

旋转相控阵雷达区域威胁度计算及调度技术研究

李纪三*

(南京船舶雷达研究所 南京 210000)

摘要: 旋转相控阵雷达在方位和仰角上均能电子扫描, 相对于传统机扫雷达在方位和仰角上能更加灵活地调配资源。为了优化探测效果, 需要对探测区域进行方位分区并进行威胁度评估。该文基于旋转相控阵雷达最威胁路径的计算提出一种区域威胁等级评估的方法; 通过把每点检测概率等价代价函数, 利用泛函变分将寻找最威胁路径转变为最短路径问题; 利用快速行进法求解旅行最短问题满足的程函差分方程, 然后利用梯度下降法回溯最威胁路径; 最后以240批目标的威胁路径计算为例, 给出相应的评估结果。实践结果验证了方法的有效性和正确性。

关键词: 旋转相控阵雷达; 资源调度; 最威胁路径; 区域威胁度评估

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)04-1177-08

DOI: 10.11999/JEIT190999

Research on Computing the Most Threatening Areas and Resource Allocation Techniques of Rotating Phased Array Multi-function Radar

LI Jisan

(Nanjing Marine Radar Institute, Nanjing 210000, China)

Abstract: Rotating phased array multi-function radar have electronically scanning capability both in elevation and in azimuth. It can allocate time and energy both in azimuth and elevation more flexible than the mechanical scanning radar. In order to optimize the effects of search, it is needed to divide and assess the areas. Based on the calculation of the most threatening path of the rotating phased array radar, this paper presents a novel method of regional threat level assessment; The radar problem of most threatening trajectories computation may be declined to a shortest path problem solved by calculus of variations by taking the detection probability as the price function; The shortest path computation based on Eikonal equations are solved with the fast marching method. The most threatening path are computed by backtracking the minimal path based on steepest gradient descent method. Finally, the solution of rotating phased array multi-function radar resources management is proposed based on divided areas, and the validity of the technique is checked and rationality of constructed model is verified by providing instances with 240 typical targets.

Key words: Rotating phased array radar; Sensor resources management; The most threaten trajectory; Areas threat assessment

1 引言

三坐标雷达(3D 雷达)是指能同时测量目标距离、方位和仰角或高度的雷达, 采用相控阵天线的三坐标(3D)雷达是目前3D雷达的主要品种, 但多数采用的是只在仰角上进行电扫描的线性阵列天线, 这种1维电扫阵列天线还不能充分发挥相控阵雷达的优势, 在性能上受到较大的限制, 这是由于天线在方位上以机械方式实现扫描时, 采用单波束

相扫的3D雷达在搜索状态下每个波束位置上的脉冲照射次数或波束驻留时间是有限的, 很大程度上影响了雷达的反杂波性能, 尽管天线波束在仰角上具有扫描的灵活性, 雷达探测信号的能量可在仰角方向上合理分配, 但所有的灵活性均只能在天线方位波束以机械方式扫过每个方位的时间内实现, 因而工作方式的自适应能力不强, 使雷达性能得不到充分发挥^[1]。

为了满足对新一代3D雷达的多任务、多功能需求, 需要采用在方位与仰角上均能灵活扫描的相控阵天线, 这种2维电扫相控阵天线安装在可旋转

的天线座上, 天线方位上机械转动范围为 360° , 因此在任一方位角位置上, 天线波束可在一定的方位与仰角范围内作高速相控扫描。在实现雷达信号能量管理方面, 具有更多的灵活性。首先, 在搜索方面, 信号能量可同时在方位与仰角上进行合理分配, 有利于实现集中信号能量(烧穿)工作方式。在雷达监视区域以外或非重点监视区域, 以及在经若干次累积检测均没有发现目标的局部方位区域, 当天线在方位上机械旋转扫过时, 可以分配较少的能量资源, 而将信号发射到相邻的需要检测目标的方位区域。其次, 在目标跟踪方面, 根据目标的态势和威胁度可采用多种模式自适应跟踪^[2]。因此, 为发挥最大的作战效能, 需对跟踪的目标和扫描的空域进行实时的威胁度评估, 并在此基础上对扫描空域进行规划, 对工作模式进行优化设计, 对资源进行合理调配, 可使之更有效地工作^[3-5]。

对跟踪目标的威胁度的评估, 国内外作了充分的研究, 目前常用的评估方法主要包括层次分析法、熵值法、模糊逻辑法和基于最大隶属度的多属性决策方法以及证据、贝叶斯网络理论等^[6-9]。而对区域的威胁度评估研究相对较少, 雷达设计师对扫描区域的划分也主要在仰角上, 在不同的仰角层采用不同的信号波形, 如英国的MESAR雷达^[10]。

