

调频连续波雷达自旋目标干涉三维成像方法

罗 迎, 李汪洋[✉], 孙玉雪

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 相比脉冲体制雷达,调频连续波雷达具有功耗低、成本低、重量轻等优点,发展前景广阔,同时雷达三维成像技术可为目标的分类识别提供重要的特征信息。但是自旋目标在调频连续波信号条件下会产生一维距离走动以及回波相位的改变,这对干涉三维成像产生了影响。针对自旋目标在线性调频连续波雷达中的干涉三维成像技术进行了研究,分析了自旋产生的回波调制效应与相位变化,结合分析所得的调制前后目标在距离-慢时间像上微动特征的变化关系与扩展 Hough 变换提取的微动参数,解决了干涉三维成像中由于回波调制效应导致的目标坐标畸变问题,提出了基于调频连续波雷达的自旋目标干涉三维成像的具体处理方法。仿真实验证明,所提方法有效提高了自旋目标的干涉三维成像质量。

关键词 调频连续波雷达;自旋目标;微多普勒效应;干涉三维成像

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.01.012

中图分类号 TG959 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)01-0073-06

Interferometric 3D Imaging for Rotating Targets in LFM CW Radar

LUO Ying, LI Wangyang[✉], SUN Yuxue

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radar has many advantages, such as low power consumption, low cost, light in weight and so on. It has a broad prospect of development. Meanwhile, three-dimensional (3D) imaging technology of radar can provide important feature information for target recognition. However, the rotating targets will induce the deviation of the range profile and phase changing in FMCW signal, which has an effect on the interferometric 3D imaging. In this paper, the interferometric 3D imaging technique for rotating targets in LFM CW (Linear FMCW) radar is studied. The echo modulation effect and phase changing caused by rotation is analyzed. The distortion of coordinates caused by echo modulation effect in interferometric 3D imaging is solved. The method of interference 3D imaging processing in LFM CW radar for rotating targets is proposed. Simulation results show that the proposed method improves the interferometric 3D imaging results of the rotating targets effectively.

Key words: LFM CW radar; rotating targets; micro-doppler effect; interferometric 3D imaging

线性调频连续波(Linear Frequency Modulated Continuous Wave, LFM CW)体制的雷达相比于传

收稿日期: 2017-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(61571457);陕西省青年科技新星计划项目(2016KJXX-49)

作者简介: 罗 迎(1986—),男,湖南益阳人,副教授,主要从事雷达成像与目标识别研究。E-mail:luoying2002521@163.com

通讯作者: 李汪洋(1994—),男,陕西商洛人,硕士生,主要从事雷达成像研究。E-mail:Li_w_y_ky@163.com

引用格式: 罗迎,李汪洋,孙玉雪.调频连续波雷达自旋目标干涉三维成像方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(1):73-78.
LUO Ying, LI Wangyang, SUN Yuxue. Interferometric 3D Imaging for Rotating Targets in LFM CW Radar[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(1): 73-78.

统的脉冲雷达,具有峰值功率低、无距离盲区,接收机灵敏度高、距离分辨能力强、体积小、结构简单、截获率低^[1-2]等特点。因此在对雷达体积大小、功耗等有要求的情况下(例如车载雷达),LFMCW 雷达具有明显的优势。

干涉式逆合成孔径雷达(Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar, InISAR)可以实现对空中目标高精度的三维成像^[3]。相比于传统的成像技术,其对目标姿态变化不敏感^[4-5],可为目标识别提供更全面、更稳定的目标信息^[6-7]。

自从微动及微多普勒的概念被 Victor C. Chen 正式引入雷达观测领域,微多普勒效应成为了研究的一大热点。目标的旋转、振动等微小的运动会产生微多普勒效应^[8],对于微动目标使用距离-多普勒(Range-Doppler, RD)算法进行成像时,由于雷达发射的脉冲重复频率有限,在成像所需转角内回波脉冲数量过少,ISAR 成像质量并不理想^[9];而其他的 ISAR 成像方法,如 Randon-Wigner 变换的成像方法^[10]、基于经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的成像方法^[11]等,破坏了信号的相位信息,基于复 ISAR 像进行干涉处理的 InISAR 三维成像方法并不能直接进行使用。因此,本文针对基于 LFMCW 的 L 型天线结构干涉三维成像系统开展了研究。

