

文章编号: 2097-1974(2025)03-0069-07

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20250310

火箭跟踪过程它站雷达信号运动趋势分析

吴高杨, 王 强, 蔡红维, 郑学平
(西昌卫星发射中心, 西昌, 615000)

摘要: 在火箭跟踪测量过程中, 手动移相操作仍然是单脉冲雷达规避同频干扰的主要应对措施。为了提高操作人员在目标跟踪过程中对干扰现象判断的准确度和处置的及时性, 降低同频干扰不利影响, 提出了一种基于雷达目标信号速度特征和火箭理论飞行弹道数据的它站雷达信号运动趋势分析方法。经与实际跟踪情况对比, 在火箭正常飞行情况下, 该方法能够准确预判各雷达信号的运动趋势, 同时, 该方法也为火箭发射测控领域单脉冲雷达实现自动目标识别提供了一种可行途径。

关键词: 火箭跟踪测量; 单脉冲雷达; 同频干扰; 速度特征; 目标识别

中图分类号: TN958.4; V19

文献标识码: A

Analysis of Radar Signal Movement Trend in Rocket Tracking Process

WU Gaoyang, WANG Qiang, CAI Hongwei, ZHENG Xueping
(Xichang Satellite Launch Center, Xichang, 615000)

Abstract: Manual phase shifting operation is still the main countermeasure for single pulse radar to avoid Co-frequency Signal Interference in space launch and control missions. In order to improve the accuracy of operators' judgment of interference phenomena and the timeliness of handling during target tracking, and reduce the adverse effects of Co-frequency Signal Interference, a method based on radar target signal velocity characteristics and rocket theory flight trajectory data is proposed to analyze the motion trend of other station radar signals. Compared with the actual tracking situation, this method can accurately predict the motion trend of each radar signal under normal rocket flight conditions. Meanwhile, this method also provides a feasible approach for achieving automatic target recognition for single pulse radar in the field of aerospace measurement and control.

Keywords: rocket tracking and measurement; monopulse radar; co-frequency signal interference; speed characteristics; target recognition

0 引言

在火箭飞行跟踪测量时, 为了保证对火箭飞行弹道的连续可靠测量, 要求至少有两站单脉冲雷达设备同时保持对火箭的持续跟踪。在应答跟踪模式下, 多站脉冲雷达与同一台箭载应答机合作, 受限于应答机的工作频点, 各脉冲雷达站均工作在同一频点上^[1], 由此带来了非常明显的同频干扰现象。文献 [2] ~ [7] 分别在不同应用场景下研究分析了单脉冲雷达抗同频干扰措施, 以及同频干扰产生机理及特性, 均取得了相应成果。在火箭测控领域, 文献 [8] 对同频信号运动特性进行全程检测, 结合移相规则, 通过仿真验证提高了同频雷达的移相成功概率。文献 [9] 分析了正弦调频和自适应变频两种方式抗同频干扰的理论可行性。在提升单脉冲雷达自动化运行能力方面, 文

献 [10] ~ [13] 开展了自动跟踪方法设计, 以及提升雷达目标检测能力相关研究。相关研究成果尚未在火箭测控领域单脉冲雷达中得到实际运用, 因此当前雷达规避同频干扰的主要措施仍然是依靠操作手进行手动移相操作。在进行手动移相操作时, 操作人员对信号移动状态的观察显得尤为重要, 需要实时判断它站信号与本站信号的移动趋势和相对位置, 并在必要时采取移相操作, 否则极有可能因不当的移相操作导致各站信号相互干扰而丢失目标。本文立足火箭发射测控实际场景, 为有助于雷达操作手在雷达跟踪过程中及时采取合理移相操作规避同频干扰, 提出了一种它站雷达信号运动趋势的分析方法, 用于预判它站雷达信号运动状态。本文给出的理论分析方法也为当前火箭测量中单脉冲雷达实现目标信号自动识别提供了

理论支撑。

1 手动移相必要性

在火箭跟踪测量中,同频干扰现象一直存在,而且是影响地面雷达正常跟踪的主要因素。在当前雷达跟踪模式下,各站雷达在同时跟踪目标时,需要保持各站信号间隔适当距离,以避免相互干扰。因箭载应答机功率及响应频率限制,应答机在响应一个地面雷达脉冲信号后存在一段恢复时间 t_r ,在此期间内,应答机不会再响应地面雷达信号。因此,地面雷达发射脉冲达到应答机的时间间隔应大于 t_r ,即各雷达的应答信号的间隔距离应大于 $C \times t_r / 2$ (C 为光速)。

