

# 相控阵雷达最优波位编排的边界约束算法研究

周 颖<sup>1</sup>,王雪松<sup>1</sup>,王国玉<sup>2</sup>,李永祯<sup>1</sup>,肖顺平<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073;2. 洛阳市 061 信箱,河南洛阳 471000)

**摘 要:** 在分析相控阵雷达波束展宽效应的基础上讨论了空域中最优波位编排的问题.把复杂空域中边界的动态性和非线性难题转化为图论问题,提出了相控阵雷达最优波位编排的边界约束算法并给出了实例.然后比较了多种不同编排样式的覆盖率和重叠率并给出了一般性结论,最后以某相控阵雷达为例给出了波位数目和相交电平的关系曲线.

**关键词:** 相控阵雷达;波位;最优搜索理论;边界约束

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-0997-04

## Study on Boundary-Confined Algorithm of Optimal Beam Position Arrangement for Phased Array Radar

ZHOU Ying<sup>1</sup>,WANG Xue-song<sup>1</sup>,WANG Guo-yu<sup>2</sup>,LI Yong-zhen<sup>1</sup>,XIAO Shun-ping<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Mailbox 61, Luoyang, Henan 471000, China)

**Abstract:** On the basis of analyzing the extension of beam width of phased array radar, the optimal beam position arrangement in complicated spaces is discussed. A new method based on boundary-confined algorithm is proposed with an example in the paper, which converts the dynamic and non-linear problem to graphics theory. Then compare the overlying and overlapping ratio among different arrangement patterns and draw out some conclusions. Finally, the curve between beam position number and intersectant voltage value is obtained according to some phased array radar.

**Key words:** phased array radar (PAR); beam position; optimal search strategy; boundary-confined

### 1 引言

雷达工作环境的恶化是现代雷达面临的严峻挑战.在现代复杂多变的电子战环境中,依靠空间捷变的波束扫描能力和灵活高效的资源管理方式,相控阵雷达在对付多目标、多干扰源以及对环境的自适应等方面均体现出传统机械扫描雷达无法比拟的优势<sup>[1]</sup>.

相控阵雷达按照波位表进行波位扫描.如果波位之间过于紧凑,将不可避免地浪费雷达系统资源,而且目标的冗余探测还将造成去相关的困难;如果波位之间过于稀松,波束形状损失可能造成目标检测的漏失<sup>[2]</sup>.另外当相控阵天线进行波束扫描时,将产生波束展宽效应,这就给波位编排带来了困难.

文献[4~8]在分析展宽效应的基础上,均指出了波位编排应该在正弦空间坐标系中进行,但没有具体的实现方法,资料[10]给出了一般简单空域中波位编排的一些优化方法.传统的波位编排工作大多针对空域图形的具体特点采取一些近似方法来进行,或者依靠人工完成,费时费力而且灵活性差.

尤其当相控阵雷达得到了预警系统的指示信息后,可以充分利用最优搜索理论<sup>[9,12,13]</sup>把扫描空域实时划分为若干重要性系数不同的区域,分别赋予不同的加权系数,或者使用 DBF 技术对每个区域采用不同的波束宽度和信号形式,以达到使发现目标的平均时间最小化的目的.此时复杂空域的波位编排难度较大,对应的波位表也不能通过预处理先生成,而这方面的工作很少见到报道.

### 2 相控阵天线波束扫描的展宽效应分析

对于一个由  $(2N_x + 1) \times (2N_y + 1)$  个阵元组成的平面阵,当波束指向  $(\theta_0, \phi_0)$  时有<sup>[5~7]</sup>:

$$\frac{(T_{x0} - dT_x)^2}{(B_{x0}/2)^2} + \frac{(T_{y0} - dT_y)^2}{(B_{y0}/2)^2} = 1 \quad (1)$$

其中  $T_{x0} = \sin \theta_0 \cos \phi_0$ ,  $T_{y0} = \sin \theta_0 \sin \phi_0$ ;  $dT_x = \sin d \cos d$ ;  $dT_y = \sin d \sin d$ ;  $B_{x0}$  为  $\theta = 0$  平面内半功率点宽度,  $B_{y0}$  为  $\phi = \frac{\pi}{2}$  平面内半功率点宽度,而  $\theta$  和  $\phi$  分别是天线阵面球坐标中的俯仰角和方位角.

