

多普勒耦合对跟踪模式切换的影响分析

樊俊良, 彭楠, 林怡呈
(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要:具有脉冲串信号形式的单脉冲雷达能通过模式切换实现应答信号和反射信号跟踪切换,对跟踪模式切换原理进行说明,并对脉冲压缩技术产生的多普勒耦合效应进行分析,给出了距离多普勒耦合效应修正模型,最后根据修正模型分析了多普勒耦合对跟踪模式切换产生的影响。

关键词:单脉冲雷达;距离多普勒耦合;跟踪模式切换

中图分类号:TN953

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.04.010

0 引言

单脉冲雷达通常有应答式和反射式两种跟踪方式,其中应答式跟踪是指雷达发射上行信号触发合作目标应答机,然后单脉冲雷达接收应答机下行信号,对目标进行跟踪和测量。应答信号具备信号干净、幅值稳定、作用距离远的特点,在合作目标跟踪测量任务中被广泛使用^[1],但应答式跟踪效果直接受应答机工作状态影响,应答式跟踪通常选用单载频波形。反射式跟踪被广泛用于非合作目标,反射式跟踪是指雷达发射信号遇到目标后反射,然后接收反射信号对目标进行跟踪和测量,但反射信号强度受目标距离、姿态等影响常有起伏,跟踪稳定性较差,反射式跟踪根据距离选用不同脉宽的线性调频信号^[2]。

现代单脉冲雷达为防止脉冲雷达在跟踪合作目标时,合作目标应答机失效,无法完成目标跟踪,通常采用脉冲串信号形式,即采用线性调频加单载频的信号形式。设计有脉冲串信号形式的单脉冲雷达,在一定条件内可以选择反射2、反射1、应答I、应答II多种模式跟踪目标,其中反射2模式跟踪线性调频的反射信号,反射1模式跟踪单载频的反射信号,应答I和应答II模式跟踪单载频在不同应答机时延下对应的应答信号。具有脉冲串信号形式的单脉冲雷达最大的优势在于能够根据回波信号情况,选择反射式或应答式最优跟踪方式,确保跟踪任务圆满成功。

本文对跟踪模式切换的原理进行研究,针对线性调频信号处理的特殊性,研究脉冲压缩技术对运动目标产生的多普勒耦合影响,并进一步分析多普勒耦合对跟踪模式切换的影响。

1 跟踪模式切换

某型单脉冲雷达跟踪模式切换根据脉冲回波信号相对位置移动跟踪波门,实现跟踪模式切换,因此波门移动距离是跟踪模式切换的关键。其中波门移动距离由不同通道的设备零值和不同时延应答机对应的应答机零值共同决定。

反射式跟踪距离零值是指发射信道和接收信道及距离跟踪回路时延所产生的零值,又叫设备零值,等于设备实测距离值 $R_{测}$ 与目标的真实距离 $R_{真}$ 的差值, $R_{真}$ 为大地测量得到或通过更高精度的测量设备的测量距离^[3]。

应答式跟踪距离零值包括设备零值和应答机零值,应答机零值是应答机时延在距离上的反映。目前相参应答机主要有两种,时延约为6.4 μs 和12.8 μs 的应答机。根据无线电波的传输原理^[4]:

$$R' = \frac{1}{2}ct \quad (1)$$

因此,应I距离零值约为960 m,应II距离零值约为1920 m,实际零值由具体应答机时延决定。

应答信号的零值等于反射式距离零值和相应的应答机零值之和,因此反射2、反射1、应答I、应答II 4种模式相互切换波门移动的距离等于相应信号之间的零值差值。反射2、反射1、应答I、应答II 4种回波信号之间的相对距离如图1所示。

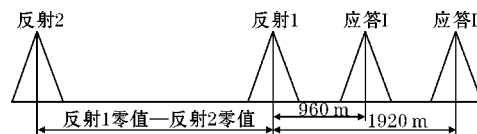


图1 反2、反1、应I、应II 4个回波信号的相对距离

在单脉冲雷达中,为兼顾作用距离和分辨能力,使用脉冲压缩技术对线性调频回波信号进行处理,但是脉冲压缩技术对运动目标又会带来多普勒耦合的影响^[5-6],因此在涉及到线性调频回波信号(即反射2)模式切换还需要补偿一个多普勒耦合修正量。