分析多次跟踪测量过程地面雷达丢失目标的原因,因同频干扰导致目标丢失达到90%以上,具体原因包括2个方面。一是雷达链中后续雷达接入跟踪时干扰正常跟踪雷达。当地面某一雷达准备跟踪目标并开始发射信号时,若与正在跟踪状态的雷达的脉冲发射时间接近,两个脉冲到达应答机的时间小于 t_r ,将导致信号被阻塞而丢失目标。如图1所示,若后接入跟踪的雷达2的发射脉冲滞后于雷达1,则应答机将不会响应雷达2的脉冲信号,雷达2不能接收到本站应答信号;若雷达2脉冲信号超前雷达1脉冲信号达到,且正好处在自动卫门检测的扣除区域,则应答机将不会响应雷达1,从而导致正常跟踪的雷达1丢失目标。若在极端情况下,两站雷达脉冲信号同时达到应答机,则上述两种干扰情况均有可能出现。由于新接入跟踪雷达开始发射脉冲的时间是随机的,因此其信号出现在它站雷达A显上的位置具有不可预测性。若地面雷达的脉冲发射周期均为 F_r ,则新接入雷达导致相互干扰的概率约为

$$P = \frac{t_r + 4\tau}{F_r} \times 100\% \quad (1)$$

式中 τ 为脉冲宽度。雷达跟踪波门和自动卫门检测扣除区域一般设置为2倍脉冲宽度,以当前在役单脉冲雷达为例,发生相互干扰的概率约为1.76%。由式(1)可知,增大雷达脉冲发射周期或减小应答机恢复时间,可以有效降低此类干扰现象发生的概率。虽然发生此类干扰现象的概率较低,但目前针对此类同频干扰现象尚无有效预防措施,主要依靠操作人员在发现干扰信号时快速采取连续手动移相操作来规避,但此类干扰现象具有突发性,对操作人员应急处置能力要求高,成功规避的概率仍然不高。

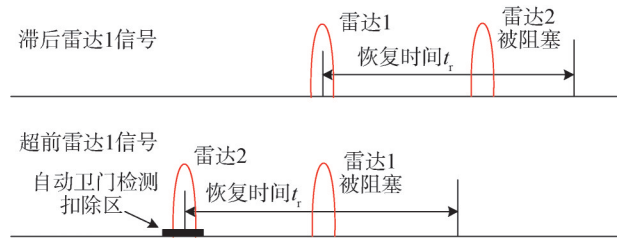


图1 新进入雷达对正常跟踪雷达的影响

Fig.1 The impact of newly entered radar on normal tracking radar

同频干扰另一主要原因是正常跟踪过程未能及时采取移相操作,导致信号相互穿越而丢失目标或跟踪错误目标。虽然单脉冲雷达设计有自动卫门检测机制,可以通过自动移相规避两站雷达信号靠近时相互穿越波门的现象,但是在雷达未锁定目标或者在雷达进行避盲时,雷达自动卫门检测机制无效。当前雷达卫门检测机制设计存在不足,当火箭箭体或火箭分离残骸的反射信号过强时,将导致雷达连续移相,影响测量精度,同时也影响其他雷达正常跟踪。部分雷达为了避免自动卫门连续移相带来的不利影响,为自动卫门设置了休止机制,即在连续多次移相后暂停卫门检测。因此,在自动卫门失效期间,若两站信号相互靠近并交叉穿越,将必然导致雷达跟踪丢失或错跟目标。

综上,现有雷达自身设计的自动卫门机制存在诸多不足之处,在多站雷达同时跟踪目标过程中,仍然需要操作人员通过手动移相确保在自动卫门失效期间避免各站信号相互干扰。

2 雷达信号运动趋势分析

当前雷达跟踪模式对操作人员,特别是测距岗位操作人员有较高要求。操作人员要熟悉各种异常应急处置措施,并在实时跟踪过程中及时准确做出判断,采取有效应对措施。若操作人员能够在跟踪测量前掌握各站信号的运动状态,则有助于操作人员提前预判可能出现的相互干扰情况,及时采取移相措施,降低干扰导致目标丢失的概率。

