

# 基于模拟退火算法的机载脉冲多普勒雷达中重复频率选择研究

葛建军 张春城

(华东电子工程研究所 合肥 230031)

**摘要:** 机载脉冲多普勒雷达常采用中等脉冲重复频率,  $N/M$  检测准则工作方式, 在该方式下对重复频率的要求主要是能解距离及速度模糊, 且能使距离与速度遮蔽区域尽量小。因而对重复频率的选择可模型化为解大规模组合优化问题, 而模拟退火算法正是解这类问题的一种有效方法。该文根据机载脉冲多普勒雷达的特点, 提出了一种基于模拟退火算法的机载雷达中重复频率选择方法, 通过试验表明, 该方法取得了很好的效果。

**关键词:** 机载脉冲多普勒雷达; 模拟退火算法; 中等脉冲重复频率; 距离和多普勒遮蔽; 距离和多普勒盲区

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0573-03

## Research on Medium PRF Selection of Airborne Pulsed Doppler Radar by Simulated Annealing Algorithm

Ge Jian-jun Zhang Chun-cheng

(East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Medium PRF and  $N/M$  detection rule is the general working model of airborne pulse Doppler radar, it is necessary to satisfy the demand that medium pulse repetition frequency (PRF) set can solve ambiguities of range and Doppler, besides the demand, the blind zones of range and Doppler occurred by the medium PRF set should be minimum. So the medium PRF set selection can be modeled as a large scale combinatorial optimization problem, the problem can be solved by simulated annealing algorithm. This paper proposed a method for medium PRF set selection of airborne pulsed Doppler radar. based on the characteristics of the radar. The results of experimentation show this method is very effective.

**Key words:** Airborne pulsed Doppler radar; Simulated annealing algorithm; Medium PRF; Ambiguities of range and Doppler; Blind zones of range and Doppler

### 1 引言

机载脉冲多普勒雷达工作于中等脉冲重复频率可避免低重复频率与高重复频率的一些缺陷: 工作于低重复频率时目标会落在主瓣杂波范围内, 无法在频域实现目标的探测; 而工作于高重复频率时杂波与目标信号强度之比与低重复频率相比大大增加, 增大了系统对天线副瓣的要求<sup>[1]</sup>。中重复频率有效地克服了两者的缺点, 但同时带来了距离和速度的二维模糊和二维遮蔽问题, 给雷达的波形设计带来了挑战。

在机载脉冲多普勒雷达探测(尤其是下视探测)目标时, 由于平台的运动, 主瓣杂波会展宽, 多普勒速度落在该区域的目标会引起速度遮蔽; 由于发射脉冲有一定的持续宽度, 则会引起距离遮蔽。该多普勒遮蔽和距离遮蔽以脉冲重复频率及不模糊距离的整数倍位置上分别在多普勒域和距离域重复形成二维遮蔽。工作于中重复频率出现对探测范围内目标距离和速度模糊, 常使用在一个波束内发射  $M$  个不同重复频率, 采用  $N/M$  ( $1 < N < M$ ) 检测准则, 以求既能解距离和速度模糊, 又能使距离和速度遮蔽尽量小。为满足既能

解模糊, 又使遮蔽小, 这  $M$  个重复频率的选择就变成了一个重要问题, 而由于重复频率的可选范围很广, 该问题可模型化为解大规模组合优化问题, 在该问题上 Hughes 等人提出了基于遗传算法的重复频率选择方法<sup>[2,3]</sup>。而在解大规模组合优化问题的算法中, 模拟退火算法具有高效、鲁棒等特点, 是一种解这类问题的很好方法<sup>[4]</sup>。本文提出一种基于模拟退火算法的机载脉冲多普勒雷达中重复频率选择方法, 通过试验表明, 所提方法取得了很好的效果。

### 2 模拟退火算法简述

1982年, Kirkpatrick 等人将 Metropolis 准则引入到优化过程中来, 得到了一种对 Metropolis 算法进行迭代的组合优化算法——模拟退火算法。该算法用 Metropolis 算法产生组合优化问题解的序列, 并由与 Metropolis 准则对应的转移概率  $P_t$  确定是否接受从当前解  $i$  到新解  $j$  的转移<sup>[4]</sup>。

$$P_t(i \rightarrow j) = \begin{cases} 1, & f(j) \leq f(i) \\ \exp\left\{\frac{f(i) - f(j)}{t}\right\}, & \text{其它} \end{cases}$$

