

doi: 10.3788/gzxb20174607.0712003

基于微多普勒效应的旋翼弦长激光探测方法研究

王云鹏, 胡以华, 郭力仁, 徐世龙

(解放军电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘 要:为实现基于微多普勒效应的旋翼目标激光探测与识别,研究了面目标旋翼对激光回波的调制作用.利用物理光学法中面元散射回波叠加原理,构建了矩形面旋翼的微多普勒激光回波模型.通过仿真,利用时频分析方法提取了异于线目标模型的特征.机理分析证实该特征反映弦长即旋翼横向尺寸信息,据此提出了相干探测激光回波的矩形旋翼弦长计算方法.不同展弦比旋翼的回波仿真结果与理论公式吻合较好,验证了该方法的有效性.误差分析表明,与进行单一窗长条件下的短时傅里叶变换相比,利用改变窗长的方法分别提取时间、频率信息可有效减小弦长计算误差至 1.58%.该模型可实现对旋翼飞行器弦长尺寸的计算,为进一步的旋翼形状探测识别提供了依据.

关键词:微多普勒效应;激光探测;时频分析;矩形旋翼;弦长估计

中图分类号:TN95

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)07-0712003-10

Research on Laser Detection Method of Rotor Chord Based on Micro-Doppler Effect

WANG Yun-peng, HU Yi-hua, GUO Li-ren, XU Shi-long

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to detect and recognize rotors based on laser micro-doppler effect, the modulation of laser echo by rotating area rotor is studied. Micro-doppler echo model of rectangular area rotor is built using the physical optics method of scattering echo superposition. Simulation of laser echo based on this model is completed and the micro-doppler feature different from line target rotor is extracted using time-frequency analysis method. Mechanism analysis confirms that the feature contains lateral size information of rotor. This paper proposes a method to calculate the chord of rectangular rotor through laser echo and verifies this method to be effective through rotor echo simulation of various aspect ratio. Error analysis shows that using the method of changing the window size of short-time Fourier transform (STFT) to extract time and frequency information respectively can reduce the chord length calculation error to 1.58% compared to single size. This model can realize the calculation of aircraft rotor chord size, providing an important reference for the research of rotor identification.

Key words: Micro-doppler effect; Laser detection; Time-frequency analysis; Rectangular rotor; Chord estimation

OCIS Codes: 120.1880; 280.3640; 040.1880

0 引言

旋翼是航空飞行器重要的升力、推力部件,直升机、涡轮螺旋桨飞机、涵道风扇式无人机都具有桨叶结构.桨叶根据性能要求的不同,其外形具有明显差异,这为空中飞行目标分类识别提供了依据.微多普勒效应^[1]可以反映旋转桨叶的微动特征以及结构特征,采用激光相干探测的方式,能够获得其高准确度的时频特

基金项目:国家自然科学基金(No. 61271353)资助

第一作者:王云鹏(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光探测. Email: wyp1987303910@163.com

导师(通讯作者):胡以华(1962-),男,教授,博导,主要研究方向为光电信息处理. Email: skl_hyh@163.com

收稿日期:2017-01-12;录用日期:2017-02-23

<http://www.photon.ac.cn>

性来刻画目标的细节特征. 基于以上两点, 可利用激光微多普勒效应实现对不同旋翼飞行器的探测与识别.

建立更符合实际目标的模型才能够进行精确的特征分析, 是后续一系列工作的前提. 就目前公开发表的文献来看, 对旋翼叶片的建模方式主要分三类: 一是将整个旋翼回波等效为局部位置的电磁散射, 利用点目标来模拟旋翼的转动. 如烟台大学的王学勤建立了转动目标微多普勒效应的点散射模型, 并进行了仿真研究, 获得了激光雷达探测转动目标的回波信号图^[2]. 但此模型过于粗糙, 与实际回波有较大差异; 仿照空军工程大学的姬伟杰对一般雷达目标的建模方式, 将叶片等效为若干强散射点^[3], 虽然优于单个散射点模型, 但叶片的散射中心并不固定, 边缘散射和镜面散射都可能起主导作用, 因此也很难完整地表征旋翼叶片的真实回波. 二是将旋翼叶片等效为线状散射体. 美国海军实验室的 V. C. Chen 教授建立了旋转目标微多普勒数学模型^[4], 采用对信号回波积分的方式, 推导了直升机桨叶线积分公式, 成功地模拟出旋翼的时域以及时频域“闪烁”现象, 并通过峰值微多普勒频率以及转速反演出旋翼长度^[5]. 但积分的建模方式不能得到旋翼横向尺度的信息. 三是认为旋翼回波由各处散射回波叠加而成, 将旋翼离散成为散射系数一致且等间隔分布的面元. 空军预警学院的陈永彬通过对旋翼叶片回波机理分析, 得出面元尺寸取值小于某一与波长相关的固定值时可等效为积分模型的结论^[6]. 南京航空航天大学的蒋相闻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、桨尖后掠角对回波的影响^[7], 电子工程学院的陈鹏综合分析了桨叶数量、转速等的回波特征^[8], 但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. 同时微波雷达实测多以大展弦比的直升机旋翼为目标, 弦长小、波长长, 使得旋翼弦长对信号调制较弱, 不足以提取相关特征^[9]. 综上, 当前基于点目标与线目标的模型及实验, 忽略了旋翼形状对信号的影响.