2.1 信号速度特征分析

当多站单脉冲雷达跟踪同一个目标时,雷达自身信号的移动速度表征了目标相对于其自身的径向速度,但是在本站雷达上看到的它站信号的移动速度并不是目标相对于它站雷达的速度,其表征的是两站雷达与目标之间的距离和变化率,如图2所示。图2中 V_1 、 V_2 分别表示目标T相对于雷达 L_1 、 L_2 的径向速度, S_1 、 S_2 表示目标相对于雷达 L_1 、 L_2 的径向距离,由图2

可得径向速度与距离关系如式 (2) 所示。

$$\begin{cases} V_1 = dS_1 \\ V_2 = dS_2 \end{cases} \quad (2)$$

设目标与两站雷达之间的距离和为 S_{12} ，则 $S_{12}=S_1+S_2$ 。假设两站雷达的发射脉冲同步，雷达 L_1 接收到雷达 L_2 的信号经由 S_{12} 的距离达到。由单脉冲雷达测距方程 $S=Ct/2$ 可知，在雷达 L_1 上所得雷达 L_2 脉冲信号视在距离 $S_{\text{视在}}$ （由信号到达时间与当前脉冲发射时间之差换算得到的距离）为信号实际行程的一半，即 $S_{\text{视在}}=S_{12}/2$ 。同理，在雷达 L_2 上雷达 L_1 脉冲信号的视在距离也为 $S_{12}/2$ 。由此可知，结合公式 (2) 它站信号在本站雷达上的移动速度可由公式 (3) 得到，即：

$$\begin{cases} V_{12} = V_{21} \\ V_{12} = \frac{dS_{12}}{dt} \Rightarrow V_{12} = \frac{V_1 + V_2}{2} \\ S_{12} = S_1 + S_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 V_{12} 和 V_{21} 表示相对于本站雷达它站信号的移动速度。式 (3) 表明在两站雷达之间，对方信号相对本站雷达的速度是相同的，且速度等于目标相对于两站雷达速度之和的一半。

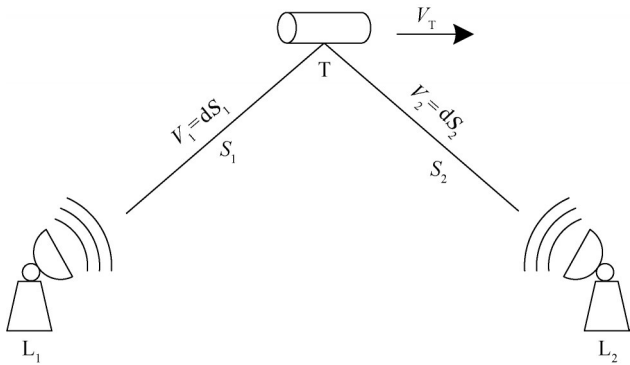


图2 两站跟踪示意

Fig.2 Two station tracking diagram

2.2 信号运动趋势预判

基于上述理论分析方法，以雷达 L_1 作为本站雷达参照，对某次实际跟踪的理论弹道数据进行分析，并给出对实际跟踪情况的信号状态预判结论。

图3给出了基于相同脉冲信号发送时间下目标相对于两站雷达的距离 S_1 、 S_2 变化和它站信号理论视在距离 $S_{\text{视在}}$ 的变化趋势。由图3可知，目标相对于雷达 L_1 的距离变化为由近及远，相对于雷达 L_2 的距离逐渐增大。目标与两站雷达之间的距离和在 150 s 之前基本保持不变。因此，由距离的变化趋势可判断出它站信号在跟踪前期基本保持静止状态。需要指出的是，由前文分析可知，它站信号理论距离可以反映目标至两

