

相控阵雷达天线最佳波位研究

王雪松¹,汪连栋¹,肖顺平¹,王国玉²,庄钊文¹

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073;2. 洛阳 061 信箱,河南洛阳 471003)

摘 要: 围绕多功能相控阵雷达扫描波位的优化设计,详细研究了相控阵天线的最佳波位问题,给出了最佳波位序列的迭代算法.考虑到实际相控阵天线波束跃度的限制,提出了波位序列最佳性的度量方法,对数字移相式的相控阵天线波位序列进行了分析和评估.

关键词: 相控阵雷达;天线;波位;波束跃度

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0805-04

Study on Optimal Beam Position of Phased Array Radar Antenna

WANG Xue-song¹, WANG Lian-dong¹, XIAO Shun-ping¹, WANG Guo-yu², ZHUANG Zhao-wen¹

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

2. Post Box 061, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: The problem of optimal beam position is studied in detail with connection to the design of the multi-functional Phased Array Radar (PAR). An iterative algorithm is derived to solve the optimal beam position sequence. Considering the practical constraint of PAR antenna's granularity of beam, a measuring method on the optimality of the beam position sequence is presented and applied to the analysis and evaluation of the beam position sequence of the digital phasing PAR.

Key words: phased array radar; antenna; beam position; granularity of beam

1 引言

相控阵雷达固有的波束捷变能力,使其在时间能量管理方面具有常规机械扫描雷达所无可比拟的灵活性,从而对复杂密集的多目标环境具有更强的适应能力^[1].现代相控阵雷达通常采用数字式移相器进行相位控制,天线阵内的相位分布具有离散性,天线波束位置也是离散的,因此相控阵天线的扫描过程实际上是天线波束从一个波位到另一个波位的无惯性跃迁.由于雷达能够灵活地控制天线阵的相位分布,所以在时间上相邻的两个波位在空间上未必相邻.相控阵雷达的这个特点决定了它能够以灵活多样的工作方式处理复杂密集的多目标环境.

在相控阵雷达设计中,天线扫描波位的设计是一项重要的基础性工作,波位序列的优劣对于相控阵雷达资源的优化分配和搜索性能的提高具有不容忽视的影响作用.相控阵雷达在不同的工作模式下,对天线波位有不同的要求.在步进搜索监视模式下,为了保证雷达检测性能,需要减小相邻波位之间的间隔(波束跃度^[1,3]),以降低波束覆盖造成的损失;另一方面,为了提高对给定空间立体角的搜索数据率,又希望适当增加波束跃度,从而节省相控阵雷达的能量资源^[4,8].因此对于实际的相控阵雷达,必须根据雷达的工作模式和战术要

求,研究设计天线波束扫描的最佳波位序列.

2 相控阵天线波束的扫描展宽效应与波束跃度

考虑均匀排列的一维线阵,阵元间距为 d ,阵元数目为 N ,工作波长为 λ ,数字移相器实际位数为 m ,波控数码的计算位数为 k ^[1].设天线阵内相邻单元相位差为 $\Delta\phi_b$,天线波束指向为 θ_b ,有 $\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_b = \Delta\phi_b$,此时天线波束半功率点宽度 $\theta_{0.5}$ 为^[1]

$$\theta_{0.5} \approx \frac{0.88\lambda}{Nd} \cdot \frac{1}{\cos\theta_b} \quad (1)$$

此式表明,天线波束宽度随扫描角的增大而展宽,这就是天线波束的扫描展宽效应.

