

典型单脉冲雷达自动跟踪系统设计与实现

吴高扬, 王康, 张瀚, 刘畅, 任臻臻

(西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000)

摘要: 为提高航天测控领域单脉冲雷达自动化运行水平, 基于典型单脉冲雷达现有技术特征, 在国产自主可控软硬件平台上设计开发了一套单脉冲雷达自动跟踪系统; 该系统融合了雷达 A 显数字信号、全站状态和控制字等信息, 自动识别雷达跟踪过程中接收通道的目标和干扰信号, 实时监控雷达运行状态, 为系统自动判断和决策提供信息支撑; 系统通过自动生成雷达控制指令, 实现了对雷达任务状态准备、目标识别、目标捕获跟踪和常见异常处置的任务全流程自动控制; 经测试验证表明, 该系统在多站协同下的单脉冲雷达链路中得到成功运用, 目标识别准确率达 100%, 能够在 3 s 内完成目标重补操作, 极大地提升了单脉冲雷达跟踪可靠性和响应速率。

关键词: 航天测控; 单脉冲雷达; 自动跟踪; 自动控制

Design and Implementation of Typical Single Pulse Radar Automatic Tracking System

WU Gaoyang, WANG Kang, ZHANG Han, LIU Chang, REN Zhenzhen

(Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, China)

Abstract: In order to improve the automation operation level of single pulse radar in the field of aerospace measurement and control, a single pulse radar automatic tracking system was designed and developed on a domestically controllable software and hardware platform based on the technical characteristics of a typical single pulse radar. The system integrates radar A-display digital signals, status and control information of radar to automatically identify targets and interference signals in the receiving channel during radar tracking, monitors radar operation status in real time, and provides information support for automatic judgment and decision. The control commands which automatically generated by the system were sent to radar, so the radar can automatically prepare for task status, recognize targets, capture and track targets, and handle common anomalies. Through testing, the system has been successfully applied in the single pulse radar link under multi station collaboration. The accuracy of target recognition reaches 100%, and the target recapture can be completed within 3 seconds, the reliability and response rate of single pulse radar tracking have been greatly improved.

Keywords: aerospace measurement and control; single pulse radar; automatic tracking; automatic control

0 引言

在火箭发射主动段测量中, 单脉冲雷达主要用于火箭飞行过程中的外弹道测量, 实时给出火箭相对雷达的距离和角度测量数据^[1]。当前, 火箭测量中的单脉冲雷达均工作在单一频点上, 由此带来了非常明显的同频干扰现象, 而依靠人工手动移相来规避同频干扰的可靠性并不高^[2]。为提高单脉冲雷达抗同频干扰能力, 国内对单脉冲雷达同频干扰现象进行了深入研究, 提出了线性调频和脉宽捷变等多种在不同应用场景下的抗干扰应对方法^[3-12]。在提升雷达自动化运行水平方面, 国内主要研究方向集中在目标特性分析和信号处理等方面, 以提升单脉冲雷达信号检测能力^[13-17]。同时在雷达运维层面, 开展了自动化标校及故障预测研究, 为雷达日常运维效率提升提供了技术支撑^[18-19]。文献^[20]基于传统单脉冲雷达, 提出了一种多目标跟踪

算法, 实现了对中频采样数据中多目标的连续跟踪。总体而言, 国内针对单脉冲雷达自动化运行能力提升开展了大量研究, 而在航天测控应用领域, 单脉冲雷达自动化水平仍然较低, 相关研究在工程运用的成功案例不多。

为提高火箭主动段测量中现有单脉冲雷达自动化运行水平, 消除人工操作中带来的不利影响。本文以典型单脉冲雷达为研究对象, 介绍了基于现有技术体制下的雷达自动跟踪系统设计与实现方法, 实现了雷达跟踪全过程的自动控制。该系统的设计与实现方法可在同型单脉冲雷达中推广运用。

1 单脉冲雷达系统组成

航天测控领域典型单脉冲雷达系统组成如图 1 所示, 主要包括天馈分系统、发射分系统、频综分系统、接收分系统、信号处理分系统、目标模拟分系统和控制台 7 部

收稿日期: 2024-09-29; 修回日期: 2024-10-15。

作者简介: 吴高扬(1991-), 男, 硕士研究生, 工程师。

引用格式: 吴高扬, 王康, 张瀚, 等. 典型单脉冲雷达自动跟踪系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 244-250.

