

文章编号: 2095-4980(2023)03-0317-08

太赫兹雷达直升机旋翼目标微动特性研究

秦晓雨^{1,2}, 邓彬^{*1}, 董俊², 王宏强¹

(1. 国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073; 2. 湖南师范大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410081)

摘要: 直升机旋翼微动形成的微多普勒特征对于战场环境下直升机目标探测识别具有重要意义, 掌握直升机旋翼的微动特性是雷达目标辨识的前提。太赫兹雷达波长短, 多普勒效应显著, 迫切需要掌握太赫兹频段旋翼目标微动特性。首先对偶数叶片和奇数叶片的螺旋桨目标进行建模, 分别使用微波波段(3 GHz)与太赫兹波段(120 GHz, 220 GHz)雷达对目标进行仿真分析, 并从目标的回波信号特征出发提取多普勒频移信息, 利用短时傅里叶变换进行时频分析, 对比分析目标与雷达参数对其多普勒效应的影响及调制关系。仿真结果表明: 在转速、视角以及直升机叶片长度均相同的情况下, 太赫兹频段下的微多普勒效应比微波频段显著增强, 多普勒曲线也更加清晰, 叶片细节更加丰富。应用太赫兹雷达提取微多普勒信息能够为直升机目标识别提供重要特征。

关键词: 太赫兹雷达; 直升机旋翼; 微多普勒; 时频分析

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022058

Micro-motion characteristics of helicopter blades based on THz radar

QIN Xiaoyu^{1,2}, DENG Bin^{*1}, DONG Jun², WANG Hongqiang¹

(1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;
2. College of Information Science and Engineering, Hunan Normal University, Changsha Hunan 410081, China)

Abstract: Micro-motion of helicopter blades forms the micro-Doppler effect, which is a kind of important characteristic and is extremely important for identifying different types of helicopters in the battlefield environment. Determining the micro-motion characteristics of helicopter rotor is the precondition for the identification. Because of the short wavelength and significant Doppler effect of terahertz radar, it is urgent to determine the fretting characteristics of the rotor target in terahertz band. Firstly, the propeller targets with even and odd blades are modeled. Then, the targets are simulated by using the radar in microwave band(3 GHz) and terahertz band(120 GHz, 220 GHz), and the Doppler frequency shift information is extracted from the characteristics of the target echo signal. Using Short Time Fourier Transform(STFT) in time-frequency analysis, the influence of the target and the radar parameters on the Doppler effect and the modulation relationship are contrasted. The simulation results show that the micro-Doppler effect in Terahertz band is more significantly enhanced than that in microwave band, and the Doppler curve is clearer and more details of the blades can be observed under the condition of the same rotation speed, angle of view and blade length. Using terahertz radar to extract micro-Doppler information can provide significant features for helicopter target recognition.

Keywords: terahertz radar; helicopter blades; micro-Doppler; time-frequency analysis

太赫兹(Terahertz, THz)波指的是频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波。作为一种介于微波与红外光之间的电磁波, THz 波兼有微波和红外波 2 个频段的特性, 更有自身独特的优良性质^[1]。相对于微波频段的信号来说, 太赫兹波的频率更高, 波长更短, 分辨力更高, 目标的微多普勒特征显著, 可以精细成像, 从而有利于目标的识别^[2]。相对于红外波段的信号来说, 太赫兹波在非金属材料中有更强的穿透能力, 可以穿破云烟识别伪装, 能够很好地应用在复杂的战场环境中。同时, 回波具有更好的相参性, 也具备更好的抗干扰性。太赫兹雷达是太赫

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871386; 61971427; 62035014; 61921001)

*通信作者: 邓彬 email:sagideng@163.com

兹波应用研究中的一个重要研究方向, 它不仅在目标预警探测上有着领先优势, 同时在反恐安检、车辆防撞、气象监测、生物医学等方面也有着广阔的应用前景。

微动是指物体的某些部分相对于物体质心的平动来说存在小幅振动、旋转和其他高阶运动的现象^[3-5]。在频谱上, 微动可以表现为微多普勒效应, 即回波多普勒频移是时变的, 频谱就会有频谱旁瓣或者展宽的存在。微多普勒特征是目标探测与识别微动现象的一个重要辅助特征^[6-7], 比如在直升机螺旋桨处可以检测出旋翼的微动, 根据旋翼微动所形成的不同微多普勒特征可以分辨出直升机的螺旋桨数目, 甚至可以估计出旋翼的长度、旋转的速率以及叶尖的速度, 进一步得到直升机类型等更加详细的信息^[8-10]。雷达目标的微多普勒特征对于提高雷达的检测和分辨能力, 改善雷达成像和目标识别的性能有着十分重要的意义。

微多普勒效应受信号频段的影响, 工作在传统的较低频段的雷达系统中, 微多普勒效应很小, 不容易被检测出来。而太赫兹雷达属于高频段雷达, 微多普勒效应非常显著, 所能提取的微多普勒信息也更加丰富^[11]。因此, 在太赫兹雷达中, 通过对微动特征的提取与分析, 能够更好地检测出微动目标的存在, 从而分析出目标的运动形式。

