

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2024.01.009

电磁涡旋波斜平面旋转目标运动参数估计方法

李含嫣¹, 李勇², 李艳¹

(1. 西安职业技术学院, 西安 710077; 2. 西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710071)

摘要:相较于传统平面电磁波,电磁涡旋波具有螺旋分布的波前相位、特殊的环形天线方向图、独特的涡旋方位维信息等特点。近几年来,得益于其特殊的物理特性,电磁涡旋波在目标运动参数估计领域受到了广泛的关注,其目标多普勒效应具有线性多普勒与旋转多普勒二维多普勒信息。现有参数估计方法实现了运动平面与涡旋天线口面平行时的目标旋转参数测量。然而,目标斜平面旋转下,现有方法将不再适用。基于电磁涡旋波所提供的目标旋转多普勒信息,提出一种斜平面旋转目标运动参数估计方法。该方法推导了一般形式下旋转目标的多普勒信号模型,通过分析斜平面下的多普勒信息特征,建立了目标运动参数表征式,给出了斜平面目标旋转参数的计算方法。最后通过仿真分析,验证了模型及参数计算方法的正确性及有效性。

关键词:电磁涡旋波;斜运动平面;运动参数估计

中图分类号:V474

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2024)01-0053-07

A motion parameter estimation method for rotating target with oblique incidence using electromagnetic vortex wave

LI Hanyan¹, LI Yong², LI Yan^{1,2}

(1. Xi'an Vocational and Technical College, Xi'an 710077, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Compared to the conventional plane electromagnetic wave, vortex electromagnetic wave has some unique characteristics such as rational phase front, circular beam pattern, and orbital angular momentum information. Benefit from these special characteristics, vortex electromagnetic wave is widely concerned in recent years for applications on target motion parameter estimation. The target Doppler effect of vortex electromagnetic wave is composed by two parts including the linear Doppler shift and the rotational Doppler shift. Current parameter estimation method achieves measurement of the target rotation parameters under the case that the target moving plane is parallel to the antenna port surface. However, under oblique motion plane, current method is no longer suitable. In this paper, a rotation parameter estimation method under oblique motion plane case is proposed based on the rotational Doppler shift of vortex electromagnetic wave. The Doppler signal model of rotational target in general form is derived. By analyzing the Doppler information, the expression of target motion parameters is built. Then, the calculation method of rotation parameters under oblique incidence is proposed. Finally, according to the simulation analysis, the effectivity of the proposed method is verified.

Key words: vortex electromagnetic wave; oblique motion plane; motion parameter estimation

收稿日期:2023-07-11; 修回日期:2023-11-09

基金项目:西安职业技术学院2022年度科研项目基金(编号:2022YB04)

引用格式:李含嫣,李勇,李艳.电磁涡旋波斜平面旋转目标运动参数估计方法[J].空间电子技术,2024,21(1):53-59. LI H Y, LI Y, LI Y. A motion parameter estimation method for rotating target with oblique incidence using electromagnetic vortex wave [J]. Space Electronic Technology, 2024, 21(1): 53-59.

0 引言

由于其特殊的螺旋波前相位以及轨道角动量调制信息方式^[1],电磁涡旋波近年来在通信、遥感领域获得了广泛的关注^[2-4]。其中在微波遥感领域,电磁涡旋波已被应用于合成孔径雷达、实孔径二维成像、干涉 SAR 等方向^[5-7]。研究表明,多模态涡旋波可提供全新的涡旋方位维自由度。文献^[5]首次提出了电磁涡旋波探测原理与信号模型,并且通过微波暗室实验,验证了电磁涡旋波探测能力。此外,与传统合成孔径雷达相结合,电磁涡旋 SAR 性能通过车载平台得以验证,其结果表明,电磁涡旋 SAR 在近距离较传统体制可获得更高的方位分辨能力^[6]。结合电磁涡旋波,多模态无物理基线下的干涉 SAR 目标三维重构算法被提出^[7]。