分。其核心是信号处理分系统, 该分系统首先对中频频射频信号进行 A/D 采样后转换为数字信号, 随后基于数字信号完成对雷达目标信号处理, 得到目标方位和俯仰角误差, 以及目标距离测量值。信号处理分系统中的测量控制计算机是整个雷达的控制中枢, 其接收控制台发送的控制指令, 调度雷达各分系统协同工作, 同时汇集雷达各分系统状态信息和目标测量数据送往控制台。雷达与用户和外界的交互通过雷达控制台完成。雷达控制台主要由 5 台计算机终端组成, 为操作人员提供雷达系统状态监视和操作接口, 同时完成目标测量数据处理和与中心的信息交互工作。

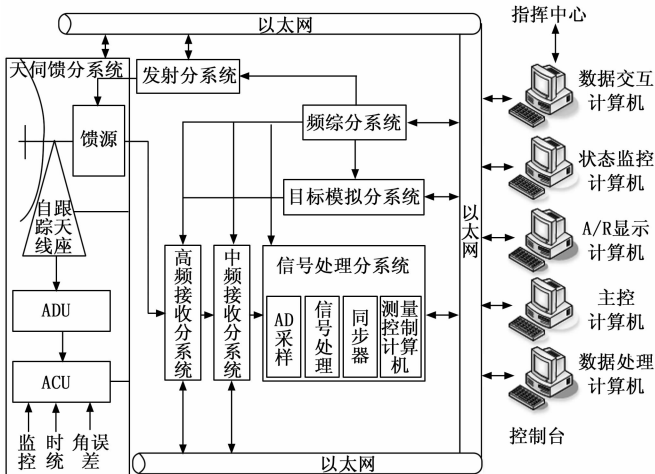


图 1 典型单脉冲雷达系统组成

该型雷达具有较高的集成度和信息化水平, 各分系统功能界限清晰, 均配置各自的控制计算机。分系统之间模拟信号通过射频电缆传输, 状态信息、控制信号等数字信号则全由雷达内部的高速以太网传输。基于高速以太网的信息传输方式, 为获取雷达全系统状态信息提供了便利, 也为雷达系统功能扩展提供了接口。本雷达自动跟踪系统正是基于此而设计实现。

2 自动跟踪系统设计

2.1 系统组成

雷达自动跟踪系统基于雷达内部 IP 网搭建, 如图 2 所示。在雷达现有的内部控制网络中新增部署一台高性能的自动运行控制计算机, 该计算机平台采用完全自主可控的 4 路龙芯 3C5000L 服务器, 搭载银河麒麟服务器版操作系统。服务器部署新研制的自动运行控制软件, 并通过内网直接与测量计算机、A 显计算机、主控计算机和 data 交互计算机进行信息交互。服务器分别接收测量计算机发送的全站状态与测量信息, A 显计算机发送的 A 显数字信息, data 交互计算机发送的引导信息, 经信息综合处理后生成控制指令, 并发送至雷达主控计算机, 从而完成对雷达的自动控制。

系统各终端之间的信息传输方式均沿用雷达系统既定的组播传输, 因此各类网络数据格式均可沿用, 只需对自动运行控制计算机发送至主控计算机的数据格式进行重新设计, 同时对雷达主控软件进行功能完善性修改。

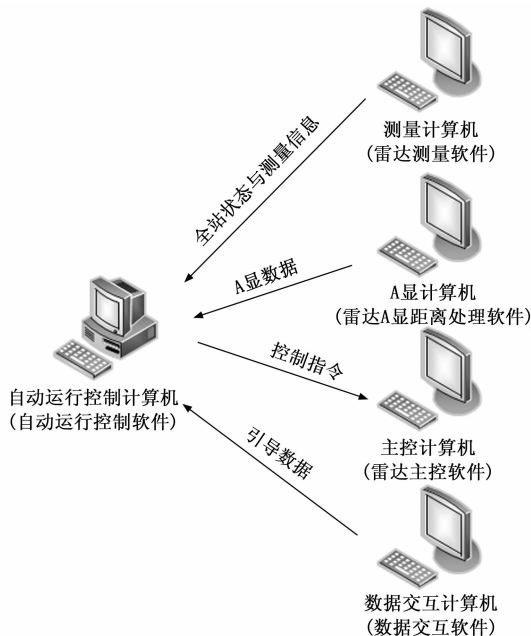


图 2 雷达自动跟踪系统组成

2.2 软件功能需求分析与设计

2.2.1 自动运行控制软件

2.2.1.1 自动运行控制软件功能需求

自动运行控制软件是整个系统的信息处理和控制中心, 完成全部的数据分析、执行决策和指令生成。考虑到降低自动跟踪系统与雷达原控制系统的耦合性, 保留原有操控模式, 确保操作人员能随时介入接管雷达控制权, 自动运行控制软件需要实现如下功能。

1) 雷达控制权限申请: 自动运行控制软件获取雷达控制权需要向雷达系统发起申请, 在雷达系统授权之后才能实施对雷达的操作控制。

2) 信息融合分析: 自动运行控制软件的信息源主要有三类, 基于雷达测量计算机发送的全站状态信息, 获取雷达各分系统运行状态、指令执行状态和目标跟踪状态等信息; 基于 A 显数据分析得到跟踪过程中目标和干扰信号的分布情况, 是目标捕获跟踪过程中的关键信息源; 基于数据交互的实时引导数据, 为捕获跟踪过程提供初始指引和辅助判决信息。自动运行控制软件融合以上三类信息的分析处理结果, 实施全流程自动控制。