随着雷达目标识别技术的不断发展, 运用高分辨力宽带雷达对微动目标进行精细辨识已经成为我国国防事业研究的重要技术热点, 对目标的类型、状态做出迅速的判断, 对目标感知探测能力提升具有非常重要的现实意义^[12]。掌握直升机旋翼的微动特性是辨识的前提, 因此本文重点开展太赫兹雷达直升机旋翼微动特性研究。

以典型直升机旋翼为例, 通过对不同叶片数目的螺旋桨目标进行建模, 分别使用微波波段与太赫兹波段的雷达对目标进行仿真分析, 得到回波数据, 并从目标的回波信号特征出发, 利用短时傅里叶变换进行时频分析^[13-14], 对比分析目标与雷达参数对其多普勒效应的影响及调制关系, 达到对目标精细辨识的目的。

1 目标回波建模及时频分析原理

1.1 直升机螺旋桨雷达回波建模

图 1 为三叶片直升机螺旋桨示意图, 螺旋桨的中心位于物体固定坐标系 (X', Y', Z') 的原点处, 叶片在平面 xoy 上以 z 轴 $(0, 0, 1)$ 为旋转轴旋转, 角速度为 Ω 。雷达位于空间固定坐标系 (X, Y, Z) 的原点处, 雷达的中心频率为 f_0 , 波长为 λ , 雷达到直升机螺旋桨中心的距离为 R_0 , 入射波的方位角和俯仰角分别为 α 和 β 。

根据电磁散射理论, 直升机的每个螺旋桨叶片可以看成由一些散射点组成。如图 2 所示, 令 $\alpha = \beta = 0^\circ$, 当 $t = 0$ 时, 在 $(x_0, y_0, z = 0)$ 处的散射点 P 以恒定的角速度 Ω 逆时针旋转, 此时点 P 到雷达的距离为 R_p , 到螺旋桨中心的距离为 $l_p = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$, 初始的旋转角为 φ_0 。在时间 t 时, 点 P 旋转到 $(x_t, y_t, z = 0)$ 的位置, 旋转角 $\varphi_t = \Omega t + \varphi_0$, 此时点 P 到雷达的距离变为:

$$R_p(t) = \sqrt{(R_0 + x_t)^2 + y_t^2} = \sqrt{(R_0 + l_p \cos \varphi_t)^2 + (l_p \sin \varphi_t)^2} = \sqrt{R_0^2 + l_p^2 + 2R_0 l_p \cos(\varphi_0 + \Omega t)} \quad (1)$$

在远场情况下 $R_p(t) = R_0 + l_p \cos(\varphi_0 + \Omega t)$, 因此雷达接收到散射点 P 的回波信号为 $s_R(t) = e^{-j[2\pi f_0 t + \frac{4\pi}{\lambda} R_p(t)]}$, 相位函数为 $\varphi_P(t) = \frac{4\pi}{\lambda} R_p(t)$ 。

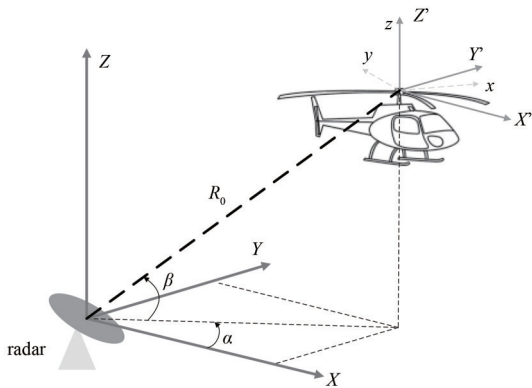


Fig.1 Radar and rotor geometry
图1 雷达与旋翼几何关系图

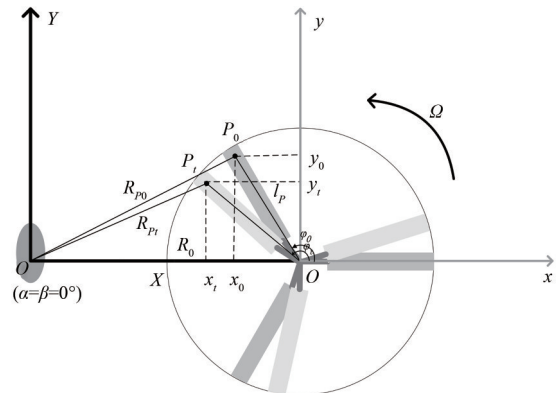


Fig.2 Plane sketch of blade rotation
图2 叶片旋转平面示意图

通常情况下，俯仰角 β 和直升机叶片的高度 z_0 不为0，则相位函数为：

$$\varphi_P(t) = \frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + \cos\beta(l_P \cos\phi_0 \cos\Omega t - l_P \sin\phi_0 \sin\Omega t) + z_0 \sin\beta] \quad (2)$$

