

基于目标威胁度计算的相控阵快速确认跟踪模式

曹正林^{1,2} 郑世友² 郑瑶²

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016;
2. 中航工业雷达与电子设备研究院第六研究室, 无锡, 214063)

摘要:机载相控阵雷达在探测远程、低空、高速目标时具有较大潜力。本文对机扫加相扫雷达环境下,如何充分发挥相控阵优势,提高机载雷达跟踪远程低空高速目标性能展开研究,在传统边扫边跟(Track while scan, TWS)技术基础上,给出了一种基于目标威胁度的快速确认跟踪模式。该模式采用有效的相控扫描策略,充分利用其波束捷变能力,通过相控回扫,一方面快速起始航迹,增加高威胁目标的跟踪距离;另一方面适当增加探测数据率,提高对远距高威胁目标的跟踪性能。仿真试验表明,新跟踪方法不但可以较好克服目标雷达散射截面(Radar cross section, RCS)起伏影响,较快地起始和跟踪目标航迹,而且保留了TWS方法覆盖空域广的优点。

关键词:有源相控阵;边扫边跟;卡尔曼滤波;跟踪加搜索;多目标跟踪

中图分类号: TN95; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2011)04-0475-06

Novel Target Tracking Method with Rapid Confirmation Based on Threat in Airborne Phased Array Radar

Cao Zhenglin^{1,2}, Zheng Shiyu², Zheng Yao²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. The Six Laboratory, Radar and Avionics Institute of AVIC, Wuxi, 214063, China)

Abstract: Airborne phased array radar which provides electronic and mechanical scanning capabilities has the potential to track those targets with low altitude, high speed and long range. In order to exploit beam agility to improve the tracking performance of phased array radars, a novel target tracking method with rapid confirmation is proposed based on the conventional track while scan (TWS). Effective electronic scanning strategies are applied to enlarge tracking range by rapidly confirming initialization of track and to improve tracking performance for long-range target by increasing data rate through retrace scanning. The simulation results show that the proposed method can not only weaken the effect of radar cross section(RCS) fluctuations, and initialize and track targets quickly, but also keep the merits of a wide azimuthal coverage for TWS.

Key words: active electronic scan array (AESA); track while scan (TWS); Kalman filter; track and search (TAS); multi-target tracking (MTT)

对于威胁越来越大的低空高速巡航导弹与低空突防隐身飞机,对其尽可能早、尽可能远地探测并稳定跟踪,具有重要军事意义。有源相控阵技术的发展和成熟,为机载警戒雷达探测此类目标提供了巨大潜力^[1-2]。

虽然传统跟踪加搜索(Track and search,

TAS)、多目标跟踪(Multi-target tracking, MTT)模式可充分发挥相控阵波束捷变优势,快速确认起始目标航迹,并迅速达到高精度跟踪,但这些模式要求任意时刻波束具备向指定方向捷变的能力,且跟踪处理的目标容量非常有限。当机载单面相控阵警戒雷达借助机扫实现全方位空域覆盖^[3-4],且需

跟踪成百上千个目标时, TAS、MTT 等相控阵常用跟踪模式即不再适用^[3,5]; 而如果采用传统边描边跟(Track while scan, TWS)模式虽可解决跟踪容量大的问题, 其算法理论与技术已比较成熟^[6-10], 但它对雷达资源平均分配特性, 未发挥出相控阵能提供的对低空高速目标跟踪的性能优势。

在机扫加相扫环境下, 如何充分发挥相控阵波束捷变优势, 提高跟踪全方位空域内远程低空高速高危目标的性能, 是机载相控阵警戒雷达的关键技术之一。当要求处理的目标个数多达上百个时, 传统相控阵对每个发现目标不加区分地采用套窗回扫确认方式, 将很快耗尽雷达资源, 难以完成正常工作。本文对此展开深入研究, 在 TWS 基本理论基础, 对远程高威胁度目标给出一种快速回扫确认的跟踪模式, 既能较好发挥出相控阵优势, 提高对低空、高速、远程、高危目标的跟踪性能, 又不影响跟踪目标容量。

