率统计分布的影响 规律。结果表明,随着扫描周期和磁场强度的增加,概率分布函数对称性不受影响,概率分布半宽会随之减小,且分布峰值随之 呈现 0.75~1.88 范围内的增加。随着阈值检测电压的提高,概率分布首先呈现半宽减小、峰值提升 0.48 态势,进而出现半宽增 大、峰值降低 0.54 现象,且在峰值前后分布曲线的上升沿和下降沿出现不同走势。随着等效噪声电压的增加,概率分布函数对 称性不受影响,但分布半宽会随之增大,且分布峰值随之减小 0.4~0.48。

关键词: 方位探测;光磁复合;磁扫描信号;概率统计分布

中图分类号: TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 4030

# Influence of periodically scanning magnetic signal characteristics on the statistical distribution of laser-magnetic composite azimuth detection

Gan Lin<sup>1,2</sup>, Wang Ke<sup>2</sup>, Xu Zihan<sup>2</sup>, Zhang Ningxi<sup>2</sup>, Zhang He<sup>2</sup>

(1. Engineering Training Centre, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Aiming at the statistical distribution of azimuth detection of ultra-short-range incoming targets, this article studies the influence mechanism of periodic scanning magnetic signal on the detection accuracy of the laser-magnetic composite azimuth measurement method. The mathematical model of the permanent magnet rotating scanning space magnetic field is formulated, and the periodic scanning magnetic signal equation is derived. Combined with the characteristics of the magnetic signal and the constant threshold time measurement method, the analytical formula of the probability and statistical distribution function of the time measurement of the periodic scanning magnetic signal is deduced. The effects of scanning period, magnetic field intensity, threshold voltage, and noise on the probability and statistical distribution of time measurement are studied. The results show that with the increase in scanning period and magnetic field intensity, the symmetry of the probability distribution function is not affected, the half-width of probability distribution decreases, and the peak value of distribution increases in the range of  $0.75 \sim 1.88$ . With the increase of the threshold detection voltage, the probability distribution firstly shows a trend of decreasing half-width and the peak value is increased by 0.48, then increasing half-width and the peak value decreased by 0.54, and the rising and falling edges of the distribution function is not affected, but the distribution function is not affected, but distribution function is not affected, but the increase of equivalent noise voltage, the symmetry of the probability distribution curve before and after the peak have different trends. With the increase of equivalent noise voltage, the symmetry of the probability distribution function is not affected, but the distribution function half-width increases and the distribution peak decreases in the range of  $0.4 \sim 0.48$ .

Keywords: azimuth detection; laser-magnetic composite; magnetic scanning signal; probability and statistics distribution

收稿日期:2022-03-14 Received Date: 2022-03-14

<sup>\*</sup>基金项目:国家自然科学基金(51605227)、南京理工大学本科生科研训练计划立项资助

# 0 引 言

激光方位探测系统具备方向性好、探测精度高、抗干 扰性能强等优势特征<sup>[1-2]</sup>,有效契合了现代复杂战场环 境,被广泛应用于各类武器装备<sup>[3-5]</sup>。例如采用激光多窗 口探测体制的美国 Thales 导弹、采用三通道激光引战系 统的英国 Thomson-Thorn 导弹和采用四象限方位探测体 制的防空火箭弹等<sup>[6-7]</sup>。对激光方位探测系统而言,方位 识别精度决定了弹药能否在最佳位置起爆攻击目标,是 其核心重要指标。

针对激光方位探测系统方位识别精度问题,文 献[8]采用3组激光收发窗口实现目标周向探测,脉冲激 光距离识别精度达到0.25 m;文献[9-10]采用电机扫描 折转机构实现单脉冲激光水下空间全向探测,采用最小 均方自适应滤波算法,研究了水下目标近程测距精度问 题;文献[8]和[11]针对激光近程探测恒阈值与峰值两 种时刻鉴别方法,研究了激光近程测距概率统计分布特 性;文献[12]采用激光同步扫描方法,采用蒙特卡洛数 值分析方法研究了目标捕获概率的影响因素以及变化规 律;国内外学者针对激光方位探测系统方位识别问题,研 究重点集中在目标距离探测精度、近程目标捕获概率等 方面<sup>[13-15]</sup>,针对目标方位识别精度的研究相对较少涉及。