1 InISAR 三维成像模型

图 1 为 L 型天线 InISAR 三维成像系统,UVW 为雷达坐标系,xyz 为参考坐标系。收发一体天线 A 位于雷达坐标系原点,接收天线 B、C 分别位于 U、W 轴方向且与 A 天线相距 L。O 点为参考坐标系的原点,其在雷达坐标系坐标为(U_0, V_0, W_0),设 P 点为雷达视野中一自旋目标,其在雷达坐标系的坐标为(U_P, V_P, W_P),在参考坐标系的坐标为(x_P, y_P, z_P)。

天线发射线性调频锯齿波信号的表达式为:

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp(j2\pi(f_c t + \frac{1}{2}\mu\hat{t}^2)) \quad (1)$$

$$s_{iA}(\hat{t}, t_m) = s_r(\hat{t}, t_m) s_{\text{refA}}^*(\hat{t}, t_m) = \sigma_P \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{AP}(t)/c}{T_p}\right) \cdot \exp(j(-\frac{4\pi}{c}\mu(\hat{t} - \frac{2R_{\text{refA}}}{c})R_{\Delta AP}(t_m) - \frac{4\pi}{c}f_c R_{\Delta AP}(t_m) + \frac{4\pi\mu}{c^2}R_{\Delta AP}^2(t_m))) \cdot \exp(j(-\frac{4\pi\mu v_{rA}(t_m)}{c}\hat{t}^2 + \frac{4\pi f_c v_{rA}(t_m)}{c}\hat{t})) \cdot \exp(j(-\frac{8\pi\mu R_{AP}(t)v_{rA}(t_m)}{c^2}\hat{t} + \frac{4\pi\mu v_{rA}^2(t_m)}{c^2}\hat{t}^2)) \quad (5)$$

式中: $R_{\Delta AP} = R_{AP} - R_{\text{refA}}$ 。由于上式中最后一项很小,因此在后面的分析中将该项忽略。

2 自旋目标干涉三维成像分析

2.1 距离-慢时间域回波相位信息分析

对式(5)关于快时间做傅里叶变换后,回波信号

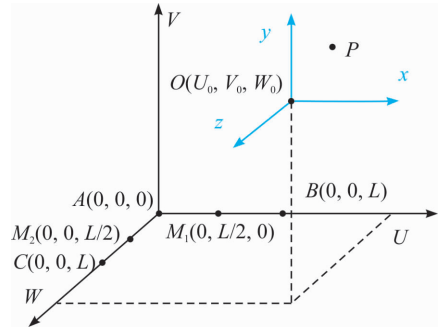


图 1 L 型天线三维成像系统

式中: f_c 为发射信号载频; T_p 为脉冲宽度由于发射信号为 LFMCW 信号,因此 T_p 也为信号的脉冲重复间隔; μ 为调频率; \hat{t} 为雷达信号快时间; t_m 为慢时间, $t_m = mT_p$; t 为全时间且有 $t = \hat{t} + mT$, m 为脉冲序号, $m = 0, 1, 2, \dots, M-1$, 其中 M 为发射脉冲总数。设目标 P 的散射系数为 σ_P 。则以天线 A 为例,目标回波信号可分别表示为:

$$s_{rA}(\hat{t}, t_m) = \sigma_P \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{AP}(t)/c}{T_p}\right) \cdot$$

$$\exp(j2\pi(f_c(t - \frac{2R_{AP}(t)}{c}) + \frac{1}{2}\mu(\hat{t} - \frac{2R_{AP}(t)}{c})^2)) \quad (2)$$