1 传统 TWS 跟踪远程低空高速目标面临的问题

机载警戒雷达传统 TWS 模式跟踪全方位空域内远程、低空、高速目标时, 常面临如下困难: (1) 目标 RCS 小并远程起伏, 在进入雷达探测威力距离初期, 只能获得间断、零星的目标量测信息, 而造成传统 TWS 航迹起始时延大; (2) 目标高速飞行使拦截系统的容许反应时间较短, 从而要求尽早起始和跟踪; (3) 大量海/地面低速目标和低空高速目标同时存在, 如不加区分处理, 对资源要求极高, 系统难以承受; (4) 目标常分布在全方位, 单纯采用单面阵相扫方式难以覆盖, 需要借助机扫方式, 传统 TWS 模式没有考虑机扫和相扫同时存在的影响。

2 基于目标威胁度的相控阵快速确认跟踪模式

2.1 机载雷达相扫限制

相控阵在提供了较大性能优势和潜力的同时, 也存在一些影响跟踪系统设计的约束。

(1) 相控阵方位观察空域有限, 即波束只能在天线阵面前方一定方位范围 $\pm\psi$ (阵面法向为 0° 基准)内电扫描, 要完成全方位覆盖需借助机械扫描, 如图 1 所示。令机扫方向为角度增大方向(假设顺时针旋转), 设在 t 时刻执行第 i 次回扫, 跳转前天线电轴指向为 φ_i (雷达系), 要使波束指向回扫到指定波位 φ'_i (雷达系), 电轴需向机扫方向逆向跳转角度为 $\Delta\theta_{\text{return}}^i$ (雷达系), 则要求

$$|\varphi'_i| = |\varphi_i - \Delta\theta_{\text{return}}^i| \leq \psi \quad (1)$$

如果不满足上述条件, 则不能回扫。

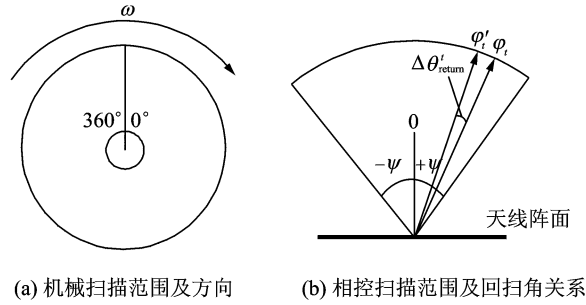


图1 天线扫描情况

(2) 最小波束跃度 $\Delta\theta_{1\text{min}}$ 有限。为了提高测量精度, 要求天线波束跃度尽可能小, 以便使目标位置始终处于差波束零点位置附近。用天线方向图函数展开法, 可得^[3]

$$\Delta\theta_{1\text{min}} = \frac{\lambda}{d} \times \frac{6}{2^n} \times \frac{1}{N^2} \left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad (2)$$

式中: λ 为雷达工作波长; n 为数字移相器实际位数; d 为天线单元间距; N 为天线单元个数。

(3) 对于相控阵天线, 随着天线扫描角增大波束会展宽, 天线增益 G 相应地下降, 可表示为^[3]

$$G = 4\pi \frac{A\eta_1\eta_2}{\lambda^2} \cos\varphi \quad (3)$$

式中: φ 为天线电轴与天线阵面法向间的夹角; A 为天线口径面积; η_1 为天线加权产生的损失; η_2 为天线自身因失配、损耗等引起的损失。

2.2 快速确认跟踪模式思想

当单帧检测概率 P_d 一定时, 增加参与检测工作帧数 m , 可有效提高目标被检测到概率 P_c , 即 $P_c = 1 - (1 - P_d)^m$ 。充分利用相扫波束捷变优势, 当发现高危目标后, 充分考虑各种限制因素, 采用有效策略, 在适当时机回扫增加高威胁目标驻留工作帧数, 提高目标被检测概率, 从而快速建立航迹, 并快速确认去除虚警; 通过回扫还可增加在航迹初期目标被检测到的概率, 提高跟踪性能; 其他处理过程(如数据关联、航迹维持等)与传统 TWS 模式一致。