在实际雷达应用中,目标往往处于运动状态,而上述研究都忽略了目标运动所产生的多普勒效应的影响。研究表明在电磁涡旋波照射下,目标具有线性多普勒与旋转多普勒二维多普勒信息。旋转多普勒信息最初由 Courtial^[8]通过毫米波频段涡旋波照射旋转目标观察得到。结合涡旋波所具有特殊二维多普勒信息特性,文献^[9]分析了运动平面与涡旋天线口面平行时的旋转目标转速测量方法,文献^[10-12]给出了速度、加速度模型下的目标参数估计方法。当目标运动平面与天线口面存在夹角时,现有多普勒频率模型将不再适用。因此,上述方法无法获得目标的准确运动状态。

本文提出一种电磁涡旋波旋转目标倾斜平面下的运动参数估计方法。第 1 节给出了电磁涡旋波目标多普勒信号模型,第 2 节结合倾斜平面条件,给出了旋转目标的参数估计方法,第 3 节通过仿真实验验证了方法的有效性,第 4 节对本文进行了总结。

1 电磁涡旋波目标多普勒信号模型

通常来说,微波频段电磁涡旋波的产生方法可归纳为 4 个大类:第 1 类方法为准光学方法,也可称作平面波转化法,通过对入射平面波进行一系列处理,使得波束在方位角上产生线性相位滞后而得到电磁涡旋波^[13];第 2 类方法为高次模贴片法,通过工作于高阶谐振模式的圆极化贴片天线来产生非零模式的电磁涡旋波^[14];第 3 类方法为超表面调控法,该方法将超材料加载至天线从而控制波前相位产生电磁涡旋波^[15];第 4 类方法即环形阵列法,通过给阵列单元馈入不同的相位来生成涡旋波

束^[16-17]。上述产生方法下,电磁涡旋波空间信号模型一致,由于环形阵列具有构型简单,工程易实现等特点,这里以该方式为例,其在直角坐标系的构型如图 1 所示。其中阵面位于 XOY 平面内, O 点为阵面中心,相邻两个阵元激励相位差为 $2\pi l/N$, N 为均匀阵中阵元数目, l 为轨道角动量模式数,即模态数。如图 1 所示,坐标 (x_0, y_0, z_0) 处的任意散射点 P 以 (v_x, v_y, v_z) 运动,则 t 时刻 P 的位置如式(1)所列。

$$(x_p(t), y_p(t), z_p(t)) = (x_0 + v_x t, y_0 + v_y t, z_0 + v_z t) \quad (1)$$

式(1)中, $x_p(t), y_p(t), z_p(t)$ 分别为 t 时刻 P 的 X, Y, Z 三轴坐标。

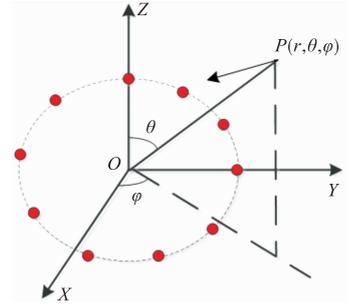


图 1 电磁涡旋波产生阵列构型示意图

Fig. 1 The array configuration generating the electromagnetic vortex wave

极坐标下, t 时刻 P 的位置如式(2)所列。

$$\begin{pmatrix} r_p(t) \\ \theta_p(t) \\ \varphi_p(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{x_p(t)^2 + y_p(t)^2 + z_p(t)^2} \\ \arcsin(\sqrt{x_p(t)^2 + y_p(t)^2}/r_p(t)) \\ \arctan(y_p(t)/x_p(t)) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(2)中, $r_p(t), \theta_p(t), \varphi_p(t)$ 分别代表斜距、俯仰角、方位角。

因此,理想阵元条件下,当阵元数大于 4 倍模态数时,散射点 P 的双程电场矢量表示如式(3)所列^[5]。

$$E(p) = A \frac{e^{i2kr_p(t)}}{r_p(t)} e^{i2l\varphi_p(t)} J_l(k a \sin\theta_p(t))^2 = A \frac{e^{i2\Phi(t)}}{r_p(t)} J_l(k a \sin\theta_p(t))^2 \quad (3)$$