式(1)表明半功率点等场强线在正弦空间坐标系内为一椭圆形,特别的,对于方形或圆形阵面的相控阵天线而言,半功率点等场强线在正弦空间坐标系内为一圆形。

假设当波束指向 $(\theta_0, \phi_0)$ 时,对应的半空间 $(\theta, \phi)$ 的角度分别为 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ ,在方位角 $\phi$ 方向上波束的半功率宽度为常数,近似等于 $B_0$ ,而在 $\theta$ 方向上其半功率点宽度 $B$ 可表示为:

$$B = \frac{B_0}{\cos \theta_0}, \quad 0 < 45^\circ \quad (2)$$

式(2)的物理意义是相控阵天线波束的半功率点宽度与扫描角的余弦值成反比。值得注意的是,当扫描角 $\theta_0$ 大于 $45^\circ$ 时,式(2)不再成立,此时可以利用波束的偏心率来表示波束半功率点宽度:

$$\frac{B}{2} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} = \arcsin \left[ \frac{\cos(\theta_2/2)}{\cos(\theta_1/2)} \right] \quad (3)$$

令 $2e = \frac{(\theta_2 - \theta_1) - (\theta_2 + \theta_1)}{(\theta_2 - \theta_1) + (\theta_2 + \theta_1)}$ ,其中 $\theta_s$ 为波束最大值处的角度,经过整理, $B$ 满足下式:

$$e \sin \theta_s \cdot B^2 - \cos \theta_s \cdot B + 2 = 0 \quad (4)$$

其中 $0 \leq e < 1$ ,特别的,当 $e = 0$ 时,式(4)退化为式(2)。

### 3 波位编排的最优化及边界约束算法

#### 3.1 波位编排的最优化

相控阵雷达的扫描空域一般在修正球坐标系下进行指定,它的坐标原点为雷达站,雷达阵面法线在水平面的投影作为方位角的零度,顺时针为正,逆时针为负,有效取值范围为 $[-1/2, 1/2]$ ,以水平面作为俯仰角的零度,向上为正,有效取值范围 $[0, 1/2]$ 。而正弦空间简单地讲就是单位球面在阵列平面上的投影<sup>[5]</sup>,至于修正球坐标系与正弦空间坐标系之间的变换关系可以参考文献[5]。

在修正球坐标系下指定的边界规整的扫描关心空域变换到正弦空间坐标系下后会发生边界的非线性畸变,这给波位编排带来了困难。如果原始扫描空域不是简单矩形,则变换后的图形可能更加复杂。此外,对于有预警信息的情况,相控阵雷达系统实时地把空域划分为多个区域,所以不能事先生成固定的波位表,所以有必要开发复杂空域中波位编排的在线算法。

最优化波位编排的目的是在充分利用先验信息和相控阵雷达系统资源的基础上,使得发现各个目标的平均时间尽可能最短,可以认为这是在约束条件下的最优化问题。

最优化的工作体现为多个过程:一个是各个区域的帧扫描周期(完成一帧搜索任务的时间,不包括其他类型任务执行时间,区别于搜索帧周期<sup>[9]</sup>)的优化,这体现为扫描空域中各个区域边界的划分以及各个区域的重要性加权,另一个是波位的编排样式的选择。对于采用了数字多波束形成技术的相控阵雷达,还可以通过优化波束形状减少波位数目,从而达到缩短帧扫描周期的目的。

此外,对于飞机等空气动力目标,当飞行高度一定时,雷达波束俯仰角越大,则目标对应的斜距就越短,此时雷达的探

测能力有较大的余量<sup>[10]</sup>,可以通过改变雷达发射信号形式来调整波位驻留时间(DWELL),从而减小帧扫描周期。

#### 3.2 边界约束算法

在实际应用中,相控阵雷达往往会得到各种预警系统的支援。后者提供的目标分布及目标类型初步信息将有助于相控阵雷达优化搜索算法<sup>[12,13]</sup>。采用了数字多波束形成的相控阵雷达的一种典型优化搜索算法就是使各个搜索区域重要性加权系数正相关于目标分布密度<sup>[9]</sup>以及目标重要性系数。具体而言,在目标分布密度大或者目标重要性程度高的区域内采用较小的帧扫描周期,较高增益的波束或者相对更加紧凑的编排样式,反之采用较大的帧扫描周期,较低增益的波束或者相对稀松的编排样式,从而实现雷达资源的合理分配,达到减小雷达发现目标平均时间的目的。