2 多普勒耦合修正

线性调频脉冲信号^[7-8]是一种脉内频率调制信号,设中心频率为 f_0 、脉宽为 τ 、带宽为 B 、幅度为 A 的线性调频脉冲信号 $x(t)$ 为

$$x(t) = A \text{rect}(t) \exp[j(2\pi f_0 t + \frac{1}{2}\mu t^2)] \quad (2)$$

在脉冲宽度内,信号的角频率从 $(2\pi f_0 - \frac{1}{2}\mu t^2)$ 变化到 $(2\pi f_0 + \frac{1}{2}\mu t^2)$,调频斜率 $\mu = 2\pi B/\tau$ 。

线性调频信号的频谱 $X(f)$ 为

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} A \text{rect}(t) \exp(2\pi f_0 t + \frac{\mu t^2}{2}) \exp(-j2\pi f t) dt \quad (3)$$

当 $D \gg 1$ 时,线性调频信号的幅度谱 $|X(f)|$ 和相位谱 $\Phi(f)$ 可近似表示为

$$|X(f)| = \begin{cases} A \sqrt{2\pi/\mu} & |f-f_0| \leq B/2 \\ 0 & |f-f_0| > B/2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\Phi(f) = -\frac{2\pi^2(f-f_0)^2}{\mu} + \frac{\pi}{4} \quad |f-f_0| \leq B/2 \quad (5)$$

线性调频的频谱可近似表示为

$$X(f) = \begin{cases} A \sqrt{\frac{2\pi}{\mu}} \exp\{j[-2\pi^2(f-f_0)^2/\mu + \frac{\pi}{4}]\} & |f-f_0| \leq B/2 \\ 0 & |f-f_0| > B/2 \end{cases} \quad (6)$$

线性调频回波信号经过雷达接收机的正交相位检波器输出零中频信号,中频信号 $f_0 = 0^0$,所以

$$X(f) = \begin{cases} A \sqrt{\frac{2\pi}{\mu}} \exp\{j[-2\pi^2 f^2/\mu + \frac{\pi}{4}]\} & -B/2 \leq f \leq B/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

根据脉冲压缩原理,脉冲压缩滤波器的频率特性 $H(f)$ ^[10-11]可以表示为

$$H(f) = K |X_0(f)| e^{-j\varphi_0(f)} e^{-j2\pi f t_{d0}} \quad (8)$$

其中 $|X_0(f)|$ 和 $\varphi_0(f)$ 分别为零中频输出信号的幅度谱和相位谱,它们分别为

$$|X_0(f)| = \begin{cases} A \sqrt{\frac{2\pi}{\mu}} & -B/2 \leq f \leq B/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\varphi_0(f) = -\frac{2\pi^2 f^2}{\mu} + \frac{\pi}{4} \quad (10)$$

因此脉冲压缩滤波器的幅频特性 $|H(f)|$ 和相频特性 $\varphi_H(f)$ 分别为

$$|H(f)| = K |X_0(f)| = \begin{cases} KA \sqrt{\frac{2\pi}{\mu}} & -B/2 \leq f \leq B/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$\varphi_H(f) = -\varphi_0(f) - 2\pi f t_{d0} = \frac{2\pi^2 f^2}{\mu} - \frac{\pi}{4} - 2\pi f t_{d0} \quad (12)$$

脉冲压缩滤波器的群时延 $t_d(f)$ 表示压缩滤波器对输入信号各频谱分量的延迟特性^[12-13],即

$$t_d(f) = -\frac{d\varphi_H(2\pi f)}{d(2\pi f)} = -\frac{2\pi f}{\mu} + t_{d0} = -\frac{f\tau}{B} + t_{d0} \quad (13)$$

实际工作中,接收机收到的运动目标的回波信号中还包含有多普勒频率 f_d ,中频信号 $f_0 \neq 0$,则

$$t_d(f) = -\frac{(f-f_0)\tau}{B} + t_{d0} \quad (14)$$

线性调频回波信号的中心频率为 $f' = f_0 + f_d$

$$t_d(f') = -\frac{(f_0 + f_d - f_0)\tau}{B} + t_{d0} = -\frac{f_d \tau}{B} + t_{d0} \quad (15)$$

