

# 相控阵雷达波控系统移相器位数的选取

宛清, 王晟达, 张智军, 马健  
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:**使用微分求导法,得出相控阵雷达波束跃度,并通过其与相控阵雷达移相器的阵内移相量和半功率点波束宽度之间的关系,提出了一种移相器位数选取的标准,通过取不同的移相器位数对相控阵雷达波束覆盖程度的影响和仿真其雷达波束扫描方向图进行比较,验证了其合理性和适用性。

**关键词:**相控阵雷达;波控;移相器位数;仿真

**中图分类号:** V243.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)01-0030-03

移相器,作为相控阵雷达波束控制系统的核心器件,在国内外有众多的研究者都在对其进行研发工作,并取得了巨大成就。就目前,有 DMTL 型移相器、开关线型 MEMS 移相器、反射型 MEMS 移相器等等许多不同种类而且技术发展成熟的移相器。采用数字式移相器时,移相器的位数是相控阵雷达系统设计者首要考虑的问题,因为其直接决定了相控阵雷达抗干扰能力、灵敏度和精度等重要技术指标。在移相器位数选取的标准上,一般是位数越高越好,文献[1]、[2]介绍了波束跃度概念;文献[3]对虚位技术进行了分析;文献[4] - [6]分析了雷达波束的搜索状态工作方程和波束指向精度;文献[7] - [10]对相控阵雷达波束控制系统的设计进行了简介,但如何通过波束覆盖程度和波束跃度之间的关系得出移相器位数选取的方法和标准,在科技文献上鲜见报道,本文从波束跃度这一概念出发,通过对波束覆盖程度和降低波束覆盖损失的分析提出了一种新的移相器位数选取的标准。

## 1 移相器位数选取的标准

在相控阵雷达中,波束扫描过程如下:首先根据天线波束所应指向的空间位置,波控计算机计算出相应的方位及仰角初始相位值,然后再计算出阵列天线中每个单元移相器所需的相位值,通过驱动器使移相器移相,从而使天线波束指向规定的方向。移相器阵内移相量和相控阵雷达波束指向角之间的关系式如下

$$\varphi = (2\pi d \sin\theta_0) / \lambda \quad (1)$$

式中: $\varphi$  为移相器阵内移相量; $\theta_0$  为相控阵雷达波束指向角; $\lambda$  为相控阵雷达波束的波长; $d$  为相控阵雷达天线阵元之间的距离。

采用数字式移相器时,若暂时设数字式移相器的位数为  $K$ ,则移相器最小移相量值  $\Delta = 2\pi/2^K$ 。

各天线单元移相器的移相量值只能是它的整数倍。

相控阵雷达波束的半功率点波束宽度(HPBW)  $\theta_{0.5} = 0.886\lambda / Nd \cos\theta$ 。 $N$  为相控阵雷达天线阵元数。

### 1.1 移相器位数选取标准的推导

本文采用微分求解推导法,能简化计算量,直接得到波束跃度并通过其得到移相器位数选取的一个标准。对式(1)求导得: $\Delta\theta = \lambda \Delta\varphi / (2\pi d \cos\theta)$ 。 $\Delta\theta$  即天线指向角变化时的变化量(波束跃度), $\Delta\varphi$  即为阵内移向量,而阵内移相量的最小值为  $\Delta$ ,则有:

$$\Delta\theta \geq (2\pi/2^K) / (2\pi d \cos\theta / \lambda) \quad (2)$$

收稿日期:2006-09-25

作者简介:宛清(1982-),男,湖南邵阳人,硕士生,主要从事信号与信息处理研究;

王晟达(1962-),男,河北正定人,教授,主要从事雷达工程信号与信息处理、预警机系统信息处理研究。

对于不同性能要求的相控阵雷达对于波束跃度  $\Delta\theta$  要求不一样,但是为了降低波束覆盖损失,波束跃度小于半功率波束宽度(HPBW)是起码的要求,即式(3)。通过式(2),(3)计算可以得到式(4)。

$$\Delta\theta \leq \theta_{0.5} = 0.886\lambda / Nd \cos\theta \quad (3) \quad K \geq \log_2(N/0.886) \quad (4)$$

由式(4)可得移相器位数选取的一个标准,移相器位数的最小值是规律地随天线阵元个数的增加而增加,若移相器位数不满足此条件,则波束扫描的角空间覆盖不到整个要求扫描的角空间。例:若  $N = 50$ ,则  $K \geq 6$ 。

### 1.2 移相器位数选取标准的验证

以波束的半功率波束宽度为天线扫描的有效角覆盖空间,并将每个扫描波束的有效角覆盖空间之和与天线要求扫描角空间比值表示有效波束覆盖程度,此程度必须大于等于 1,才能满足波束有效覆盖角空间覆盖整个所需扫描的角空间。

