

引用格式:蔡尚君,左东广,朱晓菲.运动因素对雷达引信回波多普勒频率的影响[J].电光与控制,2019,26(1):55-60. CAI S J, ZUO D G, ZHU X F. Influence of motion factors on Doppler frequency of radar fuze echo[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(1):55-60.

运动因素对雷达引信回波多普勒频率的影响

蔡尚君, 左东广, 朱晓菲
(火箭军工程大学,西安 710025)

摘要:为了探究锥形载体再入飞行时,其运动因素对雷达引信回波中多普勒频率成分的影响规律,通过建立多坐标系,利用坐标系之间的转换关系,准确构建了锥形载体的运动模型,并在时频域范围内,重点分析了飞行速度、再入倾角、摆动和锥进对多普勒频率成分的影响规律。为了验证影响规律的正确性,以短时傅里叶变换(STFT)为中心思想,利用 Matlab 软件对雷达引信的回波信号进行仿真,仿真结果与运动模型得到的理论值相符,表明运动模型合理,并且分析得到的影响规律正确。

关键词:多普勒频率;运动因素;时频分析;短时傅里叶变换;雷达引信;锥形载体;再入飞行

中图分类号: V271.4; TN957.5 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.01.013

Influence of Motion Factors on Doppler Frequency of Radar Fuze Echo

CAI Shang-jun, ZUO Dong-guang, ZHU Xiao-fei
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to obtain the law of the influence of motion factors of cone carrier on the Doppler frequency of radar fuze echo in its reentry flight, the motion model of the carrier is constructed accurately through the establishment of multi-coordinate system and by use of the conversion between the coordinate systems. Analysis is made to the influence of such motion factors as flight velocity, reentry dip angle, swing and cone on the Doppler frequency components of the radar fuze echoes in the time-frequency domain. In order to verify the correctness of the law of influence, the echo signal of the radar fuze is simulated by using Matlab software with the Short-Time Fourier Transform (STFT) as the central idea. The simulation results are consistent with the theoretical values. It shows that the motion model is reasonable and the law of influence is correct.

Key words: Doppler frequency; motion factor; time-frequency analysis; short-time Fourier transform; radar fuze; cone carrier; reentry flight

0 引言

随着时代的进步,引信技术发展迅速,如软件无线电引信技术^[1]、弹道修正引信技术^[2]、复合引信技术等新型引信技术层出不穷,但雷达引信仍然是如今使用最为广泛的引信技术之一。结合雷达引信的应用背景,其载体的运动因素对雷达引信的回波有着较大影响。研究载体运动对回波多普勒的影响有着重要意义,它与雷达引信的性能评估、回波信号的仿真模拟、多普勒滤波器的改进等方面息息相关。文献[3]最先

将锥形目标再入大气层时的微动与无线电雷达探测结合在一起。如今,与其相关的最新研究有:根据锥形目标的微动产生的微多普勒进行目标分类^[4];提取锥形目标微动情况下的散射回波多普勒频率参数^[5];选取微动状态下锥形飞行器的散射点^[6]。此类文献大都是以锥形飞行器为探测目标,研究微动情况下地面雷达照射的微多普勒效应。而雷达引信恰好相反,它依附在锥形飞行器上探测地面目标,运动因素对雷达引信回波多普勒频率的影响与之前的文献不完全相同。由于雷达引信用途的特殊性,其研究领域还有较多的空白,很少有文献深入研究载体运动因素对雷达引信回波多普勒频率的影响。文献[7]对锥形载体的雷达引信回波做了探讨,文献[8]对锥形载体自旋下的回波

收稿日期:2018-01-30 修回日期:2018-12-13

作者简介:蔡尚君(1994—),男,河南商丘人,硕士生,研究方向为雷达引信评估。

做了分析,然而锥形载体再入大气层时的运动不止自旋,还有更为复杂的锥进、摆动等,因此文献[8]对实际情况的考虑还不够周全。

1 锥形载体再入大气层飞行特点

1) 飞行速度高。

再入飞行器具有极高的再入飞行速度,本文所描述的锥形飞行器一般可以达到 3000 ~ 7000 m/s 的再入飞行速度^[9]。根据多普勒频率产生的原理,在高频电磁波下,极高的再入速度会产生较大的多普勒频移。