对区域的威胁度实时评估是2维旋转相控阵雷达优化探测效果的关键, 为此本文提出一种旋转相控阵雷达威胁区域的评估方法, 通过对雷达最威胁路径进行建模, 将某点探测概率的倒数等价为目标通过该点的速度, 探测概率越大, 则目标通过该点花费的时间越多, 反之则目标通过该处花费的时间越少, 以此将威胁路径的求解转化为旅行用时最短问题。

本文采用快速行进法求解旅行用时最短满足的离散的程函方程, 将雷达所在处作为源点, 每点的探测概率作为该点的速度, 从源点到达任一点的最短用时满足程函方程, 将程函方程离散后并用快速行进法求解, 得到了所有点到源点的最短用时, 然后计算每点最短用时的梯度, 利用梯度下降法, 回溯找出目标点到源点的路径, 该路径即为目标到源点的最短路径。在雷达警戒区域的边界上, 每隔 1° 设置1个目标的初始点, 计算出每点到达雷达源点的最短路径, 并对每条路径进行探测概率积分求和, 最小的对应着最威胁路径, 最威胁路径所在的方位区域即为最威胁区域。

2 雷达的检测概率

雷达的最威胁路径的计算, 可以等价于导弹的路径规划问题, 即导弹从雷达的警戒区域的边界上

某点A飞向雷达, 总存在一条路径, 相对于其他的路径, 使得导弹最不容易被雷达发现^[11], 那么这条路径就是导弹对应初始点A的最优路径。对于雷达来说, 导弹的最优路径就是雷达的最威胁路径。雷达在警戒区域的某点对导弹的发现能力通常用发现概率或者检测概率 P_D 描述, 检测概率与目标的信噪比正相关。在加性高斯噪声情况下, 保持恒虚警率进行目标检测时, 目标检测概率与信噪比的关系近似满足式(1)(回波信号单帧检测, 不做积累等处理)^[12]

$$P_D = 0.5 \operatorname{erfc}(\sqrt{-\ln P_F} - \sqrt{\operatorname{SNR} + 0.5}) \quad (1)$$

其中, SNR为以dB为单位的信噪比; P_F 为虚警率, 一般取 $P_F = 10^{-6}$; P_D 为目标检测概率, 补余误差函数为

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - 2/\sqrt{\pi} \int_0^z e^{-v^2} dv \quad (2)$$

检测概率与雷达的信噪比正相关, 雷达的信噪比越大则检测概率越大, 为了求出雷达在某处的检测概率, 需要求出雷达在此处的信噪比, 文献^[13]给出了涵盖目标态势影响、环境态势影响并考虑雷达接收机噪声、系统损耗、脉冲积累的信号处理方式等主要因素的信噪比计算公式。

3 快速行进法计算雷达最威胁路径

3.1 最威胁路径

雷达的最威胁路径, 等价于来袭导弹的最优路径, 即导弹沿着该路径抵达雷达, 最不容易被雷达发现。如果一条路径检测概率的积分小于另外一条路径, 则认为这条路径对雷达来说的威胁度大于另外一条路径, 因此雷达的最威胁路径可表示为在警戒区域 ϕ 内路径 c 的检测概率积分最小

$$C_{\text{opt}} = \arg \min \left(\int_c P_D(c(s)) ds \right), c \in \phi \quad (3)$$

式(3)是典型的在区域内求极值问题, 可用泛函的变分来求解, 泛函的变分计算过程为

自变量 x 在区间 $[a, b]$ 内存在一个函数 $y(x)$, 并且满足边界条件

$$y = \alpha|_{x=a}, y = \beta|_{x=b} \quad (4)$$

并使泛函

$$V = \int_a^b F(x, y, y') dx \quad (5)$$

取极值。

式(5)的泛函极值条件为 $\delta V = 0$, 即

$$\delta V = \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{\partial F}{\partial y} \delta y + \frac{\partial F}{\partial y'} \delta y' \right) dx = 0 \quad (6)$$

令泛函 $F(x, y, y')$ 是函数 $y(x)$ 的函数。假如 F 不仅与 y 有关, 同时与其导数有关, 这时泛函1阶变分自变函数可视为 $y(x)$ 和其导数 $y'(x)$ 的函数。因此可以把微分符号 d 用变分符号 δ 来代替, 而 $\delta x = 0$, 因泛函的变分只与 $y(x)$ 和 $y'(x)$ 的变分有关, 故泛函变分为

$$\delta F = \frac{\partial F}{\partial y} \delta y + \frac{\partial F}{\partial y'} \delta y' \quad (7)$$

