

# 相控阵雷达自适应采样周期算法研究

程 婷, 何子述, 唐 婷

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 针对相控阵雷达中自适应采样周期问题, 分别提出基于交互多模型和自适应网格交互多模型的变采样周期算法。前者中采样周期与目标位置残差的平方根呈反比, 后者中采样周期根据中心模型的运动步长进行调整。为了有效地平衡目标跟踪精度与系统负载, 算法中引入了一可控参数。仿真结果表明了两种算法的有效性。

**关键词:** 变采样周期; 交互多模型; 自适应网格交互多模型; 系统负载

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2007)S1-0116-04

## Research on adaptive update interval algorithms in phased array radars

CHENG Ting, HE Zi-shu, TANG Ting

(Dept. of Electronic Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** An IMM-based and an AGIMM-based adaptive update interval algorithm are proposed for the adaptive update interval problem in phased array radars. In the former algorithm, the update interval is proportional to the inverse square root of the position residual. In the AGIMM-based algorithm, the update interval adjusts according to the moving step of the mid-model. In order to balance the tracking precision and system load effectively, a controllable parameter is introduced. Simulation results demonstrate the effectiveness of the algorithms.

**Key words:** adaptive update interval; interacting multiple-model; adaptive grid IMM; system load

相控阵雷达采用电子扫描代替了传统雷达的机械扫描, 因此波束指向可以无惯性地进行捷变。这种特性使得相控阵雷达可以根据目标的运动状态自适应地改变其采样周期。

Cohen首先提出了一种基于目标位置残差的自适应采样周期算法<sup>[1]</sup>, 文[2,3]在他的工作基础上进行了一些改进。这些算法都是基于 $\alpha-\beta$ 或是 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波器的, 显然在机动目标跟踪环境下是不适用的。在基于预测协方差的变采样周期算法中, 采样周期为使算法的预测协方差不超过一阈值的最大采样间隔<sup>[4]</sup>。它能很好地与IMM估计器一起工作, 但这种算法涉及到求解一矩阵方程, 为了降低运算复杂度, 文[5]提出事先定义一个可选采样周期集合, 因此这将带来一个搜索过程。针对这一问题, 笔者提出了一种新的基于IMM的自适应采样周期算法, 它借鉴了文[1]中的思想, 认为采样周期与目标位置残差的平方根呈反比, 其中的位置残差由IMM滤波器输出, 并由它直接计算得到采样周期, 避免了搜索过程。另外, 在对机动目标进行跟踪时, 为了覆盖目标的所有运动状态, IMM算法要包含尽可能多的模型, 这会使得其算法复杂度提高, 为此有人提出变结构交互多模型滤波器的思想<sup>[6]</sup>。AGIMM就是其中的一种<sup>[7]</sup>。可见, 发展基于AGIMM的变采样周期算法是非常有意义的, 文中算法利用AGIMM中心模型的运动步长来控制采样周期。仿真结果表明了这些算法的有效性。

## 1 IMM及AGIMM算法

IMM算法中, 假设有多个模型存在, 每个模型对应于不同机动输入水平, 在计算出各模型为正确的后验概率之后, 就可以通过对各模型正确时的状态估计进行加权求和来给出最终的目标状态估计。IMM估计过程包括混合

概率计算、交互过程、模型条件滤波、模型概率更新及状态估计和协方差组合<sup>[8]</sup>。与IMM算法不同，AGIMM算法能根据滤波结果自适应调整模型参数，因此模型集合中仅需少量模型即可。这里以协同转弯模型为基础模型进行说明，考虑集合中包括3个协同转弯模型，在 $k$ 时刻，模型参数可表示为 $\omega_k = [\omega_L(k), \omega_C(k), \omega_R(k)]$ 。那么在迭代过程中有

$$\omega_c(k+1) = \mu_L(k)\omega_L(k) + \mu_C(k)\omega_C(k) + \mu_R(k)\omega_R(k), \quad (1)$$

其中 $\mu_L(k)$ 、 $\mu_C(k)$ 和 $\mu_R(k)$ 为左、中、右3个模型的模型概率。在得到下个时刻中心模型的参数后，左右两模型的参数也需要相应地进行更新<sup>[7]</sup>。当获得了下个时刻所有模型参数后，就可以进行传统的交互多模型滤波了。

