

# 相扫天气雷达扫描方式研究

高玉春<sup>1,2</sup>, 杨金红<sup>2</sup>, 程明虎<sup>1,2</sup>, 柴秀梅<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学, 北京 100876; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘要:** 为了解决现有天气雷达垂直分辨率低和探测周期长的问题, 本文旨在分析了雷达的两种采样方式 CPS (Contiguous Pairs Sampling) 与 IPS (Independent Pairs Sampling), 设计了基于 IPS 的交互式波束多路转换扫描方式, 这种扫描方式适用于速度谱宽较大的灾害性天气探测, 同时对现有多普勒天气雷达体扫模式中的降水模式 VCP11 (Volume Coverage Pattern) 进行了改进, 提出了适于相控阵天气雷达在俯仰上采用三波束同时扫描的方案, 最后对两种 VCP 进行了评价。

**关键词:** 相控阵天气雷达; 扫描方式; 连续扫描; 波束多路转换; 多波束

**中图分类号:** TN975 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 03-0485-04

## Study of Phase Scanning Weather Radar Scanning Strategies

GAO Yu-chun<sup>1,2</sup>, YANG Jin-hong<sup>2</sup>, CHENG Ming-hu<sup>1,2</sup>, CHAI Xiu-mei<sup>2</sup>

(1. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Characteristics of the noninertia fast directionality, easily form multiple beams of phased array radar antenna make it have more function than the conventional radar. In this article, both CPS scanning pattern and IPS scanning pattern are analyzed. An interlaced beam multiplexing scanning method based on IPS mode is established, which is fit for the weather phenomena with larger spectral width. After the shortcomings of presented Doppler weather radar VCP11 mode are analyzed, its scanning methods are improved, accordingly, the ideal scanning mode is derived, that is, three beams scanning is used in pitch at the same time. This scanning mode can reduce remarkably scanning time than using single beam scanning.

**Key words:** phased array weather radar; scanning strategies; contiguous scanning; beam multiplexing; multi-beam

## 1 引言

目前我国布网的新一代天气雷达具有高时空分辨率探测的能力, 是雷暴、冰雹、热带气旋、暴雨等灾害性天气监测和短时天气预报极为有效的工具<sup>[1]</sup>。但是多普勒天气雷达采用机械转动天线进行连续扫描, 完成一个探测精度不太高的立体扫描需要 5~6 分钟, 这对于快速变化的天气现象无法探测到变化的细节, 不能满足灾害性天气的预警要求<sup>[2]</sup>。然而, 若要减少体扫时间就要提高天线的旋转速度, 而提高天线转速又会使波束驻留时间减少导致对谱矩(反射率因子、多普勒平均径向速度、速度谱宽)的估计误差增加, 再有连续转动的天线具有一定的质量, 有质量就有一定的惯性, 这样也会带来数据的探测误差。相控阵雷达由于天线固定不会产生惯性且容易形成多波束从而受到雷达界的关注。2003 年, 美国将基于 IPS 方式的波束多路转换(Beam Multiplexing,

BMX) 扫描方式应用到新改装的相控阵天气雷达中用以试验<sup>[3,4]</sup>, 但该方式是在速度谱宽为  $1\text{ms}^{-1}$  的情况下得出的, 对降水的探测能获得较高的数据质量, 对速度谱宽较大的灾害性天气的探测并不理想。再有我国目前的多普勒天气雷达采用的体扫模式在探测风暴顶时存在一定的误差, 原因是在中低层采样层数较少。针对这两个问题, 本文设计了一个交互式波束多路转换扫描方式和适用于北京地区相扫天气雷达的体扫模式 VCP, 以期未来在我国相控阵天气雷达中使用。

## 2 方位向扫描方式的确立及分析

### 2.1 天气信号的相关系数

雷达完成一个体扫所需的时间主要由天气信号的相关性时间决定<sup>[5,6]</sup>。根据 Doviak, 天气信号的相关系数(呈高斯分布)由下式决定

$$p(t) = \exp[-8(\sigma_r t)^2]$$

收稿日期: 2007-12-12; 修回日期: 2008-11-30

基金项目: 财政部行业专项“相控阵天气雷达系统关键技术研究”(No. GYHY(QX)2007-6-2); 国家自然科学基金(No. 40575009)

其中  $v$  是速度谱宽,  $t$  是信号滞后时间,  $\lambda$  是波长.