2) 再入飞行倾角有所不同。

根据不同载体的飞行要求,载体的飞行轨迹也有所区分。在文献[10]中,将飞行轨迹分为高轨迹、低轨迹、正常轨迹,因此,载体在再入大气层时的飞行倾角会不同。

3) 具有自旋、锥进和摆动等微小运动。

锥形飞行器在再入飞行时会伴有自旋、锥进和摆动等微小运动。自旋是为了保证平稳飞行,锥进和摆动是因为锥载体不能满足理想飞行条件。自旋会导致雷达引信的同一天线不能始终照射地面。为解决这个问题,通常会在锥形载体的表面轴对称地分布 2 个或 4 个天线,交替工作^[11]。图 1 所示为锥体的锥进示意图。

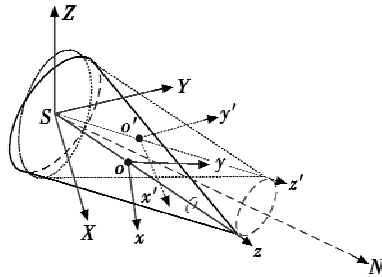


图 1 锥进
Fig. 1 Coning

锥体在绕自身对称轴 oz 做自旋,同时, oz 也在绕轴 SN 做旋转, oz 与 SN 交于点 S ,称为锥进, $\angle zSN$ 称为锥进角,如果锥进角的大小随时间做周期性变化,则称为章动^[12]。

2 运动因素对回波多普勒的影响分析

为了方便建模,作以下几点简化:

1) 雷达引信的波束属于宽波束,为了方便分析,将宽波束等效为窄波束的累加,在波束宽度范围内,只分析天线与目标连线的回波;

2) 假设地面目标为理想定点目标;

3) 建立大地坐标系时,将锥形载体的飞行垂面确定在两个坐标轴所确定的平面内,将地面目标设为原点;

4) 假设雷达引信为双天线系统,分析时只分析一个天线的回波。

多普勒频率的推导公式为

$$f_d = \frac{2f_c}{c} \cdot \frac{dr(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: f_d 为多普勒频率; f_c 为发射频率; c 为无线电传播速率; $r(t)$ 为目标与雷达引信天线的径向距离。

2.1 飞行速度和再入飞行倾角对多普勒频率的影响规律

建立锥体再入飞行模型,如图 2 所示。

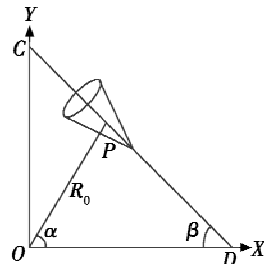


图 2 锥体再入飞行
Fig. 2 Cone reentry flight

以地面目标 O 为坐标原点,建立二维坐标系 XOY , CD 为飞行轨迹, β 为再入飞行倾角, P 为天线位置。设初始时刻 $r(t_0) = R_0$, 俯仰角为 α , 再入飞行速度 $\vec{V} = V * \mathbf{v}$, V 为速度大小, \mathbf{v} 为速度方向矢量, $\mathbf{v} = (\cos \beta, -\sin \beta)^T$ 。 t 时刻后, P 为 P' , 则

$$\vec{OP}^t = \vec{OP} + \vec{PP}^t = R_0(\cos \alpha, \sin \alpha)^T + Vt(\cos \beta, -\sin \beta)^T = (R_0 \cos \alpha + Vt \cos \beta, R_0 \sin \alpha - Vt \sin \beta)^T \quad (2)$$

因为 $r(t) = \|\vec{OP}^t\|$, 将式(2)代入式(1)得 $f_d = \frac{2f_c}{c} \cdot$

$$\frac{V^2 t + 2R_0 V \cos(\alpha + \beta)}{\sqrt{R_0^2 + V^2 t^2 + 2R_0 V t \cos(\alpha + \beta)}}$$

2.2 摆动对多普勒频率的影响分析

建立锥体摆动模型,如图 3 所示。

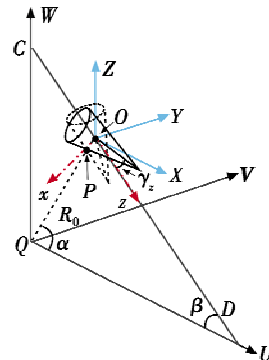


图 3 摆动模型
Fig. 3 Swing model

建立 3 个坐标系: 1) 大地坐标系,以地面目标 Q

为坐标原点,建立三维坐标系 $Q-UVW$,令飞行垂面位于平面 UQW 内, CD 为飞行轨迹;2)参考坐标系,以锥形载体的质心 O 为坐标原点,建立三维坐标系 $O-XYZ$,其中, X 轴、 Y 轴、 Z 轴分别平行于大地坐标系的 U 轴、 V 轴、 W 轴;3)本地坐标系,以锥形载体质心 O 为原点,以飞行轨迹为 z 轴,建立三维坐标系 $O-xyz$,其中, y 轴与参考坐标系 Y 轴重合。