不失一般性地假设在得到预警系统的先验信息后,相控阵雷达把用户关心的搜索空域划分后 $N$ 个区域,各个区域的待搜索面积分别为 $S_i$ ,各个区域的重要性加权系数为 $\alpha_i$ ( $i = 1$ ),在各个区域内进行波位编排的波束宽度分别对应为 $BW_i$ ,平均波束驻留周期为 $t_i$ ,则对于第 $i$ 个区域其帧扫描周期为:

$$T_{si} = \left[ \frac{N \cdot (1 - \alpha_i) \cdot \alpha_i \cdot S_i \cdot t_i \cdot \beta_i}{BW_i} \right] \cdot \frac{1}{\alpha_i} \quad (5)$$

其中, $\beta_i$ 为第 $i$ 个区域内,不同的波束编排样式所造成的欠覆盖率,即波位之间的空隙所占的比例,而 $\alpha_i$ ( $\leq 1$ )为第 $i$ 个区域内由于波束展宽效应带来的波位数目减少的比例因子。

复杂空域内波位实时编排的困难在于边界的非线性与动态性,这也是解决问题的关键。本文提出了波位编排的边界约束算法,其核心思想为把边界的非线性问题转化为图论中的几何查找问题,相应在线算法也将解决波位表不能事先生成的问题。

假设扫描空域划分后第 $i$ 个区域的边界方程为 $G(u_i, v_i) = 0$ ,经过坐标转换后成为正弦空间中的方程 $F(\theta_i, \phi_i) = 0$ 。各个区域划分的动态性使得波位表不能事先固定,而各个区域边界曲线的非线性使得在这样区域内进行最优波位编排是一件很复杂的工作。

下面给出了波位编排的边界约束算法的实现流程。

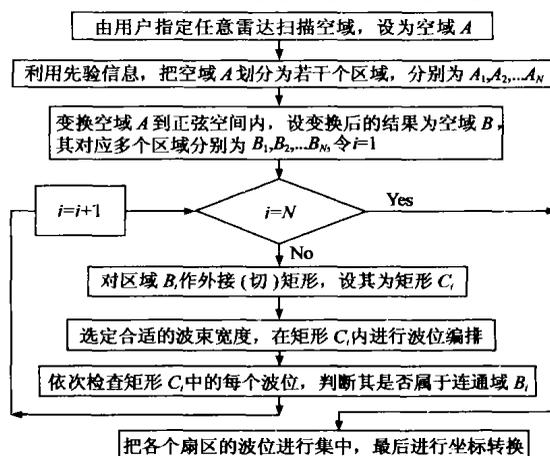


图1 边界约束算法的流程图

问题的关键转化为如何得到区域  $B_i$  的外接(切)矩形以及如何判断矩形  $C_i$  内的某个波位是否落入区域  $B_i$ 。对于前一个问题,即使得不到解析表达式,但我们总可以通过数值计算的方法解决问题。

对于后一个问题,资料[11]给出了多边形情况下的算法,其基本出发点就是,如果点  $q$  在多边形  $P$  的内部,过点  $q$  的四方向的射线必与边界相交奇数次,而如果点  $q$  在多边形  $P$  的外部,则至少有一条射线与区域的边界相交偶数次(包括零次)。

对于非多边形情况,假设任意区域  $B_i$  的边界曲线由二维数组  $[(x_i, y_i)]$  确定,则可利用数值计算方法进行处理。一种可行的办法是在一定容许范围内利用二维数组  $[(x_i, y_i)]$  构造  $N$  边形去逼近区域  $B_i$ 。另外,考虑到实际应用中,用户划定的区域大多属于简单图形(比如矩形),则算法可以相应简化,这里不再赘述。