对式(7)的右边的第2项进行分部积分

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial F}{\partial y'} \delta y' dx = \frac{\partial F}{\partial y'} \delta y_{x_2} - \int_{x_1}^{x_2} \left[\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) \delta y \right] dx \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中有

$$\delta V = \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) \right) \delta y dx + [-H(x)\delta x + p(x)\delta y]_{x_1}^{x_2} = 0 \quad (9)$$

其中

$$H(x) = \frac{dy}{dx} \frac{\partial F}{\partial \left(\frac{dy}{dx} \right)} - F, \quad p(x) = \frac{\partial F}{\partial \left(\frac{dy}{dx} \right)} \quad (10)$$

根据式(5), 最威胁路径的泛函可写为

$$V = \int_a^b g(x, y) \sqrt{1 + y'^2} dx \quad (11)$$

其中, $g(x, y)$ 为在点 (x, y) 的检测概率, a 为雷达所在的点, b 为导弹的位置, V 为整个路径上检测概率的积分, 求得 V 最小值对应的路径即为导弹从 b 飞向 a 的最威胁路径。

根据最小作用原理^[11]

$$dV(x, y) = \frac{\partial V(x, y)}{\partial x} dx + \frac{\partial V(x, y)}{\partial y} dy = -H \cdot dx + P \cdot dy \quad (12)$$

将 $F = g(x, y) \sqrt{1 + y'^2}$ 代入式(10)

$$P = \frac{\partial V(x, y)}{\partial y} dy = \frac{\partial F}{\partial \left(\frac{dy}{dx} \right)} = \frac{g(x, y) \cdot \frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}} \quad (13)$$

$$H = -\frac{\partial V(x, y)}{\partial x} dx = \frac{dy}{dx} \frac{\partial F}{\partial \left(\frac{dy}{dx} \right)} - F = -\frac{g(x, y)}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}} \quad (14)$$

联立式(13)和式(14)平方相加可得

$$\left(\frac{\partial V(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V(x, y)}{\partial y} \right)^2 = g^2(x, y) \quad (15)$$

$$|\nabla V(x, y)| = g(x, y) \quad (16)$$

计算出所有网格点的 V 后, 利用梯度下降法可以回溯出积分最短的路径。

3.2 快速行进法求解程函方程

Sethian^[14]于1996年首次提出快速行进法(fast marching method), 通过数值方法求解程函方程(eikonal equation)的近似解, 以解决界面的传播问题, 将上节中的程函方程重写为

$$|\nabla V(x)| = g(x), \text{ in } \{\phi\}, \quad g(x) > 0 \quad (17)$$

$$V = u(x), \text{ on } \{\tau\} \quad (18)$$

其中, ϕ 是2维或3维区域, τ 是区域边界。在界面传播问题中, $V(x)$ 的物理意义是到达点 x 时间, $g(x)$ 是界面在点 x 处的局部传播速度的倒数, 也可以理解为在此点代价函数。在计算雷达的最短路径中, $V(x)$ 为源点到初始点的检测概率积分, $g(x)$ 为检测概率。

根据文献^[15], 利用差分法对式(17)进行离散可得

$$\{\max(D_{ij}^{-x}V, 0)^2 + \min(D_{ij}^{+x}V, 0)^2 + \max(D_{ij}^{-y}V, 0)^2 + \min(D_{ij}^{+y}V, 0)^2\} = g_{ij}^2 \quad (19)$$

D_{ij}^x 是符号算子, D_{ij}^xV 表示在 (i, j) 点计算 V 在 x 方向的变化率, 文献^[16]给出了式(19)近似的计算方法

$$\{\max(D_{ij}^{-x}V, -D_{ij}^xV, 0)^2 + \max(D_{ij}^{-y}V, -D_{ij}^yV, 0)^2\} = g_{ij}^2 \quad (20)$$

$\Delta x, \Delta y$ 是在 x 轴和 y 轴的网格宽度。

如果令

$$V = V_{i,j}, \quad V_1 = \min(V_{i-1,j}, V_{i+1,j}), \quad V_2 = \min(V_{i,j-1}, V_{i,j+1}) \quad (21)$$

则离散的程函方程化简为

$$\max\left(\frac{V - V_1}{\Delta x}, 0\right)^2 + \max\left(\frac{V - V_2}{\Delta y}, 0\right)^2 = g_{ij}^2 \quad (22)$$

快速行进法计算的流程如图1所示^[15,16]: (1)首先初始化源点 O 点的值, 假设 O 点坐标为 $x_{3,3}$; (2)将 O 点相邻的节点即 $x_{2,3}, x_{3,2}, x_{3,4}, x_{4,3}$ 移入窄带区, 用迎风法(upwind methods)计算窄带区各节点的可能值^[17]; (3)从窄带区中找出值最小的节点(假设是节点 $x_{3,2}$), 节点 $x_{3,2}$ 移入上风区; (4)将节点 $x_{3,4}$ 点周围的 $x_{3,1}, x_{4,2}, x_{2,2}$ 移入窄带区, 并计算其可能值; (5)从窄带区中找出值最小的节点(假设是节点 $x_{2,3}$), 移入上风区; (6)将节点 $x_{2,3}$ 点周围的节点 $x_{1,3}, x_{2,4}$ 移入窄带区, 并用节点 $x_{2,3}$ 的值计算其可能值。

