DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2013.01.013

软件化雷达 P 显实时坐标变换与实现

管 行[1]，李方圆[2,3]，许 稼[2]，聂明新[1]
（1. 武汉理工大学信息学院，湖北武汉 430070；2. 清华大学电子工程系，北京 100084；
3. 海军航空工程学院电子信息工程系，山东烟台 264001）

摘 要：软件化雷达 PPI 光栅显示需完成极坐标测量数据向直角坐标的实时转换，而传统的利用简单数学公式直接转换的方式存在映射非均匀和运算量大等难题。基于整体映射和一一映射等不同逆映射方法，研究并提出了一种改进的一一映射新方案。新方法可有效解决量化漏点和区域重叠的问题，显著提高了映射查找表的形成效率，保证了 PPI 显示效果和实时性。最后，给出了新方法的具体实现流程，比较了与现有方法的效果，证明了新方法的有效性。

关键词：软件化雷达；坐标变换；PPI 显；映射查找表

中图分类号：TN957.7；TN958　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-2337(2013)01-0071-06

Real-Time Coordinate Transform of PPI Raster Display for Software Radar

GUAN Hang[1], LI Fang-yuan[2,3], XU Jia[2], NIE Ming-xin[1]
(1. *School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *China*; 2. *Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*; 3. *Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai* 264001, *China*)

Abstract: It is necessary for PPI raster display of software radar to real-time transfer the real measuring data from polar coordination into Cartesian coordination. However, the direct transform via mathematical formula may cause the problems like non-uniformly mapping and large computational burden. Based on existing inverse mapping methods like unitary mapping and one-to-one mapping, a novel mapping solution is proposed in this paper based on the modification of one-to-one mapping. The proposed method can effectively solve the missing points and regions overlapping. Also, the forming efficiency of mapping table is improved remarkably to ensure the real-time PPI raster display, and the detailed implementation is further presented for this method. Finally, the effectiveness of the proposed method is demonstrated by the performance comparisons among different solutions.

Key words: software radar; coordinate transformation; PPI radar indicator; mapping lookup table

1 引 言

随着计算机技术、图形和图像处理技术的飞速发展，利用通用计算机的光栅显示器实现实时雷达数据处理和显示已成为一种趋势。一个可简单由软件控制的数字化雷达是未来雷达的一个重要发展方向[1]。

但是，由于计算机光栅显示器采用逐行或隔行扫描的直角坐标体制，而雷达回波数据采用距离和方位的极坐标体制，因此需要通过坐标转换实现雷达测量数据在计算机光栅上的实时显示。在传统设计方案中，坐标变换是通过 EPROM 查找表[2]或高速 DSP[3]计算等方式实现的。这些实现方式可实现信号的高速转换，且精度高，但需额外的器件予以实现。采用软件化方式实现雷达数据的坐标转换一方面可显著降低系统成本，另一方面也便于系统的升级和实现[4]。因此，基于通用计算机，寻求高效的坐标变换和显示的软件化方法具有重要意义和应用前景。本文运用映射查找

收稿日期：2012-06-21；修回日期：2012-08-29
基金项目：国家自然科学基金(No.60971087)；清华大学信息学院交叉基金

的逆映射思路[5]，基于整体映射和一一映射方法，提出了改进的一一映射方案，较好地解决极坐标到直角坐标映射的量化漏点和区域重叠的问题，显著地提高图像显示效率和质量。尤其是，本文提出的改进一一映射方案具有较好的转换精度和适中的计算量，适于旋转速度、脉冲重复周期动态可变的现代雷达 PPI 显示的应用需求。

2 坐标转换存在的问题

雷达回波数据的录取格式通常采用极坐标形式，即用距离和方位(ρ,θ)表示回波数据和目标位置信息。而计算机光栅显示器中则在直角坐标系下进行显示，即用(x,y)表示目标位置。极坐标和直角坐标在理论上存在如下数学关系[6]：