## 2 两种变采样周期算法

### 2.1 基于IMM的自适应采样周期算法

目标位置的残差能很好地反映系统跟踪的质量，当跟踪精度下降时，滤波器输出的残差将增大。为了保证一定的跟踪精度，此时需提高系统对目标的照射频率。因此，可以考虑利用目标位置残差控制对它的采样周期大小，类似于文献[1]，这里认为采样间隔反比于残差的平方根，于是

$$T(k) = \frac{4}{2^p}, \quad c \cdot 4^p < |e_s(k)| < c \cdot 4^{p+1}, \quad (2)$$

其中 $e_s(k)$ 为平滑的位置残差，可由实际位置残差 $e(k)$ 得到， $c$ 为可控参数。从式(2)容易得到

$$p = \left\lceil \log_4 \frac{1}{c} |e_s(k)| \right\rceil. \quad (3)$$

而 $e(k)$ 可由IMM的预测状态获得

$$e(k) = \sum_{j=1}^r \bar{\mu}^j(k) \sqrt{(x_m(k) - \bar{x}^j(k))^2 + (y_m(k) - \bar{y}^j(k))^2}, \quad (4)$$

其中 $x_m(k)$ 和 $y_m(k)$ 为 $k$ 时刻目标在 $x$ 和 $y$ 方向的量测值， $\bar{x}^j(k)$ 和 $\bar{y}^j(k)$ 为第 $j$ 个滤波器在两个方向的预测位置， $\bar{\mu}^j(k)$ 为模型的预测概率。根据式(3)可知，当可控参数增大时， $p$ 将随之减小，此时由式(2)可见，采样间隔 $T(k)$ 将随之增大，跟踪精度相应减小；同理，当可控参数减小时，采样间隔随之减小，跟踪精度相应提高。可见通过改变可控参数的大小，能实现跟踪精度与系统负载之间的平衡。在该算法中，当从式(3)获得 $p$ 后，采样周期可以直接通过式(2)计算获得。

### 2.2 基于AGIMM的自适应采样周期算法

AGIMM算法中，当目标运动状态发生改变时，模型集合将与目标真实运动状态处于不匹配时期，此时模型参数将进行调整以使得集合能再次覆盖目标运动状态。中心模型的运动状况不仅能反映目标运动状态的变化，而且其运动步长能反映目标机动水平变化的强度。另外，目标状态改变时，跟踪精度下降，为保证一定的跟踪精度需要降低采样周期。因此，可考虑利用中心模型的滑动步长来控制采样周期大小。下面给出基于AGIMM的自适应采样周期算法一次迭代步骤：

Step1 按照式(1)计算中心模型参数；

Step2 平滑中心模型参数并计算其他两模型参数；

Step3 计算中心模型的相对滑动步长

$$l = c \cdot |\omega_c(k+1) - \omega_c(k)| / \delta_\omega, \quad (5)$$

其中  $c$  为一可控参数,  $\delta_\omega$  为模型分散距离;

Step4 计算采样间隔  $T(k+1) = f(l)$ , 其中  $f(l)$  为根据实际情况设定的映射, 它是  $l$  的减函数;

Step5 更新滤波器参数, 进行一次 IMM 滤波并返回步骤 1。

根据式(5)可知, 当可控参数增大时, 中心模型的相对滑动步长增大, 且  $f(l)$  为  $l$  的减函数, 所以采样间隔将随之减小, 跟踪精度于是相应得到提高; 同理, 当可控参数减小时, 采样间隔增大, 跟踪精度降低。可见, 该算法中的可控参数同样可以有效地平衡跟踪精度与任务负载, 与前面算法可控参数不同的是, 此处  $c$  增大将提高跟踪精度但消耗更多资源, 而前者则相反,  $c$  增大时将更加节省系统资源但是跟踪精度会下降。