2.2.1 单次回扫最大驻留时间

现代脉冲多普勒雷达通常设计 K 组不同脉冲重复频率(Pulse repetition frequency, PRF)组交替工作, 以便解决距离和速度模糊问题。设第 k 组 PRF(组内 PRF 值相同)相继的全部脉冲, 经相参积累构成一个雷达帧 T_{radar}^k , 则合适的目标回扫驻留最小时间粒度 $T_{\text{resid}}^{\text{min}}$ 应为完成 K 组不同 PRF 循环所

需时间,即

$$T_{\text{resid}}^{\text{min}} = \sum_{i=1}^K T_{\text{radar}}^i \quad (4)$$

扫描角增大时波束展宽会对探测带来影响,此时可利用相控优势,灵活地改变发射波形进行补偿,但为减少跟踪系统与其他分系统的耦合,当扫描角在±45°内时可不特殊处理。

2.2.2 快速确认跟踪模式工作流程

新相控增程跟踪模式工作流程如图2所示,与

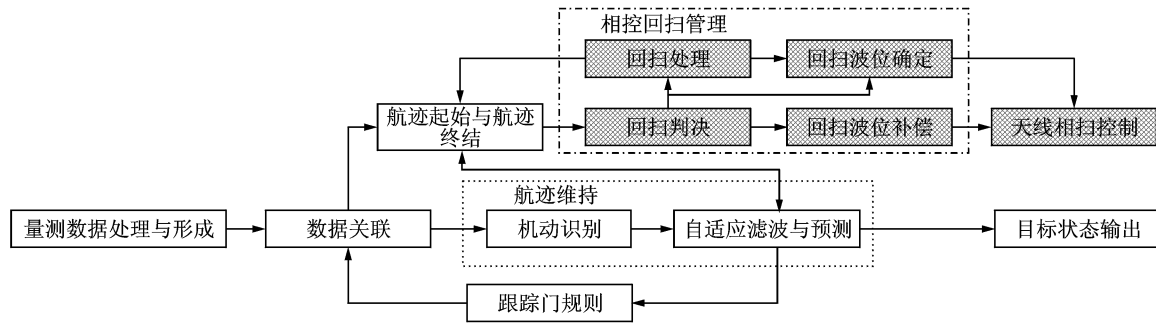


图2 相控增程工作模式流程

2.3 相控回扫管理

由于受到相控扫描角约束,回扫时间资源极为有限,需精心选择回扫确认目标。对低空、高速、远程目标探测时,一般采用下视方式,虽然大量目标同时进入雷达“视野”,但其中大部分都是海/地面慢速目标,对此类目标来说,一方面其速度较小,截击系统可有较长的反应时间,另一方面其RCS较大,雷达对其作用距离远;故设计回扫策略时应将此类目标排除在需回扫确认之外,采用基于目标威胁度计算的回扫判决准则,以充分利用雷达资源。

2.3.1 目标威胁度

目标威胁度是判断是否需要回扫的重要因素。对机载警戒雷达来说,需从目标对载机和对基地两方面考虑其威胁度(见图3)。设已知条件为:径向距离 r ,径向速度 v ,方位角 γ ,俯仰角 θ 。接近时间 $t=r/v$,当 $v \geq 0$ 时, $t > 0$, t 越大,威胁越小;当 $v < 0$ 时, $t < 0$; r 越大,威胁越小。从接近时间、进入角度两个方面构造目标对载机威胁因子 η_{radar} ,计算公式如下

$$\eta_t = \begin{cases} e^{-kt^2} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 k 为经验值常数。

$$\eta_\gamma = \begin{cases} 1 - \frac{|\gamma|}{90.0^\circ} & -90.0^\circ < \gamma < 90.0^\circ \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