因此，在散射点 P 处的回波信号和基带信号分别为：

$$s_R(t) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + z_0 \sin\beta]} e^{-j2\pi f_0 t - \frac{4\pi}{\lambda} l_P \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0)} \quad (3)$$

$$s_B(t) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + z_0 \sin\beta]} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} l_P \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0)} \quad (4)$$

对整个叶片长度 L 积分，则总的基带信号为：

$$\begin{aligned} s(t) &= \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + z_0 \sin\beta]\right\} \int_0^L \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} l_P \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0)\right\} dl_P = \\ & \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + z_0 \sin\beta]\right\} \left\{ \frac{\exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} l_P \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0)\right\}}{-j\frac{4\pi}{\lambda} \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0)} \right\} \Bigg|_0^L = \\ & L \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + z_0 \sin\beta]\right\} \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{L}{2} \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0)\right\} \operatorname{sinc}\left\{\frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{L}{2} \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0)\right\} \end{aligned} \quad (5)$$

对于具有 N 个叶片的直升机旋翼，每个叶片的初始旋转角为 $\theta_k = \theta_0 + 2k\pi/N$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N-1$)，则总的接收信号为：

$$\begin{aligned} s_{\Sigma}(t) &= \sum_{k=0}^{N-1} s(t) = \\ & L \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + z_0 \sin\beta]\right\} \sum_{k=0}^{N-1} \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{L}{2} \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0 + 2k\pi/N)\right\} \operatorname{sinc}\left\{\frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{L}{2} \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0 + 2k\pi/N)\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

螺旋桨旋转的时域特征用信号的幅度来体现，即

$$|s_{\Sigma}(t)| = L \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + z_0 \sin\beta]\right\} \sum_{k=0}^{N-1} \operatorname{sinc}\left\{\frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{L}{2} \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0 + 2k\pi/N)\right\} \exp\{-j\varphi_k(t)\} \quad (7)$$

式中 $\varphi_k(t)$ 为相位函数， $\varphi_k(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{L}{2} \cos\beta \cos(\Omega t + \phi_0 + 2k\pi/N)$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N-1$)。

螺旋桨旋转的频域特征用多普勒频移表示，第 k 个叶片旋转引起的多普勒频移表示为：

$$f_{D,k}(t) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\varphi_k(t)}{dt} = \frac{\Omega L}{\lambda} \cos\beta [-\sin(\Omega t) \cos(\phi_0 + 2k\pi/N) - \cos(\Omega t) \sin(\phi_0 + 2k\pi/N)] = -\frac{\Omega L}{\lambda} \cos\beta \sin(\Omega t + \phi_0 + 2k\pi/N) \quad (8)$$

则 P 点的多普勒瞬时频率表示为：

$$f_{D,k,P}(t) = -\frac{2\Omega l_P}{\lambda} \cos\beta \sin(\Omega t + \phi_0 + 2k\pi/N) \quad (9)$$

最大多普勒频移在叶尖处取得

$$f_{D,\max} = \frac{-2\Omega L}{\lambda} \cos\beta \quad (10)$$

1.2 时频分析原理

时频分析的思想首创于1946年Dennis Gabor提出的Gabor变换，之后对时频分析的研究便迅速发展起来，许多种时频分析算法被相继提出并应用于非平稳信号的处理中，主要分为以短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)为代表的线性变换和以韦格纳分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)为代表的双线性变换两类。

STFT的表达式为： $\text{STFT}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$ ，其基本思路是用一个非常窄的时间窗函数 $h(t)$ 取出信号，然后假定在这个时间窗内信号是平稳的，对其求傅氏变换可以得到信号在该时间窗内的频率，并且滤掉了该窗函数以外信号的频谱，然后沿着信号移动时间窗口，这样得到1个二维的时频分布，其中包含了信号在不同时刻的频谱特征。STFT算法简单，便于对微多普勒现象的时频特征进行分析，对于振动、旋转等微动目标进行时频

分析,既可以验证微多普勒模型的正确性,同时也可作为对其进行精细辨识的工具,为微多普勒效应的应用提供理论支持,而非线性变换分析在存在多个分量信号时,会出现较为严重的交叉项干扰,因此本文选用STFT算法进行后面的所有实验分析。

图3所示为叶片数目为2与叶片数目为3的直升机旋翼多普勒特征图,对于直升机来说叶片的长度、数目、旋转速率等都是分辨直升机类型的重要特征,旋转的旋翼叶片在联合时频域引起的微多普勒频谱中可以方便地提取以上特征,所以通过分析回波数据的时频分布便可以对不同信号的直升机加以识别。