相控阵雷达数字移相器的计算位数为 k ,则最小相移值为 $\Delta\phi_{\min} = \frac{2\pi}{2^k}$,因此一维线阵的第 p 个波束指向为 $\theta_p = \arcsin(\frac{\Delta\phi}{d} \cdot 2^k)$, $p = 0, 1, 2, \dots$,进而得天线波束由波位 θ_{p-1} 到 θ_p 的波束跃度 $\Delta\theta_p$ 为:

$$\Delta\theta_p = \theta_p - \theta_{p-1} \approx \frac{\Delta\theta}{\cos\theta_p} \quad (2)$$

其中 $\Delta\theta_1 = \frac{\lambda}{d \cdot 2^k}$ 为天线由 0 号波位 θ_0 到 1 号波位 θ_1 的波束

跃度. 此式表明, 相控阵天线的波束跃度也存在着扫描展宽效应. 由式(1)、(2)得

$$\frac{\Delta\theta_p}{\theta_{0.5}} = \frac{1.14N}{2^k} \quad (3)$$

此式表明, 相控阵天线的波束跃度与波束宽度之比仅由阵元数量和移相器计算位数决定, 与波束指向无关.

为了降低波束跃度, 使相控阵天线的离散扫描尽可能接近于机械式雷达的连续扫描, 需要增加移相器的计算位数 k . 譬如对于三坐标雷达, 天线波束宽度典型值为 1 左右, 通常要求 $k \geq 8$; 而对于相控阵单脉冲跟踪雷达, 则要求 $k \geq 10^{[1]}$. 显然, 这样的移相精度要求已经超出了现有的移相器件水平. 实际中, 为了降低天线波束跃度, 同时尽可能节省数字移相器的实际控制位数, 相控阵雷达通常要采用虚位技术^[5]. 虚位技术会影响天线波束的指向精度, 但通常影响程度较小, 同时还会产生量化副瓣, 破坏天线的方向性, 工程上通常利用随机馈相技术进行改善^[5].

3 相控阵雷达天线波束的最佳波位

相控阵雷达处于搜索监视工作状态时, 要对搜索空域立体角进行扫描并形成目标检测报告. 为提高对搜索空域中目标的检测概率, 一般希望相控阵天线波束跃度不宜过大, 以减小天线波束形状调制损失; 而另一方面, 为了提高雷达的搜索数据率, 又要求天线波束跃度不能太小, 即搜索空域立体角内排列的波束不宜过于紧密, 波位数目不宜过多; 此外, 天线波位排列过密还会增加雷达的冗余检测, 导致雷达在目标航迹相关、滤波预测等数据处理负担增加. 综合上述考虑可知, 所谓相控阵天线的最佳波位, 实际上就是在雷达检测性能损失和搜索数据率之间寻求折衷. 在大多数实际应用中, 通常期望天线波束在搜索立体角内均匀排列, 并且根据不同的战术要求, 天线波位序列排列的紧密程度(即相邻波束的相交电平)也有所不同.

下面以一维线阵为例, 研究其对指定搜索角度范围的最佳波位序列. 设雷达搜索角为 $[0, \theta_s]$, 天线波束的半功率宽度 $\theta_{0.5}$ 由式(1)给出. 需要指出的是, $\theta_{0.5}$ 是以半功率点作为天线波束宽度的测度, 若以功率电平 η 来衡量, 那么天线波束宽度 θ_η 的表达式形式仍与式(1)相同, 但常数系数将发生变化. 定义天线波束的 η 功率点宽度为

$$\theta_\eta = k_\eta \frac{\lambda}{Nd} \cdot \frac{1}{\cos\theta_b} \quad (4)$$

式中 k_η 为与 η 值对应的常数系数, 其典型值如表 1 所示.

表 1 典型值

η (dB)	-1	-2	-3	-4	-5	-6
k_η	0.5674	0.7308	0.8849	1.009	1.114	1.205

在相控阵雷达的设计中, 通常需要针对步进搜索监视工作模式, 利用相邻波束的相交电平确定天线波位的排列方式^[7]. 现代相控阵雷达常采用 Butler 矩阵多波束网络或基于 FFT 的数字波束形成 (DBF) 技术来实现接收多波束. 这两种网络的波束排列是均匀的, 相邻波束相交电平为 -3.92dB^[1,6]. 如果要求雷达波束在 $[0, \theta_s]$ 搜索角内均匀排列, 相邻波束的