激光雷达具有诸多优异的性能^[10], 尤其在波长上的优势使得回波时频分辨率大大提升, 令弦长探测成为可能. 弦长^[11]是决定旋翼性能的重要指标, 本文则针对弦长问题重点研究旋翼横向尺寸对激光回波微多普勒效应的影响. 文中构建了矩形面旋翼的微多普勒激光回波模型, 基于该模型利用时频分析方法对面目标旋翼进行了回波仿真. 通过机理分析, 提出了利用时频图计算旋翼弦长的方法, 并优化了其计算准确度和效率, 为旋翼微多普勒的目标特征参量选取提供了依据.

1 旋翼微多普勒激光回波模型及时频分析方法

针对点、线目标旋翼微多普勒回波模型的不足, 重点研究旋翼弦长对激光回波的调制作用, 建立矩形面旋翼微多普勒激光回波模型. 考虑目标角度的散射特性, 分析其对激光微多普勒探测性能的影响.

1.1 点、线目标旋翼激光回波模型

旋翼与激光雷达相对位置关系如图 1, 激光雷达与旋翼中心距离为 R_0 , 旋翼主体平动速度为 v , 中心位于处于激光雷达坐标系的 YOZ 平面内, 光束仰角为 β , 旋翼平面 $X'O'Y'$ 平行于 XOY 平面.

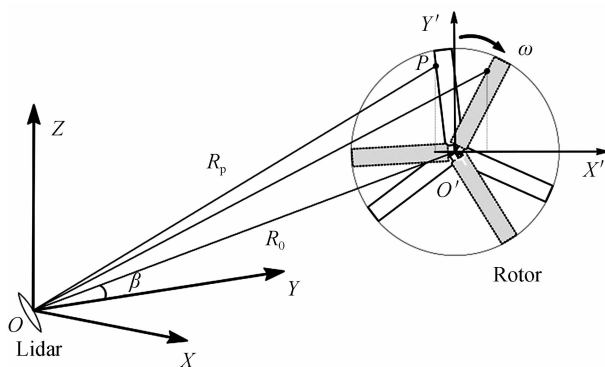


图 1 激光雷达与旋翼位置关系

Fig. 1 Positional relationship between lidar and roter

以单旋翼为例, 激光回波可表示为^[12]

$$S_p(t) = \rho \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda_c} (R_0 + vt) \right\} \exp \left\{ j \left[2\pi f_c t + \frac{4\pi l_p}{\lambda_c} \cos \beta \cos (\omega t + \varphi_0) \right] \right\} \quad (1)$$

式中 ρ 为旋翼反射率, λ_c 为激光波长 (f_c 为频率), l_p 为散射点 P 与旋转中心距离, ω 为旋转角速度, φ_0 为旋翼初始相位. 由于采用激光相干探测的体制, 信号光与本振光混频后经探测器响应电流为

$$i(t) \propto \rho \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda_c} [vt + l_p \cos \beta \cos (\omega t + \varphi_0)] \right\} \quad (2)$$

研究旋翼转动时可认为已经补偿平动速度^[13],因此可以简化信号形式为

$$s_p(t) = \exp \left\{ j \frac{4\pi l_p}{\lambda_c} \cos \beta \cos (\omega t + \varphi_0) \right\} \quad (3)$$

由式(3)可知 P 点微多普勒频率为

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

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、转速以及激光雷达俯仰角.在实际测量中,该模型仅限于得到旋翼的转速信息.

将旋翼等效为刚性均匀的线条,对散射点回波进行长度积分可得

$$s_l(t) = \int_0^l s_p(t) dl_p = \int_0^l \exp \left\{ j \frac{4\pi l_p}{\lambda_c} \cos \beta \cos (\omega t + \varphi_0) \right\} dl_p = \quad (5)$$

$$l \exp \left\{ j \frac{2\pi l}{\lambda_c} \cos \beta \cos (\omega t + \varphi_0) \right\} \text{sinc} \left\{ \frac{2l}{\lambda_c} \cos \beta \cos (\omega t + \varphi_0) \right\}$$

式中 l 为旋翼长度.式(5)即为旋翼线目标回波模型.

1.2 面目标激光回波模型

以单旋翼为例,研究式(5)可以发现,相位角是影响旋翼弦长的唯一参量.因此旋翼面目标回波可以表示为

$$s_s(t) = \int_0^\Phi s_l(t) d\varphi = \int_0^\Phi l(\varphi) \exp \left\{ j \frac{2\pi l(\varphi)}{\lambda_c} \cos \beta \cos (\omega t + \varphi_0 + \varphi) \right\} \cdot \quad (6)$$

$$\text{sinc} \left\{ \frac{2l(\varphi)}{\lambda_c} \cos \beta \cos (\omega t + \varphi_0 + \varphi) \right\} d\varphi$$

Φ 为旋翼弦长决定的相位角的范围,每个微分相位角所对应的线目标长度为一变量 $l(\varphi)$,旋翼激光回波即为对相位角 φ 的积分,函数 $l(\varphi)$ 反映了桨叶的形状尺寸.当旋翼为扇形的特殊情况, $l(\varphi)$ 为与相位角无关的定值.

变量 φ 同时包含在指数函数与 sinc 函数中,积分难度大,无法得到精确的解析解.因此对旋翼面目标的建模可以采用剖分面元的方法,当满足尺度条件时,即可认为等价于积分模型.

