

典型旋翼形状参数微多普勒激光探测计算方法

王云鹏, 胡以华, 雷武虎, 郭力仁

(国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 为实现旋翼的遥感探测分类与识别, 对基于微多普勒效应的扩展旋翼面目标激光回波特征开展研究。采用物理光学面元法构建了运动扩展旋翼的相干激光探测微多普勒回波模型, 分析计算了旋翼激光角度散射特性, 证明远场条件下旋翼各处回波反射率一致。对三种典型形状旋翼的激光探测回波进行了仿真, 通过平滑伪魏格纳维利(SPWV)变换得到了扩展旋翼的时频特征。电磁散射机理证实各频率带的产生与旋翼结构形状相关, 且桨叶数量以及整体平动速度并不影响旋翼形状在时频图中的特征表达。据此提出了旋翼形状参数的激光探测求解方法, 通过仿真验证了展弦比、根梢比以及桨尖后掠角三种参数算法的正确性, 为后续的旋翼探测识别奠定了基础。

关键词: 微多普勒效应; 激光探测; 典型旋翼; 形状参数; 时频分析

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0906003

Algorithm of typical rotor shape parameters by micro-Doppler laser detection

Wang Yunpeng, Hu Yihua, Lei Wuhu, Guo Liren

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to realize the remote sensing detection classification and identification of the rotor, the laser echo feature of extended rotor target based on micro-Doppler effect was studied. The micro-Doppler coherent laser echo model of moving extended rotor was built with the panel method of physical optics. Angular scattering characteristics of laser were analyzed and calculated, which proved that rotor had the same echo reflectivity everywhere under the far field condition. Laser detection echo of three typical rotor shapes was simulated, and the time-frequency features of extended rotor were achieved by Smooth Pseudo Wegener-Villy (SPWV) transform. The electromagnetic scattering mechanism confirms that each frequency band was related to the shape of the rotor, and the number of blades does not affect the expression of features of rotor shape in time-frequency figure as well as the moving velocity. The laser detection calculation methods of rotor shape parameters, including aspect ratio, root-tip ratio and sweep angle of rotor tip, were proposed and proved to be correct through simulation, which laid the foundation for rotor identification.

Key words: micro-Doppler effect; laser detection; typical rotor; shape parameter; time-frequency analysis

收稿日期: 2018-04-07; 修订日期: 2018-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(61271353, 61671454)

作者简介: 王云鹏(1992-), 男, 硕士生, 主要从事激光探测方面的研究。Email: wyp1987303910@163.com

导师简介: 胡以华(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信息处理方面的研究。Email: skl_hyh@163.com

0 引言

目标除本体平动以外某些部件的小幅度运动称为微动。任何运动的飞机、导弹、坦克等目标由于发动机运转或自身机械结构的影响，其部件会产生振动或转动，这些微动形式是目标的固有属性难以被消除隐藏。微多普勒特征^[1]包含了特有的微动信息，反映了目标的运动、结构特点，可以利用其对目标进行探测识别。

旋翼是直升机、旋翼飞机等飞行器重要的升力和推力部件，而根据机型、气动性能要求的不同，旋翼形状及其尺寸参数也具有相当的差异，这为空中飞行目标的探测识别提供了依据。2003 年，俄勒冈大学和洛克希德马丁公司使用 X 波段雷达测得 Bo-105 直升机旋翼回波，采取 STFT 的方法得到旋翼时频特征^[2]；2006 年 V.C.Chen 教授建立了微多普勒转动模型，给出了线目标旋翼的微多普勒回波解析式，与实验结果基本吻合^[3]。之后国外主要围绕提取旋翼参数、优化算法以及实际应用展开研究。2011 年，美国维拉诺瓦大学利用最大似然法估计了直升机旋翼参数和桨叶数量并推导相应的克拉美罗界^[4]；2013 年，英国斯特拉斯克莱德大学研究利用全球导航卫星系统作为辐照源与地基无源雷达配合，接收目标前向散射电磁波进而获得直升机旋翼微多普勒特征^[5]。国内起步较晚，现处于基础研究阶段。南京航空航天大学应用一种将物理光学、等效电磁流和准静态法相结合的方法研究了桨叶厚度、桨尖下反角对回波的影响，但并未提出量化的计算方法^[6]。国防科技大学的陈鹏综合分析了桨叶数量、转速等的回波特征^[7]，所得桨叶形状不影响微多普勒回波信号的结论有一定局限性。因此就目前公开发表的文献来看，对旋翼的研究都以线目标模型为基础，实验使用微波雷达探测，受制于旋翼大展弦比参数以及由波长较长引起的精度不足，具有一定平面形状的旋翼其微多普勒特征与线目标模型吻合较好。但从电磁散射理论来看，旋翼形状对电磁波具有相当的调制作用，即旋翼扩展目标模型才更符合理论分析结果。考虑到激光雷达诸多优良的特性^[8]，尤其在波长上相对于微波雷达的明显优势，采用激光相干探测的体制，建立典型形状的旋翼扩展目标回波模型，对精确研究

旋翼微多普勒特征是切实可行的方法。

基于以上考虑，文中重点对旋翼形状区别引起的微多普勒特征差异展开研究。利用电磁散射理论中的物理光学法建立扩展旋翼激光微多普勒回波模型，仿真三种形状旋翼激光相干探测回波并进行时频分析，研究旋翼微多普勒特征差异形成机理，并根据时频特征提出典型旋翼形状参数的量化求解方法。