式(3)中, A 为常数项, $k = 2\pi f_0/c$ 为波数, a 为阵列半径, $\Phi(t) = kr_p(t) + l\varphi_p(t)$ 。散射点 P 的多普勒频率表示如式(4)所列。

$$f_D = \frac{1}{2\pi} 2\Phi'(t) = \frac{2f_0}{c} r_p'(t) + \frac{l}{\pi} \varphi_p'(t) = f_L + f_A \quad (4)$$

式(4)中, f_L 与传统平面波雷达类似为径向多普勒频率^[15,18], f_A 为旋转多普勒频率。

2 旋转目标运动参数估计方法

当目标在任意平面做圆周运动时,其轨迹与天线的关系如图2所示, O' 为参考系 $O'X'Y'Z'$ 的参考点,该参考点与 $OXYZ$ 参考系平行。目标参考系 $O'xyz$ 参考点也为 O' ,目标在 $xO'y$ 平面以 z 轴为中心匀速旋转,旋转半径为 r_a ,旋转频率为 Ω 。目标参考系下 t 时刻 P 的坐标如式(5)所列。

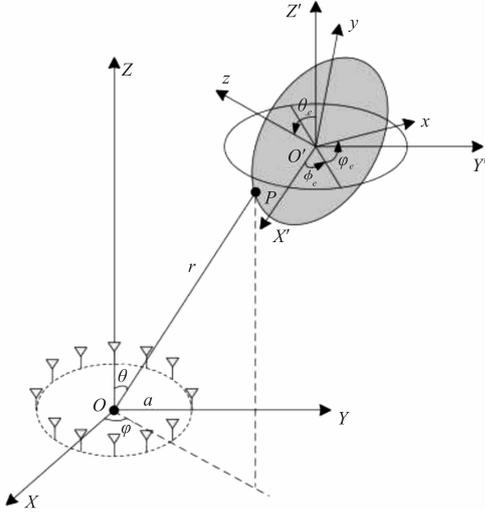


图2 任意平面圆周运动几何模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of any planar circular motion geometry

$$\begin{aligned} (x_{pl}(t), y_{pl}(t), z_{pl}(t)) = & \\ (r_a \cos(2\pi\Omega t), r_a \sin(2\pi\Omega t), 0) \end{aligned} \quad (5)$$

假设参考系 $O'X'Y'Z'$ 与目标参考坐标系间的欧拉角为 $(\phi_e, \theta_e, \varphi_e)$,则目标参考坐标系与参考系 $O'X'Y'Z'$ 间的转换矩阵如式(6)所列。

$$(x_p(t), y_p(t), z_p(t))^T =$$

$$R_{in}(x_{pl}(t), y_{pl}(t), z_{pl}(t))^T + (x_c, y_c, z_c)^T \quad (6)$$

式(6)中 R_{in} 的表示如式(7)所列。

$$R_{in} = \begin{bmatrix} \cos\phi_e & -\sin\phi_e & 0 \\ \sin\phi_e & \cos\phi_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ 0 & \sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\varphi_e & -\sin\varphi_e & 0 \\ \sin\varphi_e & \cos\varphi_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

当散射点在阵面正上方以一定倾斜角旋转,如图3所示。 O' 坐标可表示为 $(0,0,z_c)$,欧拉角为 $(0, \theta_e, 0)$ 。将上述参数带入式(6)可得式(8)、式(9)、式(10)。

$$x_p(t) = r_a \cos(2\pi\Omega t) \quad (8)$$

$$y_p(t) = \cos\theta_e r_a \cos(2\pi\Omega t) \quad (9)$$

$$f_A = \frac{l}{\pi} \varphi_p'(t) = \frac{4l\Omega \cos\theta_e}{1 + \cos^2\theta_e + \sin^2\theta_e \cos(4\pi\Omega t)} \quad (10)$$