$$\begin{cases} x=\rho\cos\theta \\ y=\theta\sin\theta \end{cases} \tag{1}$$

直观的坐标转换方法就是运用其数学关系进行转换。但由于雷达回波极坐标和屏幕显示直角坐标的数据分布密度的不同，会产生量化漏点和区域重叠的问题[7]。极坐标是随角度和极径的变化而变化，对于给定的扇区内，极径越小数据密度越大，极径越大则数据密度越小。但直角坐标的数据密度对于离原点距离却是均匀分布的。因此，对于极径较小的区域，经式(1)坐标映射取整的过程中会让圆心附近的像素点对应多个数据点，从而造成区域重叠，如图 1 中心区域所示。对于极径较大的区域，由于极坐标的数据密度小于直角坐标的数据密度，就会出现远离圆心的像素点没有与之对应的雷达回波数据点的情况，这就是所谓的量化漏点现象，如图 1 远程区域所示。传统直接采用坐标转换方法不仅降低了图像的显示质量，而且当雷达完成回波原始视频数据时需大量刷新显示数据，会因为需要对每个点进行正弦、余弦和乘法等运算，使得运算量过大，可能严重影响 PPI 画面的实时显示效果。

对于传统坐标转换方法中存在的问题，可以在定义数据格式时对角度进行进一步细划，来弥补漏掉的部分点，但这将导致靠近中心的数据更加叠加，并且数据计算量成倍增加[8]。为了兼顾解决区域重叠和量化漏点的问题，目前软件化雷达光栅 PPI 显示广泛采用了逆向映射法。逆向映射是指将所有的屏幕直角坐标点计算出与之对应的极坐标点(ρ',θ')，然后将其与极坐标的雷达回波(ρ,θ)对应[9]。

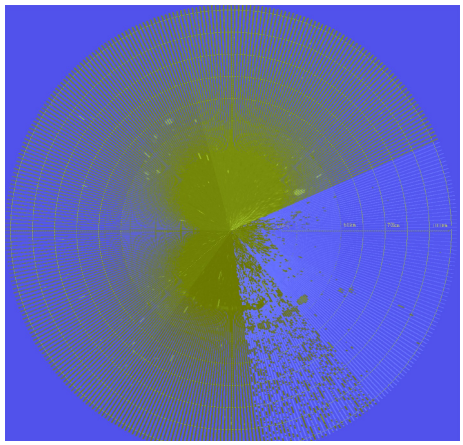

图 1 直接转换时出现的区域重叠和量化漏点现象

3 映射查找表的建立

逆向映射的运算关系如下：

$$\begin{cases} \rho'=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2} \\ \theta'=\begin{cases} \arctan\left(\dfrac{y-y_0}{x-x_0}\right), & x>x_0 \\ \arctan\left(\dfrac{y-y_0}{x-x_0}\right)+\pi, & x<x_0 \\ \pi/2, & x=x_0,\ y>0 \\ 3*\pi/2, & x=x_0,\ y<0 \end{cases} \end{cases} \tag{2}$$

式中，由于反正切函数的值域为$[-\pi/2,\ \pi/2]$，为了将θ'的值与θ一一对应，则θ'应根据不同的x取值、不同的象限进行求解。在逆向映射过程中，根据不同的(ρ',θ')与雷达回波极坐标数据(ρ,θ)的对应方式，可以建立不同的映射查找表。

3.1 整体映射法建立查找表

整体映射，是指将屏幕直角坐标点(x,y)变换为极坐标点(ρ',θ')后，先按照方位角θ'排序，再在同一方位角$\theta'_i=\theta'_j$下按照极径ρ'从小到大排列，然后将雷达回波数据(ρ,θ)截取成与(ρ',θ')相同数据大小，记为(ρ_1,θ_1)，最后直接整体进行映射，即

$$\begin{aligned} &\text{step1}:\underset{\theta'}{\text{sort}}((\rho',\theta')) \\ &\text{step2}:\underset{\rho'}{\text{sort}}((\rho',\theta'))|_{\theta'_i=\theta'_j} \\ &\text{step3}:(\rho,\theta)\ \frac{\text{length}(\rho_1)=\text{length}(\rho')}{\text{length}(\theta_1)=\text{length}(\theta')}\rightarrow(\rho_1,\theta_1) \\ &\text{step4}:(\rho',\theta')\leftrightarrow(\rho_1,\theta_1) \end{aligned} \tag{3}$$

其映射查找表的建立过程如下:首先,将屏幕直角坐标点计算出与之对应的极坐标点数组 ρ_1,θ_1,然后生成一个与之长度相等的序号数组 $N=\{1,2,3,\cdots,n\}$, n 为显示数据总点数。之后,先对 θ_1 数组进行冒泡排序,从小到大进行排列,另两个数组 ρ_1, N 也执行与 θ_1 数据相同的位置变换操作;再然后,对于 θ_1 相等的情况,对相应的 ρ_1 进行冒泡法从小到大排序,N 执行与 ρ_1 数据相同的位置变换操作,这样,最后得到的经过排列后的 N 数组即为建立的映射查找表。其算法具体实现流程图如图 2 所示。