### 4 仿真验证

#### 4.1 不同扇区采用不同宽度波束的情况

不失一般性,假设某雷达扫描区域  $A$  为大空域  $[-45^\circ, 45^\circ] \times [0^\circ, 70^\circ]$ ,而且认为波束不展宽时其截痕为圆形(对于椭圆,方法相同)。图 2 给出了按照边界约束算法进行在线自动波位编排的结果,图中每个小点代表一个波位的中心位置,而且都采用了交错波位编排样式(见图 3(c))。图 2(a)中各个扇区采样了相同的波束宽度  $1.6^\circ$ (不展宽时),而图 2(b)中把整个空域划分为三个区域(扇区),其不展宽波束宽度分别为(从下往上): $1.6^\circ, 1.9^\circ, 2.2^\circ$ ,而三个扇区的俯仰角范围为  $[0^\circ, 10^\circ], [10^\circ, 45^\circ], [45^\circ, 70^\circ]$ 。

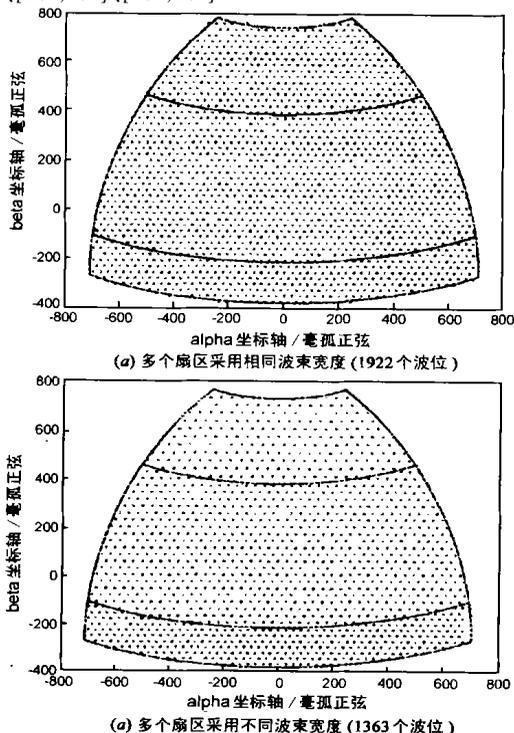


图 2 波位编排边界约束算法实现结果

#### 4.2 不同编排样式和相交电平的比较结果

相控阵雷达搜索波位的编排样式主要有如下三种:

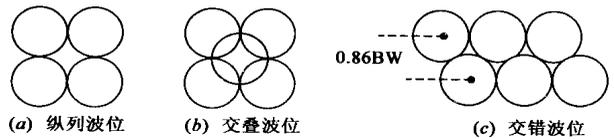


图 3 波位编排样式

表 1 中仍以上面的大空域  $[-45^\circ, 45^\circ] \times [0^\circ, 70^\circ]$  为例,并假设各个区域采用相同的波束宽度。经过计算,可以得到三种波位编排样式的覆盖率  $s_1$  和重叠率  $s_2$ 。下面先给出覆盖率和重叠率的定义,至于其他波束编排的结果,由于篇幅所限,这里不再列出。

$$s_1 = \frac{S_1}{S}, \quad s_2 = \frac{S_2}{S} \quad (6)$$

其中  $S$  是整个需要扫描空域的面积,而  $S_1, S_2$  分别是以  $3\text{dB}$  为界的情况下所有编排波位覆盖的总面积以及波位之间相互重叠的总面积。

表 1 三种波位编排样式的覆盖率和重叠率

编排方式	波位数目(个)	覆盖率(%)	重叠率(%)
纵列波位	1654	78.5	0
交叠波位	3292	100	57.1
交错波位	1922	90.7	0

从上表可见,三种波位编排各有优点,纵列波位编排所需的波位数目最少,但是其覆盖率仅仅  $78.5\%$ ,当有限的相控阵资源是矛盾的主要方面时,或者目标分布密度小的区域可以考虑使用;交叠波位编排,虽然其覆盖率可以达到  $100\%$ ,虽然没有遗漏但重叠率高,容易造成目标的冗余探测,限制了其应用范围,而交错波位编排的  $3\text{dB}$  覆盖率达到  $90\%$  左右,同时重叠率为零,两种性能达到了较好的平衡,是一种常见的波位编排样式。总而言之,具体选择哪一种编排样式不能一概而论,应该针对实际背景和相控阵雷达系统资源的情况作出合理选择。