本文针对激光方位探测系统方位识别精度问题,在 前期方位动态探测概率密度统计分析基础上<sup>[1,16]</sup>,针对 光磁复合方位测量方法,研究周期扫描磁信号对方位探 测精度的影响机理,基于等效磁荷模型,推导出周期扫描 磁信号方程,结合磁信号特征和恒阈值时间测量方法,推 导出周期扫描磁信号时间测量概率统计分布函数解析 式。理论仿真分析了不同扫描周期、磁场强度、阈值电压 和噪声对时间测量概率统计分布的影响规律。搭建了磁 信号动态扫描探测实验平台,采用蒙特卡罗方法进行实 验验证,理论分析与动态扫描探测实验的测量结果概率 统计分布基本一致。

# 1 光磁复合探测周期扫描磁信号特征

光磁复合方位探测原理是采用旋转扫描机构,驱动 单脉冲激光周向扫描探测目标距离信息,利用磁传感器 测量旋转扫描周期,结合脉冲激光目标回波信号,解算目 标方位角,通过光磁两路信号实现目标距离和方位角的 识别与解算。本文重点探讨周期扫描磁信号对光磁复合 方位探测统计分布的影响,目前针对永磁体外部空间磁 场的等效数学模型,主要有等效电流和等效磁荷两种模 型。其中等效电流模型采用矢量磁位,包含3个自由度, 计算过程复杂,而等效磁荷模型采用标量磁位替换矢量 磁位,模型相对简单易算。因此,本文基于等效磁荷模 型,建立圆柱磁体旋转扫描外部空间磁场数学模型,如 图1所示,以圆柱磁芯中心为原点,规定原点与磁芯外端 面中心连线方向为 x , 轴,磁芯磁化方向为 x , 轴正方向, 过原点垂直于柱面方向为 ym 轴,建立磁芯随动坐标系 o\_x\_y\_z\_;将磁传感器设置在与磁芯正对处轴线重合位 置,以磁传感器中心为原点,轴线方向为 x 轴,原点垂直 于柱面方向为 y 轴,建立固定坐标系 oxyz。





Fig. 1 Rotating scanning magnetic field model of cylindrical magnet

设置源点柱坐标为  $(\gamma, \theta, x)$ , 对于空间任意点 Q, 其 柱坐标为 $(\gamma', \theta', x')$ , 基于等效磁荷(equivalent magnetic monopoles, EMM) 模型和标量磁位概念, Q 点磁场强度如式(1)所示<sup>[17]</sup>。

(1)

$$H(Q) = -\frac{1}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \int_{0}^{2\pi} \nabla (M\cos(\theta') \times r(\gamma, \theta, x; \gamma', \theta', x'))$$

 $\mathrm{d}\theta'\mathrm{d}x'$ 

式中: x<sub>1</sub> 是磁芯镶嵌于转轴内端面的 X 轴坐标值, x<sub>2</sub> 是磁芯另一端面的 X 轴坐标值, M 为沿 x<sub>n</sub> 轴的均匀磁

$$\begin{aligned}
H_{\gamma}(\gamma,\theta,z) &= \frac{MR^{2}}{4\pi} \int_{z_{1}}^{z_{2}} \int_{0}^{2\pi} \left[ \gamma - R(\cos(\theta - \theta')) \right] \times \cos(\theta') r^{3}(\gamma,\theta,z;\gamma',\theta',z') \,\mathrm{d}\theta' \mathrm{d}z' \\
H_{\theta}(\gamma,\theta,z) &= \frac{MR^{2}}{4\pi} \int_{z_{1}}^{z_{2}} \int_{0}^{2\pi} \cos(\theta') \sin(\theta - \theta') \times r^{3}(\gamma,\theta,z;\gamma',\theta',z') \,\mathrm{d}\theta' \mathrm{d}z' \\
H_{z}(\gamma,\theta,z) &= \frac{MR}{4\pi} \int_{z_{1}}^{z_{2}} \cos(\theta') (z - z') \times r^{3}(\gamma,\theta,z;\gamma',\theta',z') \,\mathrm{d}\theta' \mathrm{d}z'
\end{aligned}$$
(3)

其中, R 为圆柱磁芯半径。

根据直角坐标系和柱坐标系的转换关系,在随动坐 标系中磁场强度的3个方向分量可分别表示为:

$$\begin{bmatrix} H_{xm} \\ H_{ym} \\ H_{zm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{\gamma}(\gamma, \theta, z) \\ H_{\theta}(\gamma, \theta, z) \\ H_{z}(\gamma, \theta, z) \end{bmatrix}$$
(4)