3) 自动跟踪流程控制: 自动跟踪流程控制依据雷达既定的操作流程设计, 依次进行跟踪准备、目标识别、目标捕获、目标确认、跟踪过程控制和退出跟踪, 并在全流程中实时进行异常判断和处置。

4) 运行状态监视与控制: 此项是对雷达现有监控功能的强化, 为操作人员提供更加及时、准确的雷达运行状态异常和目标跟踪异常告警信息, 同时确保在自动跟踪系统无法处理的极端情况下, 操作人员能及时介入接管雷达控制权。

2.2.1.2 自动运行控制软件架构

自动运行控制软件基本框架结构设计如图 3 所示。软

件包含基础业务、核心业务和人机交互 3 个业务层，基础业务层主要完成数据收发、存储和日志管理，为其他业务层提供公共服务；核心业务层完成数据分析、决策判断和流程控制；人机交互层，为操作人员提供人机交互界面，完成必要的参数设置和状态监控。

数据分析处理结果，依据当前的任务状态和雷达需要完成的工作，综合决策生成控制指令，并放入缓存区，由主线程程发送至主控计算机。

2.2.2 雷达主控软件

雷达主控软件需要增加的功能包括：控制权管理和人工介入，两项功能实现借助主程序的消息轮询机制，具体执行逻辑如图 5 所示。在进行雷达控制权管理时，为避免主线程被阻塞，在收到服务器的控制请求后，直接启动子线程并返回，在子线程中判断操作人员是否同意服务器接管雷达，并设置相应的标志量。若在主线程中检测到人工操作信号，则直接置服务器未接管标志，收回雷达控制权。主控软件在向雷达测量控制计算机发送指令数据包前对服务器是否接管雷达进行判断，若服务器未接管雷达，则直接将本地的指令数据包发送至雷达测量计算机，反之，则将收到的服务器指令数据包发送至雷达测量计算机，从而实现服务器对雷达的控制。

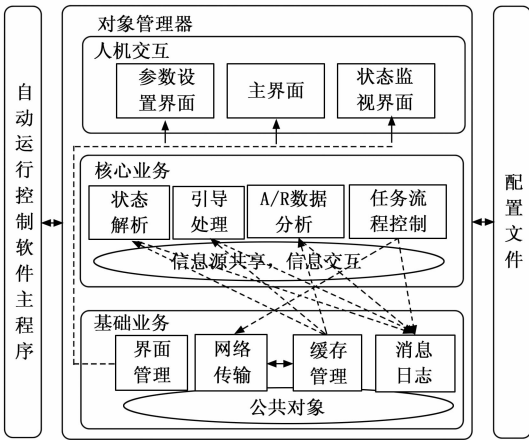


图 3 自动运行控制软件框架结构示意图

2.2.1.3 自动运行控制软件工作流程设计

自动运行控制软件采用多线程方式实现，其主线程流程设计如图 4 所示。在软件启动后，首先完成数据库、缓存区、日志管理、参数管理、网络通道建立和权限控制 6 个功能模块初始化，随后依次创建雷达状态分析、A 显数据分析、引导数据处理、任务控制 4 个业务子线程。最后完成软件界面初始化，进入主线程消息循环机制。

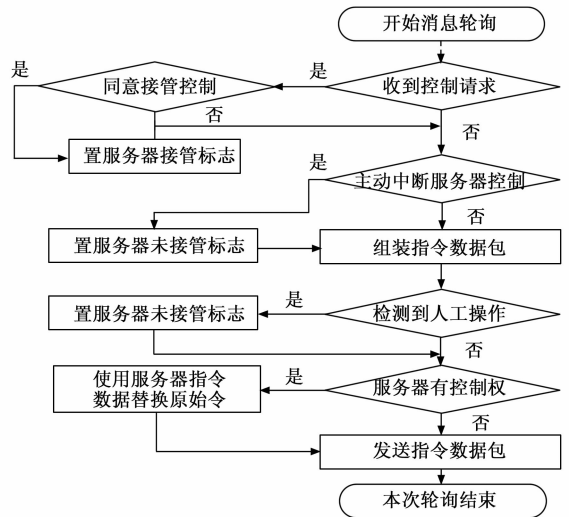


图 5 主控软件实现流程

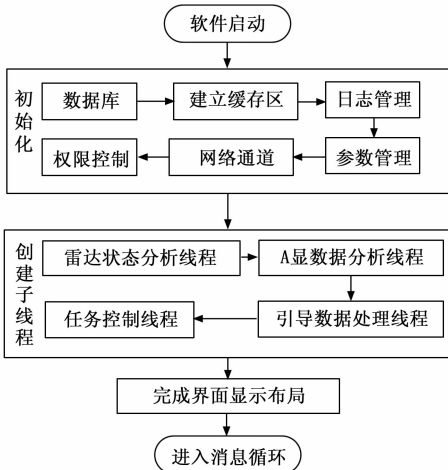


图 4 自动运行控制软件主线程流程设计

4 个业务子线程均维护各自的消息循环机制，并在主线程的统一调度下协同工作。当收到雷达测量计算机、A 显计算机和数据交互计算机的数据后，主线程会发送相应的处理信号，对应的业务线程独立完成数据分析处理工作，所有结果均放入指定的缓存区中。当服务器获得雷达控制权，并启用设置好的任务开始时间后，任务控制子线程开始工作。任务控制子线程实时从缓存区中取出当前时刻的