3.3 梯度下降法回溯最短路径

本文用于求解最威胁路径的梯度下降法, 也称作最速下降法, 是求解无约束优化问题的经典方

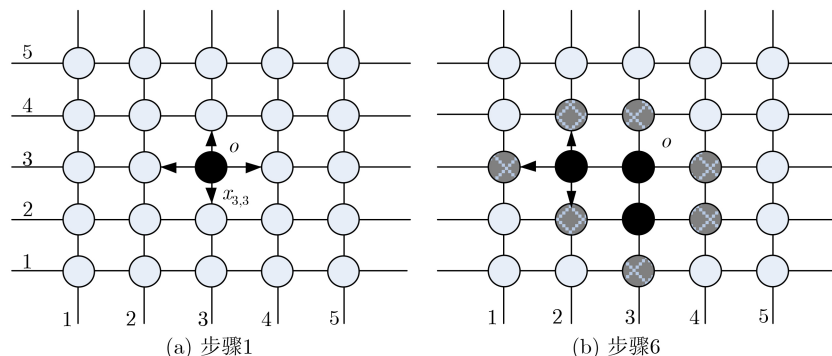


图1 快速行进法步骤

法。可以将负梯度方向作为1维搜索的方向，用于解决优化问题，因此这种方法被称作梯度下降法。

考虑 $f(x)$ 的泰勒展开式

$$f(x_k + \Delta x_k) = f(x_k) + \nabla f(x_k)\Delta x_k + o((\Delta x_k)^2) \approx f(x_k) + \nabla f(x_k)\Delta x_k \quad (23)$$

如果函数值想要下降得最快，则需要 $\nabla f(x_k)\Delta x_k$ 取最小值，即

$$\cos < \nabla f(x_k), \Delta x_k > = -1 \quad (24)$$

也就是说，此时 x 的变化方向(Δx_k 的方向)跟梯度 $\nabla f(x_k)$ 的方向恰好相反。

取步长为 $\alpha_k = \alpha \|\nabla f(x_k)\|$ ，于是牛顿迭代公式变为

$$x_{k+1} = x_k - \alpha \nabla f(x_k) \quad (25)$$

此时 α 是一个固定值，称为学习率，通常取0.1，该方法称为固定学习率的梯度下降法。

4 仿真计算

4.1 检测概率图的生成

雷达的探测区域半径为300 km，雷达在坐标(300 km, 300 km)处，令 $\Delta x, \Delta y$ 在 x 轴和 y 轴的网格宽度为 $\Delta x = \Delta y = 1$ km，由于真实的雷达检测概率涉及雷达的详细参数，为了重点验证算法的有效性，本文模拟生成雷达周围的探测概率图，警戒探测区每个网格点上的检测概率设置为

$$P_D = \begin{cases} 0.8 + 0.2\text{rand}(1), & R < 80 \text{ km} \\ 0.7 + 0.2\text{rand}(1), & 80 \text{ km} < R < 150 \text{ km} \\ 0.6 + 0.2\text{rand}(1), & 150 \text{ km} < R < 250 \text{ km} \\ 0.5 + 0.2\text{rand}(1), & 250 \text{ km} < R < 300 \text{ km} \end{cases} \quad (26)$$

其中， $\text{rand}(1)$ 为0~1之间的随机数。在方位 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 上设置了4个低检测概率带来模拟雷达的最威胁路径，其检测概率设置为

$$P_D = 0.4 + 0.2\text{rand}(1) \quad (27)$$

整个探测区域的检测概率的分布如图2所示。

5 快速行进法计算走时

利用第3节介绍的快速行进法计算从雷达源点开始到达任意点的走时 $V(x)$ ，网格上每点的 V 值，如图3所示，整个仿真区域为 $x(0 \text{ km}, 600 \text{ km}), y(0 \text{ km}, 600 \text{ km})$ ，雷达位于(300 km, 300 km)，在图中计算出的 V 值范围(0~300)用颜色灰度表示。

将每个网格点上的检测概率设置为1，则 V 的计算如图4所示，当设置每个网格点的代价函数或者速度相同时，波面是按自由空间波传播的形式向外传播的，即离源点相同距离的网格点的 V 值也相同。在图5中，设置了每个网格点的代价函数不同，并且在4个方向，代价函数较小， V 值在这几个方向相同距离段上也较小，与实际情况也是相符