如图 2 所示,将旋翼简化为矩形面目标,长度为 l ,弦长为 w .转轴为旋翼边缘一侧中心且位于直角坐标系 MON 原点 O 处,旋翼绕轴顺时针旋转.将其划分为若干边长为 $a(a < \frac{\lambda_c}{2})$ 的正方形面元,设任意面元 P_{mn} 中心点坐标为 (m, n) ,与转轴距离 $l(m, n)$,和旋翼轴线夹角为 $\varphi(m, n)$.由 1.1 节积分理论可知,面目标的回波信号即为所有散射点回波之和,可表示为

$$s_s(t) = \sum_{m=-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \sum_{n=0}^l s_{mn}(t) = \sum_{m=-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \sum_{n=0}^l \exp \left\{ j \frac{4\pi l(m, n)}{\lambda_c} \cos \beta \cos (\omega t + \varphi_0 + \varphi(m, n)) \right\} \quad (7)$$

对于具有 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

$$s_s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{m=-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \sum_{n=0}^l s_{mn}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{m=-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \sum_{n=0}^l \exp \left\{ j \frac{4\pi l(m, n)}{\lambda_c} \cos \beta \cos (\omega t + \varphi_0 + \varphi(m, n)) + 2\pi k/N \right\} \quad (8)$$

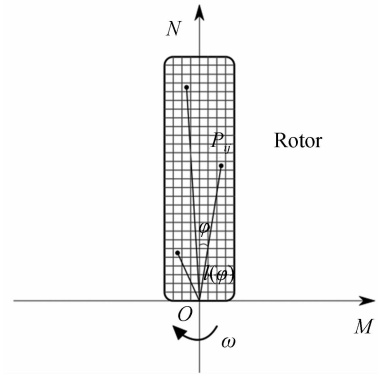


图 2 旋翼散射面元剖分
Fig. 2 Scattering surface element subdivision of rotor

式中 $l(m, n) = \sqrt{m^2 + n^2}$, $\varphi(m, n) = \arctan\left(\frac{n}{m}\right)$, 且由定义可知 $\varphi \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$.

1.3 旋翼角度散射特性对回波影响

1.2 节建模过程将旋翼反射率简化为了一个常量, 即认为各处回波强度一致. 但理论上旋翼整体相对于激光雷达的俯仰角以及旋翼各面元相对于激光雷达的角度都与反射率有密切联系, 不能简单认为反射率为恒定值. 因此为完善模型, 很有必要研究散射角对激光回波的影响.

如图 1, 旋翼平面 $X'O'Y'$ 平行于 XOY 平面, 结合图 2 旋翼上任意点 P 相对激光雷达距离可表示为

$$R_p(t) = \sqrt{(R_0)^2 + l(m, n)^2 + 2l(m, n)R_0 \cos \beta \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi(m, n))} \quad (9)$$

激光雷达视线与任意时刻点 P 所在面元处法线夹角为

$$\theta = \arccos \frac{R_0 \sin \beta}{R_p(t)} = \frac{R_0 \sin \beta}{\sqrt{(R_0)^2 + l(m, n)^2 + 2l(m, n)R_0 \cos \beta \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi(m, n))}} = \frac{\sin \beta}{\sqrt{1 + \left(\frac{l(m, n)}{R_0}\right)^2 + 2\frac{l(m, n)}{R_0} \cos \beta \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi(m, n))}} \quad (10)$$

则对于收发同轴的激光雷达, 该方向即为反射方向.

设旋翼激光反射率分布函数 $\rho(\theta)$, 带入式(10)即确定了旋翼任意位置相对于激光雷达的反射率. 分析式 10 可以看出, 旋翼的反射率是与位置、时间相关的变量. 但实际探测中往往 $R_0 \geq l(m, n)$, 因此可简化为 $\theta = \sin \beta$. 即当满足激光探测的远场条件时, 激光反射率近似为一常量 $\rho(\sin \beta)$, 仅与目标相对激光雷达俯仰角以及目标表面材料有关.

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^[14], 适于分析旋翼的微多普勒特征. 采用短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)对激光回波进行处理, 其对信号较小的强度变化并不敏感, 不影响时频图中参量的提取. 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, 对悬停旋翼而言, 各处反射率一致.

2 矩形面旋翼激光回波仿真、分析与计算

基于建立的旋翼激光微多普勒回波模型, 设置相应的参量对线、面目标旋翼进行仿真模拟, 利用 STFT 方法分析结果, 重点探究不同弦长参量条件下的矩形面旋翼时频特征, 给出矩形旋翼弦长计算方法, 并作误差分析, 从时频分析方法的角度优化求解准确度.

2.1 矩形面旋翼激光回波仿真

为体现矩形面旋翼激光回波特征, 同时对单旋翼线目标进行仿真, 结合时频图区分两者特征差异, 设置系统参量如表 1.

表 1 仿真参量值

Table 2 Parameter values of simulation

Parameters	R_0/m	l/mm	$\omega/rad/s$	β/rad	$\lambda_c/\mu m$
Value	10	50	$2\pi \times 4$	$\pi/12$	1.55

将矩形面旋翼剖分成尺度为 $0.3 \mu m$ 的面元, 激光光斑全部覆盖旋翼盘面, 激光雷达与旋翼相对位置关系如图 1 所示. 为达到较好的时频分析效果, 采样率需至少三倍于最高微多普勒频率. 根据式 4 求得 $f_{MAX} = 1.57 \text{ MHz}$, 采集卡采样率 $f_s = 5 \text{ MHz}$ 满足计算要求.

图 3 为线目标旋翼的回波时域图和时频图. 由图 3(a)可以看出, 在 1s 的时间内, 时域共出现 8 次峰值, 与式(5)中 sinc 函数所表达结果一致: 即当旋翼垂直于激光视线时, 回波强度最大^[15], 为所有散射点之和, 出现了时域“闪烁”的现象. 同一周期内旋翼两次垂直雷达视线, 可以通过时域“闪烁”求得旋翼转速约为 $4r/s$. 时频图 3(b)中, 出现了 8 条交错分居零频两侧的频率带, 从时间对应关系看, 与时域“闪烁”时刻一致. 当旋翼旋转靠近激光雷达方向时, 频率带在零频上方, 反之则在下方. 在非“闪烁”时刻, 时频图呈现微多普勒频率正弦变化的包络, 利用其峰值频率根据式(4)可求得旋翼长度.