1 典型形状转动旋翼微多普勒激光回波模型

此节利用物理光学法建立面目标激光微多普勒回波模型，选取典型形状的旋翼进行面元剖分建模，从而对目标轮廓予以精确地描述。考虑到旋翼目标的扩展性以及激光雷达相对位置变化，计算了激光回波的角度散射特性。

1.1 扩展旋翼激光角度散射特性

激光雷达照射旋翼表面，光斑覆盖全部目标。传统强散射点理论的转动旋翼建模，将目标反射率作为常数处理。而考虑到文中建立的面旋翼是扩展目标，各散射面元位置差异以及旋转导致同一面元位置移动都会造成目标各部相对激光雷达散射角度变化，进而影响反射率，因此取值需要进行理论计算。一般描述目标表面的光散射特性使用双向散射分布函数^[9]，但通常情况下其函数表达相当复杂，难以形成解析形式。因此文中采用几何方法，研究旋翼表面的角度散射特性。

激光雷达与旋翼向相对方位关系如图 1 所示。假设旋翼为悬停状态，旋翼所处的 XOY 平面平行于激光雷达坐标系 $X'O'Y'$ 平面，旋转中心位于 $X'O'Z'$ 平面内，激光雷达光束仰角为 β 。假设旋翼无宽度，

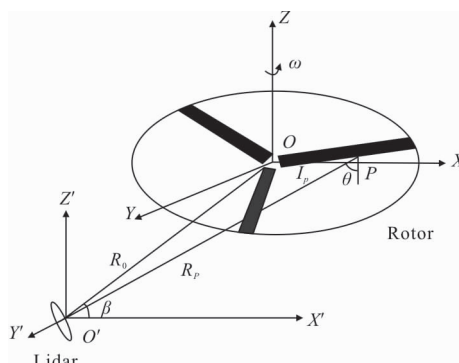


图 1 激光雷达与旋翼位置关系

Fig.1 Positional relationship between lidar and rotor

则其表面任意一点 P 相对激光雷达的距离可以表示为:

$$R_p(t) = \sqrt{(R_0)^2 + l_p^2 + 2l_p R_0 \cos\beta \cos(\omega t + \varphi_0)} \quad (1)$$

式中: R_0 为激光雷达与旋翼旋转中心的距离; l_p 为点 P 到旋翼中心的距离; ω 为旋转角速度; φ_0 为旋翼初相位。当旋翼具有一定横向尺寸时,修正公式(1)为:

$$R_p(t) = \sqrt{(R_0)^2 + l_p(x,y)^2 + 2l_p(x,y)R_0 \cos\beta \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi(x,y))} \quad (2)$$

其中, $l_p(x,y) = \sqrt{x^2 + y^2}$; $\varphi(x,y) = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$ 。

激光雷达视线与任意时刻点 P 垂直方向夹角为:

$$\theta = \arccos \frac{R_0 \sin\beta}{R_p(t)} = \frac{\frac{R_0 \sin\beta}{\sqrt{(R_0)^2 + l_p(x,y)^2 + 2l_p(x,y)R_0 \cos\beta \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi(x,y))}}}{\sin\beta} \sqrt{1 + \left(\frac{l_p(x,y)}{R_0}\right)^2 + 2\frac{l_p(x,y)}{R_0} \cos\beta \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi(x,y))} \quad (3)$$

该角度即为旋翼 P 处散射光激光雷达接收方向俯仰角。

假设旋翼设旋翼激光反射率分布函数 $\rho(\theta)$, 代入公式(3)即能够确定旋翼任意位置相对于激光雷达的反射率。分析公式(3)可知,旋翼上某处反射率是时间的周期性变量,变化速率与旋翼转速相关。当反射率分布函数一定时,反射率的大小变化区间则由旋翼的尺度范围决定。因此当考虑反射率差异导致的整个回波强度变化时,计算结果将更为精确,同时需要的计算量则更加巨大。而在实际探测中往往 $R_0 \gg l_p(x,y)$, 因此可以将公式(3)进行化简得到 $\theta = \sin\beta$ 。即当满足激光探测的远场条件时,旋翼各处反射率近似为一常数 $\rho(\sin\beta)$, 仅与目标相对激光雷达俯仰角以及目标表面材料性质有关。

从信号处理的角度考虑,时频分析可以得到回波信号瞬时时间、频率变化关系,适于分析旋翼的微多普勒特征。采用平滑伪魏格纳维利(SPWV)变换对激光回波进行处理,其对信号较小的强度变化并不敏感,不影响时频图中参数的提取。因此在后文的仿真分析中,认为当满足探测距离远大于旋翼尺度的

条件时,旋翼各处反射率一致。

1.2 扩展旋翼运动目标激光微多普勒回波模型

如图 1 旋翼主体以速度 v 沿 X 方向平动,以单旋翼为例,旋翼 P 点激光回波可表示为:

$$S_p(t) = \rho \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda_c} (R_0 + vt \cos\beta) \right\} \exp \left\{ j \left[4\pi f_c t + \frac{4\pi}{\lambda_c} \cos(\omega t + \varphi_0) \right] \right\} \quad (4)$$