在本模型中,磁芯随动坐标系可以看作是固定坐标 系先沿 Z 轴平移 D 距离,再绕 Y 轴顺时针旋转转换而 来,因此,两者的转换关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{xm} \\ H_{ym} \\ H_{zm} \end{bmatrix}$$
(5)

其中, $\phi = wt$ ,代表磁芯相对磁传感器旋转角度;w表示磁芯旋转角速度;t为时间。

综合考虑体积、成本以及计算速率等因素,磁传感器 选用 HMC1052 单轴磁传感器,单独测量固定坐标系 Z 轴 方向磁场强度,结合式(3)~(5),磁传感器处 Z 轴方向 磁场强度经过单轴磁传感器测量并放大后的电信号方程 可表示为:

$$U(t) = \Im G \left( \frac{MR^{2}\cos\theta\,\sin\phi}{4\pi} \int_{z_{1}}^{z_{2}^{2}} \int_{0}^{z_{1}} \left[ \gamma - R(\cos(\theta - \theta')) \right] \times \cos(\theta')r^{3}(\gamma, \theta, z; \gamma', \theta', z') \,\mathrm{d}\theta' \mathrm{d}z' - \frac{MR^{2}\sin\theta\,\sin\phi}{4\pi} \int_{z_{1}}^{z_{2}^{2}} \int_{0}^{2\pi} \cos(\theta')\sin(\theta - \theta') \times r^{3}(\gamma, \theta, z; \gamma', \theta', z') \,\mathrm{d}\theta' \mathrm{d}z' + \frac{MR\cos\phi}{4\pi} \int_{z_{1}}^{z_{2}^{2}} \cos(\theta')(z - z') \times r^{3}(\gamma, \theta, z; \gamma', \theta', z') \,\mathrm{d}\theta' \mathrm{d}z' + \right)$$
(6)

其中, 3为磁传感器响应度, *G*为磁传感器处理电路的电压放大倍数。

### 2 恒阈值时间测量概率统计分布

#### 2.1 时间测量概率分布模型

由上述推导, U(t) 是 Z 轴方向磁扫描探测周期信号, 假设ρ(V<sub>n</sub>) 是噪声电压的概率密度分布, 通常由背景和电路噪声组成, 可通过高斯分布表示为:

$$\rho(V_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{V_n^2}{2\sigma^2}\right)$$
(7)

其中, $\sigma$ 是等效均方根噪声电压, $V_n$ 是磁信号处理 电路的噪声电压。 从而,磁扫描探测周期信号和噪声信号叠加而成的 信号概率密度函数为:

$$P(t, V_{th}) = \int_{V_{th}}^{\infty} \rho \left[ V_n + U(t) \right] dV_{sn}$$
(8)

其中, V<sub>th</sub> 是磁扫描周期信号判别阈值。

于是,在 $\Delta t$ 时间间隔内,磁扫描周期信号的探测概率为:

$$p \mid_{t}^{t+\Delta t} = \int_{V_{th}}^{\infty} \rho \left[ V_{n} + f(t + \Delta t - t_{0}) \right] dV_{sn} - \int_{V_{th}}^{\infty} \rho \left[ V_{n} + f(t - t_{0}) \right] dV_{sn}$$
(9)

在阈值判别方式下,磁信号周期扫描探测概率密度 函数可表示为<sup>[8]</sup>:

$$p(t) = \rho \left[ V_{th} - U(t) \right] \cdot U'(t)$$
(10)

把式(6)和(7)代入,可获得磁信号周期扫描探测概 率分布函数具体形式为:

$$p(t) = \frac{\Im G}{\sqrt{2\pi}\sigma} \begin{pmatrix} \frac{MR^2\omega\cos\theta\cos\phi}{4\pi} \int_{z_1}^{z_2} \int_{0}^{2\pi} \left[\gamma - R(\cos(\theta - \theta'))\right] \times \cos(\theta')r^3(\gamma, \theta, z; \gamma', \theta', z')d\theta'dz' - \\ \frac{MR^2\omega\sin\theta\cos\phi}{4\pi} \int_{z_1}^{z_2} \int_{0}^{2\pi} \cos(\theta')\sin(\theta - \theta') \times r^3(\gamma, \theta, z; \gamma', \theta', z')d\theta'dz' - \\ \frac{MR\omega\sin\phi}{4\pi} \int_{z_1}^{z_2} \cos(\theta')(z - z') \times r^3(\gamma, \theta, z; \gamma', \theta', z')d\theta'dz' - \\ \end{pmatrix} \exp\left(-\frac{(V_{th} - U(t))^2}{2\sigma^2}\right)$$