当速度谱宽一定时, 相关系数随信号滞后时间呈递减趋势. 在  $v = 1\text{ms}^{-1}$  情况下, 当两个信号之间的间隔时间在 20ms 以后, 信号之间的相关系数已是很小了, 这时的两个信号已呈现出相对的独立性, 由这样多个信号样本经过谱平均后所得出的谱矩值误差要比使用同样多的连续信号样本数得出的小. 一般认为, 当天气信号之间的相关系数小于 0.1 时就认为这两个信号已不相关<sup>[6]</sup>, 所以, 在  $v = 2\text{ms}^{-1}$  情况下, 间隔时间大于 8ms 时, 天气信号之间已不相关了.

### 2.2 CPS 方式与 IPS 方式比较

CPS 方式是在第一个方位上一次发射完所需的脉冲数后, 如图 1(a) 接着转到下一个方位发射脉冲, 下一个方位与前一个方位的角度间隔约为  $1^\circ$ , 也就是目前常规多普勒天气雷达采用的方式. IPS 方式是在时间  $T$  (由信号不相关时的时间决定) 内, 首先在第一个方位上连续发射两个脉冲后 (发射两个脉冲是为了估计平均径向速度和速度谱宽), 接着转向下一个方位再发射两个脉冲, 这两个方位角度间隔要足够大, 再接着转向与第一个方位相邻的方位发射脉冲, 继续循环下去如图 1(b), 从图中可看出, 假设每个方位上有  $n$  对脉冲, 脉冲重复周期设为  $T_s$ , 对于 CPS 方式, 驻留时间为  $(n + 1) T_s$ , 对于 IPS 方式, 驻留时间为  $2nT_s$ , 可见 IPS 方式的驻留时间要比 CPS 方式长, 因此由这样的信号经过谱平均处理后得到的谱矩统计误差要小, 数据质量高.

### 2.3 交互式波束多路转换扫描方式的建立及分析

在方位上采用波束多路转换扫描方式是基于上述 IPS 方式而建立并能充分利用雷达资源的一种扫描体制, 在设计时, 要注意以下两点<sup>[7,8]</sup>:

- (1) 在每个波束位置, 每两个连续脉冲对之间的时间间隔最短应不小于 20ms.
- (2) 两个连续的波束位置之间的角度间隔要足够的大.

根据上述两点, YU<sup>[8]</sup> 等建立了一种波束多路转换 14 扇形扫描方式. 它是在速度谱宽为  $1\text{ms}^{-1}$  的情况下得出的, 且每个方位上采集到的脉冲对信号之间的时间间隔为 28ms. 对于速度谱宽大于  $2\text{ms}^{-1}$  的情况, 天气信号相关系数在滞后时间大于 8ms 时已变得很小, 在 28ms 以后, 尽管信号的相关系数很小, 但信号已发生很大的变化了, 因此这种波束多路转换扫描方式不适合速度谱宽较大的天气现象 (如冰雹、龙卷、下击暴流等) 的探测. 根据每个波束位置采样时两个脉冲对之间的时间间隔最短应不小于 8ms, 且角度间隔要足够大 (一般为  $6^\circ \sim 13^\circ$ ), 这时扫描方式可

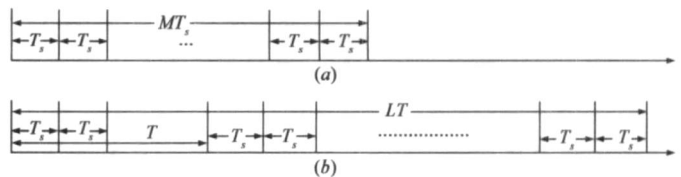


图1 CPS方式与IPS方式发射脉冲时序图

设计成如图 2 所示形式, 我们称之为交互式波束多路转换扫描方式, 即先在  $0^\circ$  方位位置发射两个脉冲, 再转到  $9^\circ$  位置发射两个脉冲, 这两个方位间的角度间隔为  $9^\circ$ ; 接着再转到  $3^\circ$  的位置, 这时的方位与前一个方位的角度间隔是  $6^\circ$ ; 满足上述的两个条件, 再接着转到  $12^\circ, 6^\circ, 15^\circ$  位置上分别发射两个脉冲, 按照此方式再循环往复直到在  $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ$  位置上发射完所需的脉冲数 (图 2 左), 同样的方式, 按照  $1^\circ, 10^\circ, 4^\circ, 13^\circ, 7^\circ, 16^\circ$  的位置顺序发射脉冲, 直到每个位置上达到所需的脉冲数 (图 2 中), 最后再按照  $2^\circ, 11^\circ, 5^\circ, 14^\circ, 8^\circ, 17^\circ$  的位置顺序发射脉冲, 直到每个位置上达到所需的脉冲数 (图 2 右). 这种扫描方式分 3 步完成一个  $18^\circ$  的扇形扫描, 接着按同样的方式完成下一个扇形扫描, 直到扫完一周, 每个方位上接收到的脉冲对信号的间隔时间是 12ms.