本地坐标系 $O-xyz$ 与参考坐标系 $O-XYZ$ 存在如下关系:以 Y 轴为旋转轴,将 $O-XYZ$ 逆时针旋转 $90^\circ + \beta$ 得到 $O-xyz$, β 为再入飞行倾角。设锥形载体以 $O-xyz$ 的 z 轴为对称轴,做正弦摆动,摆动幅度为 γ_s ,频率为 f_s 。

根据罗德里格斯旋转公式,本地坐标系与参考坐标系的坐标变换关系为^[13]

$$(X, Y, Z)^T = \mathbf{R}_{\text{init}}(x, y, z)^T \quad (3)$$

式中, \mathbf{R}_{init} 为初始旋转矩阵,即

$$\mathbf{R}_{\text{init}} = \mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) + \hat{\boldsymbol{\omega}}^2 \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right)\right) ; \quad (4)$$

\mathbf{I} 为三维单位矩阵; β 为再入飞行倾角; $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ 为旋转轴矢量 $\boldsymbol{\omega}$ 的相关矩阵,在 $\boldsymbol{\omega} = (x_\omega, y_\omega, z_\omega)$ 为单位矢量时,有

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}_y = \begin{bmatrix} 0 & -z_\omega & y_\omega \\ z_\omega & 0 & x_\omega \\ -y_\omega & x_\omega & 0 \end{bmatrix} 。 \quad (5)$$

初始时刻, $QO = R_0$,锥形载体在大地坐标系中的俯仰角为 α ,天线 P 在 $O-xyz$ 中的坐标为 $(x_0, y_0, z_0)^T$,在 $O-XYZ$ 中的坐标为 $\mathbf{R}_{\text{init}}(x_0, y_0, z_0)^T$, t 时刻后, O 为 O' , P 为 P' ,则

$$\overrightarrow{O'P'} = \overrightarrow{QO'} + \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'P'} \quad (6)$$

式中

$$\overrightarrow{QO'} = R_0(\cos \alpha, 0, \sin \alpha)^T \quad (7)$$

$$\overrightarrow{OO'} = Vt \cdot \mathbf{v} = Vt \cdot (\cos \beta, 0, -\sin \beta)^T 。 \quad (8)$$

摆动可视为锥体在以 $\boldsymbol{\omega}_s = (0, 1, 0)^T$ 为旋转轴,做旋转运动,旋转角度为 $\theta = \gamma_s \sin(2\pi f_s t + \phi)$, ϕ 为初相,表示初始时刻锥体摆动的位置。在 $O-XYZ$ 中,旋转后坐标可表示为 $(X, Y, Z)^T = \mathbf{R}_s(X_0, Y_0, Z_0)^T$,其中, \mathbf{R}_s 为摆动旋转矩阵

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}}_s \sin \theta + \hat{\boldsymbol{\omega}}_s^2 (1 - \cos \theta) \quad (9)$$

式中, $\hat{\boldsymbol{\omega}}_s$ 为矢量 $\boldsymbol{\omega}_s$ 的相关矩阵,值与式(5)相似。所以

$$\overrightarrow{O'P'} = \mathbf{R}_s(X_0, Y_0, Z_0)^T = \mathbf{R}_s \mathbf{R}_{\text{init}}(x_0, y_0, z_0)^T \quad (10)$$

由于 $r(t) = \|\overrightarrow{O'P'}\|$,代入式(1)并根据矩阵运算法则可得

$$f_d = \frac{2f_c}{c} \left(\frac{d\overrightarrow{O'P'}}{dt} \right)^T \cdot \mathbf{n} \quad (11)$$

式中, \mathbf{n} 为矢量 $\overrightarrow{O'P'}$ 的单位矢量,即

$$\mathbf{n} = \frac{\overrightarrow{O'P'}}{\|\overrightarrow{O'P'}\|} 。 \quad (12)$$