由式(11)可以看出,磁信号扫描探测概率分布函数 和磁扫描周期信号叠加噪声的信号概率密度函数成正 比,同时正比于磁传感器测量信号上升沿的斜率,与旋转 扫描周期、传感器与磁芯相对位置、阈值检测电压等因素 有关,本文探讨上述因素对磁信号扫描探测概率分布的 影响规律。

#### 2.2 扫描周期对测量概率分布的影响

在探测系统动态扫描过程中,旋转扫描周期是一 个重要参量。文献[12]研究了旋转扫描周期和目标捕 获率的关系,本文着眼于研究旋转扫描周期对阈值算法 周期解算概率分布的影响。设置磁芯与传感器静态距离 为8mm,阈值检测电压为0mV,设置旋转扫描转速为变 量,分别取值为6000、7000、8000和9000r/min,在上 述不同转速下,磁信号如图2所示,基于阈值算法的周 期解算概率分布如图3所示,可见,随着扫描转速的增 加,概率分布函数对称性不会受影响,但测量概率分布 半宽会随之减小,且分布峰值随之增加,意味着周期测 量精度随着扫描周期的增加而逐渐提高。造成上述现 象的原因是伴随扫描周期的增加,阈值检测点上升沿 的斜率会逐渐变大,从而提高了阈值检测法的周期测 量精度。



图 2 不同转速磁信号





#### 2.3 磁场强度对测量概率分布的影响

由于本文采用磁传感器测量磁芯旋转产生的交变磁 场来获取周期信号,磁场信号会随着磁芯位置的改变产 生变化,从而影响阈值检测方法判别精度。设置阈值检 测电压为0mV,旋转扫描转速为8000r/min,设置磁芯 与传感器静态距离为变量,分别为6、7、8和9mm,上述 不同距离磁场信号如图4所示,基于阈值算法的周期解 算概率分布如图5所示,可见,随着磁芯与传感器静态相 对距离的增加,磁场信号峰值逐渐降低,概率分布函数对 称性不会受影响,但测量概率分布半宽会随之增大,且分 布峰值随之减小,意味着周期测量精度随着磁芯与传感 器静态相对距离的增加而逐渐降低。造成上述现象的原 因是伴随磁芯与传感器静态相对距离的增加,阈值检测 点上升沿的斜率会逐渐减小,从而降低阈值检测法的周 期测量精度。

#### 2.4 阈值电压对测量概率分布的影响

本文主要研究阈值探测方法的测量精度问题,接下 来考察在不同阈值检测电压下的周期测量概率分布情况。设置旋转扫描转速为8000 r/min,磁芯与传感器静态距离为8mm,设置阈值检测电压为变量,分别为-1.0、





Fig. 4 Magnetic field signal at different distances between the magnetic core and the sensor



Fig. 5 Probability distribution of periodic solution at different distances

-0.5、0、0.5和1.0V,在不同阈值检测电压下,周期解算 概率分布如图6所示,可见,概率密度分布随着阈值检测 电压的提高呈现出不同变化态势,在由-1.0V增加 到0V过程中,分布曲线首先呈现出上升沿缓慢下降沿 陡峭的现象,随着阈值的提升,这种非对称现象逐渐消 除,且分布曲线峰值升高、脉宽减小,在由0V增加 到1.0V过程中,分布曲线逐渐由对称分布转变为上升 沿陡峭下降沿缓慢分布,且随着阈值的提升,这种非对称 现象逐渐加剧,分布曲线峰值降低、脉宽增加。造成上述 现象的原因是伴随阈值检测电压的增加,阈值检测点的 斜率呈现先增大后减小的规律,当阈值检测点位于斜率 极大点处,周期测量精度最高,而在该点两侧将分别呈现 不同的非对称分布特性。

#### 2.5 噪声对测量概率分布的影响

在实际测量过程中,存在多种噪声,在不同测量环境下,噪声会呈现出不同特征<sup>[18-20]</sup>,对测量精度存在较大影



Fig. 6 Probability distribution of periodic solution of voltage detection with different thresholds