### 3 俯仰扫描方式的确立及评价

#### 3.1 俯仰上连续扫描方式及存在的问题

连续扫描是天线从最低仰角开始, 扫完一周后接着抬高到第二个仰角, 再继续扫描, 循环往复, 以完成全空域的扫描. 目前, 我国使用的多普勒天气雷达体积扫描模式 VCP11 是在 5 分钟内完成 14 个仰角, 这些仰角在探测风暴顶时不是很好, 有时会造成约 3km 的误差<sup>[9]</sup>, 原因是在垂直方向上中低层的采样层数少, 造成了风暴顶的估计值要比真实值偏低. 再有在距雷达约 25km 范围内, 由于扫描不到  $19.5^\circ$  仰角以上的范围而探测不到近距离处的风暴顶.

#### 3.2 体扫模式的建立及其对比分析

为了解决上述体积扫描模式存在的缺陷, 就要计算出一组仰角. 计算方法见文献<sup>[9]</sup>.

以北京地区为例, 北京地区的风暴回波顶高一般在 12km ~ 16km, 所以假设“真实”高度为 14km, 最大高度误差百分比  $H\%$  为 13%, 最小仰角为  $0.5^\circ$ , 最大仰角不超过  $30^\circ$ , 半功率点波束宽度为  $0.99^\circ$  (目前多普勒天气雷达使用的波束宽度). 经计算, 得出一 VCP 仰角数组, 分别为  $0.5^\circ, 0.99^\circ, 1.50^\circ, 1.99^\circ, 2.50^\circ, 3.00^\circ$

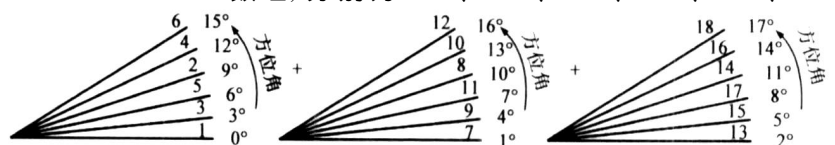


图2 交互式波束多路转换扫描方式

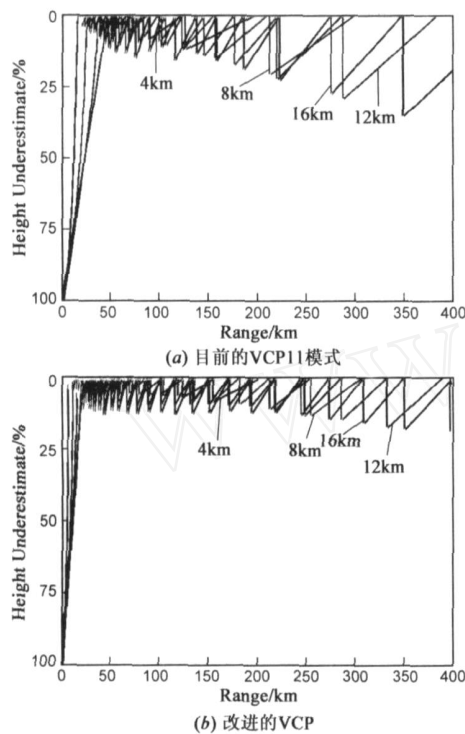


图3 风暴顶高度不确定性(误差百分比)随距离的变化情况  
(锯齿线代表在4个不同高度风暴顶高度的不确定性)

3.56°、4.18°、4.89°、5.69°、6.60°、7.71°、8.96°、10.35°、12.02°、14.02°、16.43°、18.45°、22.10°、25.82°、29.89°共21个仰角.这组仰角对风暴顶探测高度的不确定性,也就是误差百分比随着距离的变化情况如图3所示,图3(a)是现有天气雷达的降水模式VCP11,可以看出,随着距离的增大,其探测风暴顶的误差百分比越来越大,在大于220km处,误差达到了将近25%,在近距离处约25km范围内,是探测不到较高的风暴顶.而在改进的VCP中,在400km范围内,风暴顶的误差基本保持平稳,维持在20%以内,从图中还可看出,在探测较低风暴顶的高度也有所改善.尽管这种VCP能够改善现有的VCP11,但是它比现有的VCP11增加了7个仰角,若采用单波束扫描,扫描速率不变,其完成这样一个VCP总共要进行21次360°方位扫描,导致整个体扫周期的加长,这对于探测快速变化的中小尺度天气现象并不理想,而相控阵雷达可以在不同的方向形成多个发射波束同时探测目标,因此将此项技术应用到气象探测领域将是天气雷达界的一项重大改进.采取多波束扫描方式最好是在垂直方向上形成多个波束,且多个波束