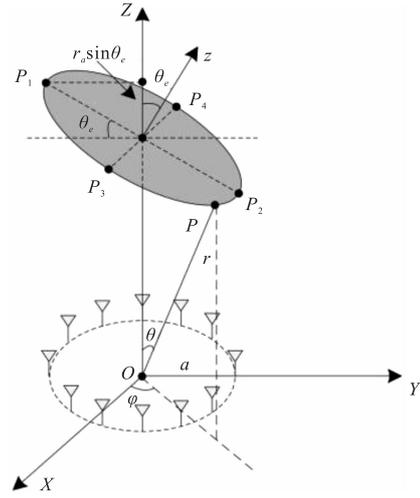


图3 $(0,0,z_c)$ 下圆周运动几何模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of the circular motion geometry of $(0,0,z_c)$

此时,当 r_a 在 $X'O'Y'$ 平面上的投影远小于 $r_p(t)$ 时, $r_p(t)$ 的近似表示如式(11)所列。

$$r_p(t) = r_{aLos} \sin(2\pi\Omega t) + r_0 \quad (11)$$

式(11)中, r_{aLos} 为散射点运动过程中 r_a 的最大投影长度, $r_0 = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2}$ 。因此,径向多普勒频率可表示为式(12)。

$$f_L = \frac{4\pi f_0}{c} r_{aLos} \Omega \cos(2\pi\Omega t) \quad (12)$$

当 r_a 远小于 z_c 时, r_{aLos} 可近似为如式(13)所列。

$$r_{aLos} \approx r_a \sin\theta_e \quad (13)$$

将 r_{aLos} 近似值带入式(13), f_L 可表示为如式(14)所列。

$$f_L = \frac{4\pi f_0}{c} r_a \sin\theta_e \Omega \cos(2\pi\Omega t) \quad (14)$$

将式(14)和式(10)带入式(4),可得如式(15)所列。

$$f_D = \frac{4\pi f_0}{c} r_a \sin\theta_e \Omega \cos(2\pi\Omega t) + \frac{4l\Omega \cos\theta_e}{1 + \cos^2\theta_e + \sin^2\theta_e \cos(4\pi\Omega t)} \quad (15)$$

对式(15)求最小值如式(16)所列。

$$f_{Dmin} = -\frac{4\pi f_0}{c} r_a \sin\theta_e \Omega + 2l\Omega \cos\theta_e \quad (16)$$

如式(16)所示,最小值以 Ω 的频率出现,因此当观测到最小值周期后即可得到旋转速度。当 $t = \frac{2k}{2\Omega} k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$,多普勒频率 f_{Dmid} 表示如式(17)所列。

$$f_{Dmid} = \frac{4\pi f_0}{c} r_a \sin\theta_e \Omega + 2l\Omega \cos\theta_e \quad (17)$$

将式(16)与式(17)联立即可求得旋转半径与倾斜角如式(18)所列。

$$\begin{cases} \theta_e = \arccos\left(\frac{f_{Dmid} + f_{Dmin}}{4l\Omega}\right) \\ r_a = \frac{(f_{Dmid} - f_{Dmin})c}{8\pi f_0 \sin(\theta_e)\Omega} \end{cases} \quad (18)$$

3 仿真与验证

为了验证算法估计性能,下面给出不同条件下的仿真结果,探测系统载频为 10 GHz,脉冲重复频率为 1 kHz。第一个实验中,目标以 0.03 m 的半径做匀速圆周运动,运动平面与阵面间的倾角 $\theta_e = 60^\circ$,旋转中心距离阵面中心 0.3 m,旋转频率 $\Omega = 6$ Hz。如图 4 所示,给出了不同模态涡旋波下的目标多普勒频率变化曲线。径向多普勒与模态数无关,不同模态下保持一致,而随着模态数变大,旋转多普勒频率的变化范围在扩大,对合成多普勒频率的影响增强。此外,与上节分析相同,可以看到合成多普勒频率的最小值以 Ω 的频率重复出现。因此,可以通过计算最小值周期的方法获得旋转目标的旋转频率。