站雷达间的距离变化，但是并不代表它站信号在本站雷达上的视距。

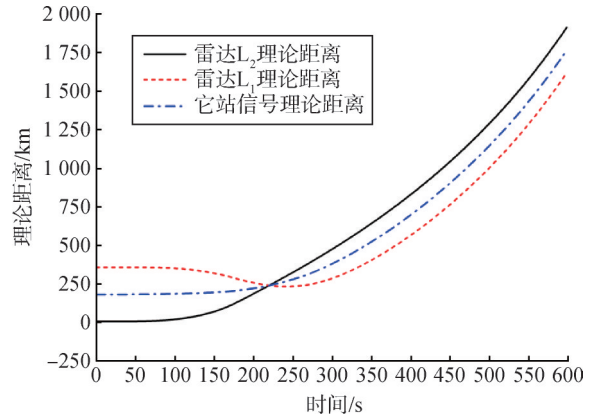


图3 目标信号理论距离变化

Fig.3 Theoretical distance variation of target signal

图4给出了3个信号的速度变化趋势。由速度变化可知，它站信号相对本站雷达的移动速度并不是目标相对它站雷达的速度，而两站雷达之间所接收到的对方信号在各自雷达上的移动速度相同。从图4中可以看出，对于当前分析的理论弹道，它站信号的移动速度在前期基本为0。随着时间增加，它站信号移动速度逐渐增大且始终为正值。因此，结合图3中的距离变化趋势和图4中的速度变化趋势可以判断，它站信号相对于本站雷达在 150 s 前由静止状态逐渐缓慢向右移动，随着时间的增加右移速度逐渐增大，全程不存在它站信号反向移动的情况。

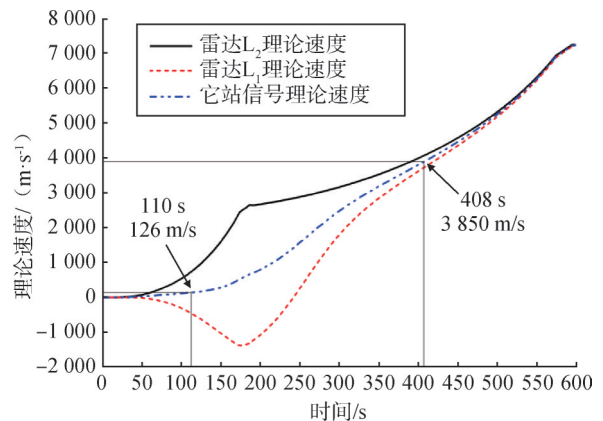


图4 目标信号理论速度变化

Fig.4 Theoretical velocity variation of target signal

图5给出了两站雷达间对方信号相对自身信号的移动速度变化。由图5可知，对雷达 L_1 而言，它站信号的移动速度在全程均大于本站雷达 L_1 信号速度，即

它站信号如果位于雷达 L_1 右侧,则它站信号一直处于右侧远离,左侧靠近的状态;对雷达 L_2 而言,它站信号的移动速度在全程均小于本站雷达 L_2 信号速度,即它站信号如果位于雷达 L_2 右侧,则它站信号一直处于右侧靠近,左侧远离的状态。因此,基于当前雷达所使用的抗同频干扰措施,雷达 L_2 要在目标跟踪过程中注意采用移相操作以避免从右侧靠近的干扰信号。同时还可以看出,随着目标的远离,本站雷达信号与它站雷达信号的速度差值逐渐趋于零,以等速同向移动。

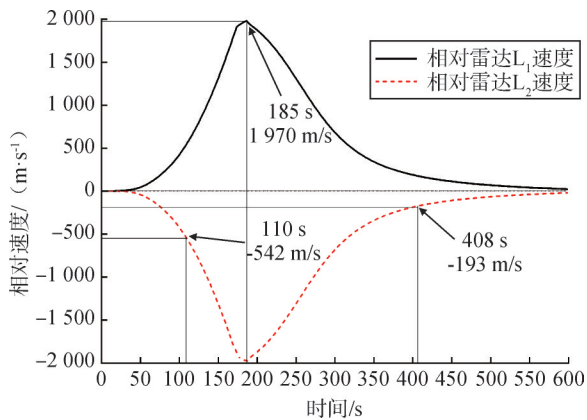


图5 目标信号理论相对速度变化

Fig.5 Theoretical relative velocity variation of target signal

综上对当前理论弹道的分析可知,对雷达 L_1 而言,它站信号相对于雷达 L_1 右移速度逐渐增大,全程不存在反向移动的情况,且相对于雷达 L_1 自身信号一直处于右侧远离,左侧靠近的状态,相对运动速度最大在185 s处,约1970 m/s。