式中: c 为光速; R_{AP} 为 t 时刻 P 到天线 A 的距离,这里假设对回波已经完成平动补偿,即等效为目标仅存在微动运动。由于 LFMCW 信号脉冲宽度较长,目标在一次脉宽的时间内的位移仍不能忽略,将第 m 个脉冲宽度内 P 到天线 A 的距离表达式写为:

$$R_{AP}(t) = R_{AP}(t_m) + v_{rA}(t)\hat{t} \quad (3)$$

式中: v_{rA} 为 P 到 A 天线的径向上的微动速度,在一次回波时长内的径向速度变化较小,这里取一次回波内 v_{rA} 为常数,即 $v_{rA}(t) = v_{rA}(t_m)$ 。

取 O 点为参考点,以 O 点到各天线的距离为参考距离^[12],各参考信号可表示为:

$$S_{\text{refA}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{\text{refA}}/c}{T_p}\right) \cdot$$

$$\exp(j2\pi(f_c(t - \frac{2R_{\text{refA}}}{c}) + \frac{1}{2}\mu(\hat{t} - \frac{2R_{\text{refA}}}{c})^2)) \quad (4)$$

式中: R_{refA} 表示天线 A 到参考点 O 的距离。

经过“dechirp”处理可得:

$$s_{iA}(\hat{t}, t_m) = s_r(\hat{t}, t_m) s_{\text{refA}}^*(\hat{t}, t_m) = \sigma_P \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{AP}(t)/c}{T_p}\right) \cdot \exp(j(-\frac{4\pi}{c}\mu(\hat{t} - \frac{2R_{\text{refA}}}{c})R_{\Delta AP}(t_m) - \frac{4\pi}{c}f_c R_{\Delta AP}(t_m) + \frac{4\pi\mu}{c^2}R_{\Delta AP}^2(t_m))) \cdot \exp(j(-\frac{4\pi\mu v_{rA}(t_m)}{c}\hat{t}^2 + \frac{4\pi f_c v_{rA}(t_m)}{c}\hat{t})) \cdot \exp(j(-\frac{8\pi\mu R_{AP}(t)v_{rA}(t_m)}{c^2}\hat{t} + \frac{4\pi\mu v_{rA}^2(t_m)}{c^2}\hat{t}^2)) \quad (5)$$

的相位可表示为:

$$\text{Angle}(s_{iA}(f, t_m)) =$$

$$-j4\pi\left(\frac{1}{\lambda}R_{\Delta AP}(t_m) + \frac{R_{\Delta AP}(t_m)}{c - 2v_{rA}}f + \frac{\mu}{c^2}R_{\Delta AP}^2(t_m)\right) \quad (6)$$

由于 v_{rA} 一般相比光速小许多,因此这里取 $R_{\Delta AP}(t_m)/(c - 2v_{rA}) = R_{\Delta AP}(t_m)/c$, 此时式(6)中第 1 项为用于干涉三维成像的相位信息,后 2 项为可去

除的剩余视频相位 (Residual Video Phase, RVP) 和包络斜置项,去除这 2 项后,有^[13]:

$$\Delta\varphi_{AB} = \text{Angle}(s_{Ad}^*(f, t_m) s_{Bd}(f, t_m)) = \frac{2\pi}{\lambda}(R_{\Delta AP}(t_m) - R_{\Delta BP}(t_m)) \quad (7)$$

$$\Delta\varphi_{AC} = \text{Angle}(s_{Ad}^*(f, t_m) s_{Cd}(f, t_m)) = \frac{2\pi}{\lambda}(R_{\Delta AP}(t_m) - R_{\Delta CP}(t_m)) \quad (8)$$

由此可见,用于干涉三维成像的相位信息并没有发生改变,因此,通过重构可得点 P 在雷达坐标系中 U 、 W 轴的坐标大小:

$$u(t_m) = \frac{\lambda R_{OM1} \Delta\varphi_{AB}}{2\pi L} + \frac{L}{2} \quad (9)$$

$$w(t_m) = \frac{\lambda R_{OM2} \Delta\varphi_{AC}}{2\pi L} + \frac{L}{2} \quad (10)$$