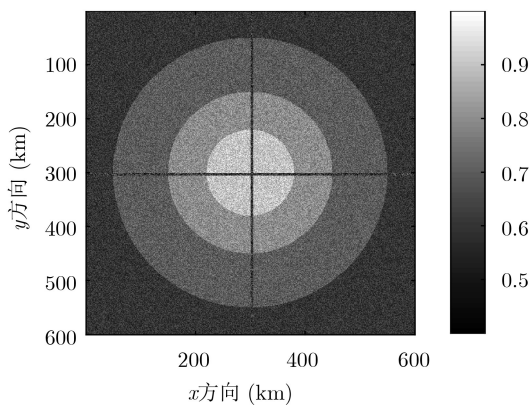


图2 检测概率分布

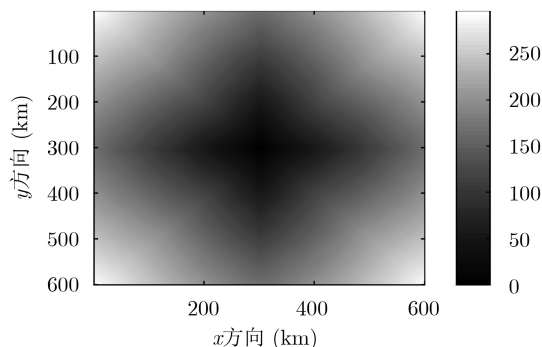


图3 警戒区域每个网格点的V值

的检测概率越小，波前行的代价越小，则对应的行进速度也越快。设置了4条低检测概率的通道，从计算中可以看出，在4个方位上相同距离段上的走时最小。设置了导弹的初始点在坐标(520 km, 560 km)，利用第4节介绍的最速下降法，回溯到雷达源点(300 km, 300 km)的最短路径，路线结果如图5所示。由图5可以看出，导弹在接近雷达的过程中，会逐渐靠近0°这个低检测概率带，最后从方位0°方向到达雷达。

为了寻找雷达整个探测区域所有的威胁路径以评估区域的威胁等级，在警戒区域的边界上，按照方位1.5°间隔，设置了240个初始点，如图6所示的

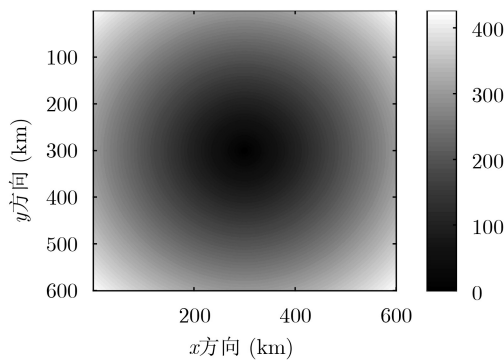


图4 相同检测概率的V值

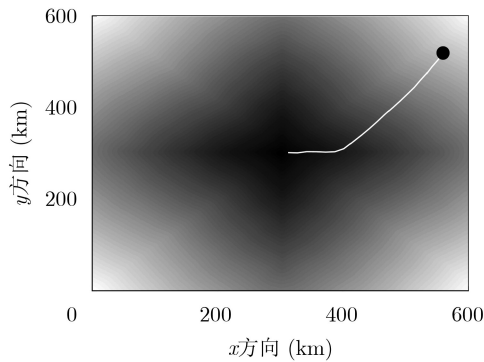


图5 初始点(520, 560)的最短路径

圆上的点，圆心为雷达所在的位置，采用图5计算出的V值，利用最速下降法，求解这240个点最威胁路径，图6中的白线便是路径，图6的灰度值代表V值与图5相同，路径大都汇聚在0°，90°，180°和270°这4个低检测带附近，与本文设置的低检测概率通道一致，可以认为这4个通带区域威胁度较高，需要雷达调配更多的时间和能量资源来探测。将每条路径的检测概率进行了求和，结果如图7所示，在0°，90°，180°和270°附近有区间的极小值存在。