3 信号运动趋势验证

前文基于某次火箭跟踪的理论弹道利用本文提出的分析方法对实际跟踪过程中的信号运动趋势进行了预判。图6与图7给出了雷达 L_1 在当次跟踪过程中两站信号4个时刻在A显上的分布情况,用于与预判结果作对比分析。

由图6可知,在弧段前期,它站信号处于缓慢向右移动的状态,且与雷达 L_1 本站信号相对距离缩小,其移动速度大约为125 m/s,与雷达 L_1 信号的相对速度约为500 m/s。通过理论弹道分析,在此时间区间得到的这两个速度分别约为126 m/s和542 m/s。由此可知,在雷达 L_1 A显上观察到的前期目标跟踪情况与依据理论弹道的预判结果基本一致。

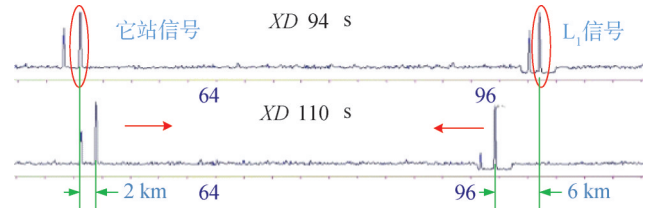


图6 跟踪情况(94~110 s)

Fig.6 Tracking situation(94~110 s)

图7给出了在跟踪弧段后期雷达 L_1 A显上的信号分布。由图7可知,它站信号在弧段后期依然保持向右移动,且向雷达 L_1 信号靠近,移动速度已达到约3750 m/s,相对雷达 L_1 自身信号速度约为200 m/s,与理论分析得到的结果3850 m/s和193 m/s基本一致。

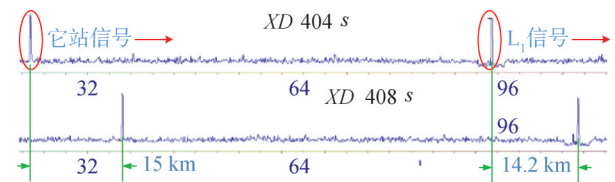


图7 跟踪情况(404~408 s)

Fig.7 Tracking situation(404~408 s)

通过对比实际跟踪情况与弹道预判结果可知,在不考虑各种测量误差带来影响的情况下,依据理论弹道对信号运动状态的预判与实际跟踪过程中的信号移动状态一致。

4 雷达信号识别

对雷达信号运动状态进行预判的前提是操作人员或本站雷达能够正确识别出各信号所属的雷达站。通常情况下,根据事先约定的各站跟踪开始时间,操作人员可根据它站雷达信号出现的时间来判断该信号所属雷达站。但是当雷达链路中存在三站以上雷达同时跟踪目标时,此种方式的可行性不高。因为在持续跟踪过程中,各雷达信号在位置和幅度上无明显的特征可区分,且信号存在跳跃和相互穿越现象,对操作人员持续观察各信号造成不利影响,操作人员在目标持续跟踪过程中往往难以对它站信号所属雷达站进行准确判断。

4.1 人工识别方法

本文基于对各雷达站信号速度特征的分析为操作人员在跟踪过程中识别信号所属雷达站提供了另外一种可行途径。图8和图9给出了根据某次跟踪测量数据得到的各雷达信号在雷达 L_1 (本站)A显上的速度和相对速度曲线,三站雷达布设在火箭飞行航迹两

侧, 沿航迹方向依次为 L_2 、 L_1 、 L_3 。由图8和图9可知, 它站雷达信号在本站雷达 L_1 A显上的移动速度和相对运动趋势是不同的。操作人员通过观察A显上各雷达信号的运动趋势, 并与事前的理论分析结果进行比对, 在各站信号移动趋势存在明显差异情况下, 操作人员可以准确判断出当前时刻各信号所属雷达站。同时根据理论弹道对各信号的运动趋势的分析结果, 操作人员在跟踪过程中可更加快速预判各信号的相对运动趋势, 在它站信号逼近时尽可能提前采取移相措施, 降低信号相互穿越导致目标丢失风险。