3 自动跟踪系统关键技术实现

雷达自动跟踪系统实现的关键在于对接收通道的信息提取和流程控制过程中的信息综合决策分析，使雷达自动跟踪系统可以完全替代人工操作，完成任务场景下的信息收集、判断决策和动作实施，同时确保决策和实施的及时性与准确性。

3.1 A 显数据获取

接收通道信息提取即对雷达输出的 A 显数据进行分析，获取雷达天线指向方向上的目标和干扰信息。A 显数据表征的是在一个雷达脉冲周期的距离量程内，雷达接收到不同距离上的电磁波信号强度。A 显计算机对该数据进行处理，得到如图 6 所示的 A 显画面，图中横轴为距离，纵轴为信号幅度，反映了信号的强弱。

A 显数据来源于雷达信号处理分系统对射频信号采样后的数字信号。由于雷达脉冲频率和射频信号的采样频率

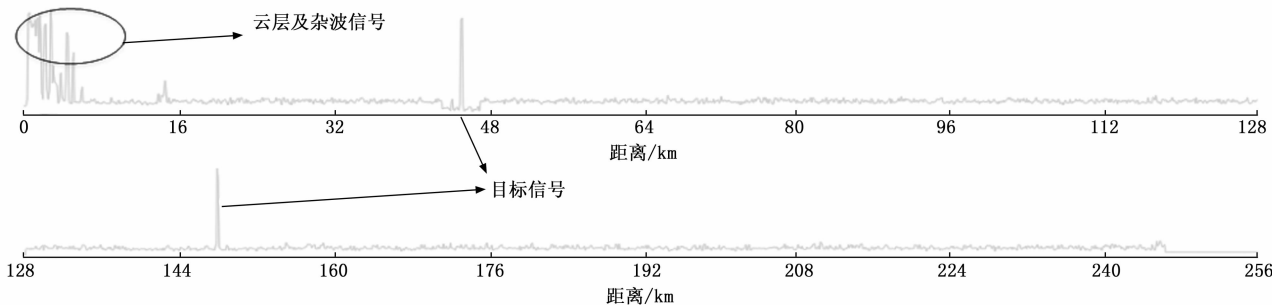


图 6 A 显画面示意图

远高于 A 显画面显示所需帧频和数据量, 因此 A 显数据组帧时在原始数字信号基础上进行了降频和抽取处理。

3.1.1 降频处理

具体方法是通过对多帧原始数字信号依次进行分段截取, 再将截取的分段数据拼接成一帧新的数字信号, 新拼接的数字信号与原始帧长相同, 如图 7 所示。

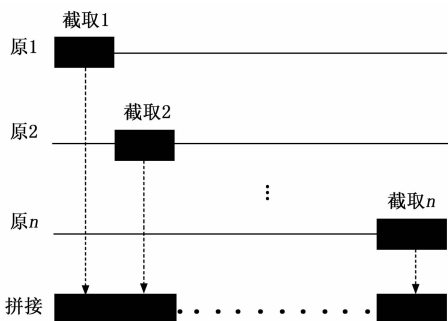


图 7 A 显数据降频处理示意图

3.1.2 数据抽取

数据抽取是在新拼接后的数字信号基础上, 等间隔抽取最大值, 其数据抽取流程如下。

1) 信号处理分系统在一个脉冲周期的采样点数 (原始数据帧长):

$$N_p = \frac{2Rf_s}{C} = \frac{f_s}{T_0} \quad (1)$$

其中: T_0 为脉冲周期, f_s 为信号处理系统采样频率。拼接后的采样数据存储于数组 $S(np)$, $np = 1, 2, \dots, N_p$ 中, $S(np)$ 为信号幅值。

2) 初始化数据抽取数组:

$$Disp(Npix) = 0$$

其中: $Npix$ 为需要抽取的数据点数, 同时令变量 $np_l = 1, i = 1$ 。

3) 抽取数据:

数据抽取流程如图 8 所示。其中 np_h 为抽取间隔, 数组 $Disp$ 中的数据即为原始采样数据 $S(np)$ 中每间隔 np_h 个点中幅值最大的数据。