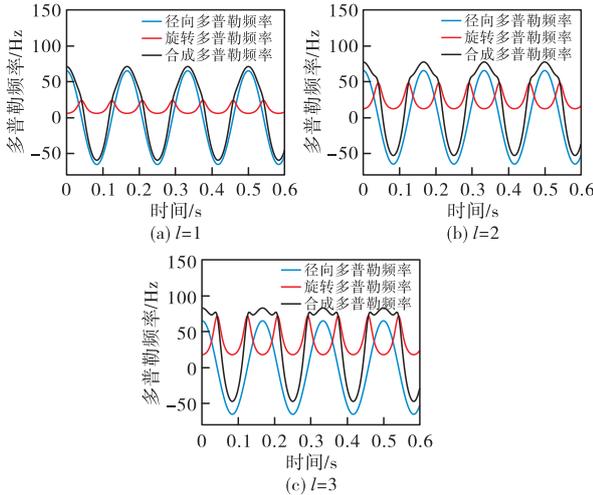


图 4 不同模态目标多普勒频率变化曲线

Fig. 4 Doppler frequency variation curve of targets with different modalities

为了验证本文提出的参数估计方法,首先需要利用时频分析工具对回波时频曲线进行测量。本文选取常规短时傅里叶变换方法进行时频分析。如图 5 所示,给出了实验一中不用模态回波的短时傅里叶变换结果。短时傅里叶变换较好地反应了目标的合成多普勒变化曲线,通过最小值周期重复频率的估计,即可获得旋转速度的估计,此外通过

f_{Dmid} 以及 f_{Dmin} 的获取,联立方程计算得到目标旋转倾角、旋转半径。如表 1 所列,给出了实验一中目标不同模态的估计结果,其中 $\tilde{\theta}_e$ 、 $\tilde{\Omega}$ 、 \tilde{r}_a 为参数 θ_e 、 Ω 、 r_a 的估计值, $e_{\tilde{\theta}_e}$ 、 $e_{\tilde{\Omega}}$ 、 $e_{\tilde{r}_a}$ 为对应的估计误差。由表 1 以及图 4 可知,模态数对目标旋转频率估计的影响不大,而随着模态数的增大,旋转多普勒频率 f_A 动态范围变大, $e_{\tilde{\theta}_e}$ 、 $e_{\tilde{r}_a}$ 都显著减小。因此,为了提高估计精度,应尽量使用高模态电磁涡旋波。

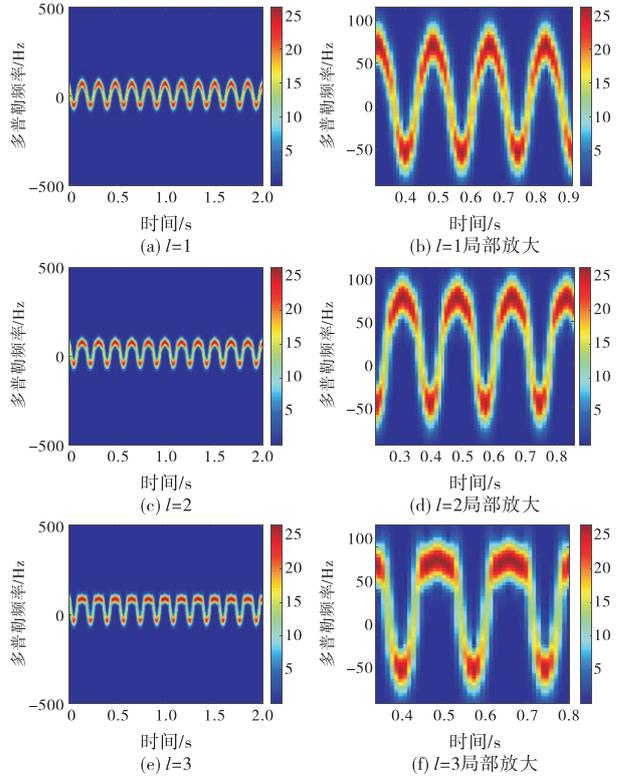


图 5 不同模态短时傅里叶变换结果

Fig. 5 Time-frequency analysis results of different OAM mode

表 1 不同模态涡旋波实验一目标估计结果

Tab. 1 Estimation results of experiment 1 with different OAM modes

模态数	1	2	3
f_{Dmid}/Hz	72.5	76.5	84.3
f_{Dmin}/Hz	-56.8	-49	-44
$\tilde{\Omega}/\text{Hz}$	6.04	6.04	6.05
$e_{\tilde{\Omega}}/\%$	0.67	0.67	0.83
$\tilde{\theta}_e/(\circ)$	49.57	55.41	56.1
$e_{\tilde{\theta}_e}/\%$	17	7.7	6.5
\tilde{r}_a/m	0.0336	0.0304	0.0303
$e_{\tilde{r}_a}/\%$	12	1.3	1