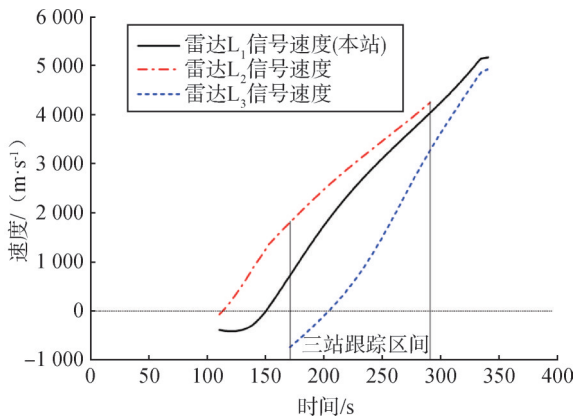


图8 三站跟踪过程雷达信号速度

Fig.8 The speed of signal during the three station tracking process

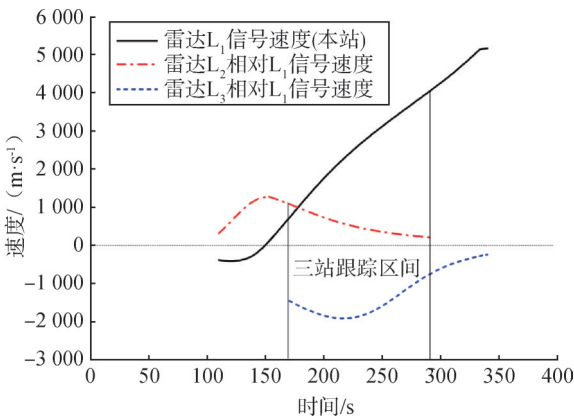


图9 三站跟踪过程它站信号相对本站信号速度

Fig.9 The relative speed of signal during the three station tracking process

4.2 自动识别方法

基于雷达A显上各信号速度特征, 雷达实现对它站信号的识别, 流程如图10所示。首先, 本站雷达根据实时得到的目标测量信息 (R_1, V_1) 通过坐标转换得到目标在地心坐标系下的位置和速度信息 (R, V) , 再计算得到目标在它站雷达测量坐标系下的

位置信息 (R_2, V_2) ^[14], 随后利用式(3)得到它站信号在本站A显上的移动速度 V_{12} , 最后将 V_{12} 与从本站A显上测得的它站信号移动速度进行比对, 即可判断出它站信号所属雷达站。

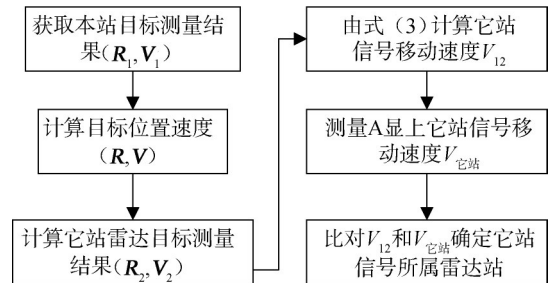


图10 雷达自动识别它站信号流程

Fig.10 Automatically recognizes other stations signal process

需要指出的是, 利用速度特征识别它站雷达信号的前提是本站雷达具有多目标跟踪测量能力, 即本站雷达至少需要能够测量出它站信号移动速度。同时, 该方法也存在一定局限, 当它站信号在本站雷达A显上的移动速度相同时, 此种方法将不再适用。如图11所示一种特殊情况, 若目标飞行轨迹正好位于雷达 L_2 和 L_3 的对称轴(图中虚线所示)所在的截面内时, 理论上 $V_{12} = V_{13}$, 且在目标相对所有地面雷达站距离逐渐增加过程中, V_{12} 和 V_{13} 将趋于相等, 此时将不能通过速度特征对目标信号进行区分。根据目前中国航天测控雷达分布和成熟型号火箭飞行弹道设计状态, 火箭飞行弹道基本固定, 并不存在如图11所示的情况, 因此在实际火箭跟踪测量中不会发生雷达上各站信号的移动速度完全相等的情况。即使在目标远离所有地面雷达, 致使所有目标信号速度趋于相等时, 因各站雷达信号相对运动速度趋于0, 且早期进入跟踪的雷达也会因遮蔽而退出跟踪, 所以在跟踪后期各站雷达信号相互穿越而发生干扰的可能性很低。