2.3 锥进对多普勒频率的影响分析

建立锥体锥进模型,如图 4 所示。

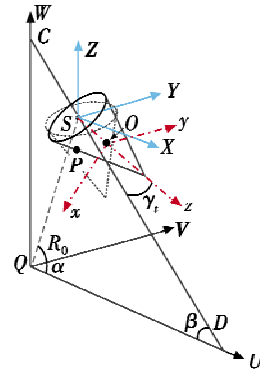


图 4 锥进模型

Fig. 4 Coning model

在描述锥进运动时同样建立 3 个坐标系,所不同的是,在建立参考坐标系时,以锥体的圆锥底面中心点 S 为原点,建立与大地坐标系 $Q-UVW$ 平行的坐标系 $S-XYZ$;在建立本地坐标系时,以锥体的质心 O 为原点,锥体的中心轴为 z 轴,建立坐标系 $O-xyz$ 。点 S 在本地坐标系的 z 轴上,坐标可表示为 $(0, 0, z_d)$ 。 $O-xyz$ 先沿着 z 轴平移 z_d ,再以 y 轴为旋转轴顺时针旋转 $90^\circ + (\beta - \gamma_t)$,得到 $S-XYZ$,其中, γ_t 为锥旋角, β 为再入飞行倾角。设初始时刻 $QS = R_0$,俯仰角为 α ,根据计算,初始旋转矩阵 \mathbf{R}_{init} 为

$$\mathbf{R}_{\text{init}} = \begin{bmatrix} -\sin(\beta - \gamma_t) & 0 & \cos(\beta - \gamma_t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos(\beta - \gamma_t) & 0 & -\sin(\beta - \gamma_t) \end{bmatrix} 。 \quad (13)$$

如果初始时刻锥体中心轴不在飞行垂面内,可以通过再一次的旋转将锥体转到图 4 中的当前位置, \mathbf{R}_{init} 则需要再乘上一个旋转矩阵,为了简化,这里不再分析。 $S-XYZ$ 和 $O-xyz$ 的关系可表示为

$$(X, Y, Z)^T = \mathbf{R}_{\text{init}}(x, y, z - z_d)^T 。 \quad (14)$$

锥体以 $O-xyz$ 的 z 轴为自旋轴,以角速度 Ω_s 做自旋运动,同时锥体以 CD 为锥旋轴,以角速度 Ω_t 做锥旋运动,在参考坐标系中,自旋轴矢量 $\boldsymbol{\omega}_s$ 和锥旋轴矢量 $\boldsymbol{\omega}_t$ 可分别表示为

$$\boldsymbol{\omega}_s = (\cos(\beta - \gamma_t), 0, -\sin(\beta - \gamma_t))^T \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\omega}_t = (\cos \beta, 0, -\sin \beta)^T \quad (16)$$

而 $\boldsymbol{\omega}_s$ 和 $\boldsymbol{\omega}_t$ 的相关矩阵 $\hat{\boldsymbol{\omega}}_s$ 和 $\hat{\boldsymbol{\omega}}_t$ 的表示与式(5)相同。

锥进旋转矩阵可以写成 \mathbf{R}_t 和 \mathbf{R}_s 两个旋转矩阵相乘的形式,由此得到

$$\overrightarrow{S'P'} = \mathbf{R}_t \mathbf{R}_s(X_0, Y_0, Z_0)^T = \mathbf{R}_t \mathbf{R}_s \mathbf{R}_{\text{init}}(x_0, y_0, z_0 - z_d)^T \quad (17)$$

S' 为 t 时刻的 S 点。式中:

$$\mathbf{R}_t = \mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}}_t \sin \Omega_t t + \hat{\boldsymbol{\omega}}_t^2 (1 - \cos \Omega_t t) ; \quad (18)$$

$$\mathbf{R}_t = \mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}}_t \sin \Omega_t t + \hat{\boldsymbol{\omega}}_t^2 (1 - \cos \Omega_t t) ; \quad (19)$$

$$\overrightarrow{QP}^t = \overrightarrow{QS}^t + \overrightarrow{SS}^t + \overrightarrow{S'P}^t . \quad (20)$$

关于 \overrightarrow{QS}^t 和 \overrightarrow{SS}^t 的计算与式(7)、式(8)相同,锥进的多普勒表达式与式(11)、式(12)相同。

考虑到锥旋中的自旋成分,在 180° 对称分布的双天线系统中,每个天线必然有半个自旋周期是无回波信号的。如图4,在 $O-xyz$ 中,当 x 坐标大于0时,天线是朝向地面目标的,当 x 坐标小于0时,天线是背向地面目标的。用 $\overrightarrow{OP}_{\text{local}}$ 作为 P 点在本地坐标系中自旋后的坐标表示,则

$$\overrightarrow{OP}_{\text{local}} = \mathbf{R}_{\text{local}} \overrightarrow{OP} = \mathbf{R}_{\text{local}} (x_0, y_0, z_0)^T \quad (21)$$

其中

$$\mathbf{R}_{\text{local}} = \mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}}_{\text{local}} \sin \Omega_t t + \hat{\boldsymbol{\omega}}_{\text{local}}^2 (1 - \cos \Omega_t t) \quad (22)$$