式中: ρ 为旋翼反射率; λ_c 为激光波长(f_c 为频率)。系统采用激光相干探测体制,信号光与本振光混频后经探测器基频被滤除,按照上一节理论将旋翼各处反射率归一化处理,得到简化的信号形式为:

$$S_p(t) = \exp \left\{ j \frac{4\pi \cos\beta}{\lambda_c} [l_p \cos(\omega t + \varphi_0) + vt] \right\} \quad (5)$$

由公式(5)可知 P 点微多普勒频率为:

$$f_{M-D} = \frac{2v \cos\beta}{\lambda_c} + \frac{4\pi r l_p \cos\beta}{\lambda_c} \sin(2\pi r t + \varphi_0) \quad (6)$$

式中: $\omega = 2\pi r$, r 为旋翼转速。可以看出,旋转叶片点散射模型的微多普勒频率主要取决于旋翼散射点位置、转速、激光雷达俯仰角以及旋翼整体沿激光视线方向上的速度。

为获得整个旋翼回波,需对其进行积分运算,对于具有复杂形状的旋翼来说难度较大。因此文中借助物理光学法中对目标进行面元剖分的方法,认为旋翼整体回波由单个面元的散射光叠加而成。如图 2 所示,将旋翼简化为 $l \times d$ 的矩形面目标,转轴为直角坐标系 XOY 原点 O 处,旋翼绕轴顺时针旋转。将其划分为若干边长为 $a(a = \lambda_c/2)$ 的正方形面元,设任意面元中 P_{xy} 心点坐标为 (x, y) ,与转轴距离 $l(x, y)$,和旋翼轴线夹角为 $\varphi(x, y)$,面目标的回波信号即为所

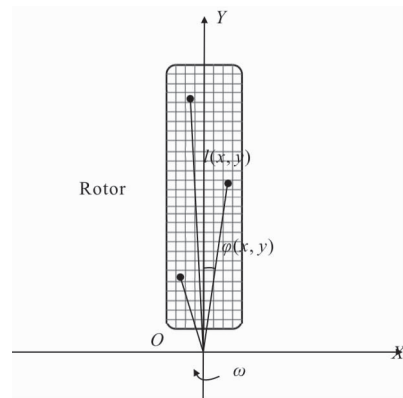


图 2 旋翼散射面元剖分

Fig.2 Scattering surface element subdivision of rotor

有散射点回波之和。为突出体现目标微动信息,通过平动速度补偿,可表示整体回波信号为:

$$S_p(t) = \sum_{x=-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \sum_{y=0}^l S_{xy}(t) = \sum_{x=-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \sum_{y=0}^l \exp \left\{ j \frac{4\pi l(x,y)}{\lambda_c} \cos\beta \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi(x,y)) \right\} \quad (7)$$

对于矩形来说, x, y 两者相互独立,可分步求和。若旋翼不为矩形,需在给出 x, y 定义域的条件下,求得旋翼的形状函数 $A(x, y)$,代入公式(7)得到旋翼整体回波。

对于 N 个叶片的旋翼,其具有 N 个不同的初始旋转角: $\varphi_k = \varphi_0 + 2\pi k/N$ 。因此 N 叶片旋翼回波为:

$$S_s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{x=-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \sum_{y=0}^l S_{xy}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{x=-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \sum_{y=0}^l \exp \left\{ j \frac{4\pi l(x,y)}{\lambda_c} \cos\beta \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi(x,y) + 2\pi k/N) \right\} \quad (8)$$

式中: $l(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$ 。

1.3 扩展旋翼典型形状几何模型

旋翼外形是影响其气动性能的重要因素,其中桨叶的平面形状则决定了飞行器的拉力和悬停效率。因此,对于具有旋翼结构的飞行器而言,遂行任务的不同使得旋翼形状产生差异,这就为旋翼飞行器的探测识别提供了依据。

根据现有旋翼的气动外形,建立三种典型平面形状的旋翼模型如图 3 所示。分别为矩形旋翼、梯形旋翼和桨尖后掠形旋翼。在旋翼的空气动力学中,描述三种平面结构的旋翼通常使用展弦比、根梢比以及桨尖后掠角三个参数^[10]。

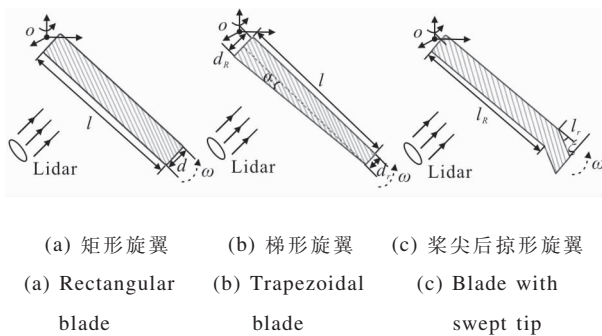


图 3 典型形状旋翼

Fig.3 Typical rotor shapes

展弦比的定义式为: $\mu = l/d$, 即矩形旋翼长度与几何弦长的比值。其大小决定了飞机诱导阻力值,与拉力相关。根梢比的定义式为: $\eta = d_r/d_t$, 即叶根宽度与叶尖宽度之比,表征了桨叶弦长变化情况,进而决定旋翼实度。桨尖后掠角 ξ 定义为旋翼末端向后缘偏折的角度。在旋翼转动过程中桨尖后掠能够减弱空气压缩性,推迟激波的发生。