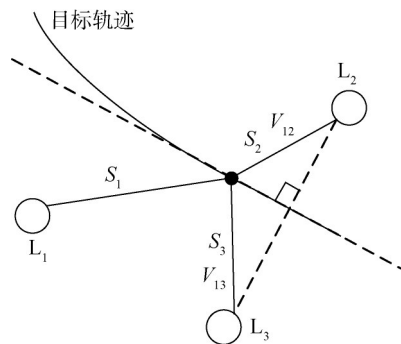


图11 三站跟踪示意图

Fig.11 Three station tracking diagram

虽然在当前火箭发射过程中不存在火箭飞行轨迹完全位于两站雷达对称轴所在截面内的情况,但随着新型号火箭增多,火箭飞行轨迹仍可能存在部分重合的情况。轨迹重合对采用本文方法识别雷达目标信号的不利影响需要根据后续新型火箭设计弹道分析。若只是短时间重叠,则仍可以在轨迹不重叠段依据速度特征进行区分;若是在两站雷达跟踪时段内完全重叠,则可以考虑调整雷达部署位置,避免此类特殊情况发生。

综上,单脉冲雷达在火箭跟踪测量实际运用场景中,通过信号速度特征对它站雷达信号进行识别具有实际运用价值。该方法可基于现行单脉冲雷达测量体制实现,无须对箭载合作目标进行调整,仅需地面雷达在信号处理环节增加多目标跟踪测量能力,而相关技术已在工程中得到成熟运用^[15-16]。

5 优势分析

本文提出的基于雷达目标信号速度特征和火箭理论飞行弹道数据的信号运动趋势分析方法,相比传统的人工操作有两点优势:

a) 可使操作人员更加快速、准确识别出 A 显上各信号所属雷达站。基于事前采用本方法对理论弹道进行分析,操作人员可提前预知各雷达信号在不同时间段的相对运动趋势,及时采取移相措施远离靠近的它站信号。因此,此方法可有效提高操作人员判断的准确性和移相操作的及时性。

b) 为同频单脉冲雷达实现自动规避干扰提供了理论支撑。若地面雷达采用多目标跟踪模式,根据本文提出的分析方法,雷达可以通过目标位置信息和各信号的速度特征自动识别出信号所属雷达站,并自动预测各雷达信号间相对移动趋势。基于此两点,雷达完全可以根据信号间的相对位置和移动趋势预判结果自行实施移相操作,从而实现自动规避干扰信号。通过雷达控制计算机实现自动判断和移相,其准确度和时效性将明显优于人工操作。

6 结束语

经过对火箭飞行理论弹道和实测弹道数据分析,本文提出的方法能够实现对它站信号运动状态的准确预判。该预判方法的关键在于计算出它站信号在本站雷达 A 显上的移动速度,依据该速度可以完全预判跟踪过程它站信号以及相对本站信号的运动趋势。在目标跟踪过程中即使存在多次移相,操作手

也可根据它站信号的移动速度和趋势较为容易地识别出信号所属雷达站,快速掌握并预判各站信号的移动情况。同时,基于对它站信号移动速度的分析,该方法也为火箭测控领域现行雷达测量体制下的单脉冲雷达实现对它站信号的识别提供了一种可行的技术途径。