6 基于区域威胁度的资源调度仿真

具有2维相扫能力的相控阵雷达，如图8所示，通过在方位上提前扫描和方位上回扫，可以在方位

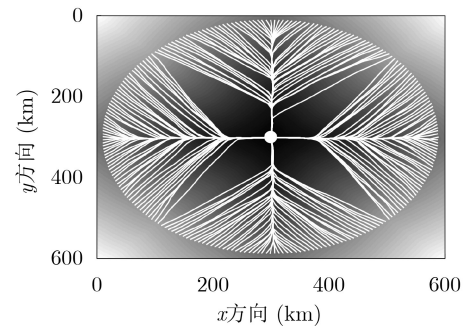


图6 所有方位上的最短路径

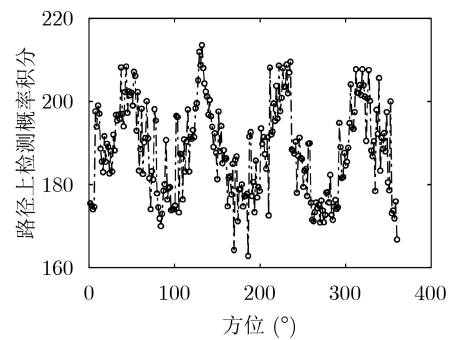


图7 每个方位上的威胁路径检测概率积分

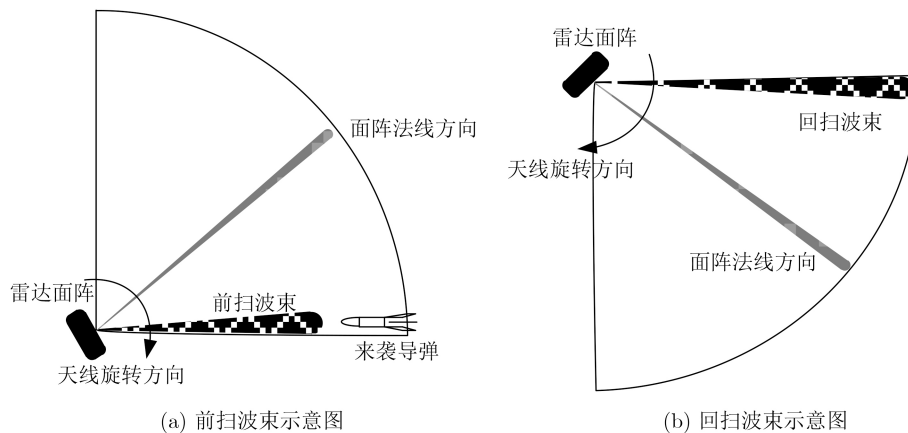


图8 波束偏扫示意图

和仰角两个维度上调配资源,资源调配的力度和灵活性更大。

相比于固定面阵相控阵雷达,旋转相控阵雷达有以下特点^[17]:天线通过360°机械旋转覆盖整个探测区域,固定相控阵雷达采用3个或4个面阵共同覆盖整个探测区域,因此旋转相控阵雷达成本更低,功耗更小;对任一方位,旋转相控阵雷达在2/3的时间天线波束照射不到,跟踪的数据率不能连续渐变,只能离散取值。

为了提升旋转相控阵雷达的作战效能,需要根据其扫描特点,合理地设计工作方式和资源调度策略,在雷达的探测区域内,不同区域的杂波环境和态势不同,为提升探测效果,可将探测区域在方位上分成若干个资源调度扇区,每个资源调度扇区分为若干个任务子扇区,同时根据第4节计算的任务子扇区的威胁度,不同的威胁度采用不同的数据率,或者根据威胁度分配不同的时间能量资源^[2-4,18,19]。

在局部任务负载较重的情况下,较大的资源分区能够使资源分配更优化,使局部较大的负载量向两边释放。天线匀速转动,较大的分区必然要通过天线的偏扫来完成,天线的偏扫量过多,会造成能量的损失和精度的下降。确定分区大小要考虑的因素:天线的转速、警戒的数据率、调度间隔大小、波束偏移的限制^[20,21],分区大小计算如下。

相控阵雷达按照调度间隔编排任务,天线选择一圈的时间为 T_{circle} (通常为1 s, 2 s和4 s),调度间隔 $T_{interval}$ (通常取值为50 ms, 100 ms),每个调度间隔对应的任务区间 ϕ 为

$$\phi = 360T_{interval}/T_{circle} \quad (28)$$

如果 T_{circle} 取值为4s, $T_{interval}$ 取值为100 ms,则一个调度间隔对应的天线转过的区域为9°。每个资源调度扇区包含着整数个调度间隔,根据上面的分析,资源调度扇区大小要适中,所以每个资源扇区可选择调度间隔数为:3, 4和5,对应着扇区大小为27°, 36°和45°,整个警戒区域360°对应的扇区数为 $360^\circ/27^\circ=13.3$, $360^\circ/36^\circ=10$, $360^\circ/45^\circ=8$ 。整个警戒区域的扇区数最好为整数,则扇区大小可选为:36°和45°。

综合考虑计算的复杂度和调度的实时性,可取资源调度扇区大小为45°,每个资源调度扇区内包含调度间隔个数 $M=5$ 。每个资源调度扇区再划分为若干个任务子扇区,每个任务扇区单独计算威胁度,然后根据威胁度确定搜索的数据率。考虑到工程的实现的简单性要求的考虑,每个任务调度子扇区与调度间隔内天线转过的角度可选择一致,子扇区的大小为9°,即每个资源调度扇区包含着任务子