同时,相位差应满足 $\Delta\varphi_{AD}, \Delta\varphi_{AC} \in [-\pi, \pi]$ 条件,否则该方法不能使用^[14]。 V 维坐标可通过处理距离-慢时间域信号得到。

2.2 自旋目标微多普勒效应分析

现 P 点在空间中以角速度 ω_x 、 ω_y 和 ω_z 绕 x 轴、 y 轴和 z 轴做旋转运动,在参考坐标系中的角速度矢量为 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^\top$,假设起始时刻,在坐标系 xyz 中的位置矢量为 $\mathbf{r}_0 = (x_{p0}, y_{p0}, z_{p0})^\top$ 。自旋目标 P 在雷达坐标系的坐标为 $(U_P, V_P, W_P)^\top = (U_O, V_O, W_O)^\top + \mathbf{R}_{\text{rotating}} \mathbf{r}_0$, $\mathbf{R}_{\text{rotating}}$ 为旋转矩阵^[15]。其具体表达式为:

$$w(t_m) = \frac{\lambda R_{OM2} \Delta\varphi_{AC}}{2\pi L} + \frac{L}{2} \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_{\text{rotating}}(t) = I + \hat{\boldsymbol{\omega}} \sin(\Omega t) + \hat{\boldsymbol{\omega}}^2 (1 - \cos(\Omega t)) \quad (12)$$

$$\Omega = \|\boldsymbol{\omega}\| \quad (13)$$

$$\hat{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\omega} / \Omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^\top \quad (14)$$

由图 2 得, $R_{\Delta AP}(t)$ 可表示为:

$$R_{\Delta AP}(t) = (\mathbf{R}_{\text{rotating}}(t) \hat{\mathbf{r}}_0) \cdot \mathbf{n}_A = \|\mathbf{GO}'\| + r_p \cos(\Omega t + \theta_{AP}) \sin \epsilon_{AP} \quad (15)$$

式中: \mathbf{n}_A 为沿雷达 A 视线方向 (Line of Sight, LOS) 的矢量; θ_{AP} 为初项; ϵ_{AP} 为 \mathbf{n}_A 与 $\boldsymbol{\omega}$ 的夹角; O' 为 P 旋转的中心; G 为参考坐标系原点 O 在 LOS 上的投影; \mathbf{n}'_A 为 \mathbf{n}_A 在旋转平面上的投影; H 点为 P 在 \mathbf{n}_A 上的投影,见图 2。

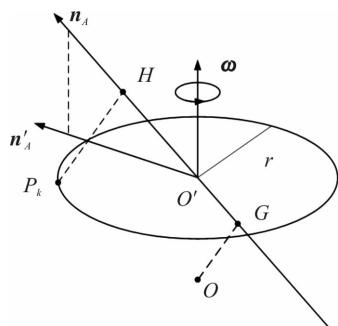


图 2 求 $R_{\Delta AP}(t)$ 表达式示意图

因此, P 的径向速度大小可表示为:

$$v_P(\hat{t}t_m) = -r_p \Omega \sin(\Omega(t_m + \hat{t}) + \theta_{AP}) \sin \epsilon_{AP} \quad (16)$$

由于脉宽通常在毫秒级别,因此目标在脉内的自旋运动可看作匀速,即:

$$v_P(t_m) = -r_p \Omega \sin(\Omega(t_m) + \theta_{AP}) \sin \epsilon_{AP} \quad (17)$$

此时, $R_{\Delta AP}(t)$ 的表达式可写为:

$$R_{\Delta AP}(t) = \|\mathbf{GO}'\| + r_p \cos(\Omega t_m + \theta_{AP}) \sin \epsilon_{AP} + v(t_m) t_k \quad (18)$$

那么 P 点在距离像上的距离可表示为^[16-17]:

$$\dot{r}_{AP}(t_m) = \|\mathbf{GO}'\| +$$

$$\frac{r_p}{\lambda \mu} \sqrt{c^2 \Omega^2 + \lambda^2 \mu^2} \cos(\Omega t_m + \theta_{AP} + \phi) \sin \epsilon_{AP} \quad (19)$$