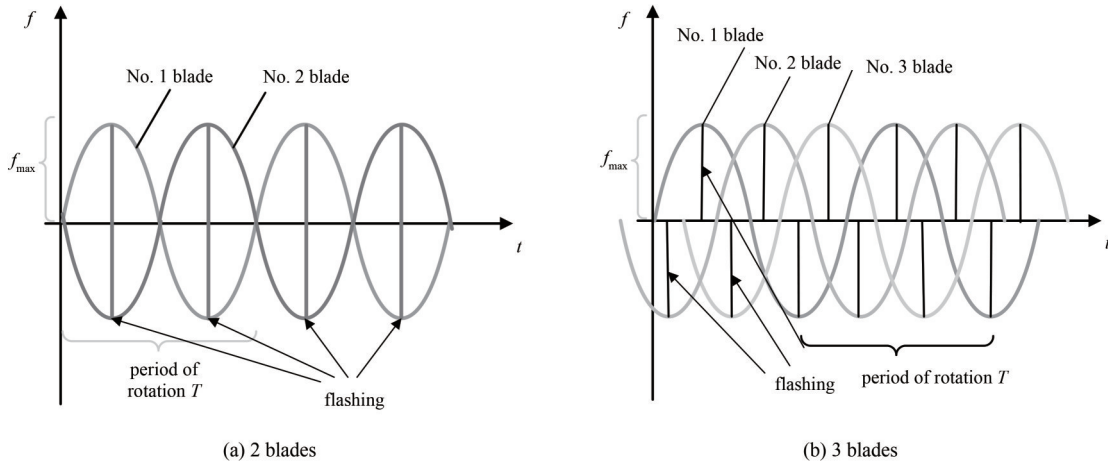


Fig.3 Different number of micro-Doppler characteristics of the rotor

图3 不同数目旋翼的微多普勒特征

2 直升机螺旋桨微动仿真

为进一步验证上述直升机旋翼目标微动特性的理论推导,对一个双叶片直升机叶片模型和三叶片直升机叶片模型进行了建模仿真。

2.1 仿真流程

本文所采用的仿真软件FEKO是由美国ANSYS公司开发的一套功能强大的电磁计算软件,它的应用领域包括电磁兼容性(Electro Magnetic Compatibility, EMC)分析、天线设计以及雷达横截面(Radar Cross Section, RCS)分析等。FEKO求解器的基础是矩量法(Method of Moments, MOM),同时它还结合了多层快速多极子(Multilevel Fast Multipole Algorithm, MLFMA)、有限元(Finite Element Method, FEM)、高频物理光学(Physical Optics, PO)以及大面元物理光学(Large Element-PO, LE-PO)等算法,在分析电磁辐射、散射等问题上都有着很好的效果。由于直升机螺旋桨属于电大目标,为了提高计算效率采用PO和MLFMA相结合的算法来计算旋翼的后向散射。

FEKO软件最大的优点在于可以很好地支持MLFMA,因此对于十几到上百波长的模型,FEKO可以较快地得到计算结果,尤其是在太赫兹频段,电磁波波长更短,直升机螺旋桨模型的尺寸相对于电磁波波长来说更大,此时其他的软件如CST或HFSS难以胜任。其次,FEKO软件自动满足无限远条件,特别适用于在远场条件下对目标散射特性的分析。因此,在本文中使用FEKO软件对直升机螺旋桨进行微动仿真。

图4所示为直升机螺旋桨微动仿真的流程,首先在FEKO软件中进行模型的参数设置,具体流程如下:

- 1) 设定变量,如雷达的脉冲重复频率、旋翼的转速、旋翼的旋转周期等参数;
- 2) 导入直升机叶片模型,并根据需要设置模型尺寸、材料、旋转角度;
- 3) 设置频率,添加平面波激励并设置视角;
- 4) 设定远场,输出.out文件;
- 5) 设置算法,使用全射线追踪算法(PO-full ray-tracing)提高电磁计算精确度;
- 6) 剖分网格,为提高计算速度采用粗面元剖分方法(Coarse),选择三角形面网格,设置全局求解算法;
- 7) 为了达到叶片旋转的效果,根据之前定义变量 $rot=(k-1)*drot$,设置模型的旋转,旋转的角度随 k 的改变而改变。利用OPTFEKO中的参数优化功能,令 k 的值从1变化到 ns , ns 为螺旋桨旋转一周所发射的脉冲个数;
- 8) 提交计算任务。

在电磁计算软件计算完成之后,输出每个旋转角度下的场强,相当于在不同时间螺旋桨旋转产生的雷达回波信号。由于电磁计算软件计算得到的结果并不是真正的场强,因此使用MATLAB软件设计读数据程序,对仿

真的结果进行数学变换，得到旋翼在每个时刻真正的雷达回波数据。再用 MATLAB 软件依次循环读出每个时刻的雷达回波值拼接成一个回波序列，即可得到慢时间下的雷达回波序列，并对此回波序列进行 STFT 变换，得到回波信号的时频分布图。