扇区的个数为 $N=5$,资源调度扇区和任务子扇区的关系如图9所示。

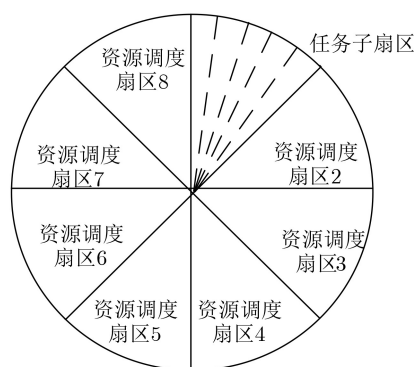


图9 扇区分区示意图

如图10所示,对旋转相控阵雷达分区资源调度进行了仿真,系统按调度扇区分配时间资源,在搜索的方式下,每个调度扇区的总时间资源除去精跟、确认、失跟捕获等高优先级任务后,剩余的时间均匀地分配给任务子扇区,根据子扇区的威胁度确定搜索数据率,根据数据率确定本圈需要扫描的子扇区。若每个扇区预先留出突发任务的驻留时间,在无突发任务时又会造成极大的浪费,而且无法估计任务的个数,为此可采取扇区资源延迟补偿策略,将本扇区的突发任务占有时间,移到下个扇区进行均衡。

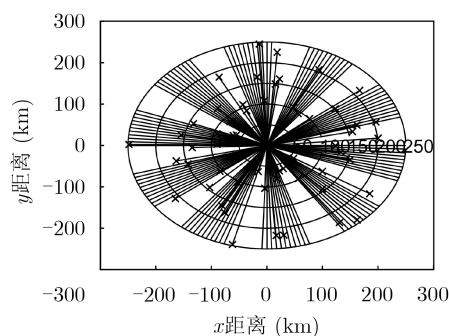


图10 资源调度仿真图

7 结论

雷达警戒区的威胁度评估是旋转相控阵雷达资源调度需要解决的关键问题之一,本文将雷达警戒区威胁度的评估问题,转化为求解雷达最威胁路径,进而转化为最短路径问题,即路径上检测概率的积分最小,利用快速行进法计算走时,然后通过最速下降法回溯出最威胁路径,将威胁路径所在的区域标记为最威胁区,通过增加威胁区的数据率来提高该区威胁目标的探测概率。经仿真验证,威胁

度评估方法合理有效,且在工程应用上有较强的现实意义;对于多功能相控阵雷达,可根据区域威胁度自适应调度波束实现对高威胁区进行加密搜索,从而实现对相控阵雷达资源的优化管理。