式中, $\hat{\boldsymbol{\omega}}_{\text{local}}$ 为 $\boldsymbol{\omega}_{\text{local}} = (0, 0, 1)^T$ 的相关矩阵。

因此,当 $\overrightarrow{OP}_{\text{local}}$ 的 x 坐标大于0时,有回波信号;当 $\overrightarrow{OP}_{\text{local}}$ 的 x 坐标小于0时,无回波信号。由此可以作为判断依据,在仿真实验中确定无回波的时间段。

2.4 锥进和摆动的组合运动对多普勒频率的影响分析

为了贴合实际,将摆动和锥进组合,即锥形载体在做锥旋的同时也做摆动,分析其对多普勒频率的影响规律。建立锥体组合运动模型,如图5所示。

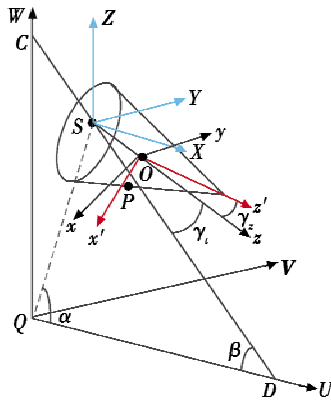


图5 组合运动模型

Fig. 5 Combined motion model

建立大地坐标系、参考坐标系、本地坐标系、锥体坐标系,其中:大地坐标系和参考坐标系与2.2节相同;本地坐标系是以锥体质心 O 为原点,摆动的对称轴为 z 轴,建立坐标系 $O-xyz$;锥体坐标系是以锥体质心 O 为原点,锥体中心对称轴为 z' 轴,建立坐标系 $O-x'y'z'$,其中, y' 轴与本地坐标系 y 轴重合。 $O-xyz$ 与 $O-XYZ$ 的关系和2.2节相同,而 $O-x'y'z'$ 是由 $O-xyz$ 绕 y 轴旋转 γ 角得到,假设锥体摆动的初始位置如图5所示,则 $\gamma = \gamma_z$, γ_z 为摆动角幅度。

设 \mathbf{R}_{init} 为 $O-xyz$ 到 $O-XYZ$ 的初始旋转矩阵, $\mathbf{R}_{\text{init}2}$ 为

$O-x'y'z'$ 到 $O-xyz$ 的初始旋转矩阵,则

$$\mathbf{R}_{\text{init}} = \begin{bmatrix} -\sin(\beta - \gamma_t) & 0 & \cos(\beta - \gamma_t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos(\beta - \gamma_t) & 0 & -\sin(\beta - \gamma_t) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{R}_{\text{init}2} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_z & 0 & -\sin \gamma_z \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_z & 0 & \cos \gamma_z \end{bmatrix} . \quad (24)$$

组合运动可以分为3个微运动:1) 锥体以 $O-x'y'z'$ 的 z' 轴为旋转轴做自旋运动,自旋角速度为 Ω_t ,在 $O-XYZ$ 中,自旋轴方向矢量可表示为 $\boldsymbol{\omega}_t = (\cos(\beta - \gamma_t - \gamma_z), 0, -\sin(\beta - \gamma_t - \gamma_z))^T$;2) 锥体以 $O-xyz$ 的 z 轴为对称轴做摆动,摆动频率为 f_z ,摆动角度 $\theta = \gamma_z * \sin(2\pi f_z t)$,在 $O-XYZ$ 中摆动的等效旋转矢量 $\boldsymbol{\omega}_z = (0, 1, 0)^T$;3) 锥体以 CD 为锥旋轴,锥旋角速率为 Ω_t ,在 $O-XYZ$ 中,锥旋轴方向矢量可表示为 $\boldsymbol{\omega}_t = (\cos \beta, 0, -\sin \beta)^T$ 。

自旋矩阵 \mathbf{R}_t , 摆动矩阵 \mathbf{R}_z , 锥旋矩阵 \mathbf{R}_t 均可由旋转公式得到。

根据式(20),其中, \overrightarrow{QS}^t 和 \overrightarrow{SS}^t 的计算与式(7)、式(8)相同,设初始时刻天线 P 在锥体坐标系的坐标为 $(x_0', y_0', z_0')^T$,则

$$\overrightarrow{S'P}^t = \mathbf{R}_t \mathbf{R}_z \mathbf{R}_t (X_0, Y_0, Z_0)^T =$$

$$\mathbf{R}_t \mathbf{R}_z \mathbf{R}_t \mathbf{R}_{\text{init}} \{ [\mathbf{R}_{\text{init}2} (x_0', y_0', z_0')^T - (0, 0, z_d)^T] \} \quad (25)$$