表1 两种扫描方式在不同速度谱宽情况下的相关系数

| 谱宽( $\text{ms}^{-1}$ ) | 0.6     | 0.8     | 1.0     | 1.2     | 1.4      | 1.6       | 1.8       | 2.0       | 2.2       | 2.4       | 2.6       | 2.8       | 3.0       |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 波束多路转换                 | 0.10769 | 0.01903 | 0.00205 | 0.00013 | 5.38E-06 | 1.312E-07 | 1.948E-09 | 1.764E-11 | 9.733E-14 | 3.273E-16 | 6.708E-19 | 8.378E-22 | 6.377E-25 |
| 交互式转换                  | 0.66411 | 0.48303 | 0.32079 | 0.19451 | 0.10769  | 0.05444   | 0.02513   | 0.01059   | 0.00407   | 0.00143   | 0.00046   | 0.00014   | 3.597E-05 |

### 4.2 两种体扫的比较

雷达的扫描周期是评价体积扫描的一个指标.在

要相邻,相当于一个较宽的发射波束,而在接收时采用多个窄波束接收,这样一是可大大提高数据的采集率,节省整个扫描时间,二是方位向分辨率可保持不变.

天气雷达一般在低仰角(一般为1.5°以下)处要进行两次扫描,一次是使用低脉冲取样用以确定准确的目标位置和强度,一次是使用高脉冲取样以测量准确的径向速度和速度谱宽数据,对于改进的VCP,由于它的低仰角有三个分别为0.5°、0.99°、1.50°,因此采用三波束同时扫描比较合理,即采用相当于3个波束宽度的发射波形,接收时分别接收三个波束信号方式,每个仰角对应一个波束.扫描时首先最低的三个波束所对应的三个仰角上使用常定的低脉冲重复频率取样以便确定准确的目标位置和强度,接着同样是在这三个仰角上使用常定的高脉冲重复频率取样以便测量准确的径向速度和速度谱宽数据.接下来的9个中间仰角采用交替取样方式,三次360°方位扫描就可完成.最上面的9个仰角也使用三次360°方位扫描就可完成,采用不考虑距离折叠的连续多普勒方式.这样的VCP总共需8次360°方位扫描就可完成,而现有的VCP11扫描14个仰角共需要16次360°方位扫描.

### 4 扫描方式的评价

#### 4.1 波束多路转换扫描与交互式扫描的比较

由前面的分析可知,波束多路转换扫描方式在每个方位上接收到的信号间隔时间是28ms,交互式波束多路转换扫描方式在每个方位上接收到的信号间隔时间是12ms.从表1可以看出,对于速度谱宽较小的天气现象(一般性降水),波束多路转换扫描方式下接收到的信号相关系数约在0.1至0.0001,这样的信号在谱平均后得到的数据质量要高,而对于速度谱宽较大的天气现象,尽管信号的相关系数已是很小,但由这样的信号经过谱平均后得到的数据质量就会发生很大的变化,所以,波束多路转换扫描方式不适合速度谱宽较大的天气现象的探测.而交互式波束多路转换扫描方式由于每个方位上接收到的信号间隔是12ms,在12ms时对于速度谱宽较大的天气现象,其相关系数约在0.1至0.0001,所以信号经谱平均后得到的数据质量要高,交互式扫描方式适合速度谱宽较大的灾害性天气的探测,但对于一般性降水的探测不如波束多路转换扫描方式.交互式扫描方式是波束多路转换扫描方式的一种补充,对不同的天气形势应选择不同的扫描方式.

发射相同的脉冲数条件下,波束的驻留时间一样,则体扫时间也相同.若要缩短扫描周期,只能采用上述3.2

节中的多波束扫描方案. 表 2 是对现有的 VCP11 和改进的 VCP 完成一个体扫所用时间的对比. 假设二者在每个径向(共 360 个径向)上发射的脉冲数相同, 低仰角(1.5 以下的仰角)每径向上发射 66 个脉冲, 其余仰角每径向上发射 50 个脉冲(参考新一代天气雷达 SA 用户手册), 每个脉冲的驻留时间假设为 1ms.