参考文献

- [1] 张光义. 二维电扫三坐标雷达技术应用分析[J]. 现代雷达, 2005, 27(12): 1–7. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2005.12.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2005.12.001).
ZHANG Guangyi. Analysis of 3D radar with 2D-electronically scanning antenna[J]. *Modern Radar*, 2005, 27(12): 1–7. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2005.12.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2005.12.001).
- [2] 杨善超, 田康生, 吴长飞. 基于服务质量的相控阵雷达网目标分配方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(12): 2844–2851. doi: [10.11999/JEIT181133](https://doi.org/10.11999/JEIT181133).
YANG Shanchao, TIAN Kangsheng, and WU Changfei. Target assignment method for phased array radar network based on quality of service[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(12): 2844–2851. doi: [10.11999/JEIT181133](https://doi.org/10.11999/JEIT181133).
- [3] LABREUCHE C, BARBARESCO F, NGUYEN D, *et al.* Multi-criteria aggregation for adaptive multifunction radar resource management performances evaluation[C]. 2017 18th International Radar Symposium (IRS), Prague, Czech Republic, 2017: 1–10. doi: [10.23919/IRS.2017.8008152](https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008152).
- [4] TIAN Tuanwei, ZHANG Tianxian, and KONG Lingjiang. Timeliness constrained task scheduling for multifunction radar network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(2): 525–534. doi: [10.1109/JSEN.2018.2878795](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2878795).
- [5] SHAGHAGHI M, ADVE R S, and DING Z. Multifunction cognitive radar task scheduling using Monte Carlo tree search and policy networks[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(12): 1437–1447. doi: [10.1049/iet-rsn.2018.5276](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5276).
- [6] 张延风, 刘建书, 张士峰. 基于层次分析法和熵值法的目标多属性威胁评估[J]. 火箭与制导学报, 2019, 39(2): 163–165. doi: [10.15892/j.cnki.djzdx.2019.02.037](https://doi.org/10.15892/j.cnki.djzdx.2019.02.037).
ZHANG Yanfeng, LIU Jianshu, and ZHANG Shifeng. A multi-attribute threat assessment method based on analytical hierarchy process and entropy method[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019, 39(2): 163–165. doi: [10.15892/j.cnki.djzdx.2019.02.037](https://doi.org/10.15892/j.cnki.djzdx.2019.02.037).
- [7] ZHANG Kun, KONG Weiren, LIU Peipei, *et al.* Assessment and sequencing of air target threat based on intuitionistic fuzzy entropy and dynamic VIKOR[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(2): 305–310. doi: [10.21629/JSEE.2018.02.11](https://doi.org/10.21629/JSEE.2018.02.11).
- [8] 肖力铭, 齐海生, 屈济坤, 等. 基于直觉模糊层次分析法的空中目标威胁评估[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(3): 108–111.
XIAO Liming, QI Haisheng, QU Jikun, *et al.* Air target threat assessment based on intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Journal of Detection & Control*, 2019, 41(3): 108–111.
- [9] OKELLO N and THORNS G. Threat assessment using Bayesian networks[C]. The 6th International Conference of Information Fusion, Cairns, Australia, 2003: 1102–1109. doi: [10.1109/ICIF.2003.177361](https://doi.org/10.1109/ICIF.2003.177361).
- [10] BUTLER J M. Tracking and control in multi-function radar[D]. [Ph. D. dissertation], University of London, 1998.
- [11] BARBARESCO F. Computation of most threatening radar trajectories areas and corridors based on fast-marching & Level Sets[C]. 2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications, Paris, France, 2011: 51–58. doi: [10.1109/CISDA.2011.5945944](https://doi.org/10.1109/CISDA.2011.5945944).
- [12] NORTH D O. An analysis of the factors which determine signal/noise discrimination in pulsed-carrier systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1963, 51(7): 1016–1027. doi: [10.1109/PROC.1963.2383](https://doi.org/10.1109/PROC.1963.2383).
- [13] BARTON D K. Radar Equations for Modern Radar[M]. Boston, Mass: Artech House, 2013: 16–17.
- [14] SETHIAN J A. Fast marching methods[J]. *SIAM Review*, 1999, 41(2): 199–235. doi: [10.1137/s0036144598347059](https://doi.org/10.1137/s0036144598347059).
- [15] CHACON A and VLADIMIRSKY A. Fast two-scale methods for Eikonal equations[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2012, 34(2): A547–A578. doi: [10.1137/10080909X](https://doi.org/10.1137/10080909X).
- [16] 兰海强, 张智, 徐涛, 等. 地震波走时场模拟的快速推进法和快速扫描法比较研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5): 1863–1870. doi: [10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.005](https://doi.org/10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.005).
LAN Haiqiang, ZHANG Zhi, XU Tao, *et al.* A comparative study on the fast marching and fast sweeping methods in the calculation of first-arrival travelttime field[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(5): 1863–1870. doi: [10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.005](https://doi.org/10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.005).
- [17] MRUDUL K, MANDAVA R K, and VUNDAVILLI P R. An efficient path planning algorithm for biped robot using fast marching method[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 133: 116–123. doi: [10.1016/j.procs.2018.07.015](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.015).
- [18] 李纪三, 侯姣, 班阳阳, 等. 旋转相控阵雷达资源调度策略研究[J]. 雷达与对抗, 2018, 38(4): 1–6.
LI Jisan, HOU Jiao, BAN Yangyang, *et al.* Study on resource scheduling strategy for rotary phased array radar[J]. *Radar & ECM*, 2018, 38(4): 1–6.
- [19] 杨善超, 田康生, 刘仁争, 等. 基于价值优化的相控阵雷达任务调度算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(2): 465–471. doi: [10.11999/JEIT190147](https://doi.org/10.11999/JEIT190147).
YANG Shanchao, TIAN Kangsheng, LIU Renzheng, *et al.* Scheduling algorithm based on value optimization for

- phased array radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 465–471. doi: [10.11999/JEIT190147](https://doi.org/10.11999/JEIT190147).
- [20] 叶朝谋, 丁建江, 俞志强, 等. 基于周期分区的相控阵雷达任务交叉调度研究[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(2): 435–440. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00475](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00475).
- YE Chaomou, DING Jianjiang, YU Zhiqiang, *et al.* Study on task interleaving scheduling of phased array radar based on period division[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(2): 435–440. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00475](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00475).
- [21] LIU Dai, ZHAO Yongbo, CAI Xingyu, *et al.* Adaptive scheduling algorithm based on CPI and impact of tasks for multifunction radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11205–11212. doi: [10.1109/JSEN.2019.2936659](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2936659).
- 李纪三: 男, 1981年生, 高级工程师, 研究方向为相控阵雷达资源调度及数据处理.

责任编辑: 余 蓉