传统TWS模式流程相比,新增了相控回扫管理和天线相扫控制部分(图中阴影部分),其中天线相扫控制部分由雷达天线控制系统完成,本文不展开论述,而相控回扫管理部分是新增程跟踪模式重点;流程图中其他部分技术与传统TWS处理模式一致,可查阅文献[7,8]。

相控回扫管理包括:是否需要回扫判断、回扫波位确定、回扫处理策略、回扫波位补偿等内容,将分别介绍。

$$\eta_\theta = \begin{cases} 1 - \frac{|\theta|}{90.0} & -90.0^\circ < \theta < 90.0^\circ \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

则总威胁指数 η_{radar} 为

$$\eta_{\text{radar}} = a_1 \times \eta_t + a_2 \times \eta_\gamma + a_3 \times \eta_\theta \quad (8)$$

式中: a_1, a_2 为权系数, $0 \leq a_1, a_2, a_3 \leq 1$ 且 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ 。

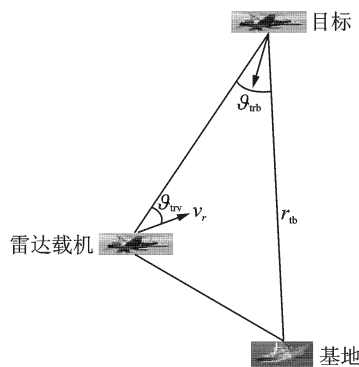


图3 目标、载机、基地位置关系图(箭头指向为飞机速度方向)

由于单站机载雷达难以确知目标实际速度,只能测知其径向速度,因此不能直接计算接近时间,但只要雷达测知目标的位置,即可结合基地和本机的地理位置信息,较方便地推知目标的地理位置,从而获知目标、雷达、基地的位置几何关系。则目标对基地威胁因子 η_{base} 可构造为

$$t_{\text{threat}}^b = \beta \frac{r_{\text{tb}}}{(v - v_r \cos \vartheta_{\text{trv}}) / \cos \vartheta_{\text{trb}}} + (1 - \beta) \frac{r_{\text{tb}}}{(v - v_r \cos \vartheta_{\text{trv}}) \cdot \cos \vartheta_{\text{trb}}} \quad (9)$$

$$\eta_{\text{base}} = \begin{cases} e^{-k(t_{\text{threat}}^b)^2} & t_{\text{threat}}^b \geq 0 \\ 0 & t_{\text{threat}}^b < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $0 \leq \beta \leq 1$ 为调节因子。

2.3.2 回扫判决准则

以机械扫过 $\theta_{3\text{dB}}$ 新空域为回扫判断周期。设在 t 时刻需要回扫判断, 在待考察的判断周期内, $Z(t)$ 表示与确认航迹和潜在航迹均未关联的所有新量测集合; $Q(t)$ 表示被检测到(有量测与之关联) 1 次以上, 但尚不满足航迹起始条件 M/N 原则(如 $M=3, N=4$) 的所有新量测集合, 则在此判断周期内所有未获证实的新量测集合 $P(t)$ 为

$$P(t) = Z(t) \cup Q(t) = \{P_{\text{meas},t}^i\}_{i=1}^{M_{\text{meas}}^t} \quad (11)$$

式中 M_{meas}^t 为 t 时刻所有未获证实的新量测个数。

$$P_{\text{meas},t}^i = (R_{\text{meas},t}^i \ dR_{\text{meas},t}^i \ Az_{\text{meas},t}^i \ El_{\text{meas},t}^i \ \eta_{\text{meas},\text{radar}}^i \ \eta_{\text{meas},\text{base}}^i)^t \quad (12)$$

式中: $R_{\text{meas},t}^i, dR_{\text{meas},t}^i, Az_{\text{meas},t}^i, El_{\text{meas},t}^i, \eta_{\text{meas},\text{radar}}^i, \eta_{\text{meas},\text{base}}^i$ 分别为第 i 个量测的距离、径向速度、方位角、俯仰角、对雷达威胁度、对基地威胁度。