$\Delta = 2\pi/2^k$  为最小阵内移相量,则阵内移相量可表示为  $\varphi = i\Delta, i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。 $\pm\theta_{\max}$  为波束最大扫描角,则雷达所需全部角空间为  $\theta = \theta_{\max}$ 。需要多少个波束,才能使得波束能够扫描到所需扫描的整个角空间?需要指出的是,此处所指的波束能扫描整个角空间不等于波束有效覆盖角空间能覆盖整个角空间,这是因为波束是离散跳跃的,相邻 2 个波束之间可能有空隙。当波束扫描至最大扫描角  $\pm\theta_{\max}$  时,由式(1)可得

$$i_{\max} = \lceil (2^k d \sin\theta_{\max} / \lambda) \rceil \quad (5)$$

$i_{\max}$  的物理意义是波控数码的最大值,阵内移相量为  $\varphi = i_{\max} \Delta$  时,波束能扫描到最大扫描角  $\pm\theta_{\max}$ ,阵内移相量通过产生由  $-i_{\max}$  至  $i_{\max}$  共  $2i_{\max} + 1$  个波控数码,相控阵雷达就能产生  $2i_{\max} + 1$  个波束达到扫描整个角空间的目的,而这  $2i_{\max} + 1$  个波束的波束宽度之和就是所有波束的有效覆盖角空间。

在波束扫描时,有  $\sin\theta_i = i\Delta\lambda / (2\pi d)$ , 可得  $\cos\theta_i = \sqrt{1 - (i\lambda/d2^k)^2}$ 。此时半功率波束宽度为  $\theta_{0.5} = 0.886\lambda / Nd \cos\theta_i = 0.886\lambda / Nd \sqrt{1 - (i\lambda/d2^k)^2}$ 。所以可以得全部波束半功率波束宽度(有效角覆盖空间)之和  $\theta_{0.5,h} = 2 \sum_{i=0}^{i_{\max}} 0.886\lambda / Nd \sqrt{1 - (i\lambda/d2^k)^2} - 0.443\lambda / Nd$ 。则波束有效覆盖程度为

$$\eta = \theta_{0.5,h} / \theta_q = (2 \sum_{i=0}^{i_{\max}} 0.886\lambda / Nd \sqrt{1 - (i\lambda/d2^k)^2} - 0.443\lambda / Nd) / 2\theta_{\max} \quad (6)$$

分别取  $K = 4, 5, 6, 7, 8$ , 取  $d/\lambda = 1/2, N = 50$ , 天线最大扫描角  $\theta_{\max} = \pm 60^\circ$ , 则天线要求扫描角空间  $\theta_q = 2\pi/3$ , 将参数代入公式(5)、(6), 可得  $i_{\max} = 7, 14, 28, 55, 111$ , 即移相器波控数码分别为:0111, 01110, 011100, 01110111, 01001001, 有效角覆盖空间之和分别为:  $\theta_{K=4} = 0.6784 \text{ rad}; \theta_{K=6} = 2.4868 \text{ rad}; \theta_{K=8} = 9.5888 \text{ rad}; \theta_{K=5} = 1.1900 \text{ rad}; \theta_{K=7} = 4.7563 \text{ rad}$ 。波束有效覆盖程度分别为:  $\eta_{K=4} = 32.41\%; \eta_{K=5} = 56.85\%; \eta_{K=6} = 118.80\%; \eta_{K=7} = 227.22\%; \eta_{K=8} = 458.03\%$ 。

通过以上的比较分析可以看出,移相器位数的选取与阵元个数有直接的关系,在  $K$  小于由公式(4)所得最小移相器位数时,有很大的角空间没有覆盖,这样会导致严重的漏警(FAR)现象。需要指出的是,移相器位数越高越好,但要做到位数很高的数字移相器是很困难的,除移相器损耗增大外,成本将上升,故在相控阵雷达中通常采用“虚位技术”,这在参考文献[3]有详细的介绍。

## 2 仿真与结果分析

通过式(6)可以得到移相器位数与有效波束覆盖程度之间的关系(如图1)。由图1可知,有效波束覆盖程度是随着移相器位数的增加而增加的,为获得同一波束覆盖程度(100%)所需的移相器位数是随天线阵元数  $N$  的增加而增加的,当  $N = 50$  时,波束覆盖率大于 100% 时,  $K$  为大于 5 小于 6 的小数,取整,移相器位数最小取 6, 而当  $N = 100$  或  $N = 150$  时,即阵元个数为 10 000 或 22 500 时,移相器位数最小应分别取 7 或 8, 这样才能达到有效波束覆盖程度为 100%, 即才能使得相控阵雷达波束的角空间在扫描过程中能覆盖全部角空间。