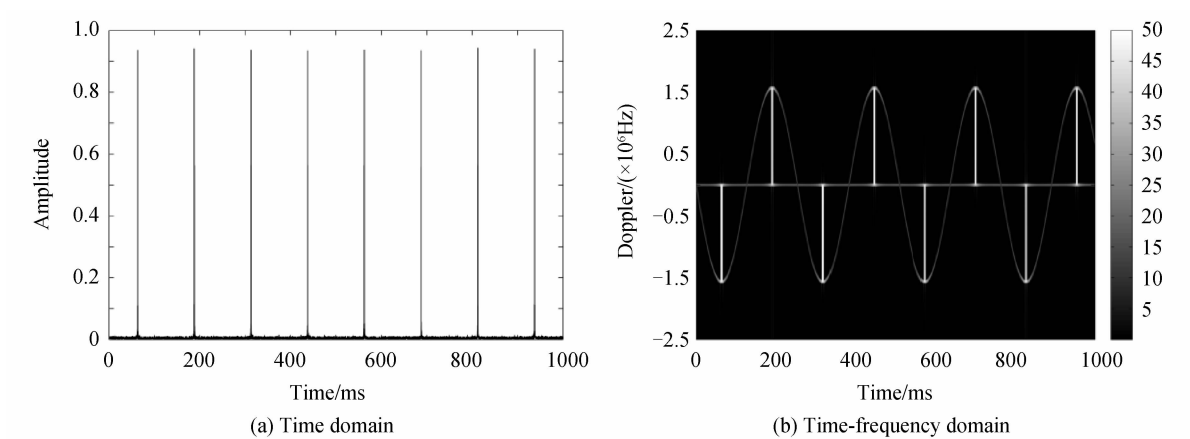


图3 线目标旋翼回波
Fig. 3 Echo of liner rotor

图4~6为矩形面旋翼回波时域图和时频图.在时域图(a)中,除了出现与线目标类似的峰值时域“闪烁”之外,还在每个“闪烁”间隔中心内出现了幅度较小的次峰值.从时频图(b)上看,则产生了较多的新特征.