有关自旋成分对回波的影响,与2.2节相同。

3 仿真结果及分析

假设雷达引信的回波模型为^[14]

$$s_r(t) = (A(t - \tau)) / 2 \cos 2\pi(\Delta f - f_d)(t - \tau) \quad (26)$$

式中: Δf 为中频, $\Delta f = f_c - f_0$; τ 为回波的延迟时间, $\tau = 2r(t)/c$; $A(t)$ 为周期脉冲信号,即

$$A(t) = \begin{cases} 0 & T_p < t \leq T \\ 1 & 0 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (27)$$

T 为脉冲重复周期, T_p 为脉冲持续时间。

在仿真中需要对回波信号的时频域进行分析,本文利用 STFT 的思想^[15-16]。

设雷达引信的射频 $f_c = 3$ GHz,中频 $\Delta f = 2$ MHz,脉冲重复周期 $T = 400$ μ s,脉冲持续时间 $T_p = 40$ μ s,飞行速度 $V = 2000 \sim 8000$ m/s^[9],再入飞行倾角 $\beta = 20^\circ \sim 75^\circ$,天线 P 的初始坐标为 $(2.12 \text{ m}, 0 \text{ m}, -1.5 \text{ m})^T$, $z_d = -0.5$ m,初始俯仰角 $\alpha = 120^\circ$,初始 $r(t_0) = R_0 = 10000$ m。

3.1 速度、倾角对多普勒频率的影响仿真

多普勒与速度的关系如图6所示。

取 $\beta = 45^\circ$,不同速度对多普勒频率的大小有影响,速度越大,多普勒频率就越大。而在速度相同的情况下,随着锥形载体移动,天线与地面目标的径向方向变化剧烈,因此多普勒频率曲线斜率变化较大。

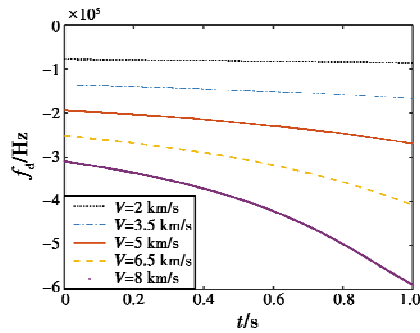


图 6 多普勒—速度关系图

Fig. 6 Doppler-velocity diagram

多普勒与倾角的关系如图 7 所示。

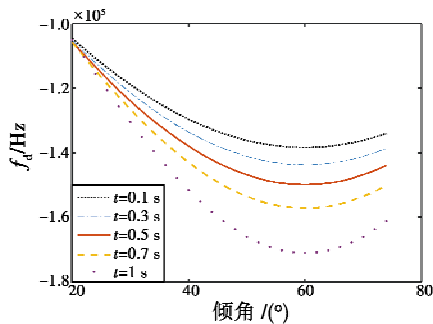


图 7 多普勒—倾角关系图

Fig. 7 Doppler-inclination diagram

$V = 3400 \text{ m/s}$, t 取不同值代表锥形载体在飞行轨迹上的不同位置。连续改变倾角,发现所有位置的多普勒频率曲线都在 60° 时,斜率为零,说明在飞行倾角为 60° 时,回波的多普勒频率最大。

3.2 摆动对多普勒频率的影响仿真

取 $V = 3400 \text{ m/s}$, $\beta = 45^\circ$, $f_z = 20 \text{ Hz}$, $\gamma_z = 10^\circ$, $\phi = 0 \text{ rad}$ 。摆动对多普勒频率影响的理论值和仿真见图 8。

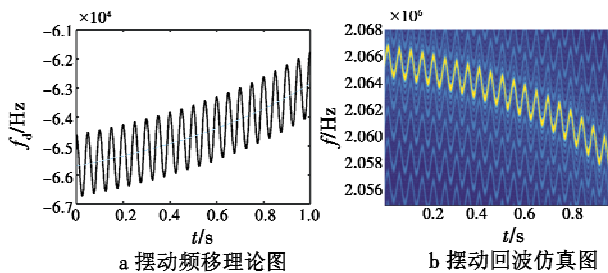


图 8 摆动频移理论与仿真对比

Fig. 8 Theoretical and simulated frequency shift caused by swinging

从图 8a 可以看出,摆动使多普勒频率有了一定的上下浮动,浮动范围为 $\pm 1070 \text{ Hz}$,并且浮动的频率为摆动频率。对比理论图和仿真图,由于理论图中多普勒频率为负值,所以在仿真图中回波偏离中频 2 MHz 随时间变小,这与理论值相符,仿真值与理论值也十分相近。