### 3 仿真

这里设置了两个仿真, 分别用来评估基于 IMM 和 AGIMM 的自适应采样周期算法性能。仿真 1 中选择 CV 和 CA 模型构成模型集合, 目标在 40 ~ 80 和 120 ~ 160 s 进行匀加速运动<sup>[5]</sup>。仿真 2 中选择 3 个协同转弯模型构成模型集合, 目标在 61 ~ 105 s 以 2g 进行 180° 的转弯<sup>[7]</sup>。由于自适应采样周期算法每次仿真时获取的采样时刻序列不一样, 因此为得到多次仿真的平均结果, 在每一个小的时间段内进行平滑处理<sup>[9]</sup>。这里选择的平滑时间段为 1s, 仿真次数为 1000。

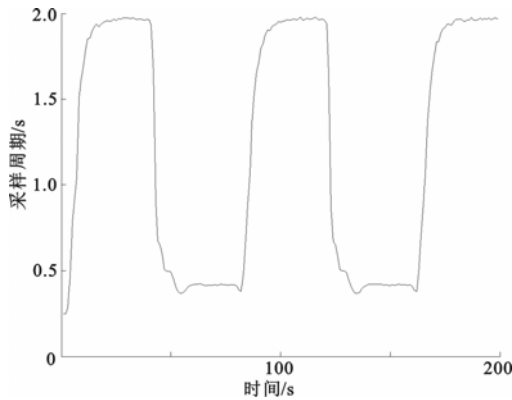


图 1 传统的基于 IMM 变采样周期算法采样周期曲线

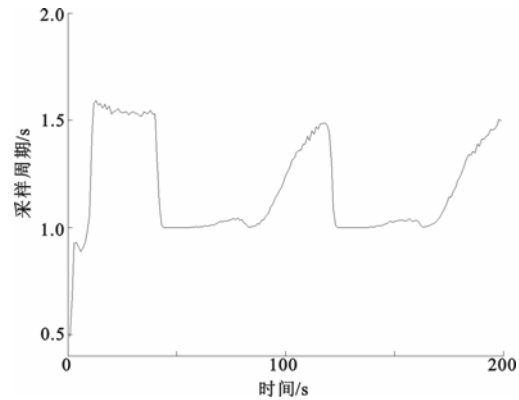


图 2 基于 IMM 变采样周期算法采样周期曲线  $c=1/16$

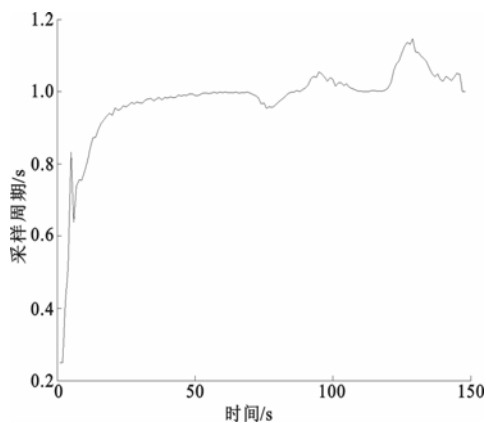


图 3 传统的基于 AGIMM 变采样周期算法采样周期曲线

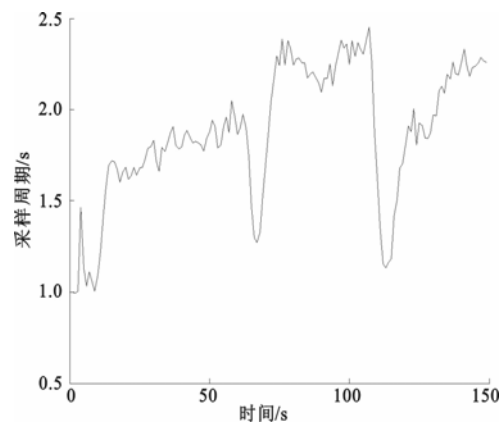


图 4 基于 AGIMM 变采样周期算法采样周期曲线  $c=0.6$

仿真 1 中, 首先采用基于预测协方差的变采样周期算法与 IMM 滤波器相结合(下文称其为传统的基于 IMM 变采样周期算法)实现目标的变采样跟踪, 采样周期曲线如图 1 所示。图 2 为文中的基于 IMM 的变采样周期算法获得的采样周期曲线, 与图 1 对比可见, 类似于传统算法, 它同样能很好地自适应于目标运动状态, 即在目标