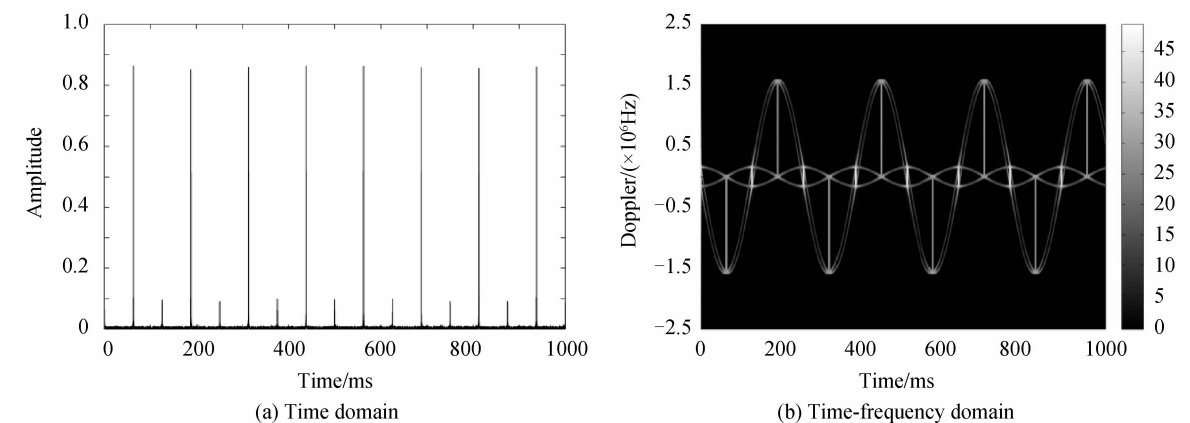


图4 单旋翼面目标回波
Fig. 4 Echo of single-blade area rotor

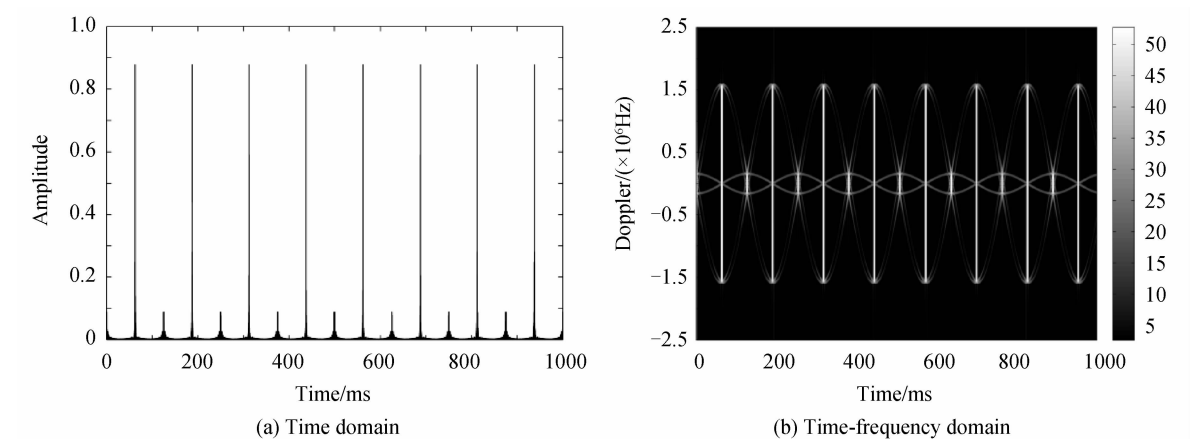


图5 双旋翼面目标回波
Fig. 5 Echo of two-blade area rotor

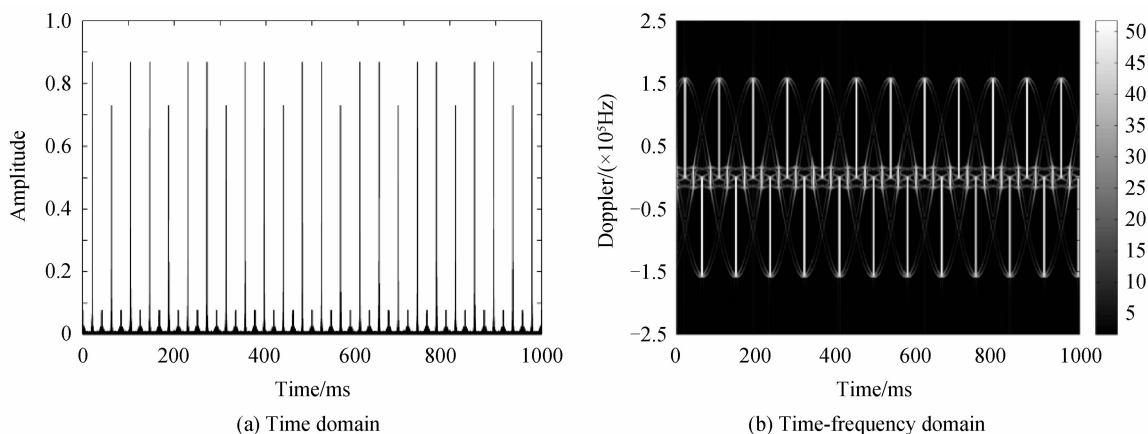


图6 三旋翼面目标回波
Fig. 6 Echo of three-blade area rotor

2.2 矩形面旋翼激光回波分析

本节给出矩形面旋翼时频特征的定性描述,并从几何模型以及电磁散射机理出发,结合时域图解释时频图特征成因,并力求从中获得与旋翼弦长相关的特征参量,为后续弦长计算奠定基础.以单旋翼面目标为例,对照线目标旋翼,可以总结为如下新特征:

特征1:在两频率带之间出现了更小的频率带,为了表示区分,定义与线目标时频图中频率带相同的主频率带,幅度较小的为次频率带.可以发现,次频率带没有交错分居于零频两侧,而是相对零频对称分布.主、次频率带都与时域回波峰值时刻相对应.

机理分析:在电磁散射理论中,复杂目标的电磁散射来源于局部效应的散射中心,可以理解为 Stratton-Chu 积分中的数学不连续处,从几何模型观点来看就是曲率不连续处与表面不连续处^[16].而对于矩形旋翼目标而言,散射中心的类型主要包括镜面散射中心,边缘散射中心以及尖顶散射中心.如图7(a),旋翼展长旋转至垂直于雷达视线位置时,旋翼发生镜面反射,对于接收后向散射的收发同轴激光雷达,此时的回波强度也达到最大值.而当旋翼转过 90° ,与前者类似也发生镜面反射,散射回波出现短暂的峰值,因此在时域图4(a)中可以观察到幅度短时间周期性的突变.旋翼旋转一周,展长与弦长回波峰值交替出现两次.由于两者尺寸差异,时域幅度大小也存在区别.时频图4(b)中次频率带的出现,对应时域图中较小峰值出现的时刻.如图7(b),此时由于弦长垂直于雷达视线,边缘散射中心与镜面散射中心起主要作用,旋翼散射中心为弦长边缘的不连续处.根据瑞利分辨准则,相邻散射点间隔至少大于或等于波长的一半微多普勒频率才有可能被分辨,模型中网格尺寸 $0.3 \mu\text{m} < \frac{1}{2}\lambda$,因此旋翼各点相对于激光雷达的微多普勒频率点形成一条连续的频率带.该时刻旋翼相对于激光视线对称分布,因此次频率带也相对于零频对称分布.

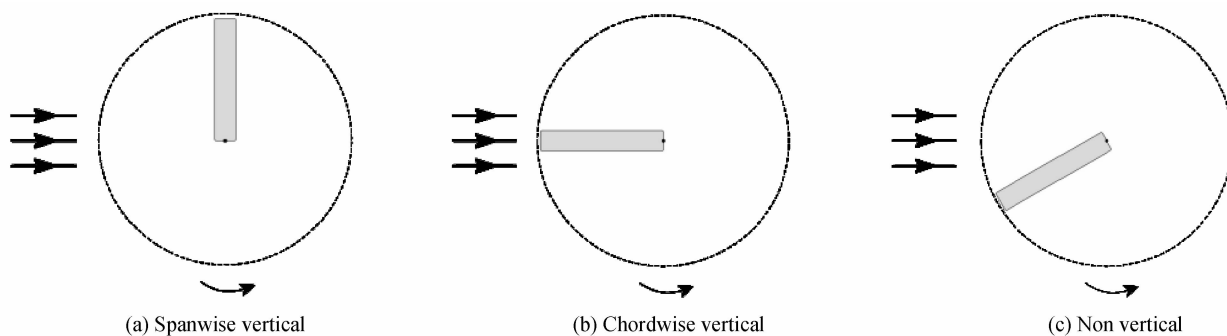


图7 旋翼相对激光视线位置
Fig. 7 Position of rotor to laser sight

特征2:与线目标旋翼时频特征相比,零频带变为两个相位相差 180° 的正弦包络,且相对于零频对称,其峰峰值即为次频率带的范围.线目标旋翼时频图中正弦曲线分裂为两个相对主频率带对称的正弦包络.