式中: $\phi = \arctan(\lambda \mu / (c \Omega)) - \pi/2$ 。

由式(19)可以得出 2 个结论:

1) 在距离-慢时间像上,自旋目标在 LOS 上的投影呈余弦曲线形式变化,同时该正弦曲线的振幅被放大了 $\sqrt{c^2 \Omega^2 + \lambda^2 \mu^2} / (\lambda \mu)$ 倍;

2) 在距离-慢时间像上,自旋目标呈现出余弦曲线与其到雷达的真实距离随时间变化所呈现出的余弦曲线相差 ϕ 的初相。

因此,对 P 点成像时 V 轴坐标需进行重新换算。

3 成像流程总结

从上文的分析来看,在对自旋目标进行干涉三维成像前需要:①获得目标回波信号在每个慢时间上峰值的位置;②得到目标转速 Ω 与初相 θ_{AP} 。

自旋目标在距离像上的幅度随慢时间呈正弦规律变化。因此可使用扩展 Hough 变换方法将自旋目标的微动信息提取出^[18]。Hough 变换方程为:

$$f = l \sin(\Omega t_m + \varphi_0) + d \quad (20)$$

该式可用来描述图像中的正弦曲线,其中 l 为曲线振幅, Ω 为角频率, φ_0 为正弦曲线的初始相位, d 为正弦曲线的偏距,

$$\varphi_0 = \phi + \theta_{AP} + \pi/2,$$

$$l = 2\mu r_p \sin \epsilon_{AP} \cdot d_t n_t \sqrt{c^2 \Omega^2 + \lambda^2 \mu^2} / \lambda \mu c,$$

$$d = 2\mu \|\mathbf{GO}'\| d_t n_t / c,$$

式中: d_t 为采样间隔; n_t 为一次慢时间回波内的采样总数。联合式(19),目标在 W 轴的坐标大小可表示为:

$$w(t_m) = \frac{c}{2\mu d_t n_t} \left(d + \frac{\sqrt{c^2 \Omega^2 + \lambda^2 \mu^2}}{\lambda \mu} \sin(\Omega t_m + \varphi_0 - \phi) \right) \quad (21)$$

但在实际情况中,在雷达视野中并不是只有一个散射点存在,此时,对天线回波进行快时间傅里叶

变换后,不同目标在距离域生成了不同的 sinc 函数,这些 sinc 函数互相叠加,影响各自的干涉相位^[19-20],使干涉取相结果产生误差,尤其在距离-慢时间平面,不同目标显示出的曲线存在交叠,交点所在单元格的干涉相位遭到了极大的破坏。这里可以利用自旋目标的坐标变化呈正弦曲线变化的先验信息,对坐标值进行拟合。

因此,LFMCW 雷达对自旋目标的干涉三维成像流程可归纳为:

Step 1 处理 A、B、C 3 个天线的回波,获得其距离-慢时间像;

Step 2 利用式(19)在距离-慢时间像上找出正弦曲线参数组,并得到距离-慢时间平面上的正弦位置 f_1, f_2, \dots, f_K ;

Step 3 对 3 个天线的距离-慢时间平面信号进行干涉处理,取出在 f_1, f_2, \dots, f_K 位置的相位信息并分别存储;

Step 4 利用干涉处理得到的相位信息,分别计算目标在 x 、 y 、 z 维的坐标;

Step 5 对 x 、 z 维坐标进行拟合处理,对 y 维

坐标根据式(20)进行重新计算;

Step 6 根据处理后的坐标绘制目标三维像。

4 仿真实验

雷达参数设置如下,带宽 $B=500$ MHz,载频 $f_c=5$ GHz,脉冲宽度 $T_p=1$ ms,基线 $L=1$ m,观测时间 $T_1=0.5$ s,参考点的坐标为 $(0, 50\ 000, 0)$ m,假设雷达视野内有 4 个散射点,其转速分别为 $\omega_1=(2\pi, 4\pi, 3\pi)$, $\omega_2=(7\pi, 3\pi, 7\pi)$, $\omega_3=(6\pi, 1\pi, 2\pi)$, $\omega_4=(2\pi, 4\pi, 8\pi)$,根据第 3 节进行仿真,见图 3~4。