上述参数是典型平面形状旋翼的特征参量,可以作为对旋翼进行分类识别的依据。因此文中后续将针对三特征参数提取与计算展开研究。

2 典型形状旋翼微多普勒激光回波仿真、机理分析和特征参数计算方法

此节设计了目标微多普勒激光探测实验系统,对前文建立的面目标旋翼微多普勒激光回波模型以及三种平面形状的旋翼几何模型进行仿真,利用时频分析方法对回波进行处理,借助电磁散射理论对时频特征形成机理展开研究,并给出典型形状旋翼的特征参量探测求解方法。

电磁散射理论中的物理光学法是一种高频近似的方法,认为当电磁波长远小于目标尺寸时,目标散射场是所有面元散射波的矢量和。因此在利用其眼面模型即面元法进行回波仿真时,需对目标进行面元划分。一般认为面元尺寸小于波长尺度的十分之一即可满足要求。设置仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数值

Tab.1 Parameter values of simulation

Parameters	R_0/m	l/mm	$\omega/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	β/rad	$\lambda_c/\mu\text{m}$	f_s/M	$v/m\cdot\text{s}^{-1}$
Value	100	100	$2\pi \times 4$	$\pi/12$	1.55	15	1

对信号做时频分析处理,采样率需达到最高微多普勒频率的三倍^[11],当旋翼径向速度为 1 m/s 时 $f_{\text{MAX}} = 4.42 \text{ MHz}$, $f_s = 15 \text{ MHz}$ 满足探测需求。

2.1 目标激光微动探测实验系统

旋转目标相干激光探测系统原理如图 4 所示,光纤激光器输出激光经过光纤分束器(Beam splitter)分为激光强度为 90% 和 10% 的两束激光。其中光强为 90% 的信号光经过光纤准直镜,照射到被

测目标上；光强为 10% 的本振光与望远镜收集的目标散射光一同进入 2×2 光纤耦合器，光纤耦合器输出连接至平衡探测器。光信号经过相干探测器后转变为电信号，连接至 AD 采集卡进行数据采集，最后进行数据分析。

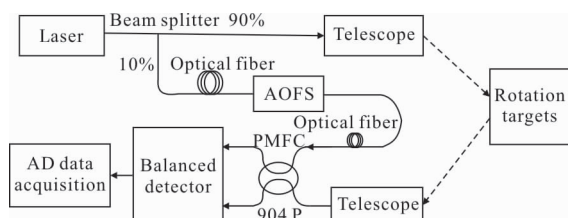


图 4 实验系统框图

Fig.4 Schematic of experimental system

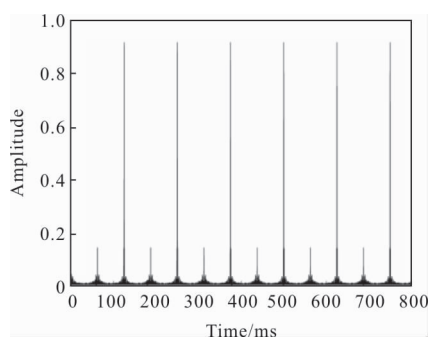
2.2 矩形旋翼

2.2.1 仿真与机理分析

根据公式(6)可知微多普勒峰值频率与旋翼尺度相关。设置矩形旋翼展长 $l=100\text{ mm}$ ，弦长 $d=20\text{ mm}$ 。将旋翼剖分成若干尺度为 $a=0.15\text{ }\mu\text{m}$ 的正方形面元，仿真探测旋翼的激光回波。

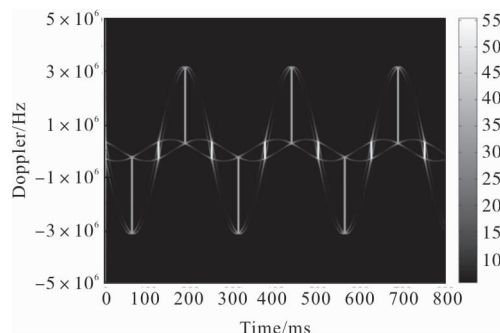
图 5 为矩形单旋翼悬停状态下激光回波的时域图和时频图。对图 5(a)中的回波强度进行归一化处理，可以看到当旋翼以 4 r/s 速度旋转时，在 250 ms 的一个周期内出现两次幅度较强的回波“闪烁”和两次幅度较弱的回波“闪烁”，等间隔交错分布且峰值差异明显。其中较高幅值出现的位置与线目标旋翼积分回波模型表达式中 sinc 峰值时刻一致^[12]。

通过时频变换，能够更直观地展现旋翼特征。图 5(b)是将激光回波仿真信号进行 SPWVD 后所得时频图。时频“闪烁”清晰可见，且闪烁位置与时域信号峰值处相对应。根据电磁场理论，复杂目标的电磁