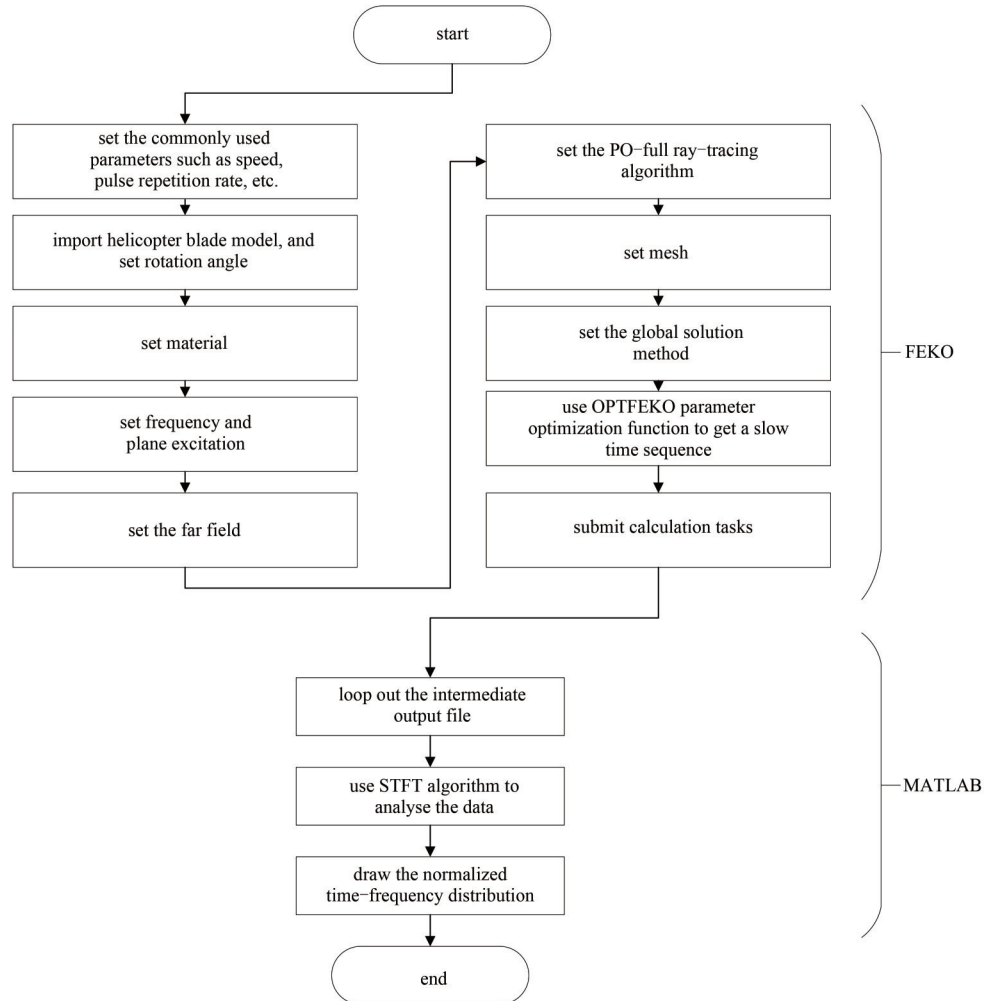


Fig.4 Flow chart of the simulation
图4 仿真流程图

2.2 双叶片直升机叶片仿真

建立如图 5 所示的双叶片直升机旋翼模型，它的 2 个叶片均为三棱柱，对称分布在圆形中轴的两侧，叶片在 YOZ 平面内以 X 轴为转轴逆时针旋转，具体的仿真参数如表 1 所示。

如图 6 所示，由 4 幅图可以看出，双叶片直升机旋翼仿真结果与理论计算结果基本吻合，在图中可以清晰可见 1 号叶片的两次闪烁和 2 号叶片的 2 次闪烁，但由于存在多次反射的情况，在正弦包络的峰值上下会周期性出现微弱的条状闪光。

对比图 6(a)与图 6(b)，在微波频段(图 6(a))微多普勒效应只有几千赫兹，而当使用太赫兹频段的雷达时(图 6(b))，微多普

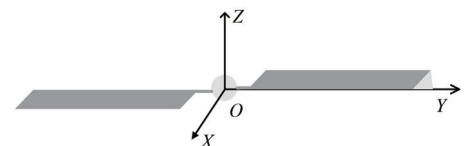


Fig.5 Blade modeling of bi-blade helicopter
图5 双叶片直升机叶片建模

表 1 双叶片直升机叶片不同频段下仿真参数表

Table1 Simulation parameter list of the blades of bi-blade helicopter under different frequencies

parameter	3 GHz band	120 GHz band	120 GHz band	220 GHz band
blade length/m	1.29	1.29	0.64	0.64
rotate speed/rpm	1 000	1 000	1 000	1 000
radar incidence direction $\theta/^\circ$	90	90	90	90
radar incidence direction $\varphi/^\circ$	40	40	40	40
PRF/Hz	6 000	240 000	120 000	240 000

勒效应达到几万赫兹,比微波频段更加明显,正弦包络也更加清晰,能够观察到更多叶片的细节,比如图 6(b)中 15 ms 和 45 ms 时由于镜面反射图像上方出现两个闪光,可以看出直升机的 2 个叶片并不完全在同一平面内。其次,图 6(b)中正弦曲线上峰值处只有一个叶片出现强闪光,另一个叶片闪光比较微弱,这也正说明了叶片并不是规则的长方体,而是如图 5 所示的三棱柱,而这些信息都是在微波频段的图中无法得知的。同样,对比图 6(c)与图 6(d),在雷达载波频率为 120 GHz 的情况下(图 6(c)),最大多普勒频移大约出现在 35 kHz 处,而在雷达载波频率为 220 GHz 的情况下(图 6(d)),最大多普勒频移大约出现在 68 kHz 处。太赫兹雷达的频率较高,所以与 3 GHz 雷达相比,太赫兹雷达获得的叶片微多普勒效应更强,更容易检测到目标的存在,同时微多普勒图像更直观,可以实现对旋翼目标的精细识别。