表 2 几种体扫描模式的时间对比

| 体积覆盖模式       | 仰角数 | 时间               |
|--------------|-----|------------------|
| 现有的 VCP11    | 14  | 311.04 秒(5.18 分) |
| 改进的 VCP(单波束) | 21  | 466.56 秒(7.76 分) |
| 改进的 VCP(三波束) | 21  | 155.52 秒(2.58 分) |

由表 2 可见, 对改进的 VCP 采用俯仰方向多波束扫描能够大大提高数据的采集率, 相比于现有的 VCP11, 不仅增加了中低层仰角数和高层的仰角而且扫描时间也缩短了 2.6 分钟, 但是这种扫描方式又有其不足, 每个波束又会受到其他相邻波束的污染, 对今后数据质量控制带来新的问题.

## 5 结论

本文从相控阵雷达具有的特点出发, 初步研究了相控阵天气雷达的扫描方式, 得出的主要结论有:

(1) 分析了基于 IPS 方式的波束多路转换扫描策略, 建立了一种在方位上采用交互式波束多路转换扫描方式, 这种方式能够提高速度谱宽较大的灾害性天气的数据质量. (2) 在分析现有 VCP11 存在的问题后, 根据北京地区风暴顶的平均“真实”值, 计算得出了一个包含 24 个仰角的改进的 VCP, 改进的 VCP 不仅能够减小风暴顶的探测误差, 而且还能够探测到雷达近距离处的风暴. (3) 对改进的 VCP, 理想的扫描方式是在俯仰方向上采用 3 波束同时扫描方案, 这种俯仰方向多波束同时扫描能够大大提高数据的采集率, 相比于现有的 VCP11, 不仅增加了仰角数而且扫描时间也缩短了 2.6 分钟, 但这种扫描方式又有其缺陷, 即每个波束会受到其他相邻波束的污染, 因此对今后数据的质量控制带来新的问题.

## 参考文献:

- [1] 张越. 相控阵技术在天气雷达中的应用[J]. 现代雷达, 2003, 25(12): 23-25.  
Zhang Yue. The application of phased array technology in weather radar[J]. Modern Radar, 2003, 25(12): 23 - 25. (in Chinese)
- [2] 张越, 张子良. 相控阵天气雷达在大气探测中的应用[J]. 电子工程信息, 2005, 5:1 - 3.  
Zhang Yue, Zhang Ziliang. The application of phased array weather radar in atmospheric sounding[J]. Electronic Engineer-

ing Information, 2005, 5:1 - 3. (in Chinese)

- [3] Forsyth D E, Kimpel J F, Zrnice D S, et al. Bulding the national weather radar testbed (phased-array) [A]. 19th International Conference on Interactive Information and Processing System (IIPS) [C]. Long Beach: American Meteorological Society, 2003.
- [4] McNellis T, Katz S, Campbell M, et al. Recent advances in phased-array radar for meteorological applications [A]. 21st International Conference on Interactive Information and Processing System (IIPS) [C]. San Diego: American Meteorological Society, 2005.
- [5] Doviak R J, Zrnice D S. Doppler Radar and Weather Observations (2nd Edition) [M]. San Diego: Academic Press, 1993. 84-85.
- [6] Yu T Y, Orescanin M B, Curtis C D, et al. Optimization of weather update time and data quality using phased-array radar [A]. 23rd International Conference on Interactive Information and Processing System (IIPS) [C]. San Antonio: American Meteorological Society, 2007.
- [7] Orescanin M B, Yu T Y, Curtis C D, et al. Signal processing of beam-multiplexed data for phased-array weather radar [A]. 23rd International Conference on Interactive Information and Processing System (IIPS) [C]. San Antonio: American Meteorological Society, 2007.
- [8] Yu T Y, Orescanin M B, Curtis C D. Beam multiplexing using the phased array weather radar [J]. Atmospheric Oceanic Technology, 2006, 24(4): 616-626.
- [9] Brown R A, Wood V T. Improved WSR-88D scanning strategies for convective storms [J]. Weather Forecasting, 2000, 15(4): 208-220.

## 作者简介:



高玉春 男, 1961 年生于北京, 正高级高工, 硕士生导师, 主要研究领域: 气象雷达系统、信号处理方法、二次产品的开发。  
E-mail: gycac@cma.gov.cn

杨金红 女, 1974 年生于山西稷山, 博士, 中国气象局气象探测中心工作, 主要从事相控阵天气雷达研究。  
E-mail: yangjh0407@163.com

程明虎 男, 1962 年生于安徽合肥, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域: 雷达卫星气象学和雷达卫星遥感。  
E-mail: tiger@cams.cma.gov.cn

柴秀梅 女, 1956 年生于内蒙, 高工, 主要研究方向: 雷达气象学、气象雷达。