由图 8 可知, A 显数据并非一个脉冲周期的全程采样数据, 其数据精度主要取决于数组 $Disp$ 的维数。对于本系统雷达设备而言, A 显数据的距离分辨率精度为 100 m, 远

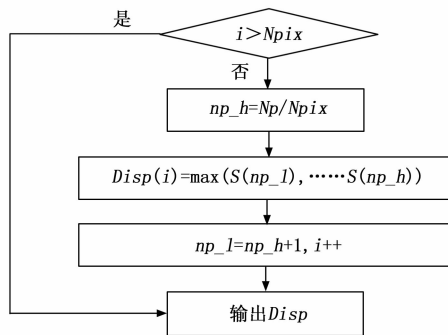


图 8 A 显抽取流程

高于当前人工观察识别方式, 其精度足以满足对信号捕获和跟踪需要。数组 $Disp$ 中的数据大小和位置表征了信号幅值和距离信息, 结合数据帧的时间, 可以估计得到信号的强弱、位置和速度信息。

3.2 A 显信号信息提取

在人工操控方式下, 操作人员主要通过观察 A 显画面来判断雷达接收到的各类干扰和目标信号, 完成本站目标识别、捕获和跟踪过程中的操作。因此实现对 A 显数据中目标信号和干扰信息的自动提取, 以替代人工观察, 是本系统实现自动跟踪控制的关键。本系统在对 A 显数据进行分析时, 分三步依次进行了幅度门限检测、信号确认和信号追踪, 以确保对目标信号和干扰信息提取的准确性。

3.2.1 幅度门限检测

因雷达接收通道增益存在动态变化, A 显数据的平均幅值也在不断变化, 所以对幅度门限检测的门限阈值进行实时计算, 即每收到一帧 A 显数据均计算一次门限值。门限计算方法如公式 (2):

$$V_{gate} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} A_i \times a + b \quad (2)$$

式中, V_{gate} 为门限值, N 为数据帧中数据点数, A_i 为数据帧各点幅度值, a 为放大系数 (≥ 1), b 为初始值 (> 0)。

在对 A 显数据进行幅度检测时, 为确保准确检测到所有目标信号, 以及区分云层干扰等杂波信号, 设计了基于滑窗扫描的检测方式。滑窗的宽度可以依据火箭主动段测量中目标信号的特点设定, 该宽度一般大于等于一个目标信号的宽度 (约 300 m), 且小于两个目标信号最小间隔

(约 1 km)。滑窗对一帧 A 显数据从头至尾逐点扫描，若滑窗内持续存在大于幅度门限的数据点，直至滑窗内不存在大于门限的数据点为止，则认为这些大于幅度门限的数据点属于同一个信号，并对该信号进行标记，记录该信号的宽度和位置信息。

3.2.2 信号确认

为提高对 A 显数据中信号检测的准确率，降低虚检和漏检概率，在根据幅度门限完成信号的初步检测后，采用 M/N 准则 ($M \leq N$) 对初检结果进行再次检测确认。M/N 准则检测的基本原理是，在连续记录的 N 帧数据中，若同一信号在 N 帧数据中出现 M 次，则标识确认该信号存在。由于幅度门限检测的每一帧记录数据中可能不止一个信号 (即需要判定的信号数不止 1 个)，则其检测记录结果可排列为一张二维数据表，如图 9 所示，其中帧 1 为当前最新的记录数据。M/N 准则检测即对此二维数据表中的信号元素进行重复性比对，提取出在同一区域内出现次数超过 M 次的信号信息，作为当前最终确认的信号。

帧N	信号N-1	...	信号N-n
⋮	⋮	...	⋮
帧3	信号3-1	...	信号3-n
帧2	信号2-1	...	信号2-n
帧1	信号1-1	...	信号1-n
确认	信号1	...	信号n

图 9 M/N 准则检测数据模型

信号确认实施过程在幅度检测累计记录帧数大于 M 后开始，在每完成一次幅度门限检测后，以帧 1 中的信号作为比对基准，逐一与历史记录帧中的信息进行重复性比对。在帧 1 中信号比对完成后，继续使用帧 2 中的信号信息逐一与历史记录帧信息进行比对，最多比对 N 帧数据。在信号比对过程中，若某一信号比对成功，则后续比对过程中将不再比对该信号，以此提升处理效率。

由于 A 显数据是降频抽取的结果，若信号存在移动情况，其在相邻两帧数据中的位置会有较大变化，因此在进行信号比对时，采用线性反推方式估计信号在历史记录数据帧中所在范围，反推位置范围计算方法如公式 (3)：

$$\begin{cases} p_1 = i_{\max} - \Delta R + \Delta i \times \Delta N \\ p_2 = i_{\max} + \Delta R + \Delta i \times \Delta N \\ \Delta i = \frac{i_{\max} - i_{\text{old_max}}}{\Delta N_{\text{old}}} \end{cases} \quad (3)$$