3.3 锥进对多普勒频率的影响仿真

取 $V = 3400 \text{ m/s}$, $\beta = 45^\circ$, $\Omega_z = 2\pi \cdot 10 \text{ rad/s}$, $\Omega_x =$

$2\pi \cdot 2 \text{ rad/s}$, $\gamma_x = 10^\circ$ 。锥进对多普勒影响效果见图 9。

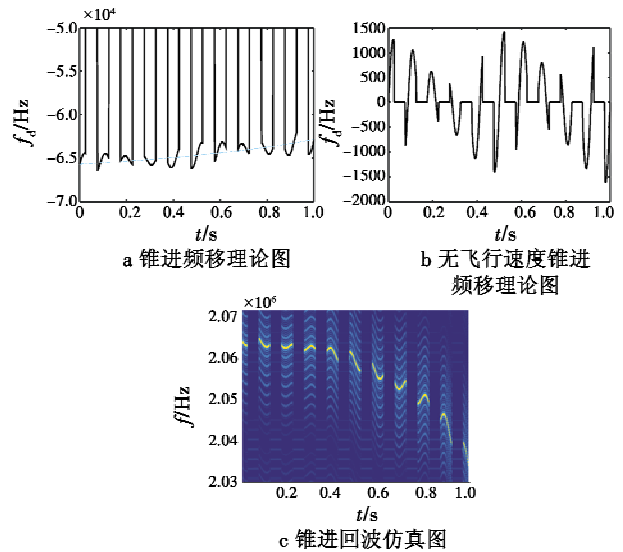


图 9 锥进频移理论与仿真对比

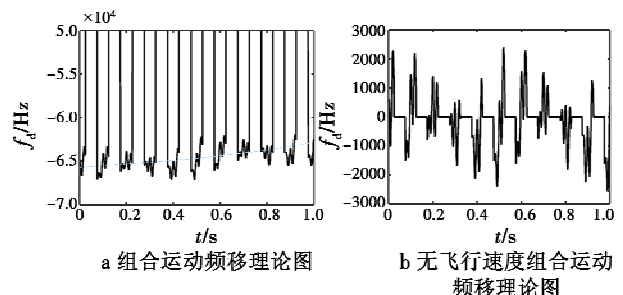
Fig. 9 Theoretical and simulated frequency shift caused by coning

图 9a 为锥进状态下的多普勒频率理论图,图 9b 为不考虑飞行速度,锥进产生的多普勒频率变化,对比可知,锥进运动产生的多普勒频率对飞行速度产生的多普勒频率进行了调制,有约为 $-1600 \sim 1400 \text{ Hz}$ 的多普勒频率波动。另外,从图 9a 可以看出,锥进产生的多普勒频率为自旋和锥旋产生的多普勒频率的调制,从时频图可以看出,自旋和锥旋的旋转频率分别为 10 Hz 和 2 Hz 。图 9c 为进动状态下的回波仿真图,对比图 9c 和图 9a,仿真图和理论图基本相符。

3.4 组合运动对多普勒频率的影响仿真

取 $V = 3400 \text{ m/s}$, $\beta = 45^\circ$, $\Omega_z = 2\pi \cdot 10 \text{ rad/s}$, $\Omega_x = 2\pi \cdot 2 \text{ rad/s}$, $f_z = 50 \text{ Hz}$, $\gamma_x = 15^\circ$, $\gamma_z = 5^\circ$ 。组合运动对多普勒的影响效果如图 10 所示。

由图 10b 可看出,摆动产生的多普勒频率对锥进产生的多普勒频率再次进行了调制,多普勒频率随时间的变化也比较剧烈,多普勒频率变化范围大致为 $-2500 \sim 2400 \text{ Hz}$ 。对比图 10c 和图 10a 可知,仿真数据与理论数据相符,有些差别如频率与时间的关系是由于仿真时采样的因素导致的。



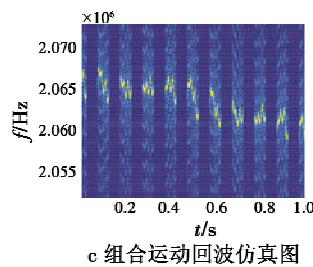


图 10 组合运动频移理论与仿真对比
Fig. 10 Theoretical and simulated frequency shift caused by combined motion