设 $H(t)$ 表示在刚扫过的 $\theta_{3\text{dB}}$ 新空域内所有未获更新的确认目标航迹集合, 则

$$H(t) = \{P_{\text{track},t}^i\}_{i=1}^{M_{\text{track}}^t} \quad (13)$$

式中 M_{track}^t 为 t 时刻所有未获更新的确认航迹个数。

$$P_{\text{track},t}^i = (R_{\text{track},t}^i \ dR_{\text{track},t}^i \ Az_{\text{track},t}^i \ El_{\text{track},t}^i \ \Delta T_{\text{track},t}^i \ Cnt_{\text{track},t}^i \ \eta_{\text{track},\text{radar}}^i \ \eta_{\text{track},\text{base}}^i)^t \quad (14)$$

式中: $R_{\text{track},t}^i, dR_{\text{track},t}^i, Az_{\text{track},t}^i, El_{\text{track},t}^i, \Delta T_{\text{track},t}^i, Cnt_{\text{track},t}^i, \eta_{\text{track},\text{radar}}^i, \eta_{\text{track},\text{base}}^i$ 分别为第 i 个确认航迹在 t 时刻的距离、径向速度、方位角、俯仰角、量测中断持续时间、单次量测中断回扫计数、对雷达威胁度、对基地威胁度。

回扫判决准则为

$$\left\{ \begin{array}{l} |\varphi_i - \Delta\theta_{\text{return}}^i| \leq \psi \\ \left(\bigcup_{i=1}^{M_{\text{track}}^t} \left((dR_{\text{track},t}^i \geq V_T) \cap ((\eta_{\text{track},\text{radar}}^i \geq \eta_{T,\text{radar}}) \cup (\eta_{\text{track},\text{base}}^i \geq \eta_{T,\text{base}})) \cap ((\Delta T_{\text{track}}^i \leq (k((\Omega/\omega) + \Delta T))) \cap (Cnt_{\text{track},t}^i > m_{\text{cnt}})) \right) \right) \cup \left(\bigcup_{i=1}^{M_{\text{meas}}^t} ((dR_{\text{meas},t}^i \geq V_T) \cap ((\eta_{\text{meas},\text{radar}}^i \geq \eta_{T,\text{radar}}) \cup (\eta_{\text{meas},\text{base}}^i \geq \eta_{T,\text{base}}))) \right) \neq \emptyset \end{array} \right. \quad (15)$$

式中: Ω 为方位覆盖范围; $V_T > 0, m_{\text{cnt}} > 0, \eta_{T,\text{radar}} > 0, \eta_{T,\text{base}} > 0, \Delta T > 0$ 预先设定; k 依据最关注目标的 RCS 起伏与航迹数量情况确定, 目标 RCS 起伏较严重或航迹数量较少时 k 取值取大些, 一般情况下 k 可取为 2。

2.3.3 回扫波位确定

为不引入载机航向及姿态影响, 专注于算法思想, 以下分析均以天线系为分析基准坐标系。在实际应用时需进行相应坐标变换以获取天线系下所需信息。

设在 t 时刻需要回扫时, 有 N_{meas}^t 个符合条件的新量测, 并且第 k 个需回扫确认的新量测 $P_{\text{meas},t}^k$ 的方位角为 $Az_{\text{meas},t}^k$ (天线系); 同样有 N_{track}^t 个符合条件的确认航迹, 并且第 k 个需回扫确认航迹 $P_{\text{track},t}^k$ 的方位角为 $Az_{\text{track},t}^k$ (天线系), 则考虑解模糊开销等因素后波束指向应回扫到指定波位 φ_i

$$\varphi_i = \max \{ (\varphi_i - \theta_{3\text{dB}}), (\min \{ (\min_{k=1}^{N_{\text{meas}}^t} \{ Az_{\text{meas},t}^k \} - \omega T_{\text{resid}}^{\min}), (\min_{k=1}^{N_{\text{track}}^t} \{ Az_{\text{track},t}^k \} - \omega T_{\text{resid}}^{\min}) \}) \} \quad (16)$$