$t$  表示控制参数, 与固体退火过程中的温度  $T$  相当;  $i, j$  表示解, 与固体的某个微观状态等价; 而  $f(i), f(j)$  为目标函数, 与固体的能量等价。开始时  $t$  取较大值(与固体溶解温度

相对应), 然后缓慢减小  $t$  值(与徐徐降温相对应); 重复上述过程, 直到满足某个停止准则时终止, 这就完成了模拟退火算法。

### 3 所提基于模拟退火算法的重复频率选择方法

$N/M$  准则中  $N$  与  $M$  的值是根据雷达系统资源及具体应用确定, 这里不作分析, 本文分析的是准则确定后  $M$  个频率值的选择。

变量、约束和目标是优化问题的 3 个基本要素, 因此, 重复频率选择中首先要确定的就是这 3 个要素。

变量:  $M$  个频率值。

约束:  $M$  个频率值中的任意  $N$  个频率组合都能解距离与速度模糊。

目标函数: 距离速度二维遮蔽率。

所提方法具体过程如下:

(1) 根据雷达系统设计时确定的最大距离量程  $R_{\max}$ , 目标最大速度  $V_{\max}$ , 距离分辨单元  $\Delta R$ , 多普勒处理带宽  $B_{pd}$ , 雷达工作频率  $F$ , 计算最大距离单元数与最大多普勒单元数:

最大距离单元数:

$$RC_{\max} = R_{\max}/\Delta R \quad (1)$$

最大速度对应的最大多普勒频率:

$$FD_{\max} = 2 \cdot V_{\max} \cdot F/c \quad (2)$$

其中  $c$  为电磁波在自由空间的传播速度。

最大多普勒单元数:

$$FC_{\max} = FD_{\max}/B_{pd} \quad (3)$$

(2) 根据  $RC_{\max}$  与  $FC_{\max}$  的值构建  $M$  个  $RC_{\max} \cdot FC_{\max}$  的二维数据矩阵  $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_M$ , 初始化为全 0。

(3) 确定重复频率选择范围  $(prf_{\min}, prf_{\max})$ , 从中任选  $M$  个重复频率  $prf_1, prf_2, \dots, prf_M$  作为初始值, 并将某一个重复频率的距离多普勒遮蔽  $zb_1$  确定为初始值。

(4) 根据  $prf_1, prf_2, \dots, prf_M$  计算以下参数:

各重复频率下不模糊距离单元数:

$$RU_i = c/(2 \cdot prf_i \cdot \Delta R) \quad (4)$$

其中  $i$  为  $1, 2, \dots, M$ 。

各重复频率下不模糊多普勒单元数:

$$DU_i = prf_i/B_{pd} \quad (5)$$

各重复频率下距离模糊次数:

$$NR_i = RC_{\max}/RU_i \quad (6)$$

各重复频率下多普勒模糊(即速度模糊)次数:

$$ND_i = FC_{\max}/DU_i \quad (7)$$

(5) 根据各重复频率下脉冲占空比  $pr_1, pr_2, \dots, pr_M$  计算在不模糊距离内的距离遮蔽, 根据设定的杂波宽度  $CW$  计算不模糊多普勒范围内的多普勒遮蔽(即速度遮蔽):

不模糊距离内的距离遮蔽(以距离单元数为单位):

$$RS_i = c \cdot pr_i / (2 \cdot prf_i \cdot \Delta R) \quad (8)$$

不模糊多普勒范围内的多普勒遮蔽(以多普勒单元数为单位):

$$DS = CW/B_{pd} \quad (9)$$

(6) 根据  $RS_i$ ,  $DS$ ,  $NR_i$ ,  $ND_i$ , 确定出各重复频率在最大距离和最大多普勒范围内的距离和多普勒遮蔽, 在二维数据矩阵  $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_M$  中将相应的位置置 1。