(a) 时域图

(a) Time domain



(b) 时频图

(b) Time-frequency domain

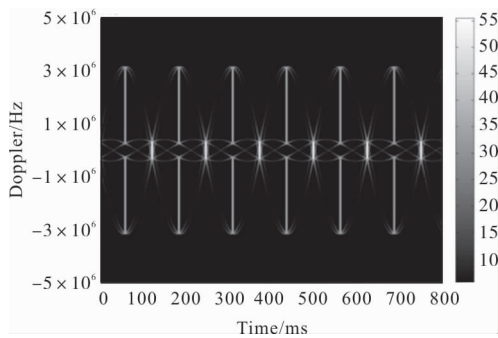
图 5 悬停矩形单旋翼激光回波特征

Fig.5 Feature of laser echo of hovering rectangular single-blade rotor

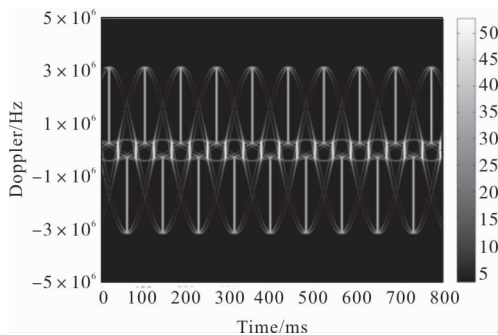
散射主要来自局部效应的散射中心，从几何观点来看是目标一些曲率不连续处与表面不连续处^[13]。对于旋翼来说包括镜面散射中心、边缘散射中心以及尖顶散射中心。当旋翼展向垂直激光视线方向时发生镜面散射，但旋翼相对雷达具有一定俯仰角，所以并非严格的镜面散射最强，而是边缘散射占优。此刻旋翼展向任意一点微多普勒频率由公式(6)决定，且旋翼边缘各处对回波均有贡献，为矢量叠加的结果。而相邻散射点产生的微多普勒频率受横向分辨率约束无法分辨^[14]，最终形成图 5(b)中峰值较高的一条频率带，文中定义为主频带，其峰值频率 f_{max} 反映旋翼展长。当旋翼靠近激光雷达旋转时主频带位于零频以上，反之则以下。1.2 节所建立旋翼模型为二维扩展目标，所以旋转 90°旋翼弦向垂直激光视线时，同样形成一条频率带，其峰峰值 f_{ppdmax} 反映旋翼弦长所引起的微多普勒频移。但由于微多普勒频率与长度成正相关，而旋翼弦向尺寸较小，因此形成频率带的峰值也较低，定义其为次频带。此刻旋翼相对于激光视线对称，所以次频率带相对零频对称分布。

旋翼非闪烁时刻，激光回波的主要来源转化为旋翼的尖顶散射^[15]，而旋翼尖端散射截面变小，导致回波强度急剧下降。根据公式(6)微多普勒点目标模型，其时频特征为正弦形式，且幅度、相位与旋翼尖角位置有关。因此图中出现四条正弦包络，分别对应矩形旋翼的两叶尖顶角以及两叶根底角的强散射中心，在大部分方位角范围均可以起作用，能够表示旋翼旋转过程的时频分布特征。

桨叶旋翼悬停状态时频特征如图 6 所示。在双旋翼回波时频图 6(a)中,主、次频带关于零频带对称分布;在三旋翼回波时频图 6(b)中,频率带则类似于单旋翼时频特征交错分布,但同一正弦包络内则出现了三组正负频率带。由公式(8)可知,旋翼叶片数量不同,每个叶片的初始旋转相位也不同。与单旋翼相比,具有 N 个叶片的旋翼旋转初始相位差为 $2\pi k/N, k=1,2,\dots,N$ 。由此可见,多旋翼回波时频图本质上是由单旋翼时频特征按照桨叶相位差所对应的旋转时间差平移叠加而成。



(a) 双旋翼
(a) Double-blade rotor



(b) 三旋翼
(b) Three-blade rotor

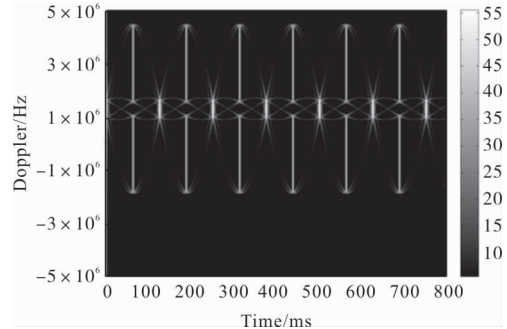
图 6 悬停矩形多旋翼激光回波时频特征

Fig.6 Time-frequency feature of laser echo of hovering rectangular multi-blade rotor

多桨叶旋翼平动状态时频特征如图 7 所示。旋翼以 1 m/s 的速度沿 X 轴负方向平动。根据多普勒原理,运动目标相对探测视线方向的速度将导致接收电磁波频率的改变。激光雷达俯仰角为 $\pi/12$,因此理论回波将产生 1.246 MHz 的频移。通过提取参数对比图 6 可以发现,旋翼微多普勒特征并未发生变化,而是仅向正频方向移动了约 1.25 MHz,与理

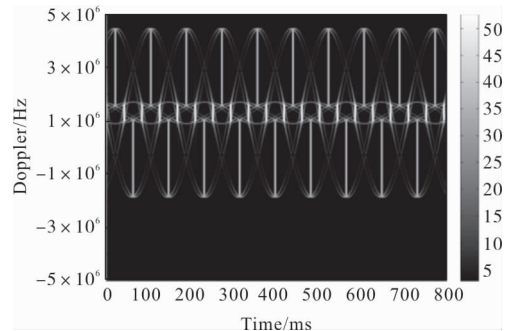
论计算结果吻合。因此可将旋翼整体运动推广到空间方向,当旋翼被激光雷达照射时,旋翼做 Z 方向爬升以及 X 方向平动相结合的复杂运动,其多普勒频移仍由激光视线方向速率引起。