线性调频的匹配滤波器对存在多普勒回波信号产生附加 Δt 的时延 $\Delta t = -\frac{f_d \tau}{B}$,这个附加时延与多普勒频移成正比,称为多普勒耦合现象^[14]。定义目标出地平到航捷处,径向速度 $v < 0$, $f_d > 0$,收到的回波载频提高;目标从航捷到入地平,径向速度 $v > 0$, $f_d < 0$,收到的回波载频降低。当 f_d 为正值时, Δt 为负,脉压后的脉冲前移;当 f_d 为负值时, Δt 为正,脉压后的脉冲后移。

因此脉冲串信号形式下设计到反射2跟踪模式切换还需要考虑附加时延 Δt 的影响,波门移动的距离还要进行多普勒耦合修正,其修正模型为

$$R' = R \pm \frac{\Delta t}{2} = R \pm \frac{c\tau}{2B} f_d = R \pm \frac{c\tau}{2B} \frac{2v}{\lambda} = R \pm \frac{v f_0 \tau}{B} \quad (16)$$

修正模型中使用正负号是由于脉压系统可能采用了正或负斜率的脉压匹配滤波器。令 $\delta_i = \pm \frac{v f_0}{B}$, δ_i 为距离多普勒耦合系数,是一个常量,确定多普勒耦合系数 δ_i 时,应该以进行脉压匹配的线性调频信号为准,当斜率为正时,距离多普勒耦合系数为负。当斜率为负时,距离多普勒耦合系数为正。但当测量设备采用高差式混频时,应对 δ_i 进行反置处理,当斜率为正时,距离多普勒耦合系数为正,当斜率为负时,距离多普勒耦合系数为负。

3 影响分析

某型单脉冲雷达采用了正斜率的脉压匹配滤波

器,根据多普勒耦合修正模型,分析该型雷达不同脉宽、速度对应的多普勒耦合量之间的关系,具体数据如图2所示。

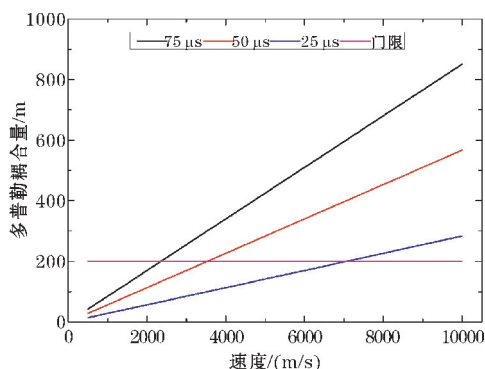


图2 不同速度、不同脉宽对应的多普勒耦合量

从图2可以看出,同一种脉宽信号的多普勒耦合量随速度的增加成线性增长;信号脉宽越宽,多普勒耦合量曲线斜率越大,速度对多普勒耦合量的影响越大。假设某型雷达的窄跟波门宽度为200 m,脉宽为75 μ s、50 μ s、25 μ s的线性调频信号在速度分别达到1.2 km/s、1.8 km/s、3.5 km/s时,多普勒耦合修正量将达到100 m。如图3所示,如果不进行多普勒耦合修正,对于脉宽为75 μ s、50 μ s、25 μ s的线性调频信号在速度分别达到1.2 km/s、1.8 km/s、3.5 km/s时,跟踪模式切换时波门边缘刚好接触回波信号边缘,影响波门锁定回波信号,影响目标跟踪。

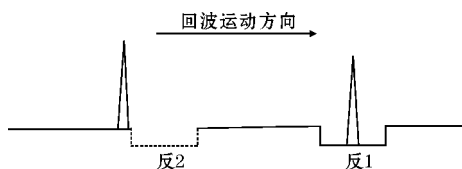


图3 跟踪模式切换波门移动示意图

在实际跟踪过境目标工作中,单脉冲雷达测量目标径向速度时,目标靠近测量雷达,速度为负,绝对值越来越小;目标远离测量雷达,速度为正,绝对值越来越大。采用某型单脉冲雷达跟踪国际空间站^[15]实测数据,根据多普勒耦合修正模型,分析了实际跟踪过程中距离、速度和对对应多普勒耦合量的关系,如图4所示。