式中， p_1 为范围前沿， p_2 为范围后沿， i_{\max} 为当前作为比对基准的信号位置， Δi 为当前信号平均每帧移动位置量 (在每确认一次信号时进行计算，更新此值)， ΔR 为搜索范围初始值， ΔN 为反推信号所在帧序号与当前帧序号差值， $i_{\text{old_max}}$ 为确认的信号历史位置， ΔN_{old} 为确认的历史信号所在帧序号与当前信号所在帧序号的差值。

3.2.3 信号追踪

信号追踪用于对确认的多个信号进行持续跟踪，并在累积一定时间后对信号移动速度进行估计，初步判断信号类别。在信号追踪过程中，通过利用上一帧中信号信息，采用外推法预测其在当前帧中的位置，具体计算如公式 (4)：

$$\begin{cases} p_{\text{前}} = i_{\max} - dr + V \\ p_{\text{后}} = i_{\max} + dr + V \end{cases} \quad (4)$$

式中， $p_{\text{前}}$ 为预测范围前沿， $p_{\text{后}}$ 为预测范围后沿， i_{\max} 为前一帧数据中信号位置， dr 为预测初始范围， V 为信号平均每帧移动速度。

信号追踪的实现流程如图 10 所示，在每完成一次信号确认后执行。该流程依次对前一帧数据中的信号进行遍历，并依据其信号信息预测最新位置。若在当前数据帧中对应位置有信号，则标志该信号为同一信号，设置相同编号，记录累计追踪数；若没有信号，则不再记录该信号，表示该信号消失。当前一帧记录数据中的信号全部遍历完成后，若当前数据帧中还存在未被追踪的信号，则对剩余的未追踪信号赋予新的编号值，以便后续追踪。

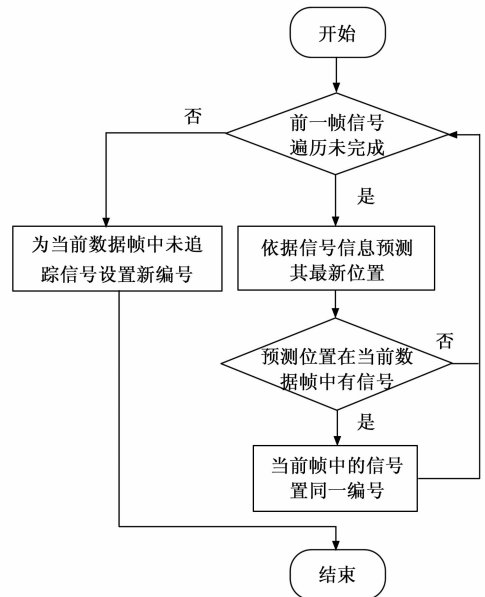


图 10 A 显信号追踪流程

由于各雷达在目标跟踪过程中会适时采取移相操作，同时受雷达天线角度变化和云层厚度变化影响，本站雷达 A 显中的各类信号一般不会长时间的连续移动，而会存在信号宽度变化和距离跳跃现象，且出现时机取决于实际跟踪情况和它站雷达操作，因此本系统对 A 显中信号的持续追踪是间断性的。当对信号的连续累计追踪计数达到一定数值后，通常取 20 帧 (约 0.5 s)，则利用信号最近时间段的位置和时间信息估计出该信号的移动速度。同时，依据信号宽度，可以区分出所追踪信号是杂波或云层干扰信号，还是雷达目标信号。

3.3 任务控制流程设计

雷达自动跟踪系统在获取雷达控制权、设置任务开始时

间有效后便可进入雷达自动跟踪控制流程。以任务开始时间为节点, 整个任务自动控制流程分为准备控制和跟踪控制。

3.3.1 准备控制

雷达准备过程控制由定时器触发, 循环执行, 每次循环执行流程如图 11 所示。系统首先判断当前雷达天线位置是否已处在等待点位置, 若不在等待点, 则控制天线直到等待点位置。完成天线置等待点后, 对雷达的参数设置进行检查, 确保雷达的状态参数与当次任务设置值一致。在完成上述准备工作后, 系统置雷达状态准备好标志, 并退出准备控制流程, 等待进入任务开始后的控制流程。

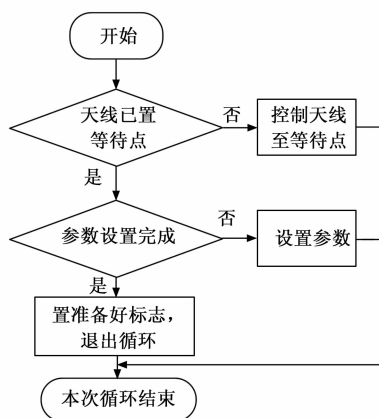


图 11 准备控制流程

3.3.2 跟踪控制

从任务开始至目标跟踪结束, 自动跟踪系统按时间顺序将跟踪过程分解为 9 项事件, 依次为: 控制流程进入标志判断、天线引导状态判断、发现目标判断、识别本站信号、目标截获确认、角度跟踪判断、移相规避干扰控制、异常检测与处置、任务结束判断, 如图 12 所示。系统对该 9 起事件进行循环执行, 每次循环由 A 显数据分析结果驱动, 根据事件相应标志量判断是否需要执行该事件。每项事件主要内容如下。