根据以上的分析可知,旋翼数量与运动速度并不影响旋翼形状在时频图中的特征表达。因此为突出形状引起的时频特征,后文重点以单旋翼为例研究不同形状旋翼参数的探测计算方法。



(a) 双旋翼

(a) Double-blade rotor



(b) 三旋翼

(b) Three-blade rotor

图 7 平动矩形多旋翼激光回波时频特征

Fig.7 Time-frequency feature of laser echo of moving rectangular multi-blade rotor

2.2.2 旋翼展弦比探测计算方法

基于传统线目标模型的旋翼激光回波通过时频变换能够得到桨叶长度信息,特征较为单一。根据文中模型仿真结果分析,次频带峰峰值体现了矩形旋翼弦长引起的微多普勒频移,因此可以通过计算弦长得旋翼展弦比。以悬停单旋翼为例,讨论展弦比的计算方法。参考公式(6)将旋翼长度计算公式推广到弦长计算中: $f_{ppdmax} = \frac{4\pi r d}{\lambda_c} \cos\beta$ 。由此可得弦长计算公式:

$$d = \frac{f_{ppdmax} \lambda_c}{4\pi r \cos \beta} \quad (9)$$

根据旋翼展弦比的定义将公式(6)、(9)代入化简可得:

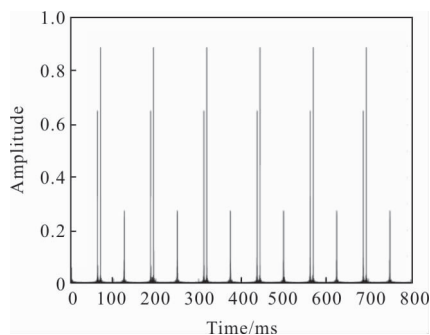
$$\mu = \frac{f_{lmax}}{f_{ppdmax}} \quad (10)$$

由公式(10)可见,通过微多普勒激光回波时频特征计算旋翼展弦比,仅需提取时频变换后主、次频带的峰值频率。而展弦比的计算精度则取决于时频分析以及参数提取的算法。时频图中主频率带峰值频率约为 3.16 MHz,次频率带峰峰值约为 0.63 MHz,因此旋翼展弦比计算得 5.02,与仿真设定 $\mu=5$ 一致。

2.3 梯形旋翼

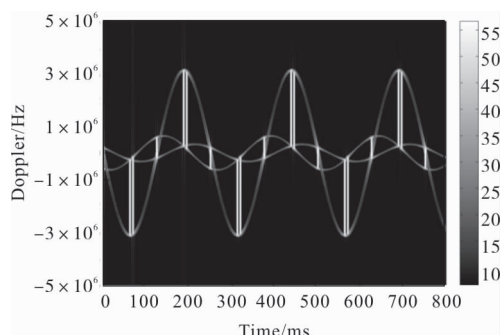
2.3.1 仿真与机理分析

旋翼几何坐标关系如图 3(b)所示。桨叶形状设置为直角梯形,旋翼前缘与后缘夹角 $\alpha=\pi/18$,叶尖弦长 $d_T=9$ mm,叶根弦长 $d_R=25$ mm。激光回波信号时频分布如图 8(b)所示。对照矩形旋翼时频特征可以发现,主频率带分裂为两条具有一定间隔的频率带。根据 2.2.1 节中的电磁散射原理,在第一个旋转周期约的时刻旋翼后缘垂直激光视线,后缘的边缘散射远强于其他部分的散射强度,因此旋翼的时频分布特征即为旋翼后缘产生的时频“闪烁”,定义为后频带。当旋翼转过 α 角度,旋翼前缘垂直激光视线,对应时频图约 67 ms 处的时频“闪烁”,定义为前频带。频带峰值分别由前缘和后缘尺度的最大微多普勒频移引起。当旋翼弦向垂直于激光视线,次频率带则由叶尖、叶根弦长边缘强散射产生,各散射点转动对频率带形成均有贡献,其峰峰值对应叶根弦长的最大值。



(a) 时域图

(a) Time domain



(b) 时频图

(b) Time-frequency domain

图 8 悬停梯形单旋翼激光回波特征

Fig.8 Feature of laser echo of hovering trapezoidal single-blade rotor

2.3.2 旋翼根梢比探测计算方法

根据旋翼根梢比的定义,需根据次率带得到叶根弦长与叶尖弦长。但旋转过程中两者同时垂直于激光视线,因此频率带在同一时刻产生了混叠。次频带的峰峰值仅能显示长度相对较大的叶根弦长特征,并不能直接确定叶尖弦长。此节则根据时频图中其他特征信息研究叶尖弦长的计算方法,进而求得旋翼根梢比。