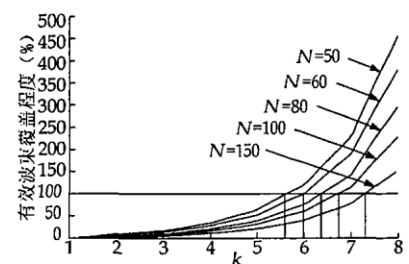
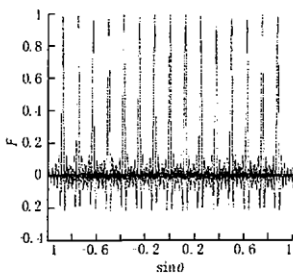
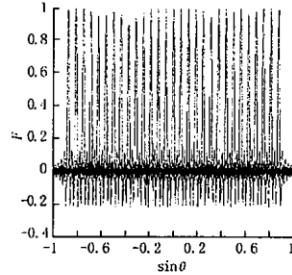
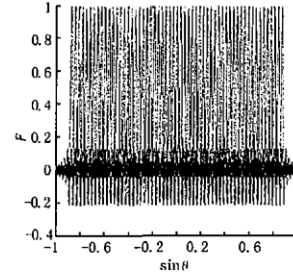
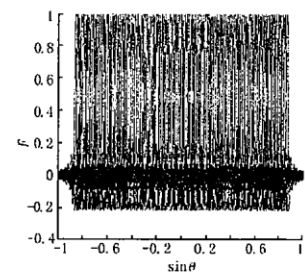


图 1 移相器位数与有效波束覆盖率关系

下面我们分别取  $K=4, 5, 6, 7$ , 即分别取 4 位、4 位、6 位和 7 位移相器为例, 并分别得到其扫描时的阵面正弦空间天线方向图进行比较。

比较图 2 至图 5 可以看出, 当阵列的阵元数确定后(由  $N$  确定), 采用不同位数的移相器都能实现在全角空间扫描, 但是波束的有效角覆盖空间不一定能够覆盖全角空间。当选取的移相器位数小于本文所提出的选取标准值时, 如图 2、3, 很明显, 在相邻波束之间将会出现很大的角空间没有覆盖到, 这样将会导致很严重的漏警(FAR); 而选取的移相器位数等于或大于本文所提出的选取标准值时, 如图 4、5, 扫描波束不仅能扫描全角空间, 而且能够覆盖全角空间, 这样就能避免漏警现象的发生。

图2  $K=4$  时波束扫描方向图图3  $K=5$  时波束扫描方向图图4  $K=6$  时波束扫描方向图图5  $K=7$  时波束扫描方向图

### 3 结论

本文提出一种移相器位数选取的标准, 并通过取不同的移相器位数对相控阵雷达波束覆盖程度的影响进行了仿真分析, 验证了此标准的合理性和可行性。本文用半功率波束宽度作为波束覆盖有效角空间, 在工程应用中可以根据实际需求和雷达不同的工作状态的具体技术指标对式(3)进行修正, 使用本文提出的方法同样可以得到与式(4)类似的移相器位数选取的标准, 以获得不同相控阵雷达所需的最小移相器位数。因此, 本文提出的移相器位数选取的标准是合理的和适用的。

#### 参考文献:

- [1] Garrod A. Digital modules for phased array radars[A]. International Radar Conference[C]. USA:IEEE, 1995. 726-731.
- [2] 张光义. 相控阵雷达天线波束宽度计算[J]. 现代雷达, 1989, (4): 1-9.
- [3] 金林, 张祖稽, 束咸荣, 等. 雷达天线技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [4] 卢建斌. 相控阵雷达搜索技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [5] Hansen R C. Phased array antennas[M]. New York: John Wiley and sons, 2001.
- [6] Carver K, Cooper W, Stutzman W. Beam-pointing errors of planar-phased arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1973, 21(2): 199-202.
- [7] 高铁. 机载固态有源阵指数约束二维可分离的多阶振幅量化[J]. 中国空间科学技术, 1992, 22(3): 11-17.
- [8] 王涛. 相控阵雷达数字波束形成的实现[J]. 微计算机信息, 2005, 21(11): 93-96.
- [9] 王查散. 波束控制系统测试平台的设计[J]. 现代雷达, 2003, 25(9): 29-31.
- [10] 郑清, 张健. 相控阵雷达分布式波控系统的设计. 现代雷达, 2001, 23(S): 48-52.

(编辑: 姚树峰)

## A Selecting Method of Phase Shifters' Digit of Phased Array Radar Beam Control System

WAN Qing, WANG Sheng-da, ZHANG Zhi-jun, MA Jian

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China)

**Abstract:** This paper elicits Phased Array Radar Beam Bound by using Differential Coefficient method, then, compares it with the connection between the measure of phase Shifter and the HPBW, and simultaneously puts forward a selecting standard of Phase Shifters' digit. Finally, the paper analyzes the effect of different Phase Shifters' Digit on the Beam Coverage degree, imitates and compares the Pattern of Beam Scan, which validates the rationality and applicability of it.

**Key words:** phased array radar; beam control; phase shifters' digit; imitate