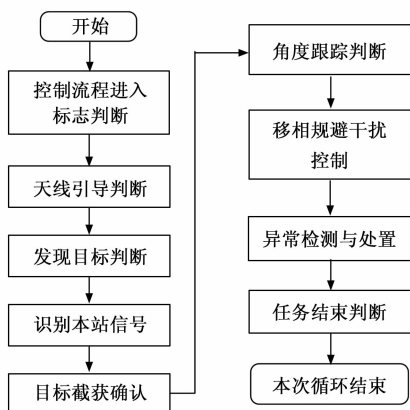


图 12 跟踪过程控制流程

1) 控制流程进入标志判断。每次循环进入时判断是否满足继续执行条件, 可以进入的前提为系统有对雷达的控制权, 任务开始时间有效, 相对时大于 0 s, 任务未结束。

2) 天线引导状态判断。当雷达未锁定目标时, 自动跟踪系统会对实时接收到的引导数据与当前雷达的天线位置进行比对, 若引导数据接近雷达天线角度位置, 则系统发送天线转引导指令, 雷达天线随引导数据运动, 并置雷达天线引导标志。若不满足转引导条件, 则本次循环结束, 雷达天线置未引导标志。

3) 发现目标判断。当天线成功引导后, 自动跟踪系统将对 A 显数据的分析结果进行判断, 若提取的信号中存在雷达目标信号, 则置发现目标标志。

4) 识别本站信号。系统确认雷达发现目标后, 在当前提取的 A 显目标信号中, 若存在距离与当前的引导距离在设定差值内, 且移相后距离差值为跳变的目标信号, 则认为该目标信号为本站信号, 置识别到本站目标信号标志。

5) 目标截获确认。确认本站信号位置后, 系统将控制距离波门移动至本站信号位置处, 并执行距离截获命令。若雷达状态信息返回距离锁定成功标志, 则控制雷达执行一次移相操作。若距离未失锁, 则可以确认截获本站目标成功, 进而根据雷达状态信息判断距离测量值与引导值是否在设定差值内, 进一步确认距离测量值正确, 然后置本站目标信号截获成功标志。

6) 角度跟踪判断。在本站截获目标成功后, 若雷达状态信息中的角误差数据在设定的阈值内, 则系统发送角度跟踪命令, 雷达天线进入角度跟踪模式, 并置雷达状态为总跟踪状态。

7) 移相规避干扰控制。在进入正常跟踪后, 雷达执行的主要操作是通过适时改变发射脉冲相位, 使本站信号与他站信号保持相对安全距离, 避免信号相互干扰导致跟踪错误目标或目标丢失。系统将实时根据从 A 显数据中提取的目标信号信息, 判断本站信号与它站信号的距离和移动趋势, 若它站信号从右侧靠近, 且小于设定的限制距离时, 则自动发送移相指令远离干扰信号。

8) 异常检测与处置。自动跟踪系统在任务开始后全程进行实时异常检测。检测的主要异常情况有距离和角度测量异常、天线运转速度异常、目标锁定异常和目标丢失, 当出现上述异常时, 系统首先控制雷达保持引导状态, 并回退相应事件的标志量, 重新进行本站目标捕获跟踪。同时, 在目标跟踪过程中实时检测近程杂波和云层干扰信号分布区域, 适时自动调整雷达避盲距离, 避免本站信号落入干扰信号区域导致目标丢失。

9) 任务结束判断。系统根据设定的任务结束时间和最低俯仰角限制结束跟踪, 当目标跟踪角度低于限制值时, 或者在跟踪时间超过结束时间且目标丢失后, 自动控制雷达退出距离和角度跟踪, 保持雷达待命状态。

4 自动跟踪系统测试验证

4.1 测试方法

通过跟踪近地轨道天平一号标校卫星, 对雷达自动跟踪系统实际运行效能进行多次测试, 测试包括本站单独跟踪和与他站雷达同时跟踪两种场景, 并在两种场景下验证

自动跟踪系统全程无人介入实现自动跟踪能力，统计测试跟踪过程中目标识别和按规则进行自动移相操作的准确率。同时，通过人工主动退出跟踪，测试系统应急重捕能力。最后将相关测试结果与历次任务人工操作结果进行对比，分析该系统对雷达跟踪效能的提升作用。