另外,表 1 中覆盖率和重叠率的计算均以  $3\text{dB}$  为标准,但是注意到实际天线波束在其  $3\text{dB}$  宽度以外并非刚性截止的,这就意味着,当相控阵雷达天线波束进行如上三种扫描时,相邻波位的波束之间总是互相覆盖的,只是相邻波束之间的相交电平(天线增益值)不同而已。一般而言,此相交电平过高会导致波位数目增多,从而造成雷达资源的浪费和对雷达数据处理系统的压力;相交电平过低时虽然波位数目减少了,但是可能造成信号检测损失。资料[2]研究了一维线阵情况下波位数

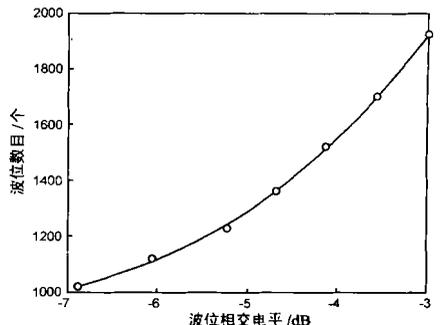


图 4 某相控阵雷达波位相交电平值波位数目之间的关系

目与相交电平值的关系,而下图 4 针对国外某相控阵雷达天线,以如上大空域为例给出了二维情况下的关系曲线.此相控阵雷达阵面的阵元总数为 5161 个,阵面倾角  $22.5^\circ$ ,波束扫描角  $\pm 60^\circ$ ,不展宽情况下的主波束 3dB 宽度为  $1.6^\circ$ .

## 5 结束语

相控阵雷达在预警系统的支援下采用优化的搜索策略时,需要把扫描空域实时划分为多个区域,并且对各个区域进行适当的加权以达到发现目标平均时间最小的目的.空域中各个区域边界的动态性和非线性使得波位编排的工作比较困难,而且 DBF 技术的应用也对波位编排提出了更高的要求.本文提出的波位编排的边界约束算法能较好地解决这个问题,具有自动生成、适应复杂区域、能够灵活选取相交电平和编排样式等优点.

### 参考文献:

- [1] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,1994.1-9.
- [2] 王雪松,汪连栋,等.相控阵雷达天线最佳波位研究[J].电子学报,2003,31(6):5-8.
- [3] 赵利娟.电子战条件下“宙斯盾”AN/SPY-1 雷达系统仿真研究[D].长沙:国防科技大学研究生院,2002.
- [4] Wilhelm H, Von Aulock. Properties of Phased Arrays[J]. Proc IRE, 1960:1715-1727.
- [5] P J 卡里拉斯.电扫描雷达系统设计手册[M].北京:国防工业出版社,1979.133-136.
- [6] 汪茂光,吕善伟,等.阵列天线分析与综合[M].成都:电子科技大学出版社,1989.106-112.
- [7] 郭燕昌,钱继曾,等.相控阵和频率扫描天线原理[M].北京:国防工业出版社,1978.1-15.
- [8] 翟孟云,严育林.阵列天线理论导引[M].北京:国防工业出版社,1980.50-56.

- [9] 徐斌.相控阵雷达的最优分区搜索算法[J].电子学报,2000,(12):69-73.
- [10] 钟广海.相控阵雷达扫描波位和扫描时间的设计与优化[J].上海航天,1999,(5):1-6.
- [11] 周培德.计算几何-算法分析与设计[M].北京:清华大学出版社,2000.15-26.
- [12] Wulf D. Wirth. Fast and efficient target search with phased array radar [A]. IEEE International Radar Conference [C]. US: IEEE, 1975. 198-203.
- [13] W Fleskes. On search strategies of phased array radar [A]. IEE conference Publication International Conference-RADAR [C]. US: IEEE, 1982. 12-14.

### 作者简介:



周颖男,1975年9月生于湖南常德市,博士研究生,1998和2001年于国防科技大学电子工程学院分获学士和硕士学位,2003年获得首届全军优秀硕士学位论文,发表论文10多篇,研究方向为:战场感知,雷达电子战仿真与评估.



王雪松男,1972年10月生于内蒙古包头市,博士,副教授,研究所所长,中国电子学会高级会员,遥感遥测遥控分会委员,1999年于国防科技大学获博士学位,发表国际国内论文130余篇,获得第四届全国优秀博士学位论文,合作出版专著2部,获军队科技进步一等奖3项,部委科技进步二、三等奖2项,研究兴趣为:雷达信号处理与目标识别,综合电子战,雷达系统仿真.