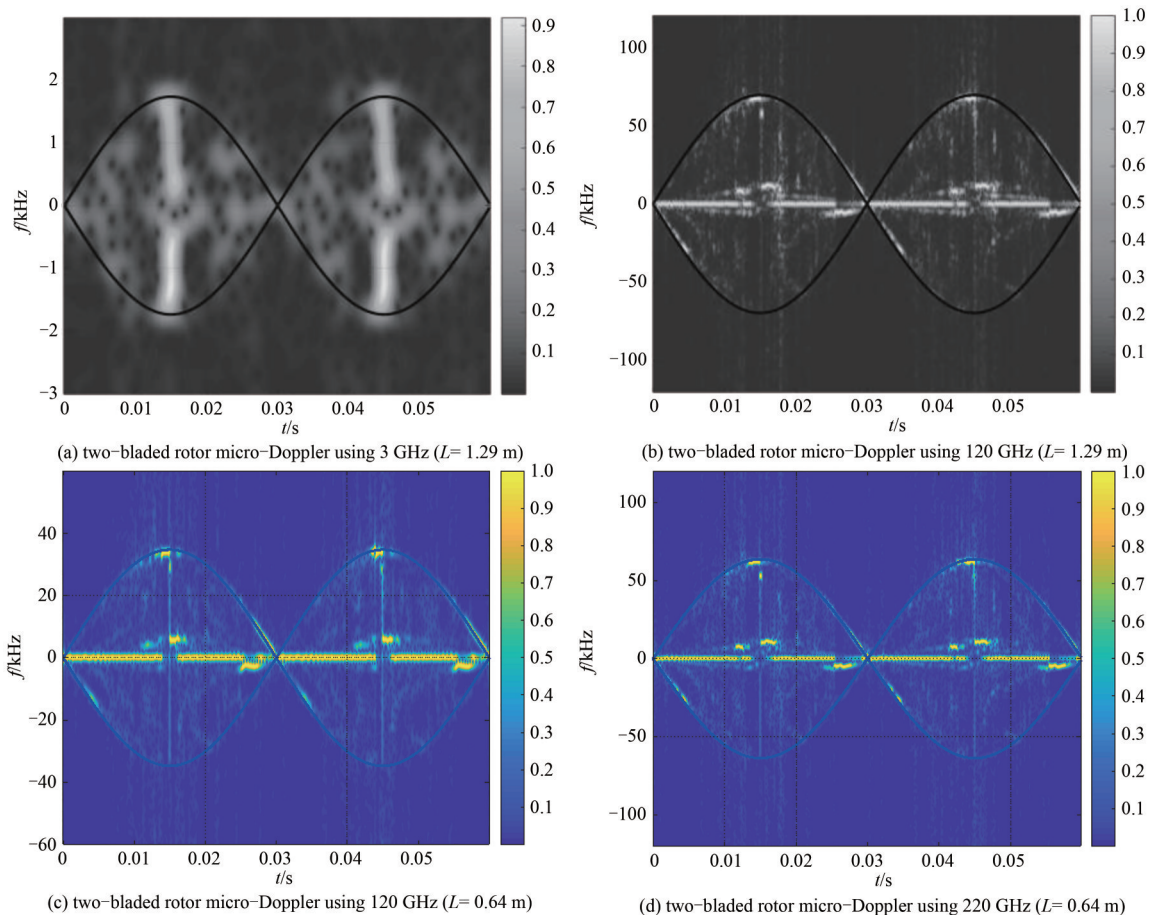


Fig.6 Simulation results of the blade of bi-blade helicopter at three frequencies

图 6 双叶片直升机叶片 3 个频段仿真结果

对比图 6(b)与图 6(c),在叶片长度为 1.29 m 的情况下(图 6(b)),最大多普勒频移大约出现在 70 kHz 处,而在叶片长度缩小为一半的情况下(图 6(c)),最大多普勒频移大约出现在 35 kHz 处。所以在转速与雷达载波频率均相同的情况下直升机的叶片越长,微多普勒特征就越明显,对应的多普勒频率也越大,可以对不同型号的直升机旋翼加以辨识,进而通过旋翼类别获取直升机的型号。

2.3 三叶片直升机叶片仿真

建立三叶片直升机旋翼模型如图 7 所示,与双叶片直升机旋翼模型不同的是它的 3 个叶片均为材质均匀的长方体薄片,均匀分布在圆形中轴上,叶片在 XOZ 平面内以 Y 轴为转轴逆时针旋转,具体的仿真参数如表 2 所示。