图 3 中,(a)、(b)、(c)为目标的实际坐标,(d)、(e)、(f)为初步干涉结果,(d)与(f)反映了距离-慢时间平面上曲线交点附近信号间相位的影响导致干涉结果出现突变错误,而(e)验证了 2.2 节中 y 维坐标的畸变,可以看出由高分辨一维距离像得到的 y 维的坐标明显与真实值不同;(g)、(h)、(i)为本文方法处理后得到的坐标值图,图 3(h)表明此时已获得了准确的干涉结果。

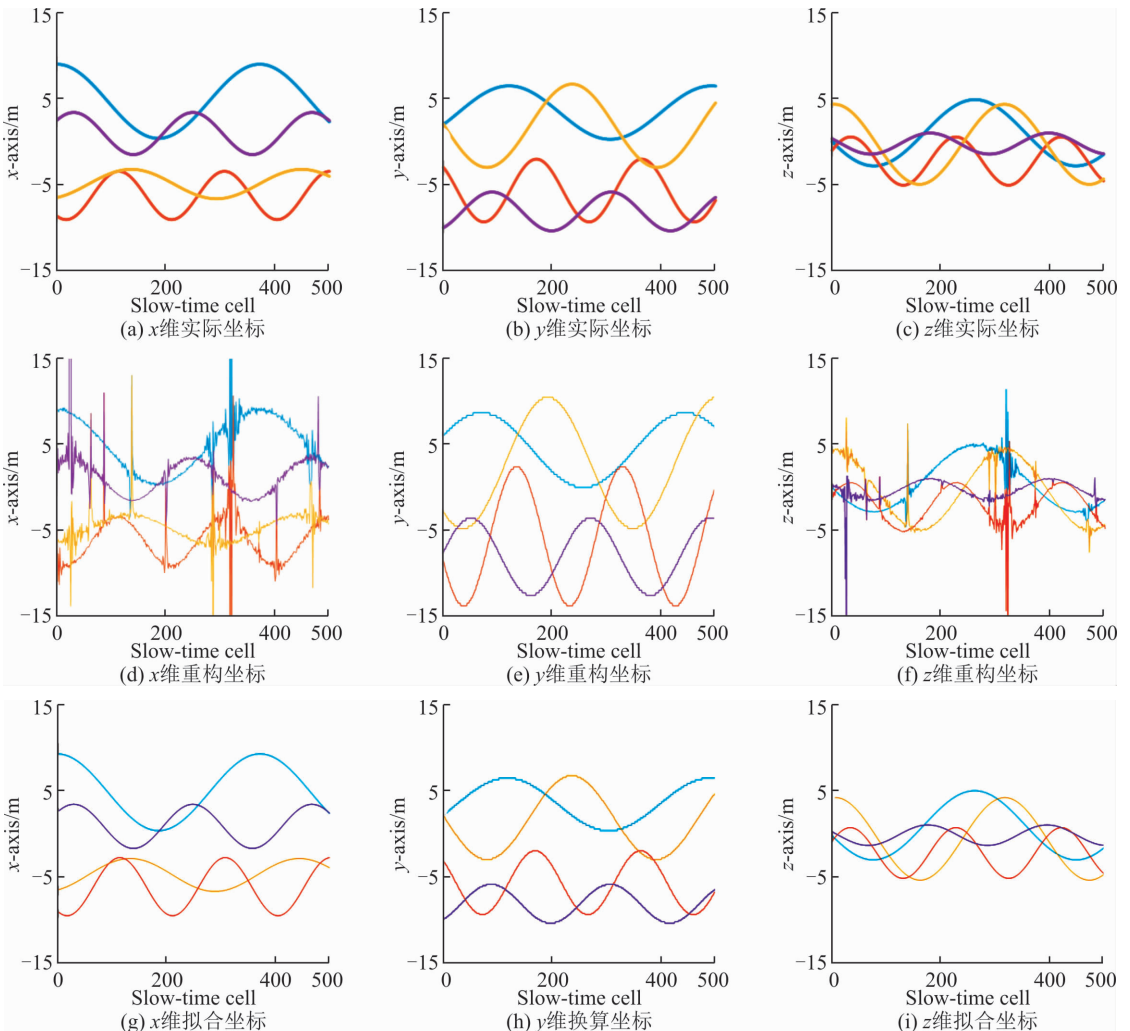


图 3 仿真结果

图 4 中(b)因坐标畸变目标的运动轨迹明显与实际不同,经拟合后在(c)中可看出成像精度有所改善。表 1 为计算结果,可更直观看出,经过 x 维 z 维

拟合并与 y 维重新换算后,成像坐标精度得到了提升。

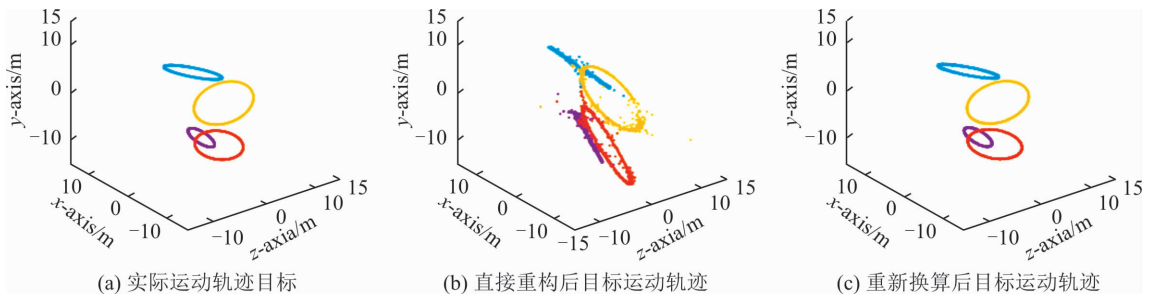


图 4 目标运动轨迹

表 1 干涉坐标 MSE

坐标	MSE/m		
	x 维	y 维	z 维
重构坐标	5.747 5	15.472 2	0.985 2
拟合坐标	0.064 7	0.007 4	0.036 3

5 结语

针对 LFM CW 雷达中的自旋目标,本文提出了一种基于 L 型天线的干涉三维成像方法,建立了空间中自旋目标干涉三维成像信号模型,在距离-慢时间域上分析了微动目标回波信号的相位信息,同时研究了回波脉内调制的特点,最终通过干涉处理实现了对自旋目标的三维成像。仿真实验对所提方法的有效性进行了验证,但在目标结构复杂或存在遮挡效应的情况下,该方法还存在不足之处,需在接下来的工作中进一步研究解决。

参考文献(References):

[1] LIAO X, LIU S, XIANG Y, et al. Non-Contact Vibration Retrieval and Performance Analysis Based on LFM CW Radar [C]//IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. IEEE, 2016:1-4.

[2] 张群, 马长征, 张涛, 等. 干涉式逆合成孔径雷达三维成像技术研究[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(9): 890-898.

ZHANG Q, MA C Z, ZHANG T, et al. Research on 3D Imaging Technique for Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2001, 23(9):890-898. (in Chinese)

[3] WANG R, LOFFELD O, NIES H, et al. Focus FM-CW SAR Data Using the Wavenumber Domain Algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Re-

mote Sensing, 2010, 48(4): 2109-2118.

[4] WEHNER D R. High-Resolution Radar[M]. 2nd Edition. Boston: Artech House, 1994.

[5] ZHANG Q, YEO T S, DU G, et al. Estimation of 3D Motion Parameters in Interferometric ISAR Imaging [J]. IEEE Transactions on & Remote Sensing, 2004, 42(2): 292-300.