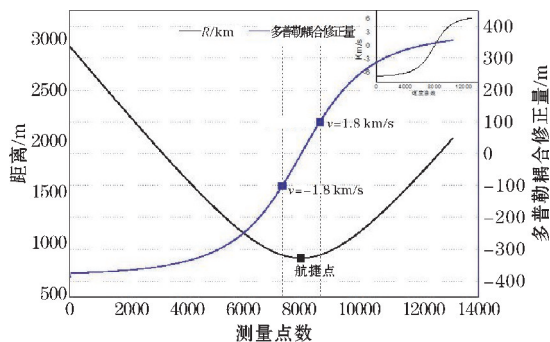


图4 距离、多普勒耦合和波门关系图

从图4可以看出,目标跟踪弧段内目标距离由远及近,然后由近及远,径向速度绝对值相应的由大到小,再由小到大。多普勒修正量变化曲线与右上角目标径向速度曲线趋势一致,多普勒耦合修正量随速度的增加而增加,在跟踪弧段航捷附近速度在-1.8 km/s和1.8 km/s时多普勒耦合修正量达到-100 m和100 m。也就是说在两条虚线之外的弧段进行跟踪模式切换,若不进行多普勒耦合修正,波门移动距离不够无法准确锁定回波信号影响稳定跟踪。在实际跟踪实验中,跟踪弧段内目标径向速度绝对值大于1.8 km/s的段落占绝大部分,因此在大部分跟踪弧段内实施跟踪模式切换多普勒耦合现象都将影响稳定跟踪,导致目标丢失。

4 结束语

反射式跟踪是非合作目标正常跟踪的重要手段,同时合作目标跟踪时为应对应答信号突然消失的突发情况,必要时进行跟踪模式切换确保跟踪成功。对跟踪模式切换原理进行阐述,并对线性调频信号产生的多普勒耦合效应进行分析,给出了多普勒耦合效应修正模型,最后分析了多普勒耦合对跟踪模式切换产生的影响。通过分析发现,多普勒耦合对模式切换具有较大的影响,跟踪空间目标大部分弧段多普勒耦合理论修正量都远超波门宽度,无法完成跟踪模式的无缝切换,影响空间目标稳定跟踪。

参考文献:

- [1] 范义平. 全固态数字化脉冲相参应答机设计[J]. 电讯技术, 2012, 50(12): 102-105.
- [2] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 85-110.
- [3] 朱祥玲. 单脉冲雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 120.
- [4] 向敬成. 雷达系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 110-162.
- [5] 徐敏. 单脉冲测量雷达测速技术研究[J]. 现代雷达, 2005(1): 61-64.
- [6] 蒋立民. 测量雷达的距离多普勒耦合修正研究[J]. 电子测试, 2018, 10: 71-73.
- [7] 邱丽原. 线性调频信号脉冲压缩仿真与分析[J]. 电子科技, 2011, 24(7): 117-119.

[8] 孟泽,孙合敏,董礼. 线性调频信号仿真及其特性分析[J]. 舰船电子工程,2009,29(8):114-117.

[9] 王德纯,丁家会,陈望冬. 精密跟踪测量雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006:340-360.

[10] 徐玉芬. 现代雷达信号处理的数字脉冲压缩方法[J]. 现代雷达,2007(7):65-68.

[11] 严明. 脉冲多普勒雷达信号处理 MATLAB 仿真研究[D]. 淮海:安徽理工大学,2016:27-40.

[12] 胡红军. 脉冲压缩雷达距离多普勒耦合对测距影响分析[J]. 现代雷达,2011,30(12):47-50.

[13] 翟庆林,张军,付强. 线性调频脉冲压缩技术及其在雷达系统中的应用[J]. 现代电子技术,2007(1):17-19.

[14] 李国军,赵栋华,赵永铁. 距离多普勒耦合对雷达滤波精度影响分析[J]. 舰船电子工程,2018,38(4):51-53.

[15] 姚人杰,埃瑞克·伯杰. 太空史诗:国际空间站载人运行 20 年[J]. 世界科学,2021(2):4-7.

Analysis of Effects and Solving on Doppler Coupling to Tracking Mode Switching

FAN Junliang, PEN Nan, LIN Yicheng

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: The monopulse radar with coherent pulse train signal can track switch between response signal and reflected signal through mode switching. First, this article explains the principle of tracking mode switching in detail. Then by analyzing the Doppler coupling effect produced by pulse compression technology ,the Range-Doppler Coupling correction model is given. Finally, the influence of Doppler coupling on tracking mode switching is analyzed according to the modified model and radar measurement data.

Keywords: the monopulse radar; Range-Doppler Coupling effect;tracking mode switching