机理分析:由上文电磁理论分析可知,当旋翼处于非镜面反射位置,如图7(c),即展长与弦长都不

垂直与激光视线,旋翼发生一般散射,此时尖顶散射占优,相当于矩形旋翼的四个顶角是回波强度的主要来源,但对于垂直位置的镜面散射中心和边缘散射中心幅度值大大降低,这也解释了无线目标旋翼还是矩形旋翼在处于非“闪烁”时刻时域图回波较弱的现象.由此可以认为,时频图中所出现的正弦包络由尖顶散射中心形成.主频率带包含两条正弦包络,由叶尖两顶角散射中心形成.相对于原零频带对称的两条正弦曲线,是由靠近旋翼叶毂的两底角散射点形成.在其峰峰值时刻,旋翼所有散射点的频率值分布在其峰峰值范围内而形成次频率带.因此,次频率带峰峰值即对应矩形旋翼弦长引起的最大微多普勒频移.

在图 5 双旋翼回波时频图中,所有频率带关于零频带对称分布;在图 6 三旋翼回波时频图中,频率带则类似于单旋翼时频图交错分布,但同一正弦包络内则出现了三组正负频率带.由式(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域图按照旋转相位差所对应的时间差平移叠加而成.

2.3 矩形面旋翼弦长计算

根据矩形面旋翼时频图中呈现的新特征,可以对其进行量化并计算旋翼的弦长即横向宽度.为了进一步研究其中的规律,仿真单旋翼不同弦长条件下的激光回波并进行时频分析.其他参量值与 2.2 节相同.

从时频分析结果可以看出,当旋翼长度、转速等条件设置相同且只改变弦长时,主频率带范围以及其出现的周期不发生变化.次频率带范围随着弦长设置的差异而改变,如图 8.

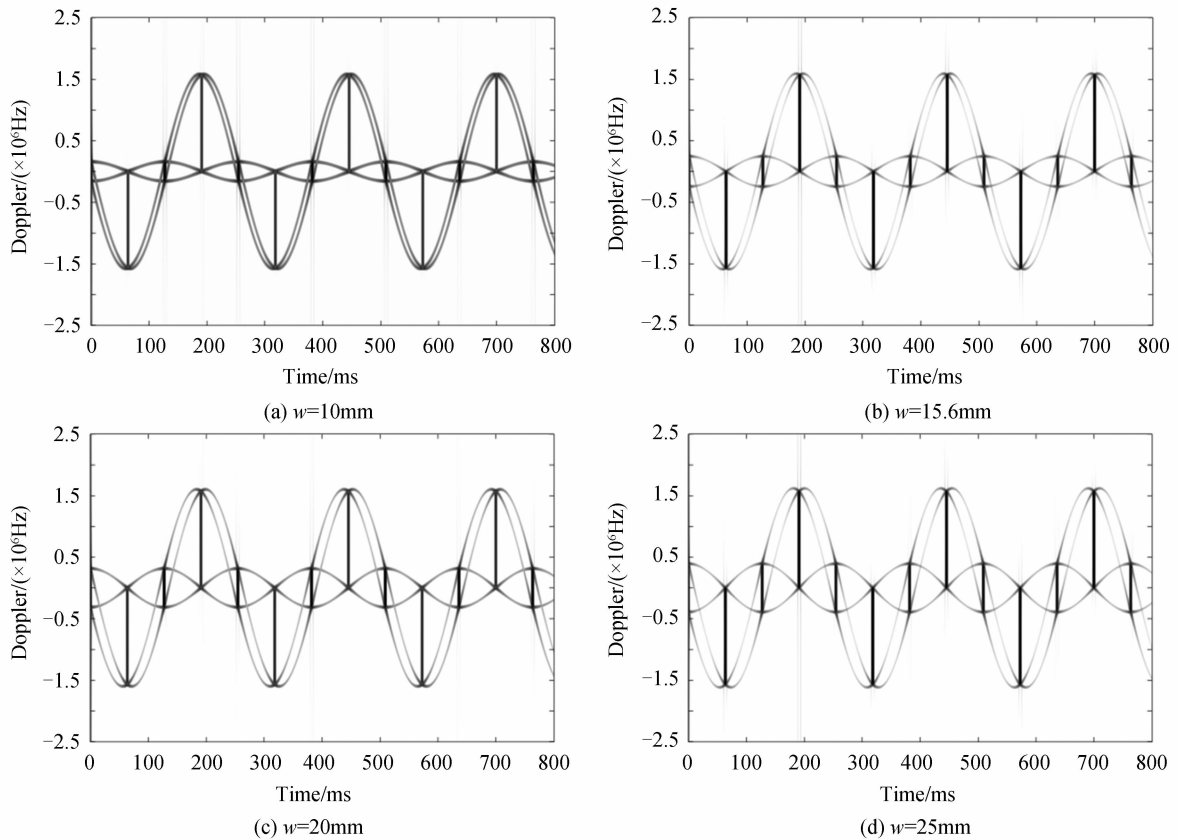


图 8 不同弦长矩形面旋翼回波时频图

Fig. 8 Time-frequency domain echo of rectangular rotor with different chord

根据 2.2 节理论分析,次频率带的产生与旋翼弦长相关,提取若干不同弦长旋翼的次频率带峰值数据,通过拟合曲线可知:旋翼弦长和次频率带微多普勒峰值呈线性变化关系,如图 9 所示.参考式(4),将旋翼长度的计算方法推广到弦长求解中,即