响,接下来分析不同噪声环境下周期测量概率分布情况。 设置磁芯与传感器静态距离为8mm,旋转扫描转速 为8000r/min,阈值检测电压为0V,设置等效噪声电压 为变量,分别为0、10、20、30和40mV,在不同等效噪声电 压环境下,基于阈值算法的周期解算概率分布如图7所 示,可见,随着等效噪声电压的增加,概率分布函数对称性 不受影响,但分布半宽会随之增大,且分布峰值随之减小, 意味着周期测量精度随着等效噪声电压的增加而逐渐降 低。造成上述现象的原因是伴随等效噪声电压的增加,信 噪比逐渐减小,从而降低阈值检测法的周期测量精度。



Fig. 7 Probability distribution of periodic solution with different noise

## 3 实验与分析

为了验证理论推导及仿真计算结果的可靠性,搭 建实验平台进行实际测量验证实验,磁信号动态扫描 探测实验系统如图8所示。该实验系统由动态扫描平

应磁芯,跟随电机转轴做周期扫描圆周运动,磁传感器 测量磁芯动态旋转产生的交变磁场信号,经过放大电 路处理后,由阈值时刻解算电路测算旋转扫描周期。 实验流程如下所示。



图 8 磁信号动态扫描探测实验系统 Fig. 8 Magnetic signal dynamic scanning detection experimental system

首先验证旋转扫描周期对阈值算法周期解算概率分 布的影响。通过检测电路距离调整机构将磁芯与传感器 静态正对距离调整为8mm,阈值解算电路电压设置为 0mV,调整转速控制电路参数,将旋转扫描转速分别控制 在6000、7000、8000和9000r/min,在不同转速下每组 测量实验进行200次。不同旋转扫描转速下的实验测量 结果概率密度分布如图9所示。实验测量与理论分析概 率密度分布基本呈现出一致情况,均表现为高斯分布特 征,转速增加会促使分布半宽减小、峰值提高。由于实际 测量实验样本量限制以及实测周期扫描磁信号与理论仿 真信号的特征差异等因素,实际测量实验结果均值低于 理论分析结果均值,实验结果分布较理论结果向左迁移, 随着转速的增加,磁信号周期压缩减小,磁信号检测阈值 点斜率增加,导致迁移趋势逐渐减小。

其次验证磁芯与传感器静态距离对阈值算法周期解 算概率分布的影响。将阈值解算电路电压设置为0mV, 调整转速控制电路将转速控制在8000 r/min,通过检测 电路距离调整机构将磁芯与传感器静态正对距离分别调 整为6、7、8和9mm,在磁芯与传感器不同正对距离下每 组测量实验进行200次。不同磁芯与传感器正对距离下 的实验测量结果概率密度分布如图10所示,为了更加清 晰对比实验与理论分析结果,将不同间距下的概率分布 分段独立表示。实际测量结果与理论分析结果概率发布 基本呈现一致情况,表现为高斯分布,磁芯与传感器静态 距离增加会导致分布半宽增大、峰值降低,由于实际测量



实验样本量限制以及实测周期扫描磁信号与理论仿真信号的特征差异等因素,实际测量实验结果均值低于理论分析结果均值,实验结果分布较理论结果向左迁移,且随着磁芯与传感器静态距离的增加,磁信号周期将会被拉伸扩大,磁信号检测阈值点的斜率会降低,导致迁移趋势逐渐扩大。

接下来实验验证不同阈值检测电压对阈值算法周期 解算概率分布的影响。调整转速控制电路将转速控制在 8 000 r/min,通过检测电路距离调整机构将静态磁芯与 传感器正对距离调整为 8 mm,将阈值解算电路电压分别







设置为-1.0、-0.5、0.5和1.0V,在不同阈值检测电压下 每组测量实验进行 200次。不同阈值检测电压下的实验 测量结果概率密度分布如图 11 所示,可见,实际测量结 果与理论分析结果概率密度发布基本呈现出一致情况, 在由-1.0V增加到-0.5V过程中,分布曲线先呈现出 上升沿缓慢下降沿陡峭现象,随着阈值提升,这种非对称 现象减弱,且分布曲线峰值升高、脉宽减小,在由 0.5 V 增加到 1.0 V 过程中,分布曲线逐渐表现为上升沿陡峭 下降沿缓慢,且随着阈值的提升,这种非对称现象逐渐明 显,分布曲线峰值降低、脉宽增加。由于实际测量实验样 本量限制以及实测周期扫描磁信号与理论仿真信号的特 征差异等因素,实际测量实验结果均值低于理论分析结 果均值,实验结果分布较理论结果向左迁移,且随着阈值 检测电压的增加,阈值检测点的斜率呈现先增大后减小 的规律,导致迁移趋势先减小再扩大。