三叶片的直升机叶片 3 个频段的仿真结果如图 8 所示。由于所建模的叶片为材质均匀的长方体薄片,叶片上有无数的散射点在旋转,每个散射点与旋转中心的距离不同,对应的径向速度就不同,所以理论上应该形成一簇幅值不同的正弦曲线。微波频段的雷达接收到的回波主要是以强散射点的反射为主,在 3 GHz 雷达(图 8(a))所得到的回波多普勒图中波峰波谷的位置就会出现很多强亮点,这些强亮点叠加起来就好像形成一条亮线,形成闪烁,在图中可以清晰可见 1 号叶片的 2 次闪烁和 2 号叶片的 2 次闪烁以及 3 号叶片的 2 次闪烁,但叶片上其他散

射点的多普勒效应相对来说比较微弱，看不到叶片本身的结构特征。而太赫兹雷达各分辨单元的回波强度基本相同，对于叶片上微弱的散射点产生的微多普勒效应也清晰可见，与理论结果相吻合。与偶数叶片旋翼对比，奇数叶片旋翼的多普勒谱是明显不同的，偶数叶片产生围绕零多普勒谱的对称多普勒图形，但是奇数叶片产生的是围绕零多普勒谱的不对称多普勒图形，这与理论推导的公式也是一致的。

对比 3 幅仿真图像，当使用 3 GHz 频段的雷达时(图 8(a))所得到的回波时频分布图中正弦包络并不清晰，而雷达的频段在太赫兹频段时(图 8(b)和图 8(c))，可以看到清晰的正弦包络。在雷达载波频率从 3 GHz 上升到 120 GHz 和 220 GHz 时，最大多普勒频移从几千赫兹增加到十几万赫兹。这也验证了在转速与叶片长度均相同的情况下，雷达载波频率越大，微多普勒效应越强，120 GHz 和 220 GHz 雷达提取的微多普勒细节更丰富，使用太赫兹雷达可以实现对直升机旋翼的精确分类。

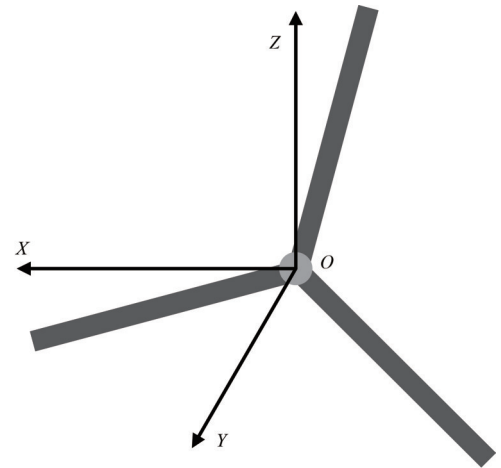


Fig.7 Blade modeling of tri-blade helicopter
图 7 三叶片直升机叶片建模

表 2 三叶片直升机叶片不同频段下仿真参数表

Table 2 Simulation parameter list of the blades of tri-blade helicopter under different frequencies

parameter	3 GHz band	120 GHz band	220 GHz band
blade length/m	2.02	2.02	2.02
rotation speed/rpm	1 000	1 000	1 000
radar incidence direction $\theta/^\circ$	90	90	90
radar incidence direction $\varphi/^\circ$	50	50	50
PRF/Hz	6 000	240 000	480 000

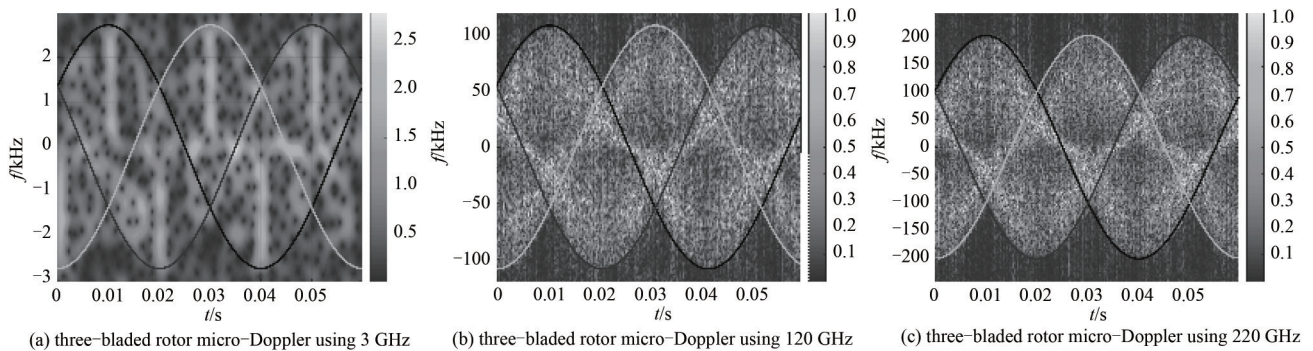


Fig.8 Simulation results of the blade of tri-blade helicopter at three frequencies