时频图中可以观察到同一峰值包络内的前、后频带具有较小的时间间隔 Δt ,这是旋翼转动过程中前缘、后缘分别垂直激光视线的两个时刻。在根据时频闪烁次数确定旋翼转速的前提下,可得旋翼转过的角度为: $\alpha=r\Delta t$ 。该角度也是旋翼前缘与后缘的夹角。根据公式(6)求解理论旋翼长度为: $l = \frac{f_{lmax} \lambda_c}{4\pi r \cos \beta}$ 。 f_{lmax} 为前频带峰值,近似表示旋翼展长引起的微多普勒频移。叶根弦长根据弦长公式(9)可得: $d_R = \frac{f_{ppdmax} \lambda_c}{4\pi r \cos \beta}$ 。根据图 3(b)的几何关系,能够确定叶尖弦长。代入根梢比定义式可求得:

$$\eta = \frac{d_R}{d_T} = \frac{f_{ppdmax}}{f_{ppdmax} - f_{lmax} \tan \alpha} \quad (11)$$

公式(11)即为旋翼根梢比微多普勒探测计算公式。提取仿真图中前频带峰值频率 $f_{lmax}=3.15$ MHz,次频带峰峰值 $f_{ppdmax}=0.79$ MHz,旋翼前、后缘夹角 $\alpha=0.028$ rad。代入公式(11)求得旋翼根梢比 $\eta=3.42$,与仿真设置参数 2.83 有较大误差。因此需对公式进行修正。由于旋翼叶根与旋转中心以叶毂相连

接,叶毂散射截面较小,因此不对前频带产生贡献。从时频图上来看前频带的最低频率并非零频,因此长度公式应修正为: $l=\frac{(f_{i\max}-f_{i\min})\lambda_c}{4\pi r\cos\beta}$ 。根梢比公式变为:

$$\eta=\frac{d_R}{d_T}=\frac{f_{ppd\max}}{f_{ppd\max}-(f_{i\max}-f_{i\min})\tan\alpha} \quad (12)$$

提取前频带末端频率 $f_{i\min}=0.26$ MHz,重新计算根梢比 $\eta=2.84$,与设置参数吻合较好。

2.4 桨尖后掠形旋翼

2.4.1 仿真与机理分析

桨尖后掠形旋翼如图 3(c)所示。设置旋翼从 0.85 l 处开始后掠,后掠角为 30°。仿真结果如图 9 所示。时频图中主、次频带与矩形旋翼时频特征相似,而主频带峰值一侧出现了新的频率带,定义其为后掠频带,由旋翼后掠部分垂直激光视线时强散射形成。主频带峰值不再表示旋翼展长,而显示旋翼后掠处到旋转中心的距离。主频带与后掠频带垂直于时间轴,旋翼在两者时间间隔内转过的角度即为桨尖后掠角。

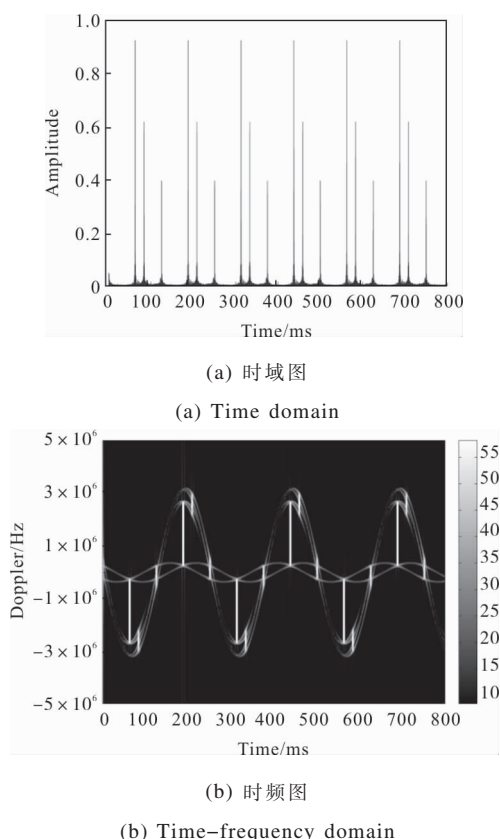


图 9 悬停桨尖后掠单旋翼激光回波特征

Fig.9 Feature of laser echo of hovering single-blade rotor with swept tip

2.4.2 旋翼桨尖后掠角探测计算方法

由机理分析可知,时频图中主频带与后掠频带出现位置对应旋翼主体和桨尖后掠处分别垂直激光视线的时刻,因此旋翼在此时间间隔 Δt 内转过的角度为:

$$\xi=\frac{2\pi\Delta t}{T} \quad (13)$$

亦即旋翼后掠角。提取仿真图中 $\Delta t=21.1$ ms,旋翼旋转周期 $T=251.2$ ms,根据公式(13)解得 $\xi=0.5275$ rad=30.2°,与设置参数 30°吻合较好。从时频图来看,主频带峰值约为 2.66 MHz,根据公式(7)解得旋翼后掠处尺度为 8.5 mm,而设置旋翼长度参数为 10 mm,可见旋翼后掠区从翼展的 0.85 处起始,到旋翼末端结束,验证了机理分析和计算方法的准确性。

3 结论

激光雷达以其波长优势,令目标微多普勒探测时频分辨率显著提升,使得旋翼形状的非成像探测成为可能。文中利用物理光学面元法建立了多旋翼二维扩展目标的激光微多普勒回波模型,并通过理论计算证明远场条件下旋翼各处角度反射特性一致。利用 SPWVD 得到并定义不同旋翼形状的时频特征,量化了旋翼形状参数表征方法。