$$f_{wmax} = \frac{1}{2} \frac{4\pi r w}{\lambda_c} \cos \beta \quad (11)$$

由此可得弦长计算公式为

$$\omega = \frac{f_{vmax} \lambda_c}{2\pi r \cos \beta} \quad (12)$$

式中转速可通过计算时频图中“闪烁”次数的方法求得,旋转周期 T 与转速关系为 $r = \frac{1}{T}$. 由于旋转中心位于旋翼弦长边缘的二分之一处,故其峰值频率也为次频率带的一半. 分析弦长与峰值微多普勒频率的理论表达式 12 可以发现,两者成正比关系.

将理论公式的曲线绘制于图 9,对比真实数据的拟合曲线,所得两者结果基本一致,验证了旋翼弦长求解公式的正确性. 需要说明的是,模型所设定的条件都为理想情况,提取频率值拟合曲线应当与理论公式完全吻合,但可以观察到两者并非严格重合,即频率点没有完全分布在理论曲线上. 这是由于时频变换存在时频聚集性问题,频率带具有一定宽度,且边缘模糊,给参量提取造成较大误差,导致即使是利用简单模型得到的理论计算结果,也不能具有完全的一致性. 2.4 节针对参量提取误差的问题做出讨论,并采取一定手段提高参量的提取准确度.

2.4 误差分析

研究旋翼弦长过程中,时频分析的性能是限制求解微多普勒频率和转速准确度的重要因素^[17],而这两者也决定了最终旋翼弦长计算的准确性.

时频图表示信号能量在时频平面上的分布. 在 MATLAB 中的计算结果为一数值矩阵,数值对应各时间频率上能量的大小,所以可以把时频图做为一幅灰度图进行处理. 对于背景干净的时频图,利用边缘检测算法便可找到信号时频分布的边缘,进而得到信号所在位置信息. 但是由于时频聚集性的问题,频率带往往具有宽度,即时间有一定范围的不确定度. 同时频率带的边缘较为模糊,提取峰值频率同样存在不确定度的问题. STFT 窗长的选取直接影响时间-频率的分辨率.

如图 10(a) 当选取大窗长时,频率分辨率较好,峰值边界清晰,适于提取微多普勒频率峰值;但是频率带有一定宽度,时间不确定度大. 如图 10(b) 当选取小窗长时,频率带窄细不确定范围小,时间分辨率较优,适于提取转速信息;但频率能量分散,通过阈值处理后峰值频率边界仍然模糊.

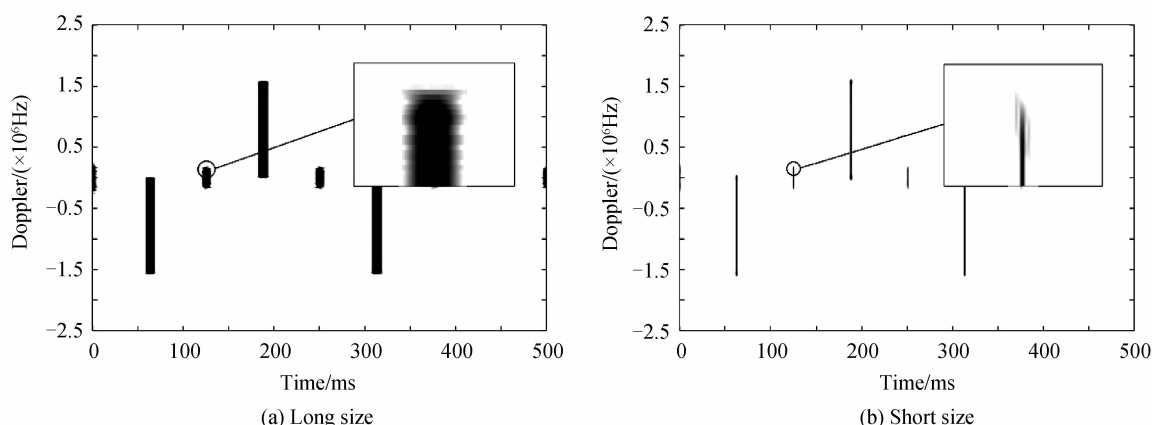


图 10 STFT 窗长对时频曲线影响

Fig. 10 The influence of STFT window size to time-frequency curve

变换窗长对仿真回波结果分别提取时间、频率如表 2. 从表 2 提取的数据来看,在相同信噪比的条件下,使用分别长、短窗长对数据进行短时傅里叶变换,误差分别为 3.52% 和 4.17%,结果相差不大. 考虑到次频率带时间-频率两参量相对独立,虽然不能够使其准确度同时到达较高,但可以通过两次变换,分别提取最优准确度的时间、频率值. 经过计算,所得误差为仅 1.58%,相较于前两者明显降低. 因此,只讨论由时频分析局限性带来的影响,该方法能够使误差获得一定程度的降低,令提取准确度与运算速度达到较高水平,这

对于激光探测中高采样率、大数据量的计算是一种快捷有效的途径。

表 2 STFT 变换窗长提取参量

	Short size	Long size	Better choice
T/ms	253.21	258.04	253.21
$f_{w\max}/\text{Hz}$	1.61×10^5	1.57×10^5	1.57×10^5
w/mm	10.42	10.35	10.16
error	4.17%	3.52%	1.58%

本文建立矩形旋翼模型目的是探究弦长的探测求解方法,因此对其他条件进行了简化处理.在实际探测中,应当考虑三方面的影响:一是旋翼相对激光雷达的俯仰角.仰角越大微多普频率越小,实际上不利于获得精确的频移值,因此应当避免激光雷达的过顶探测;二是考虑旋翼的平动速度.进行微动探测信号处理的关键一步是对平动速度进行补偿,补偿算法对于次频率峰值提取的影响还应当进一步研究.三是旋翼的实际形状.旋翼并非严格矩形平面,且与转轴连接处形状也与假设模型具有一定差异,因此下一步仍需要建立更为接近实际旋翼的几何模型,达到精确识别的目的.