相交电平为 η (此条件称为“相交电平约束”). 令阵面法向为第 0 波位, 第 p 波位上波束指向记为 $\theta_{B,p}$, 天线波束在该指向上的 η 功率点宽度为 θ_p . 忽略扫描时波束方向图不对称变形的影响, 则相邻波位之间存在如下关系:

$$\theta_{B,p} - \frac{1}{2}\theta_p = \theta_{B,p-1} + \frac{1}{2}\theta_{p-1}, \quad p=1, 2, \dots \quad (5)$$

此式的几何含义如图 1 所示. 根据相控阵天线波束扫描展宽效应, 由式(4)得

$$\theta_p = \frac{\theta_0}{\cos\theta_{B,p}} \quad (6)$$

其中 $\theta_0 = k_\eta \frac{\lambda}{Nd}$ 为天线波束在第 0 号波位上的 η 功率点宽度. 式(5)、(6)联立得到一递推方程, 其初

始条件为 $\theta_{B,0} = 0$, $\theta_0 = k_\eta \frac{\lambda}{Nd}$. 若已知 $\theta_{B,p-1}$ 和 θ_{p-1} , 记 $A_{p-1} = \theta_{B,p-1} + \frac{1}{2}\theta_{p-1}$, 则有

$$\theta_{B,p} \cos\theta_{B,p} - A_{p-1} \cos\theta_{B,p} - \frac{1}{2}\theta_0 = 0, \quad \theta_{B,p} \in [0, \theta_s] \quad (7)$$

这是关于 $\theta_{B,p}$ 的超越方程, 需用数值方法求解. 在相交电平约束下, 相控阵天线对指定搜索角的最佳扫描波位序列可用式(7)求解, 此方程对于 η 值具有适应性, η 值仅影响 θ_0 的数值, 对方程本身没有影响.

4 相控阵雷达天线波位序列最佳性的度量

由于相控阵雷达移相器位数等因素的限制, 雷达波控机生成的波位序列通常不是最佳的. 设雷达波控机生成的步进扫描波位序列为 $\Theta = \{\theta_{B,p}, p=0, 1, \dots, N\}$, 其为一递增序列. 以 η 值作为相邻波束相交电平的期望值, 则每个波位上天线波束的下边界和上边界分别为 $\theta_{BL,p} = \theta_{B,p} - \frac{1}{2}\theta_p$, $\theta_{BH,p} = \theta_{B,p} + \frac{1}{2}\theta_p$. 在此基础上定义两个相邻波位的“过覆盖区”和“欠覆盖区”分别为

$$R_{m,p} = \begin{cases} \theta_{BH,p-1} - \theta_{BL,p}, & \text{若 } \theta_{BH,p-1} > \theta_{BL,p} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$R_{n,p} = \begin{cases} \theta_{BH,p} - \theta_{BL,p-1}, & \text{若 } \theta_{BH,p} < \theta_{BL,p-1} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

“过覆盖区”的物理含义是: 若第 $p-1$ 号波位和第 p 号波位存在着过覆盖区, 说明这两个波位上天线波束的相交电平 η' 高于期望值 η , 过覆盖区越大, η 越高, 特别地, 当 $\eta' = \eta$ 时, 有 $R_{m,p} = 0$; 当 $\eta' = 1$ 时, 有 $R_{m,p} = \theta_p$. “欠覆盖区”的物理解释为: 若第 $p-1$ 号波位和第 p 号波位存在着欠覆盖区, 则表明这两个波位上天线波束的相交电平 η 要低于标准值 η , 欠覆盖区越大, η 越低.

过覆盖区和欠覆盖区从不同的角度描述了两个相邻波位排列的“均匀性”, 也就是在 η 相交电平约束下的最佳性. 同理对于一个波位序列, 也可以用同样的思路来描述其均匀性