4 结束语

本文通过建立锥形载体的运动模型推导了雷达引信在锥形载体再入飞行状态下的回波多普勒频率,重点分析了摆动、锥进对回波多普勒频率影响,并利用时频分析的方法仿真了回波信号,仿真结果表明,锥形载体的运动因素对回波的多普勒频率确实有较大影响,验证了推导模型的正确性。通过探究运动因素对多普勒频率的影响规律,可以为雷达引信回波的仿真奠定基础,以及为雷达引信终端处理中多普勒滤波器组的中心频率设计提供依据,可使滤波器更加精确。由于篇幅有限,未对锥旋角变化的章动进行分析,下一步会进行探究。

参 考 文 献

- [1] 王林瑶,刘延飞,罗大成,等. 软件无线电引信技术综述[J]. 现代防御技术,2016,44(1):90-97.
- [2] 郭庆伟,王毅,张磊,等. 弹道修正引信技术发展综述[J]. 飞航导弹,2016(10):47-51.
- [3] CHEN V C, LI F Y, HO S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems(S0018-9251), 2006, 42(1):2-21.
- [4] 束长勇,张生俊,黄沛霖,等. 基于微多普勒的空间锥体目标微动分类[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(7):1387-1394.
- [5] 肖金国,杜兰,韩勋,等. 基于参数化时频分析的进动锥目标瞬时微多普勒频率提取方法[J]. 电子与信息学报,2016,38(1):90-96.
- [6] 张瑜,赵小纳,王召迎. 弹道导弹微动特征散射点的选取[J]. 电光与控制,2017,24(11):1-6.
- [7] 孙璟潇,姜勤波,马红光. 弹载雷达回波模拟技术探讨[J]. 飞航导弹,2016(3):55-58.
- [8] 孙璟潇,马红光,姜勤波. 弹载雷达模拟回波关键参数特性分析[J]. 电光与控制,2016,23(5):89-93.
- [9] 潘越,周树德. 弹道导弹弹道建模与仿真技术研究[J]. 计算机仿真,2014,31(9):71-74.
- [10] 苏宪飞,张忠阳,张强,等. 远程防空导弹的新型弹道优化设计[J]. 现代防御技术,2017,45(5):29-34.
- [11] 孙璟潇,姜勤波,马红光. 自旋条件下弹载脉冲多普勒雷达回波特性研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(24):203-207.
- [12] 赵双,鲁卫红,冯存前,等. 基于宽窄带微多普勒信息的进动目标特征提取[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(10):2250-2257.
- [13] 李松,冯有前,刘昌云,等. 弹道导弹微动模型及微多普勒特征研究[J]. 现代防御技术,2011,39(6):95-99.
- [14] 张素玲,席峰,陈胜焱,等. 基于正交压缩采样系统的脉冲雷达回波信号实时重构方法[J]. 电子与信息学报,2016,38(5):1064-1071.
- [15] 原帅,盛美菊,王学勤,等. 复合微多普勒效应中几种时频方法的比较[J]. 电光与控制,2008,15(8):57-60.
- [16] 艾春安,蔡笑风,刘继方,等. 短时傅里叶变换声-超声检测信号缺陷识别[J]. 中国测试,2015,41(4):29-31.

(上接第 50 页)

析及影响[J]. 科学技术与工程,2007,24(7):6427-6430.

- [3] 范伟,余晓芬,奚琳. 压电陶瓷驱动系统及控制方法研究[J]. 光学精密工程,2007,15(3):368-371.
- [4] 谭志波. 压电陶瓷驱动器迟滞补偿方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [5] 王婉婷. 基于高精度辨识的复合轴控制策略研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2016.
- [6] 张桂林,张承进,李康. 基于 PI 迟滞模型的压电驱动器自适应辨识与逆控制[J]. 纳米技术与精密工程,2013,11(1):85-89.
- [7] GU G Y, ZHU L M. Modeling of rate-dependent hysteresis

in piezoelectric actuators using a family of ellipses[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2011, 165(2):303-309.

- [8] 朱炜. 压电陶瓷叠堆执行器及其系统的迟滞现象模拟、线性化及控制方法的研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [9] 方楚. 光束指向控制设备中快速反射镜系统设计研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2017.
- [10] 江国栋,王晓东. 基于 PI 逆模型的压电执行器复合控制[J]. 压电与声光, 2016,38(4):553-557.
- [11] 张丽敏,郭劲. 快速反射镜双 X-Y 轴控制的仿真研究[J]. 光学精密工程,2008,13(s1):142-147.
- [12] 许晏铭. 单探测器复合轴的跟踪技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2014.