最后分析验证不同噪声对阈值算法周期解算概率分 布的影响。设置磁芯与传感器静态正对距离为 8 mm,旋 转扫描转速为 8 000 r/min,阈值检测电压为 0 V,设置信 号发生器,在信号输入端分别调整等效噪声电压为 10、 20、30 和 40 mV,在不同等效噪声电压下每组测量实验进 行 200 次。不同等效噪声电压的实验测量结果概率密度 分布分别如图 12 所示,可见,实际测量结果与理论分析 结果概率密度发布基本呈现出一致情况,表现为高斯分 布,随着等效噪声电压的增加,分布函数对称性不受影 响,但分布半宽会随之增大,分布峰值随之减小。由于实



图 11 阈值电压为-1.0、-0.5、0.5 和 1.0 V 时周期 实测概率分布

Fig. 11 Measured probability distribution of the threshold voltage at -1.0, -0.5, 0.5 and 1.0 V cycles



图 12 噪声电压为 10、20、30 和 40 mV 周期实测概率分布 Fig. 12 Measured probability distribution of noise voltage for 10, 20, 30 and 40 mV

际测量实验样本量限制以及实测周期扫描磁信号与理论 仿真信号的特征差异等因素,实际测量实验结果均值低 于理论分析结果均值,实验结果分布较理论结果向左迁 移,且随着等效噪声电压的增加,信噪比逐渐减小,因此 实测周期扫描磁信号和理论值的误差会逐步增大,导致 迁移趋势逐渐扩大。

# 4 结 论

本文建立了光磁复合方位探测周期扫描等效磁荷模 型,理论构建出周期扫描磁信号方程,基于磁信号特征和 恒阈值时间测量方法,推导出周期扫描磁信号时间测量 概率统计分布函数解析式。理论仿真与实际周期解算实 验结果表明,随着扫描转速的增加,概率分布函数对称性 不会受影响,但测量概率分布半宽会随之减小,且分布峰 值随之增加:随着磁芯与传感器静态相对距离的增加,磁 场信号峰值逐渐降低,概率分布函数对称性不会受影响, 但测量概率分布半宽会随之增大,且分布峰值随之减小; 随着阈值检测电压的提高,概率密度分布呈现出不同变 化态势,在由-1.0 V 增加到 0 V 过程中,分布曲线首先 呈现出上升沿缓慢下降沿陡峭的现象,随着阈值的提升, 这种非对称现象逐渐消除,且分布曲线峰值升高、脉宽减 小,在由0V增加到1.0V过程中,分布曲线逐渐由对称 分布转变为上升沿陡峭下降沿缓慢分布,且随着阈值的 提升,这种非对称现象逐渐加剧,分布曲线峰值降低、脉 宽增加;随着等效噪声电压的增加,概率分布函数对称性 不受影响,但分布半宽会随之增大,且分布峰值随之 减小。

#### 参考文献

- [1] 甘霖,张合.光-磁复合方位动态探测概率密度统计 分布[J]. 兵工学报,2018,39(12):2338-2344.
  GAN L, ZHANG H. Statistical probability density distribution of azimuth dynamic detection based on laser and magnetism [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(12):2338-2344.
- [2] 周治国,曹江微,邸顺帆. 3D 激光雷达 SLAM 算法综述[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 13-27.
  ZHOU ZH G, CAO J W, DI SH F. Overview of 3D Lidar SLAM algorithms [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 13-27.
- [3] HUA T, DAI K R, ZHANG X J, et al. Optimal VMDbased signal denoising for laser radar via Hausdorff distance and wavelet transform[J]. IEEE Access, 2019, 7: 167997-168010.
- [4] GARIEPY G, TONOLINI F, HENDERSON R, et al. Detection and tracking of moving objects hidden from

view[J]. Nature Photonics, 2016, 10(1): 23-26.