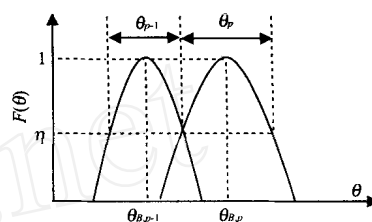


图 1 相邻波束的几何关系图

或最佳性. 基于过覆盖区的概念, 定义波位序列 Θ 的过覆盖率为 $\gamma_m = \frac{1}{\|\Theta\|} \sum_{p=0}^N R_{m,p}$, 其中 $\|\Theta\|$ 表示该波位序列的实际扫描角度范围, $\|\Theta\| = \theta_{B,N} + \frac{1}{2}\theta_N + \frac{1}{2}\theta_0$. 注意到实际相控阵雷达往往采用针状波束, 其波束宽度远小于搜索空域立体角, 故可认为 $\|\Theta\| \approx \theta_s$, 于是有 $\gamma_m = \frac{1}{\theta_s} \sum_{p=0}^N R_{m,p}$. 同理, 定义波位序列 $\|\Theta\|$ 的欠覆盖率为 $\gamma_n = \frac{1}{\theta_s} \sum_{p=0}^N R_{n,p}$.

显然, 过覆盖率表征了波位序列用于扫描指定的 θ_s 空域角时相邻天线波束重叠的程度, 过覆盖率越高, 说明该波位序列中相邻波位之间发生重叠照射的情况越严重; 而欠覆盖率则表征了相控阵雷达依照该波位序列去照射指定空域时受到“不足照射”区域的大小. 据以上分析可知, 要衡量一个波位序列的最佳性, 可以从三个方面进行综合分析: (1) 波位序列长度 N ; (2) 波位序列的过覆盖率 γ_m ; (3) 波位序列的欠覆盖率 γ_n . 根据波位序列空间排列的几何关系, 可知这三个指标之间存在着相互制约的关系. 当序列长度 N 一定时, 过覆盖率 γ_m 增加, 通常会导致欠覆盖率 γ_n 增加, 反之亦然. 若 γ_n 维持在

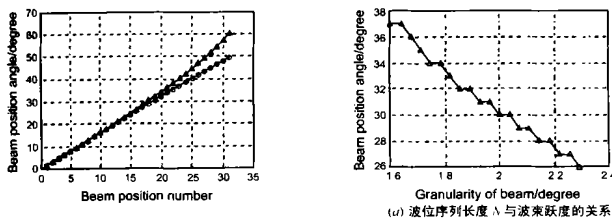


图2 某C波段相控阵雷达的最佳波位序列

由于天线波束的扫描展宽效应, 最佳波位序列通常是一个非线性递增序列, 相应的波束跃度也是非线性递增的. 为了说明波位序列的 (N, γ_m, γ_n) 指标间的制约关系, 下面考虑波束跃度为恒定值的情况下线性波位序列最佳性的度量问题. 仍以上述C波段相控阵雷达为例, 设波控机产生的波位序列为线性递增的, 且波束跃度的变化范围为 $[1.6^\circ, 2.29^\circ]$, 图3给出了线性波位序列长度 N 、覆盖率 γ_m 、欠覆盖率 γ_n 和波束跃度的关系曲线, 由这些曲线可以清楚地看出 N, γ_m, γ_n 三者之间的相互制约关系.

6 移相器计算位数对最佳波位序列的影响

利用过覆盖率和欠覆盖率指标可以研究数字移相器位数对相控阵雷达最佳波位序列的影响程度. 雷达移相器计算位数为 k , 最小相移单元为 $\Delta\phi_{\min} = \frac{2\pi}{2^k}$, 雷达送给波控机的波位指令为 θ_p , 则波控机解算输出阵内相位梯度为 $\Delta\phi = 2\pi d \sin \theta_p / \lambda$. 设 $\Delta\phi = l \Delta\phi_{\min} + \varepsilon$, 其中 l 为整数, ε 为相移余量, 即 $\varepsilon \in [0, \Delta\phi_{\min})$. 考虑移相器位数的限制, 天线阵内的实际相位梯度为 $\Delta\phi = l \Delta\phi_{\min} \triangleq [\Delta\phi]_k$, 其中“ $[\cdot]_k$ ”表示对 $\Delta\phi_{\min}$ 的取整算符. 故知天线波束的实际指向为 $\theta_B = \arcsin$

一定的水平上, 那么 γ_m 增加, 必定会导致 N 增大. 反之, 若 γ_m 基本恒定, 那么 γ_n 增加就会导致 N 减小. 一般而言, 上述3个指标之间存在着非线性制约关系, 一般不能用解析方法描述, 下面用具体的算例来说明.