在实验一中,我们分析了模态数对旋转参数估

计的影响。实验二主要分析倾角对估计结果的影响,目标运动参数除倾角外,与实验一相同,涡旋波模态数 $l=3$ 。如图6所示,给出了不同倾角下的目标多普勒频率变化曲线。结合图4(c)结果可知,倾角越小,合成多普勒越接近于径向多普勒曲线,倾角越大,由于旋转多普勒最大值显著变大,合成多普勒畸变较大。

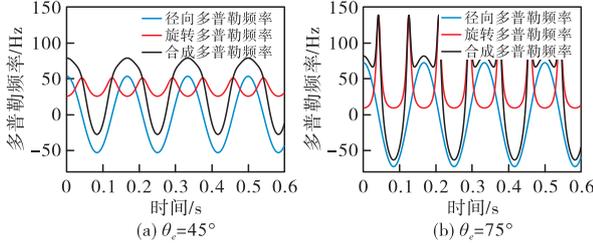


图6 不同倾角下的目标多普勒频率变化曲线

Fig. 6 Target Doppler frequency variation curves at different inclination angles

如图7所示,给出了实验二中不用倾角回波的短时傅里叶变换结果。短时傅里叶变换都可较好地反应目标的合成多普勒变化曲线,与实验一类似,通过最小值周期重复频率的估计,即可获得旋转速度的估计,此外通过 f_{Dmid} 以及 f_{Dmin} 的获取,即可得到目标旋转倾角、旋转半径。表2给出了实验二中目标不同倾角的估计结果。由表2以及表1第3栏信息可知,倾角对目标旋转频率估计的影响不大,而随着倾角增大, $e_{\tilde{\theta}_e}$ 、 $e_{\tilde{r}_a}$ 减小,观察图6可知,大倾角下,由于 f_A 动态范围更大,估计精度更高。

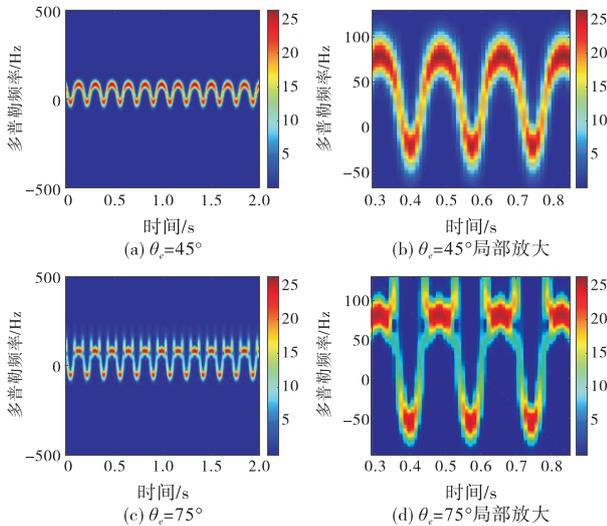


图7 不同倾角短时傅里叶变换结果

Fig. 7 Time-frequency analysis results of different inclination angles

表2 不同倾角实验二目标估计结果

Tab. 2 Estimation results of experiment 2 with different inclination angles

倾角 / ($^\circ$)	45	75
f_{Dmid}/Hz	80.3	80.39
f_{Dmin}/Hz	-25.5	-56.9
$\tilde{\Omega}/\text{Hz}$	6.04	6.04
$e_{\tilde{\theta}_e}/\%$	0.67	0.67
$\tilde{\theta}_e/(\text{^\circ})$	40.96	71.11
$e_{\tilde{\theta}_e}/\%$	8.9	5.1
\tilde{r}_a/m	0.0318	0.0304
$e_{\tilde{r}_a}/\%$	6	1.3