- [5] 段中兴,杨琪凡,李进,等.用于轻气炮弹速测量的 新型高信噪比激光测速系统[J].电子测量与仪器学 报,2021,35(5):154-160.
  DUAN ZH X, YANG Q F, LI J, et al. New laser projectile velocity-measuring system with high SNR for light-gas gun[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5):154-160.
  - [6] GAN L, ZHANG H, LIU B, et al. Influence of high overload on the collimating lenses of laser ranging systems[J]. Defence Technology, 2020, 16 (2): 354-361.
  - [7] 蔡克荣,余曜,高志林,等.激光引信在防空导弹高效引战配合中的应用研究[J]. 红外与激光工程,2020,49(4):16-21.
    CAI K R, YU Y, GAO ZH L, et al. Research on application of laser fuze for efficient fuze-warhead coordination in the air-defense missile[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 16-21.
  - [8] JIANG H J, LAI J C, YAN W, et al. Theoretical distribution of range data obtained by laser radar and its applications[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 278-284.
  - [9] TAN Y, ZHANG H, ZHA B. Underwater single beam circumferentially scanning detection system using rangegated receiver and adaptive filter[J]. Journal of Modern Optics, 2017: 1-9.
  - [10] 谭亚运,张合,查冰婷.水中单光束扫描激光引信捕获率建模与仿真[J].强激光与粒子束,2015,27(11):73-78.
    TAN Y Y, ZHANG H, ZHA B T. Modeling and simulation of underwater single-beam scanning laser fuze acquisition rate [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(11):73-78.
  - [11] 姜海娇,来建成,王春勇,等.激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J].中国激光,2011,38(5): 1-7.
    JIANG H J, LAI J CH, WANG CH Y, et al. Research on ranging property of laser radar and its range

on ranging property of laser radar and its range accuracy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 1-7.

[12] 陈杉杉,张合,徐孝彬. 脉冲激光周向探测地面目标 捕获建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2):113-123.
CHEN SH SH, ZHANG H, XU X B. Modeling and simulation of acquisition for ground target by pulsed laser circular-viewing detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(2): 113-123.

- [13] MOU Y, WU Z, LI Z, et al. Geometric detection based on one-dimensional laser range profiles of dynamic conical target [J]. Applied Optics, 2014, 53 (35): 8335-8341.
- [14] GRÖNWALL C A, STEINVALL O K, GUSTAFSSON F, et al. Influence of laser radar sensor parameters on rangemeasurement and shape-fitting uncertainties [J]. Optical Engineering, 2007, 46(10): 106201.
- [15] 姚宗辰,张合,张祥金,等. 探测距离对激光定距引 信探测能力影响的分析与评价[J]. 红外与激光工 程,2018,47(3):55-63.

YAO Z CH, ZHANG H, ZHANG X J, et al. Analysis and evaluation of detection distance effect on detection capability of laser fixed-distance fuze [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 55-63.

- [16] GAN L, ZHANG H. Short-range azimuth measurement method based on the adaptive filtering mechanism using laser and magnetism [J]. Applied Optics, 2018, 57(20): 5749-5757.
- [17] 张兴,方亮,李国丽,等.无线内窥镜中圆柱永磁体 建模与仿真[J].系统仿真学报,2007,19(3): 494-496.

ZHANG X, FANG L, LI G L, et al. Modeling and simulation for permanent column in wireless endoscope[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(3): 494-496.

[18] CHANG J, ZHU L, LI H, et al. Noise reduction in Lidar signal using correlation-based EMD combined with soft thresholding and roughness penalty [ J ]. Optics Communications, 2018, 407: 290-295.

- [19] TANG B, DONG S, SONG T. Method for eliminating mode mixing of empirical mode decomposition based on the revised blind source separation [J]. Signal Processing, 2012, 92(1): 248-258.
- [20] TRIPATHY R K, PATERNINA M R A, ARRIETA J G, et al. Automated detection of atrial fibrillation ECG signals using two stage VMD and atrial fibrillation diagnosis index [J]. Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 2017, 17(7): 1740044.

#### 作者简介



甘霖(通信作者),2009 年于南京理工 大学获得学士学位,2014 年于南京理工大学 获得博士学位,现为南京理工大学副教授, 主要研究方向为激光探测制导以及近程方 位测量技术。

E-mail: kg568605@163.com

**Gan Lin** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2009, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2014. He is currently an associate professor at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include laser detection guidance and short-range azimuth measurement technology.