5 算例

某C波段相控阵雷达, 工作波长为 $\lambda = 5.45\text{cm}$, 水平方向阵元数目 $L = 72$, 方位向扫描角为 $\pm 60^\circ$, 即 $\theta_0 = 60^\circ$, 阵元间距 $d = \lambda / (1 + |\sin \theta_0|) = 2.92\text{cm}$. 考虑幅度加权等因素后, 天线波束法向半功率点宽度为 $\theta_0 = 1.6^\circ$. 根据式(7)可解出此雷达天线在水平方向的最佳波位序列, 如图2所示. 图中“ Δ ”表示雷达最佳波位序列, 要覆盖 $0 \sim 60^\circ$ 的探测空域, 最佳波位序列长度为 $N_{\text{opt}} = 32$ (包括零号波位), 在 -3dB 相交电平约束下, 最佳波位序列的过覆盖率 $\gamma_m = 0$, 欠覆盖率 $\gamma_n = 0$. 图中“ $\circ$ ”表示不考虑天线波束的扫描展宽效应时, 波束跃度为固定值 1.6° 的波位序列 (这种步距固定的波束编排方法是由 D K Barton 建议的^[9]). 要覆盖 $0 \sim 60^\circ$ 的方位向探测空域, 该序列共需 $N = 38$ 个波位 (包括零号波位), 在 -3dB 相交电平约束下, 该序列的过覆盖率 $\gamma_m = 0.245$, 欠覆盖率 $\gamma_n = 0$.

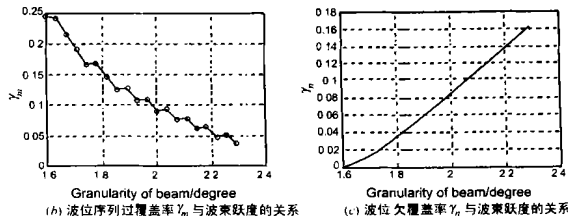


图3 线性波位序列的度量指标与波束跃度的关系

$\frac{\lambda}{2\pi d} [\Delta\phi]_k$. 设最佳波位序列为 $\Theta_{\text{opt}} = \{\theta_{B,p}, p = 0, 1, \dots, N\}$, 考虑移相器字长效应后, 实际波位序列为 $\Theta_k = \{\theta_{B,p}, p = 0, 1, \dots, N\}$, 其中 $\theta_{B,p} = \arcsin \frac{\lambda}{2\pi d} [\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_{B,p}]$. 得到序列后, 即可利用过覆盖率和欠覆盖率等指标来度量该波位序列的最佳性.

仍以上述C波段相控阵雷达为例, 设数字移相器的计算位数为 $k = 7$, 不考虑虚位技术造成的波束指向误差, 那么由式(6)可得天线波位的量化误差曲线 (图4). 此时 $\gamma_m = 4.29\%$, $\gamma_n = 3.96\%$, 量化波位序列性能与移相器计算位数的关系如表2所示. 当移相器

计算位数 k 低于5时, 量化波位序列性能严重恶化, 其过覆盖率和欠覆盖率均超过40%; 当 k 高于6时, 量化波位序列性能呈现平缓下降趋势. 从工程使用的角度来看, 若 $k \geq 7$ 则能够保证实际波位序列的过覆盖率和欠覆盖率均不超过

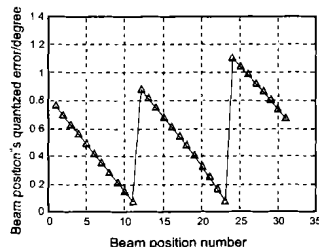


图4 移相器位数 $k = 7$ 时的天线波位量化误差曲线

5%,再增大 k 所能带来的改善已不太显著.另一方面,由于移相器实际控制位数很难做得很高(通常不超过 5),随着计算位数的增加,虚位技术所带来的波束指向误差也逐渐加大^[1].若该 C 波段相控阵雷达移相器控制位数为 4,那么可以算出,当 $k=7$ 时虚位技术造成的波束指向误差为 1.22%;当 $k=8$ 时,误差上升为 4.92%;当 $k=9$ 时,该误差达到 19.7%,这时表 2 中的波位序列性能指标实际上已经失去意义.为保证波束指向精度,移相器的计算位数不宜选得太高.综合上述两个方面的考虑,最终选择 $k=7$ 为宜.