2.3.4 回扫处理策略

充分考虑各种限制条件及回扫确认效率, 确定如下回扫策略。

(1) 天线每机械扫过 $\theta_{3\text{dB}}$ 新空域(非回扫空域), 就根据判决原则判断是否需要回扫确认。如果需要即开始回扫, 否则判断是否需要且是否满足补偿波位条件, 如果符合, 则补偿波位, 否则继续正常扫描。

(2) 波束电轴在回扫前捷变至需回扫波位后, 回扫期间天线系下电轴固定, 由天线机械旋转带动波束完成回扫。

(3) 每次回扫时波束驻留时间 T_{resid} 需满足

$$T_{\text{resid}} \leq T_{\text{resid}}^{\min} \quad (17)$$

一旦不符合此条件, 则强制完成本次回扫, 波束捷变到回扫前未扫描空域波位。

(4) 对在正常扫描中未获确认的某新量测, 在此次回扫中, 如果至少检测到一次, 则认为此量测是真实目标, 而直接建立目标航迹; 如果回扫也未检测到, 但在下圈扫描时被检测到, 也认为是真实目标, 建立目标航迹, 否则认为是虚警丢弃。

(5) 对回扫期间新检测到的符合回扫条件的新量测, 不再进行回扫确认, 但保留并标记, 如果在下圈扫描时被检测到, 就认为是真实目标, 建立航迹, 否则认为是虚警丢弃。

(6) 对符合回扫条件的确认航迹, 如果没有其他符合回扫条件的新量测或航迹, 只要回扫检测到一次, 即可中断本次回扫处理。

(7) 如果在需回扫空域内, 所有未获确认的新

量测均已被确认,以及所有未被更新的确认航迹已被更新,则中断本次回扫,波束捷变到回扫前的波位继续新空域扫描。

2.3.5 相控回扫波位补偿策略

(1)将360°方位分为多个扇区,根据先验知识,将各扇区按威胁度排列,选择威胁度最小的扇区作为强制补偿扇区。在此扇区内不进行增程搜索,反而利用相扫加快扫描速度,从而补偿因回扫带来的波束后向偏移。

(2)在其他扇区扫描过程中,当波束存在后向偏移时,如果某雷达帧未检测到任何量测,则在该帧开始扫过 θ_{3dB} 空域期间,可以利用相扫加快扫描速度直到已校正到预期指向,或发现新量测为止。

(3)在已检测到的干扰源方位可用相控前移波束指向跳过该区域,以补偿波束后移。

3 仿真试验

仿真试验采用Visual C++6.0 构建机扫加相扫天线、目标回波、载机/目标运动、虚假目标产生、目标量测及噪声等雷达工作环境。

仿真环境:传统TWS和基于相控回扫的多目标跟踪系统采用相同的参数设置:雷达天线机械旋转速度5 r/min,方位扫描范围360°,容许相控扫描范围 $\pm 45^\circ$,详细雷达仿真参数、载机和目标机的初值如表1,2所示。

表1 雷达仿真参数设置

雷达波束 (方位× 俯仰)/(°)	天线旋 转速率/ (r·min ⁻¹)	方位扫 描范围/ (°)	相控扫 描范围/ (°)	雷达帧 周期/ ms	雷达检 测概率
4×7	5	360	±45	30	0.5