参 考 文 献

- [1] 王德纯,丁家会,程望东.精密跟踪测量雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2006.
WANG Dechun, DING Jiahui, CHENG Wangdong. Precision tracking and measurement radar technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [2] 夏栋,李宝鹏,高伟亮,等.雷达脉宽捷变抗同频干扰技术[J].舰船科学技术,2022,44(6):121-124.
XIA Dong, LI Baopeng, GAO Weiliang, et al. Research on the technology of radar pulse width agility against co-frequency interference[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(6): 121-124.
- [3] 夏栋,朱海华,张静.线性调频信号变波形抗同频干扰研究[J].中国电子科学研究院学报,2020,15(7):642-648.
XIA Dong, ZHU Haihua, ZHANG Jing. Research on anti-co-frequency interference of LFM signal variable waveform[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(7): 642-648.
- [4] 王健,王宝,万华.脉冲多普勒雷达同频干扰研究[J].雷达科学与技术,2014,12(4):441-445.
WANG Jian, WANG Bao, WAN Hua. Study on co-frequency interference between pulse doppler radars[J]. Radar Science and Technology, 2014, 12(4): 441-445.
- [5] 闫冯军,汪永军.一种基于时域信号处理的同频干扰抑制方法[J].雷达与对抗,2015,35(4):21-24.
YAN Fengjun, WANG Yongjun. A shared frequency interference suppression method based on time-domain signal processing technology[J]. Radar & ECM, 2015, 35(4): 21-24.
- [6] 常艳,付涛,邵亮.一种抗同频异步干扰方法的研究与实现[J].火力与指挥控制,2019,44(10):75-79.
CHANG Yan, FU Tao, SHAO Liang. The research and realization of anti-asynchronous interference method[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(10): 75-79.
- [7] 袁建军,赵玉丽.同频干扰产生机理及特征分析[J].计算机与数字工程,2014,43(5):812-816.
YUAN Jianjun, ZHAO Yuli. Mechanism and characteristics of co-channel interference[J]. Computer & Digital Engineering, 2014, 43(5): 812-816.

- [8] 安家驰, 殷敏. 单脉冲雷达抗同频干扰措施分析[J]. 现代雷达, 2012, 34(11): 18-21.
AN Jiachi, YIN Min. Analysis of eliminating the same frequency jamming in single-pulse radar[J]. Modern Radar, 2012, 34(11): 18-21.
- [9] 赵梅, 韩大伟, 彭渔露. 单脉冲雷达抗同频信号干扰处理方法研究[J]. 无线电工程, 2019, 49(7): 617-620.
ZHAO Mei, HAN Dawei, PENG Yulu. Research on processing method of monopulse radar against co-frequency signal interference [J]. Radio Engineering, 2019, 49(7): 617-620.
- [10] 郭昕, 梁允峰, 杨博, 等. 一种测控雷达自动跟踪方法的设计与实现[J]. 现代雷达, 2020, 42(2): 23-29.
GUO Xin, LIANG Yunfeng, YANG Bo, et al. Design and application of an automatic tracking method for measurement and control radar [J]. Modern Radar, 2020, 42(2): 23-29.
- [11] 张庭赫, 黄学宇, 张启亮. 主瓣掩护式干扰下单脉冲雷达目标检测方法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 65-69.
ZHANG Tinghe, HUANG Xueyu, ZHANG Qiliang. A target detection method for monopulse radar under condition of main lobe cover interference[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 65-69.
- [12] 王建, 陈振华. 航天发射场单脉冲雷达粒子滤波检测前跟踪方法[J]. 现代雷达, 2020, 42(10): 38-45.
WANG Jian, CHEN Zhenhua. A particle filter track-before-detect method for monopulse radar in space aircraft launch site[J]. Modern Radar, 2020, 42(10): 38-45.
- [13] 蔡飞. 雷达弱小目标检测与跟踪技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
CAI Fei. Research on detection and tracking technologies for dim targets in radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [14] 赵文策, 高家智. 运载火箭弹道与控制理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
ZHAO Wence, GAO Jiazhi. The theoretical basis of trajectory & control of the launch vehicle[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [15] 高德宝, 陈浩, 印勇, 等. 单脉冲雷达基于相参积累的多目标分辨[J]. 无线电工程, 2017, 47(6): 24-26+55.
GAO Debao, CHEN Hao, YIN Yong, et al. Pulse radar's multi-target resolving based on coherent integration[J]. Radio Engineering, 2017, 47(6): 24-26+55.
- [16] 张德军, 曾维贵, 石文君, 等. 一种基于单脉冲雷达信号生成方位距离像的多目标跟踪算法[J]. 火控雷达技术, 2021, 50(2): 73-77.
ZHANG Dejun, ZENG Weigui, SHI Wenjun, et al. A multi-target tracking algorithm based on monopulse radar azimuth-range imaging acquisition[J]. Fire Control Radar Technology, 2021, 50(2): 73-77.

作者简介

吴高杨 (1991—), 男, 工程师, 主要研究方向为航天发射无线电测控。

王强 (1985—), 男, 工程师, 主要研究方向为航天发射无线电测控。

蔡红维 (1979—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为航天发射无线电测控。

郑学平 (1977—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为航天发射无线电测控。