表 2 量化最佳波位序列性能与移相器计算位数的关系

k	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\gamma_m(\%)$	73.49	53.52	6.14	4.29	4.21	3.03	1.42	0.75	0.36
$\gamma_n(\%)$	69.29	47.50	4.05	3.96	3.52	2.84	1.46	0.73	0.32

7 结束语

在现代复杂密集的战场环境中,如何实现多功能相控阵雷达资源的优化配置和调度是一个重要的研究课题.在步进搜索监视工作模式下,最佳扫描波位设计是相控阵雷达实现最佳资源调度的一个基础性关键环节.本文从对搜索空域均匀覆盖的角度提出并研究了基于相交电平约束的最佳波位序列问题,提出了波位序列最佳性的度量方法和度量指标.本文的度量方法是从天线波位的几何关系出发,而非利用雷达天线波束形状损失这样的统计性指标进行度量,因此严格地讲,本文提出的度量指标不完全等同于雷达天线方向图调制损失,但二者存在着内在的相关性.

本文着重研究了天线波束对扫描空域的均匀覆盖准则,由于相控阵雷达的战术使命和工作要求多种多样,对天线波位覆盖的要求也会有所不同,即需要根据不同的准则来设计天线波位序列.此外本文仅研究了相控阵雷达在一个角度维上的最佳波位序列.原则上讲,本文的研究方法既适用于方位维的波位设计,也适用于仰角维的波位设计,但由于实际相控阵雷达的阵面形状、馈电结构、波束形成方法,以及所需覆盖的空间立体角等诸多因素的限制,所以必须根据具体要求来设计最佳二维波位序列.

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.
- [2] D Curtis Schieher. Electronic Warfare in the Information Age [M]. Boston, London: Artech House, 1999.
- [3] R H Burrell. Granularity of beam positions in digital phased array[J]. Proc of IEEE, 1962, 56(11): 1795 - 1800.
- [4] R A Baugh. 现代雷达的计算机控制 [M]. 王连成,译.北京:航空航天工业部第二研究院,1992.
- [5] 郭燕昌,钱继曾,黄富雄,等.相控阵和频率扫描天线原理 [M]. 北京:国防工业出版社,1978.
- [6] 张光义,华海根,邵润朋.相控阵接收多波束的数字形成方法及计算机模拟试验 [J]. 电子学报,1982;10(4): 47 - 53.
- [7] 钟广海,王克宁.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.
- [8] 杨晨阳,李少洪,毛士艺,等.相控阵雷达数据处理的预处理算法[J]. 电子学报,1998, 26(3): 80 - 85.
- [9] 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.

作者简介:



王雪松 男,1972 年 10 月生于内蒙古包头市,副教授,电子学会高级会员,遥感遥测遥控分会委员.1999 年在国防科技大学电子科学与工程学院获博士学位,博士论文被评为 2001 年度“全国百篇优秀博士学位论文”,研究兴趣包括雷达极化信息处理、目标检测与识别、综合电子战系统仿真,出版专著 2 部,在国际、国内期刊等发表论文 80 余篇,被 Sci、EI 等检索 30 余篇,获军队科技进步一等奖 1 项,部委级科技进步奖二、三等奖 2 项.



汪连栋 男,1966 年 11 月生于天津宝坻县,高级工程师,电子学会高级会员,1996 年在国防科技大学获电磁场与微波技术专业硕士学位,现在国防科技大学电子科学与工程学院攻读博士学位,研究兴趣包括雷达系统仿真、综合电子战,出版专著 2 部,发表论文 30 余篇,获军队科技进步一等奖 2 项,二、三等奖 2 项.