表2 载机与目标机初值

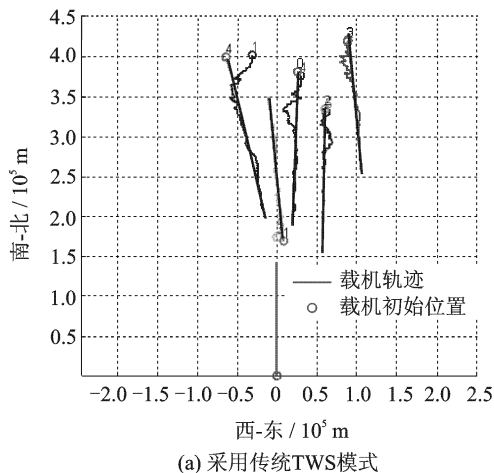
载机与 目标机	X/ km	Y/ km	Z/ km	v_x / (m·s ⁻¹)	v_y / (m·s ⁻¹)	v_z / (m·s ⁻¹)
载机	0.0	0.0	8	120	0	0
目标1	381.0	25.6	7	-160	-5	0
目标2	170.0	8.0	7	-150	-15	0
目标3	335.0	59.8	7	-150	-3	0
目标4	421.5	88.6	7	-140	15	0
目标5	400.0	-64.0	7	-165	50	0

在两种模式下跟踪的5个目标的总体态势图如图4所示(仿真时间20 min)。

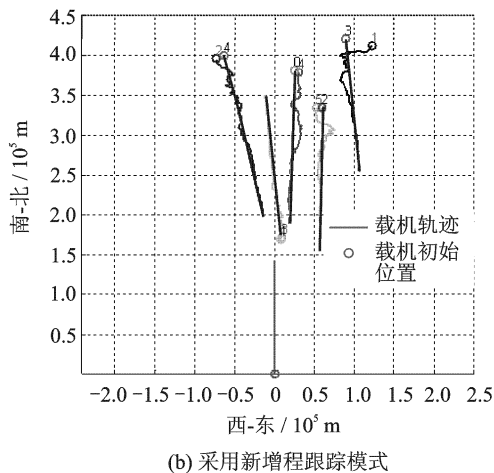
总精度计算公式如下(见表3)。

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i^2 T_i)}{\sum_{i=1}^n T_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

式中 T_i 表示第*i*个目标全程/稳定段的跟踪时间。



(a) 采用传统TWS模式



(b) 采用新增程跟踪模式

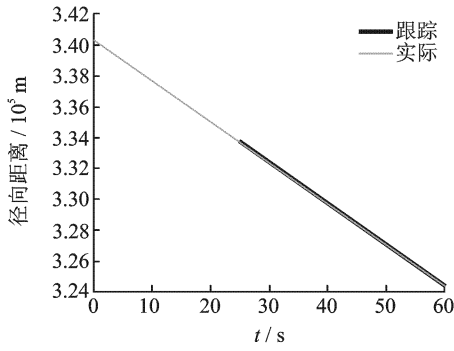
图4 采用两种模式仿真出的总体态势图
(图中圆圈为起始端,直线为目标真实航迹,曲线为跟踪航迹)

表3 跟踪5个目标的总精度统计(稳定段取跟踪起始200 s后)

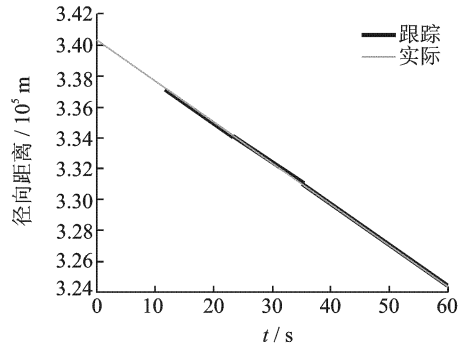
模式	全程 (5个目标总精度)			稳定段 (5个目标总精度)		
	R/ m	dR/ (m·s ⁻¹)	Az/ (mrad)	R/ m	dR/ (m·s ⁻¹)	Az/ (mrad)
传统TWS	37.741	1.649	18.737	31.069	0.451	11.276
新跟踪模式	33.179	1.517	17.748	25.322	0.401	9.911

两个目标在传统TWS跟踪模式和新增程跟踪模式下的航迹起始时间对比见图5,6。

由仿真结果可以看出,在相同仿真环境下,分别用传统TWS模式和新增程跟踪模式进行多目标跟踪,结果航迹起始时间由原来的2~3圈缩短为1~2圈(360°环扫),即新增程跟踪模式较传统TWS模式航迹起始提前了1圈(12 s左右),且跟踪精度也有所提高。