图 8 三叶片直升机叶片 3 个频段仿真结果

3 结论

本文通过对偶数叶片和奇数叶片的螺旋桨目标进行建模，分别使用微波波段 3 GHz 与太赫兹波段 120 GHz、220 GHz 的雷达对目标进行仿真分析，得到回波数据，并从目标的回波信号特征出发，利用短时傅里叶变换进行时频分析，对比分析目标与雷达参数对其多普勒效应的影响及调制关系，并利用时频分布图对目标的参数进行估计。通过实验分析可知：a) 偶数叶片与奇数叶片旋翼的微多普勒谱是不同的，偶数叶片产生围绕零多普勒谱的对称多普勒图形，奇数叶片产生的是围绕零多普勒谱的不对称多普勒图形；b) 在转速与雷达载波频率均相同的情况下直升机叶片的长度越长，目标的回波幅度也越强，微多普勒特征就越明显，对应的多普勒频率也越大；c) 在转速与直升机叶片长度均相同的情况下，雷达载波频率越高，尤其是使用太赫兹频段后，微多普勒效应比微波频段更明显，多普勒曲线也更加清晰，能够观察到更多在微波频段观察不到的叶片细节。

下一步将开展参数估计算法研究以及带旋翼的直升机太赫兹雷达仿真实验，深入研究微动特征提取技术，为后续的直升机目标分类与精细辨识奠定基础。

参考文献:

- [1] 杨琪,邓彬,王宏强,等. 太赫兹雷达目标微动特征提取研究进展[J]. 雷达学报, 2018,7(1):22-45. (YANG Qi,DENG Bin, WANG Hongqiang, et al. Advancements in research on micro-motion feature extraction in the Terahertz region[J]. Journal of Radars, 2018,7(1):22-45.)
- [2] 王瑞君,王宏强,庄钊文,等. 太赫兹雷达技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013,50(4):4-20. (WANG Ruijun,WANG Hongqiang,ZHUANG Zhaowen, et al. Research progress of Terahertz radar technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013,50(4):4-20.)
- [3] CHEN V C,LI F Y,HO S S. Micro-Doppler effect in radar-phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006,42(1):2-21.
- [4] CHEN V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics:a review[J]. Proceedings of SPIE—the International Society for Optical Engineering, 2003(5102):240-249.
- [5] CHEN V C,LI F. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. IEE Proceedings on Radar,Sonar and Navigation, 2003,150(4): 271-276.
- [6] 张群,胡健,罗迎,等. 微动目标雷达特征提取、成像与识别研究进展[J]. 雷达学报, 2018,7(5):531-547. (ZHANG Qun,HU Jian,LUO Ying, et al. Research progresses in radar feature extraction,imaging and recognition of target with micro-motions[J]. Journal of Radars, 2018,7(5):531-547.)
- [7] 毕严先,杜瑞,焦栋,等. 太赫兹雷达的人体微多普勒特征[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(5):760-764. (BI Yanxian, DU Rui, JIAO Dong, et al. Human micro-Doppler characteristics of terahertz radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(5):760-764.)
- [8] 谭源泉,王厚军,李良超,等. 基于旋翼结构微多普勒特征的目标识别方法[J]. 电波科学学报, 2013,28(1):50-55. (TAN Yuanquan, WANG Houjun, LI Liangchao, et al. Target identification method based on rotor structure micro-Doppler characteristics[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013,28(1):50-55.)
- [9] 宋晨,周良将,吴一戎,等. 基于时频集中度指标的多旋翼无人机微动特征参数估计方法[J]. 电子与信息学报, 2020,42(8): 2029-2036. (SONG Chen,ZHOU Liangjiang, WU Yirong, et al. An estimation method of micro-movement parameters of UAV based on the concentration of time-frequency[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2020,42(8):2029-2036.)
- [10] 赵紫蕙. 微多普勒效应在飞机目标分类中的应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (ZHAO Zihui. Research on micro-Doppler effects applied in the classification of aircraft targets[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2014.)
- [11] CHEN Victor C. 雷达中的微多普勒效应[M]. 北京:电子工业出版社, 2013. (CHEN Victor C. The micro-Doppler effect in radar[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2013.)
- [12] 符婷. 基于微多普勒特征的目标分类方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011. (FU Ting. Research on classification of target based on micro-Doppler[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2011.)
- [13] 李粮余. 基于微多普勒谱图的多旋翼无人机识别[D]. 成都:电子科技大学, 2021. (LI Liangyu. Multi-rotor UAV recognition based on micro-Doppler spectroscopy[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2021.)
- [14] 郭琨毅,牛童瑶,屈泉西,等. 散射中心的时频像特征研究[J]. 电子与信息学报, 2016,38(2):478-485. (GUO Kunyi,NIU Tongyao,QU Quanyou, et al. Research on signatures of scattering centers shown in time-frequency representation[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016,38(2):478-485.)

作者简介:

秦晓雨(2000-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理.email:1179056421@qq.com.

董俊(1986-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为物联网技术与射频传感系统.

邓彬(1981-),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为雷达信号处理与微动目标指示.

王宏强(1970-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为雷达信号处理.