(7) 根据  $N/M$  准则, 计算总的距离和多普勒遮蔽:

$$S_{zong} = (\mathbf{S}_1 | \mathbf{S}_2 | \dots | \mathbf{S}_N) \otimes (\mathbf{S}_1 | \mathbf{S}_3 | \dots | \mathbf{S}_{N+1}) \dots \\ \otimes (\mathbf{S}_1 | \mathbf{S}_{M-N+2} | \dots | \mathbf{S}_M) \dots \\ \otimes (\mathbf{S}_{M-N+1} | \mathbf{S}_{M-N+2} | \dots | \mathbf{S}_M) \quad (10)$$

其中  $|$  代表逻辑“或”,  $\otimes$  代表逻辑“与”。

$$zb_{r1} = \frac{S_{zong} \text{ 中 1 的 个数}}{RC_{\max} \cdot FC_{\max}} \quad (11)$$

(8) 运用模拟退火算法进行以下运算(MATLAB 语言描述):

If  $zb_{r1} \leq zb_r$

temp<sub>1</sub> = prf<sub>1</sub>, temp<sub>2</sub> = prf<sub>2</sub>, ..., temp<sub>M</sub> = prf<sub>M</sub>

else if  $\exp\left(\frac{(zb_r - zb_{r1})}{t}\right) > \text{rand}(1)$

temp<sub>1</sub> = prf<sub>1</sub>, temp<sub>2</sub> = prf<sub>2</sub>, ..., temp<sub>M</sub> = prf<sub>M</sub>

end

上述过程中,  $t$  值的选择从大到小, 刚开始较大, 最后趋近于零, 与  $\text{rand}(1)$  对应, 就可实现开始运算时除接受最优解, 还在一定范围内接受恶化解, 随着运算的推进, 将不再接受恶化解的 Metropolis 准则。

进行上述运算后, 将  $zb_{r1}$  的值赋予  $zb_r$ :

$$zb_{r1} = zb_r \quad (12)$$

(9) 按一定规则产生新的重复频率值, 并使之满足以下条件:

条件 1  $prf_1, prf_2, \dots, prf_M \in (prf_{\min}, prf_{\max})$

条件 2  $\text{gcd}(prf_i, prf_j) \leq \text{gp}$

$\text{lcm}(prf_i, prf_j) \geq \text{lp}$

$i, j \in (1, M)$  且  $i \neq j$

其中  $\text{gcd}$  表示最大公约数,  $\text{lcm}$  表示最小公倍数,  $\text{gp}$  表示最大不模糊距离为  $R_{\max}$  时的单重复频率,  $\text{lp}$  表示最大不模糊速度为  $V_{\max}$  时的单重复频率,  $i, j$  遍历  $(1, M)$  的各个值。

(10) 根据新的重复频率值循环计算步骤(4)到步骤(9), 直到达到停止准则的条件。

模拟退火算法的显著特点是除接受优化解外, 还在一定范围内接受恶化解, 使之可以从局部最优的陷阱中跳出, 更容易求得整体最优解, 但这一点也可能使跳离的局部最优是整体最优这种情况发生。

本文在运用模拟退火算法进行重复频率选择时停止准则采用的是迭代次数与平衡状态相结合的方式。为使之更容易获得整体最优解, 同时又使运算量较小, 总的迭代次数取

得较大,在迭代过程中若迭代次数达到一定值且有多个状态相差极小,即达到平衡,则终止迭代。而为了避免跳离的局部最优是整体最优这类情况发生,  $t$  的取值随着迭代次数的增加按指数方式增大,这样当迭代次数达到一定值时,几乎已不再接受恶化解,从而避免这种情况的发生。

#### 4 试验结果与分析

作者用 MATLAB 语言编写了所提方法的程序,在 CPU 为 3GHz,内存为 512M 的计算机上运行,程序中有关参数如下:最大距离量程:600km;目标最大速度:1000m/s;距离分辨单元:60m;工作频率:3GHz;多普勒处理带宽:200Hz;杂波宽度:600Hz;重复频率范围:2kHz-13kHz;脉冲占空比:5%;检测准则:2/4。