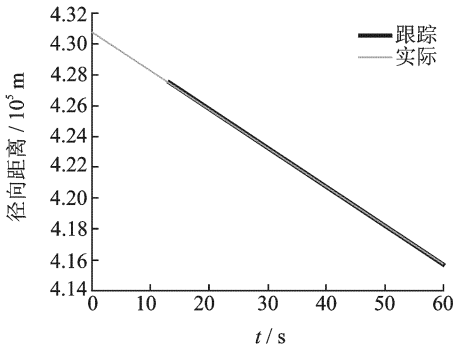


(a) 采用传统TWS模式

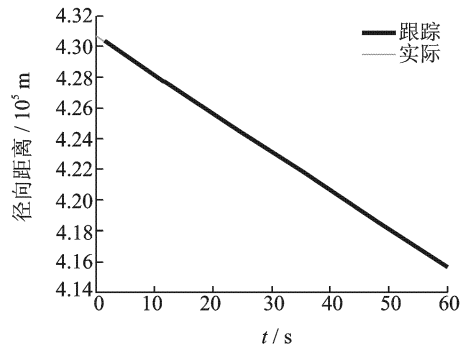


(b) 采用新增程跟踪模式

图5 采用两种方法获取的目标1航迹起始时间对比



(a) 采用传统TWS模式



(b) 采用新增程跟踪模式

图6 采用两种方法获取的目标2航迹起始时间对比

4 结束语

本文在传统TWS技术基础上,针对在机扫加相扫雷达环境下如何发挥相控阵波束捷变优势,提高机载预警雷达跟踪远程低空高速目标性能展开研究,给出了一种新的基于回扫确认的增程跟踪模式,该模式综合考虑目标威胁和相扫加机扫工作环境限制,在传统TWS中引入相控回扫闭环跟踪环节,设计出适合工程实现的回扫发起规则、任务合并、波位确定、处理策略、波位补偿等方法,在充分利用相扫能力通过回扫确认在快速起始航迹的同时,还增加了位于雷达威力距离初期目标驻留时间来提高数据率,从而提高对此类目标的跟踪性能。仿真试验表明,新模式不但可以在一定程度上降低目标RCS起伏影响,较快的起始和跟踪航迹目标,从而增加目标跟踪距离,而且保留了TWS方法覆盖空域广的优点。

参考文献:

[1] Lee C G, Kang P S, Shih C S. Schedulability envelope for real-time radar dwell scheduling[J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, 55(12): 1599-1613.

[2] 吕江涛,肖靖,徐振来.相控阵雷达对海面目标的检测跟踪方法[J].现代雷达,2008,30(4):50-52.

[3] 张光义,赵玉杰.相控阵雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2006:79-83.

[4] Kuo T W, Chao Y S, Kuo C F, et al. Real-time dwell scheduling of component oriented phased array radars[J]. IEEE Transactions on Computers, 2005, 54(1):47-60.

[5] Cheng T, He Z S, Tang T. Dwell scheduling of multifunction phased array radars based on genetic algorithm [C]//Proceedings of 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Xiamen: [s. n.], 2007: 846-849.

[6] Park S T, Lee J G. Improved Kalman filter design for three-dimensional radar tracking [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2):727-739.

[7] 王兰云,赵拥军.相控阵雷达多目标跟踪原理及数据关联算法研究[J].光电与控制,2007,14(1):30-33.

[8] 何友,修建娟,张晶炜,等.雷达数据处理及应用[M].2版.北京:电子工业出版社,2009:338-339.

[9] Bilik I, Tabrikian J. Maneuvering target tracking using the nonlinear non-Gaussian Kalman filter [C]//ICASSP. Toulouse, France: IEEE, 2006: 724-727.

[10] 赵艳丽,林辉,赵锋,等.多目标跟踪中的数据关联和航迹管理[J].现代雷达,2007,29(3):28-31.