4.2 结果分析

图 13 给出了一次测试中自动运行控制软件的运行效果。由监视显示结果可知，目标测量数据正确，与目标理论飞行轨迹吻合；指令执行正常，正确反映了雷达当前运行状态。在全流程测试中，自动跟踪系统能够通过 A 显数据正确获取干扰分布和目标信息，并结合雷达运行状态和引导数据成功按设计流程自动完成了任务前准备、目标识别、捕获与跟踪过程中的移相、盲区自动切换等控制操作，各项功能达到系统设计目的。在实际运用过程中，系统可在完成参数配置后自动完成目标跟踪测量，全程无需人工介入，实现了单脉冲雷达跟踪全流程自动化。

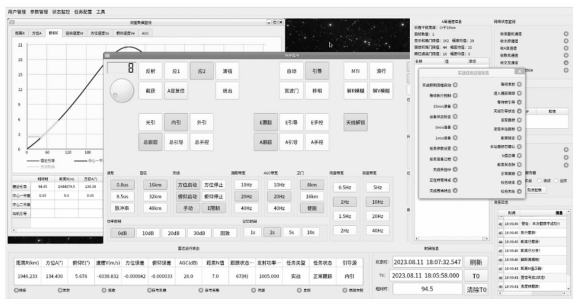


图 13 自动运行控制软件运行效果

统计自动跟踪系统在测试中的目标识别准确率、移相时机准确率、目标捕获时间和应急重捕时间关键性能指标，并与历次任务中人工操作统计结果进行对比，结果如表 1 所示。在历次自动跟踪测试过程中，自动跟踪系统目标识别准确率和移相准确率均达到 100%，目标捕获和应急重捕的时间均明显小于人工操作，而人工判断不能做到完全正确，且在应急状态下，人工判断和操作的反应时间更长。由此可知，本系统在提升雷达自动化运行水平的同时，自动跟踪系统在状态判断的准确性和操作响应速率上都明显优于人工操作，也极大提高了雷达状态判断和操作执行的可靠性。

表 1 性能提升对比

对比项	人工操作	自动控制	备注
目标识别准确率/%	95	100	历次任务统计
移相时机准确率/%	90	100	是否按规则执行
目标捕获时间/s	>6	<3	成功识别到捕获
应急重捕时间/s	>10	<4	判断丢失并重捕

5 结束语

为提高单脉冲雷达在航天发射火箭主动段弹道测量中的自动化水平，本文基于典型单脉冲雷达技术特征，开展了单脉冲雷达自动跟踪系统设计。该系统利用 A 显数字信

号实现了目标和干扰信息的自动提取，并结合雷达运行状态信息和引导数据，能够对雷达的运行与跟踪状态做出准确判断。经测试验证表明，该系统可实现雷达任务准备至结束的全流程自动控制，其状态判断准确率和操作反应速度均明显优于人工操作，极大提高了雷达运行效能。本文所提出的雷达自动跟踪系统设计思路和关键技术实现方法可为同型雷达开展自动化升级提供技术参考。

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.
- [2] 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.
- [3] 郭永康, 方华金, 喻学明, 等. 单脉冲雷达避开云层回波干扰的方法研究 [J]. 现代雷达, 2010, 32 (2): 95-99.
- [4] 张文祥, 李进华. 雷达同频干扰现象分析研究 [J]. 火控雷达技术, 2007, 36 (2): 50-53.
- [5] 张曦, 王星, 王红卫, 等. 单脉冲雷达的相干干扰研究 [J]. 现代雷达, 2013, 35 (12): 21-26.
- [6] 王建, 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.
- [7] 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.
- [8] 黄旭东, 姬新阳, 江良剑, 等. 雷达同频干扰机理及抗干扰措施研究 [J]. 现代电子技术, 2015 (7): 16-18.
- [9] 刘冬利, 付建国, 索继东. 时域多脉冲相关法抗雷达同频干扰 [J]. 现代雷达, 2009, 31 (6): 12-14.
- [10] 李阳, 杨兴, 张鹏, 等. 同型雷达的抗同频干扰目标显示处理 [J]. 雷达与对抗, 2011, 31 (4): 1-3.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 户锋刚, 阮怀林. 脉冲多普勒雷达特征分析及干扰识别方法研究 [J]. 舰船电子对抗, 2007, 30 (3): 30-32.
- [14] 蒋立民. 单脉冲雷达数据采集及处理方法 [J]. 电子测试, 2017 (19): 77-78.
- [15] 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.
- [16] 王智岩. 单脉冲雷达目标 RCS 特性测量技术研究 [J]. 中国新通信, 2020, 22 (20): 74-75.
- [17] 付申苗. 提高单脉冲二次雷达测距性能的一种策略 [J]. 福建电脑, 2018, 34 (12): 134-135.
- [18] 宋海军, 丁求启, 苏龔, 等. 舰载单脉冲雷达快速标校系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (9): 95-98.
- [19] 欧阳霄, 杨辉, 朱东济, 等. 基于 ARIMA 和神经网络的单脉冲雷达设备故障预测研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (10): 83-87.
- [20] 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.