实验三主要分析旋转频率对估计结果的影响,目标旋转半径、中心距阵面与上述实验相同,倾角 $\theta_e = 45^\circ$,涡旋波模态数 $l=3$ 。如图8所示,给出了不同旋转频率下的目标多普勒频率变化曲线。结合图6(a)结果可知,旋转频率越高,多普勒频率动态范围越大。

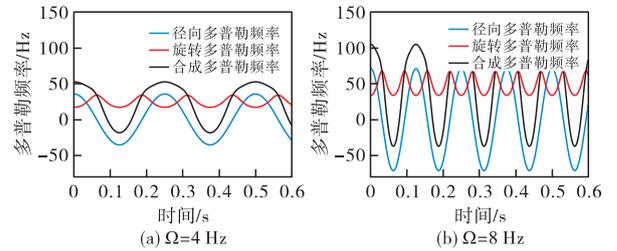


图8 不同旋转频率下的目标多普勒频率变化曲线

Fig. 8 Target Doppler frequency variation curves at different rotational frequencies

如图9所示,给出了实验三中不同旋转频率回波的短时傅里叶变换结果。

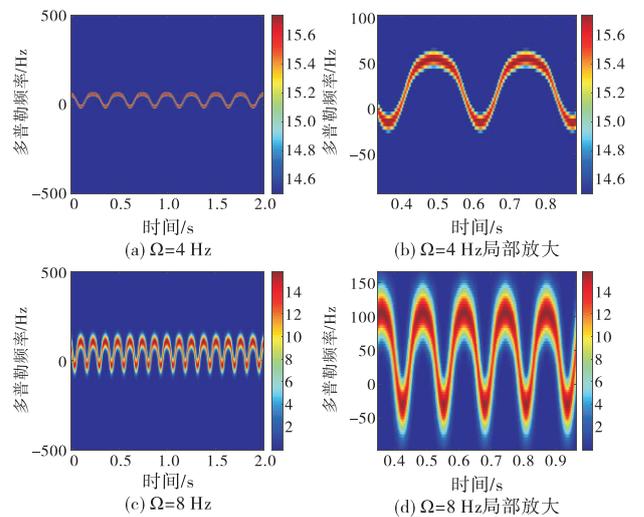


图9 不同旋转频率短时傅里叶变换结果

Fig. 9 Time-frequency analysis results of different rotation frequencies

如图 9 所示,短时傅里叶变换都可较好地反应目标的合成多普勒变化曲线,通过 f_{Dmid} 以及 f_{Dmin} 的获取,即可得到目标的旋转倾角、旋转半径。表 3 给出了实验三中目标不同倾角的估计结果。由表 3 以及表 2 第一栏信息可知,目标旋转频率的估计误差随旋转频率改变而明显变化,而随着旋转频率增大, $e_{\tilde{\theta}_e}$ 、 $e_{\tilde{r}_a}$ 增大,观察图 8 可知,大旋转频率下,合成多普勒 f_D 变化速率更快,瞬时变化率变大,此时短时傅里叶变换参数估计精度变差,影响最终目标运动参数估计结果。

表 3 不同旋转频率实验三目标估计结果
Tab.3 Estimation results of experiment 3 with different rotation frequencies

$\tilde{\Omega}/\text{Hz}$	4	8
f_{Dmid}/Hz	52.9	103
f_{Dmin}/Hz	-17.6	-28.4
$\tilde{\Omega}/\text{Hz}$	4.03	8.04
$e_{\tilde{\Omega}}/\%$	0.75	0.5
$\tilde{\theta}_e/(\circ)$	43.38	39.42
$e_{\tilde{\theta}_e}/\%$	3.6	12.4
\tilde{r}_a/m	0.0303	0.0304
$e_{\tilde{r}_a}/\%$	1	1.3

结合实验一、二、三分析可知,在同样的旋转频率下,模态数越高、倾角越大,旋转多普勒频率动态范围越大,此时本文所提方法估计精度越高。而旋转频率较高时,受时频对应关系约束,瞬时频率估计精度变差,使得本文方法整体精度变差。