[6] ZHAO L, GAO M, MARTORELLA M, et al. Bi-static Three-Dimensional Interferometric ISAR Image Reconstruction[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2016, 51(2):951-961.

[7] 刘波, 潘舟浩, 李道京, 等. 基于毫米波 InISAR 成像的运动目标探测与定位[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(3):258-264.

LIU B, PAN Z H, LI D J, et al. Moving Target Detection and Location Based on Millimeter-Wave InISAR Imaging[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 31(3): 258-264. (in Chinese)

[8] ZHANG Q, LUO Y, CHEN Y A. Micro-Doppler Characteristics of Radar Targets[M/OL](2016-11-1). <http://www.elsevier.com>.

[9] 白雪茹, 周峰, 邢孟道, 等. 空中微动旋转目标的二维 ISAR 成像算法 [J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1937-1943.

BAI X R, ZHOU F, XING M D, et al. 2D ISAR Imaging Algorithm for Air Micro-Motion Targets[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9):1937-1943. (in Chinese)

[10] 吴亮, 黎湘, 魏玺章, 等. 基于 RWT 的旋转微动目标二维 ISAR 成像算法 [J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1302-1308.

WU L, LI X, WEI X Z, et al. 2D ISAR Imaging Algorithm for Rotating Micro-Motion Target Based on RWT[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6):1302-1308. (in Chinese)

[11] BAI X R, XING M D, ZHOU F, et al. Imaging of Micromotion Targets with Rotating Parts Based on Empirical-Mode Decomposition[J]. IEEE Transactions

- on Geoscience & Remote Sensing, 2008, 46(11): 3514-3523.
- [12] 刘承兰, 高勋章, 贺峰, 等. 一种基于相位校正的 InISAR 图像配准新方法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 35(5):116-122.
- LIU C L, GAO X Z, HE F, et al. A Novel Method for Image Registration in InISAR Imaging Based on Phase Correction[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 35(5):116-122. (in Chinese)
- [13] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- BAO Z, XING M D, WANG T. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [14] WANG G, XIA X G, CHEN V C. Three-Dimensional ISAR Imaging of Maneuvering Targets Using Three Receivers[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(3):436-447.
- [15] LUO Y, CHEN Y A, SUN Y X, et al. Narrowband Radar Imaging and Scaling for Space Targets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(6):946-950.
- [16] 梁颖, 田韵, 张群, 等. 基于多项相位变换的 FMCW-ISAR 微多普勒特征提取方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(2):74-78.
- LIANG Y, TIAN Y, ZHANG Q, et al. An Extracting Method of Micro-Doppler Features in FMCW-ISAR Based on Polynomial Phase Transform[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2012, 13(2): 74-78. (in Chinese)
- [17] 李松, 梁颖, 张群, 等. 高速弹道目标进动微多普勒分析及脉内补偿[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(4):37-40.
- LI S, LIANG Y, ZHANG Q, et al. The Research on Micro-Doppler Features of Ballistic Missile Based on Precession with High Speed[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles & Guidance, 2012, 32(4):37-40. (in Chinese)
- [18] ZHANG Q, YEO T S, TAN H S, et al. Imaging of a Moving Target with Rotating Parts Based on the Hough Transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 46(1):291-299.
- [19] 孙玉雪, 罗迎, 张群, 等. 空间自旋目标宽带雷达干涉三维成像方法[J]. 航空学报, 2017, 38(4):227-239.
- SUN Y X, LUO Y, ZHANG Q, et al. Interferometric 3D Imaging for Space Rotating Targets in Wideband Radar[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(4): 227-239. (in Chinese)
- [20] 胡健, 罗迎, 张群, 等. 弹道目标宽带雷达干涉式三维成像与微动特征提取[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8):1865-1871.
- HU J, LUO Y, ZHANG Q, et al. Three-Dimensional Interferometric Imaging and Micro-Motion Feature of Ballistic Targets in Wideband Radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(8): 1865-1871. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)