进行加速运动期间, 采样周期较小, 而在目标匀速运动期间采取较大的采样周期。但是, 传统算法需在事先设置好的采样周期集合中选择满足预测协方差阈值的最大采样周期, 因此不可避免会有一个搜索过程。文中算法的采样周期可由滤波残差直接计算获得, 所以计算量得到减少。图3和图4为仿真2中得到的采样周期曲线, 图3为采用基于预测协方差的变采样周期算法与AGIMM滤波器相结合(下文称其为传统的基于AGIMM变采样周期算法)获得的采样周期曲线。图4为采用文中基于AGIMM的变采样周期算法获得的采样周期曲线, 与图3相比可见, 该算法能更快、更好地响应目标运动状态的变化, 在60s和105s时迅速降低采样周期, 而传统算法采样周期的改变不仅不明显而且在时间上有所滞后。图2和图4表现出来的采样周期变化规律有所不同, 前者采样周期变化后将在一时间内保持平稳; 后者的采样周期仅在目标状态改变时发生变化, 然后快速地调整回来。原因是AGIMM算法中当模型集合检测到目标状态变化时, 它将自适应地调整模型参数以实现与目标真实运动状态的重新匹配, 一旦这一调整过程结束, 跟踪稳定后就能采取较大的采样周期了。表1和表2分别给出了文中提出的两个算法在可控参数设置不同情况下的平均跟踪误差、平均均方根误差和平均采样周期, 可见, 通过改变可控参数的大小可以灵活地在跟踪周期与系统负载之间进行权衡。

表1 基于IMM自适应采样周期算法的跟踪性能和平均周期

	AME/m	AMSE/m	AT/s
x方向(c=1/64)	36.804	47.846	0.6405
y方向(c=1/64)	36.717	47.729	
x方向(c=1/16)	43.591	56.904	1.1111
y方向(c=1/16)	43.321	56.585	

表2 基于AGIMM自适应采样周期算法的跟踪性能和平均周期

	AME/m	AMSE/m	AT/s
x方向(c=1.2)	53.373	68.507	1.0216
y方向(c=1.2)	49.872	64.749	
x方向(c=0.6)	60.702	77.569	1.5025
y方向(c=0.6)	55.907	72.053	

## 4 结束语

在相控阵雷达资源管理过程中, 目标采样间隔是一个重要的参数。文中分别提出一种基于IMM和一种基于AGIMM的自适应采样周期算法。它们能有效地根据目标运动状态改变采样周期大小, 使得系统在目标非机动期间采用大的采样间隔, 机动期间降低采样间隔。算法中的可控参数使得操作员能有效地在目标跟踪精度与系统负载之间进行权衡。

### 参考文献

- [1] Cohen S A. Adaptive Variable Update Rate Algorithm for Tracking Targets with Phased Array Radar [J]. IEE Proc F, 1986, 133(3): 277-280.
- [2] Wilkin D J, Harrison I, Woolfson M S. Target Tracking Algorithms for Phased Array Radar [J]. IEE Proc F, 1991, 138(3): 255-262.
- [3] Munu M, Harrison I, Wilkin D J, et al. Comparison of Adaptive Target-tracking Algorithms for Phased-array Radar [J]. IEE Proc F, 1992, 139(5): 336-342.
- [4] Blackman S S, Dempster R J. IMM/MHT Solution to Radar Benchmark Tracking Problem [J]. IEEE Trans on Aero Elect Syst, 1999, 35(2): 730-737.
- [5] 王峰, 詹晶晶, 潘泉等. 一种灵活的相控阵雷达采样周期自适应算法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(10): 1179-1182.
- [6] LI X R. Multiple-model Estimation with Variable Structure-II: Model-set Adaptation [J]. IEEE Trans on Automat Contr, 2000, 45(11): 2047-2060.
- [7] Jikov V P, Angelova D S, Semerdijev T A V. Mode-set Adaptive IMM for Maneuvering Target Tracking [J]. IEEE Trans on Aero Elect Syst, 1999, 35: 343-350.
- [8] 杨万海. 多传感器数据融合及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004.
- [9] Shin H J, Hong S M, Hong D H. Adaptive-update-rate Target Tracking for Phased-array Radar [J]. IEE Proc Radar, Sonar Navigation, 1995, 142(3): 137-143.