4 结论

文章基于电磁涡旋波所提供的目标旋转多普勒信息,提出一种斜平面旋转目标运动参数估计方法。该方法推导了一般形式下旋转目标的多普勒信号模型,通过分析斜平面下的多普勒信息特征,建立了目标运动参数表征式,给出了斜平面旋转参数的计算方法。最后通过仿真分析,验证了模型及参数计算方法的正确性及有效性。由分析可知,为了提高目标旋转参数的估计精度,需要使用较高模态的涡旋波。此外,目标运动所在平面与阵面间的夹角越大,夹角估计精度越高,目标旋转频率越高,估计误差越大。受限于现有时频分析方法较高信噪比需求的约束,本文未考虑信噪比较低以及存在干扰情况下的参数问题,上述方面还有待进一步的

研究。

参考文献:

- [1] TENNANT A, BAI Q, ALLEN B. Experimental circular phased array for generating OAM radio beams [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(20):1414-1415.
- [2] MAHMOULI F E, WALKER S D. 4-gbps uncompressed video transmission over a 60-GHz orbital angular momentum wireless channel [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(2):223-226.
- [3] TAMBURINI F, THIDÉ B, MARI E, et al. Reply to Comment on ‘Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: First experimental test’ [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(11):118002.
- [4] HUANG W Q, LI Y, WEI D, et al. Research on physical layer security scheme based on OAM [M] // *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2019:573-586.
- [5] LIU K, CHENG Y Q, YANG Z C, et al. Orbital-angular-momentum-based electromagnetic vortex imaging [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14:711-714.
- [6] BU X X, ZHANG Z, CHEN L Y, et al. Implementation of vortex electromagnetic waves high-resolution synthetic aperture radar imaging [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(5):764-767.
- [7] BU X X, ZHANG Z, CHEN L Y, et al. Synthetic aperture radar interferometry based on vortex electromagnetic waves [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:82693-82700.
- [8] COURTIAL J, DHOLAKIA K, ROBERTSON D A, et al. Measurement of the rotational frequency shift imparted to a rotating light beam possessing orbital angular momentum [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(15):3217-3219.
- [9] ZHAO M Y, GAO X L, XIE M T, et al. Measurement of the rotational Doppler frequency shift of a spinning object using a radio frequency orbital angular momentum beam [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11):2549-2552.
- [10] ZHENG J Y, ZHENG S L, SHAO Z L, et al. Rotational Doppler effect based on the radio orbital angular momentum wave [C] // 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC). [S. l.]: IEEE, 2017.
- [11] ZHENG J Y, ZHENG S L, SHAO Z L, et al. Analysis of rotational Doppler effect based on radio waves carrying orbital angular momentum [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(16):164907.
- [12] WANG Y Z, WANG Y L, GUO K, et al. Detecting targets’ longitudinal and angular accelerations based on vortex electromagnetic waves [J]. *Measurement*, 2022,

- 187:110278.
- [13] 郭忠义,汪彦哲,郑群,等. 涡旋电磁波天线技术研究进展[J]. 雷达学报,2019,8(5):631-655.
- [14] 姜山. 射频涡旋电磁波辐射机理研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020.
- [15] XU H X, HU G W, LI Y, et al. Interference-assisted kaleidoscopic meta-plexer for arbitrary spin-wavefront manipulation[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 1141-1150.
- [16] 董超,田嘉. 深空着陆器双程多普勒测量设计方法[J]. 空间电子技术,2018,15(6):70-74.
- [17] XU S, XU H X, WANG Y Z, et al. Circularly polarized antenna array with decoupled quad vortex beams[J]. Nanomaterials, 2022, 12(17):3083.
- [18] 汤礼建,黄建冲,王强. 一种基于瞬时自相关的多普勒补偿方法研究[J]. 空间电子技术,2008,5(4):89-92+101.

作者简介:李含嫣(1989—),陕西西安人,硕士研究生,讲师。主要研究方向为信号与信息处理。E-mail: lihanyan8916@163.com