3 结论

本文利用物理光学面元散射回波叠加的方法,建立了基于微多普勒效应的矩形面旋翼激光回波模型.与点、线目标模型相比,面目标模型更接近真实旋翼的特征.通过仿真模拟,得到了矩形面旋翼旋转激光回波的时频图.

研究发现,时频图中出现了异于传统线目标模型的次频率带,其峰值频率与旋翼弦长成比例关系.数据点拟合曲线与本文给出的理论曲线吻合较好,验证了旋翼弦长计算方法的正确性.同时误差分析的结果表明,通过变化 STFT 窗长得到优化的时间、频率分辨率,分别提取峰值微多普勒频率和转速信息可有效降低计算误差,从而求得更为准确的旋翼弦长,对基于微多普勒效应的旋翼桨叶形状分类与识别具有重要的参考价值.

参考文献

- [1] 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.
- [2] WANG Xue-qin, YUAN Shuai, ZHANG Jun, *et al.* Study on simulation of micro-Doppler effect for rotation target[J]. *Laser&Infrared*, 2007, **37**(11): 1216-1219.
王学勤, 原帅, 张骏, 等. 转动目标光学微多普勒效应的仿真研究[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(11): 1216-1219.
- [3] JI Wei-jie, TONG Chuang-ming. Research on electromagnetic scattering computation and synthetic aperture radar imaging of ship located on two-dimensional ocean surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(16): 11-18.
姬伟杰, 童创明. 二维海面上舰船目标电磁散射及合成孔径雷达成像技术研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(16): 11-18.
- [4] CHEN V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics; a review[C]. SPIE, 2003, **5102**: 240-249.
- [5] CHEN V C. The micro-Doppler effect in radar[M]. Norwood: Artech House, 2011. 47-55.
- [6] CHEN Yong-bin, LI Shao-dong, YANG Jun, *et al.* Rotor blades echo modeling and mechanism analysis of flashes phenomena[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(13): 281-291.
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.
- [7] JIANG Xiang-wen, ZHAO Qi-jun, MENG Chen, *et al.* Effect of helicopter rotor blade shape on its radar signal characteristics[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, **35**(11): 3123-3136.
蒋相闻, 招启军, 孟晨. 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.
- [8] CHEN Peng, HAO Shi-qi, ZHAO Nan-xiang, *et al.* Micro-doppler analysis of helicopter's rotor blades[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(12): 3259-3264.
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.
- [9] THAYAPARAN T, ABROL S, RISEBOROUGH E, *et al.* Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data[J]. *Iet Radar Sonar&Navigation*, 2007, **1**(4): 289-299.
- [10] CHEN Peng, HAO Shi-qi, HU Yi-hua, *et al.* Micro-Doppler analysis of moving helicopter's rotor blades[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(1): 118-121.
陈鹏, 郝士琦, 胡以华, 等. 运动直升机旋翼的微多普勒特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(1): 118-121.
- [11] ZHANG Qiao, LIU Chun-yi. Structure design of ducted fan unmanned aerial vehicle[J]. *Aircraft Design*, 2013(4): 4-8.
张桥, 刘春义. 涵道风扇无人机结构设计[J]. *飞机设计*, 2013(4): 4-8.

- [12] CHEN Yong-bin, LI Shao-dong, CHEN Wen-feng, *et al.*. Modeling of helicopter rotor blades' echoes and its characteristic analysis[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2015, **29**(5): 322-327.
陈永彬, 李少东, 陈文峰, 等. 直升机旋翼叶片回波建模与特性分析[J]. *空军预警学院学报*, 2015, **29**(5): 322-327.
- [13] LI Kun, ZENG Yong-hu, YIN Zhao-wu, *et al.*. Analysis of radar signatures of helicopter rotary blades[J]. *Electronics Optics&Control*, 2009, **16**(5): 23-26.
李琨, 曾勇虎, 尹照武, 等. 直升机旋翼雷达特征信号分析[J]. *电光与控制*, 2009, **16**(5): 23-26.
- [14] ZHAO Tong-lu, LIAO Gui-sheng, YANG Zhi-wei. Micro-Doppler extraction based on short-time iterative adaptive approach and inverse radon transform[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, **44**(3): 505-513.
赵彤璐, 廖桂生, 杨志伟. 基于短时迭代自适应-逆 Radon 变换的微多普勒提取方法[J]. *电子学报*, 2016, **44**(3): 505-513.
- [15] YE Ling-ping, ZHU Si-hai, CHEN Guo-hong. Application of radon-wigner transform in the detection of blades echo [J]. *Modern Radar*, 2013, **35**(8): 55-58.
叶玲平, 诸四海, 陈国宏. Radon-Wigner 变换在旋翼回波检测中的应用[J]. *现代雷达*, 2013, **35**(8): 55-58.
- [16] 张麟兮. 雷达目标散射特性测试与成像诊断[M]. 中国宇航出版社, 2009.
- [17] 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*, 2001: 260-263 vol. 1.