在上述参数条件下用所提方法得到的一组重复频率,满足解距离与速度模糊的条件,其距离和速度二维遮蔽如图 1 所示,图 2 为运算过程中遮蔽率变化的情况。

所提方法用时 249.1s,所得重复频率的距离和速度遮蔽率为 3.77%。

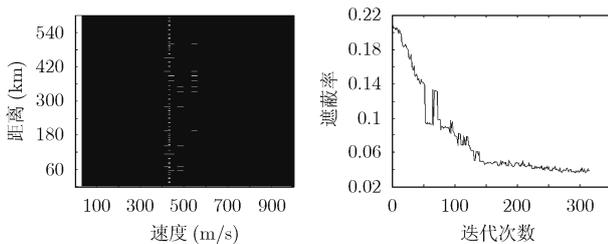


图 1 所提方法运算所得重复频率的距离与速度遮蔽

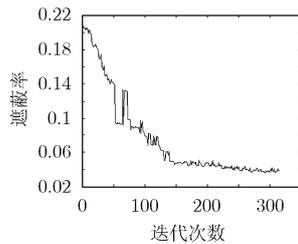


图 2 所提方法运算过程中的遮蔽率变化

作者用 MATLAB 语言编写了基于遗传算法的程序<sup>[2,5]</sup>,在相同计算机上用相同参数做了试验,得到一组重复频率,满足解距离和速度模糊的条件,其距离和速度二维遮蔽如图 3 所示。

基于遗传算法的方法在用时 1492.3s 情况下,所得重复频率的距离和速度遮蔽率为 6.83%。

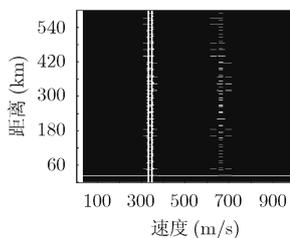


图 3 遗传算法运算所得重复频率的距离与速度遮蔽

从图 2 的遮蔽率变化可见,所提方法既避免了得到局部最优解,又避免了跳离的局部最优是整体最优这种情况发生。从图 1 与图 3 比较可见,所提方法得到的遮蔽率优于基于遗传算法得到的遮蔽率。而从运算时间看,所提方法也优于基于遗传算法的方法。所提方法能取得较好的效果,得益于采用 Metropolis 准则的模拟退火算法具有高效、鲁棒等特点。此外,所提方法阐述的是一种思路,只要改变运算中的相关参数,就可运用所提方法得到其它情况下的结果。

#### 5 结束语

本文根据机载脉冲多普勒雷达的工作特点,提出了一种基于模拟退火算法的机载脉冲多普勒雷达中重复频率选择方法,通过试验表明,所提方法具有高效、鲁棒、通用,灵活等特点,可供雷达设计师在实际工作中参考。

#### 参考文献

- [1] Stimson G W 著,吴汉平等译. 机载雷达导论[M]. 第二版,北京:电子工业出版社,2005: 645-661.  
Stimson G W. Introduction to Airborne Radar. Second Edition, Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005: 645-661.
- [2] Davies P G and Hughes E J. Medium PRF set selection using evolutionary algorithms[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(3): 933-939.
- [3] Alabaster C M, Hughes E J, and Matthew J H. Medium PRF radar PRF selection using evolutionary algorithms[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 990-1001.
- [4] 康立山,谢云,尤矢勇等. 非数值并行算法—模拟退火算法[M]. 北京:科学出版社,1998: 22-38.  
Kang Li-shan, Xie Yun and You Shi-yong *et al.* Non-numerical Parallel Algorithms-Simulated Annealing Algorithm. Beijing: Publishing House of Science, 1998: 22-38.
- [5] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999: 18-64.  
Zhou Ming and Sun Shu-dong. Genetic Algorithms: Theory and Applications. Beijing: Publishing House of National Defense Industry, 1999: 18-64.

葛建军: 男,1967年生,研究员,38所副总工程师,从事雷达总体工作。

张春城: 男,1976年生,博士,从事雷达总体、信号处理方面的工作。