旋翼二维扩展面目标模型可有效模拟不同形状旋翼的激光微多普勒回波,根据电磁散射机理分析还可以得到如下结论:

(1) 矩形旋翼展长的时频特征体现为主频带的峰值频率,其各面元散射点转动引起的微多普勒频率对主频带均有贡献。次频带由旋翼弦向垂直激光视线时刻边缘强散射形成,其峰峰值由弦长尺度决定。通过仿真数据验证,文中给出的探测方法能够有效地计算矩形旋翼展弦比。

(2) 梯形旋翼时频图中前、后频带分别由前缘、后缘微多普勒频移形成。叶根弦长与叶尖弦长所产生频率带发生混叠,仅能直接通过弦长公式求得叶根弦长。文中给出叶尖弦长计算方法可以确定旋翼根梢比,公式计算结果与仿真设置参数吻合较好。

(3) 桨尖后掠形旋翼后掠处微多普勒频移在时

频图中显示为主频带一侧的后掠频带。文中提出的计算方法证明,旋翼在主频带与后掠频带时间差内转过的角度即为桨尖后掠角。

综上,二维扩展旋翼激光微多普勒模型能够显示和提取不同形状桨叶的时频特征,并可有效利用文中提出的方法计算典型形状参数,为旋翼目标分类识别奠定基础。但由于旋翼目标散射截面小,对系统发射功率以及回波接收耦合器件要求较高,下一步工作应当着力于优化实验系统完成模型算法的实验验证。

参考文献:

- [1] Chen V C. Micro-Doppler effect of micromotion dynamics: a review [C]//Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering, 2003, 5102: 240-249.
- [2] Marple S L. Large dynamic range time-frequency signal analysis with application to helicopter Doppler radar data [C]//Signal Processing and ITS Applications, Sixth International, Symposium on. IEEE Xplore, 2001: 260-263.
- [3] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [4] Setlur P, Ahmad F, Amin M. Helicopter radar return analysis: Estimation and blade number selection [J]. *Signal Processing*, 2011, 91(6): 1409-1424.
- [5] Clemente C, Soraghan J J. GNSS-based passive bistatic radar for micro-doppler analysis of helicopter rotor blades [J]. *Aerospace & Electronic Systems IEEE Transactions on*, 2014, 50(1): 491-500.
- [6] Jiang Xiangwen, Zhao Qijun, Meng Chen, et al. Effect of helicopter roter blade shape on its radar signal characteristics [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(11): 3123-3136. (in Chinese)
蒋相闻, 招启军, 孟晨, 等. 直升机旋翼桨叶外形对雷达特征信号的影响[J]. *航空学报*, 2014, 35(11): 3123-3136.
- [7] Chen Peng, Hao Shiqi, Zhao Nanxiang, et al. Micro-Doppler analysis of helicopter's rotor blades [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3259-3264. (in Chinese)
陈鹏, 郝士琦, 赵楠翔, 等. 直升机旋翼微多普勒特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3259-3264.
- [8] Dong Jing, Chen Rui, Li Xiaolong, et al. Lidar coherent detection and feature ettraction of moving target based on micro-Doppler effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(10): 199-202. (in Chinese)
董晶, 陈蕊, 李小龙, 等. 运动目标微多普勒效应的激光雷达相干探测及特征提取 [J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 199-202.
- [9] Zhang Zhihu, Li Tie, Yang Xiaojun. The mathematical model of the target transient response of laser scattering [J]. *Journal of Detection & Control*, 2007, 29 (5): 63-66. (in Chinese)
张志虎, 李铁, 杨小军. 脉冲激光照射下目标散射特性研究[J]. *探测与控制学报*, 2007, 29(5): 63-66.
- [10] Seddon J. Basic Helicopter Aerodynamics [M]. UK: Wiley John & Sons, 2011: 74-78.
- [11] Xiang Daopu, Zhou Dongming, He Jianguo. Application of MLFMA in helicopter Doppler echo simulation [J]. *The Chinese Journal of Radio Science*, 2010, 25 (6): 1193-1198.
向道朴, 周东明, 何建国. MLFMA 用于直升机多普勒回波信号仿真[J]. *电波科学学报*, 2010, 25(6): 1193-1198.
- [12] Baczyk M K, Samczynski P, Kulpa K, et al. Micro-Doppler signatures of helicopters in multistatic passive radars [J]. *Iet Radar Sonar Navigation*, 2015, 9 (9): 1276-1283.
- [13] 张麟兮, 李南京, 胡楚锋, 等. 雷达目标散射特性测试与成像诊断[M]. 北京: 中国航空出版社, 2009: 2-4.
- [14] Wang Tong, Tong Chuangming, Li Ximin, et al. Research on extended micro-motion target echo simulation and characteristic extraction[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(21): 148-156. (in Chinese)
王童, 童创明, 李西敏, 等. 扩展性微动目标回波模拟与特征参数提取研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(21): 148-156.
- [15] Chen Yongbin, Li Shaodong, Yang Jun, et al. Rotor blades echo modeling and mechanism analysis of flashes phenomena [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65 (13): 281-291. (in Chinese)
陈永彬, 李少东, 杨军, 等. 旋翼叶片回波建模与闪烁现象机理分析[J]. *物理学报*, 2016, 65(13): 281-291.