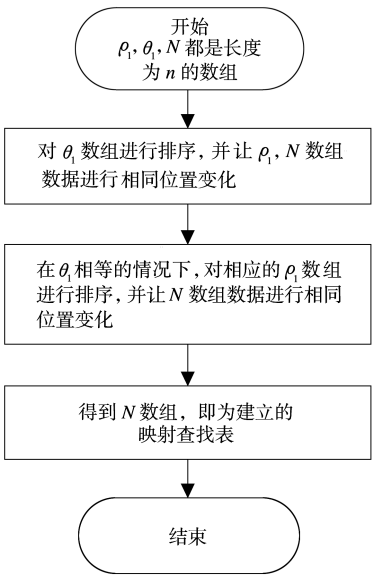

图 2　整体映射法建立查找表流程图

整体映射所生成的映射查找表建立起来比较方便,算法运算量较低,只需要进行两次双层循环即可,而且双层循环内部只是进行比较和赋值操作;但整体对应所生成的映射查找表精度不高。一方面是因为屏幕像素点数和接收到的雷达数据点数不相等,一般需对雷达数据进行截取。另一方面,接收的雷达数据的方位 θ 和经坐标转换后的方位 θ' 的量化精度不一致,导致按照 θ 量化精度应该处于同一方位的数据最后在与 θ' 对应时处于不同方位。

3.2　一一映射法建立查找表

与整体映射不同,一一映射方法首先需建立雷达回波数据的 ρ,θ 数组, ρ,θ 数组分别包含所有雷达回波数据的距离与方位,而且 ρ 数组数据的最大值应该不大于以屏幕中心为圆心的最大圆的半径,否则应对其进行归一化处理。所谓一一映射法,是指将屏幕直角坐标点变换为极坐标点 (ρ',θ') 后,寻找与其最近的雷达回波数据点 (ρ,θ),并确定其在 ρ,θ 数组中的位置。从而,实现屏幕直角坐标点与雷达回波数据点一一对应。从数学上进行分析,一一映射法可归结为一个二维寻优问题:对于 (ρ',θ') 中任一元素,遍历二维数组 (ρ,θ),寻找满足使 $\sqrt{\rho^2+\rho'^2-2\rho\rho'\cos(\theta-\theta')}$ 最小的元素,即

$$(\rho',\theta')\leftrightarrow \underset{(\rho,\theta)}{\operatorname{argmin}}\left(\sqrt{\rho^2+\rho'^2-2\rho\rho'\cos(\theta-\theta')}\right) \quad (4)$$

鉴于以上分析,一一映射法映射查找表的建立过程如下:首先,需建立雷达回波数据的 ρ,θ 数组。然后,将屏幕直角坐标点计算出与之对应的极坐标点数组 (ρ',θ')。遍历 ρ,θ 数组,寻找与之最近的雷达回波数据点 (ρ,θ),并记录下其在 ρ,θ 数组中的位置 pos。最后,所有点按照这种方式一一对应后形成的 pos 数组即为建立的映射查找表。其算法具体实现流程图如图 3 所示。

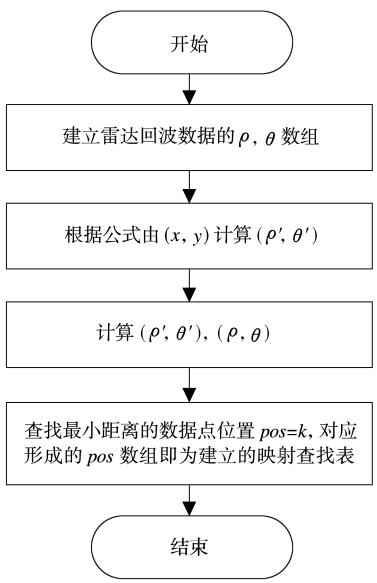

图 3　一一映射法建立查找表流程图

由一一映射法建立查找表的流程可知,由于屏幕像素点与雷达回波数据是一一映射,且不需对雷达回波数据进行截取,这种映射方法精度可以达到很高;但其映射表的建立却很复杂,需要进行两层循环,而且在循环内部还要进行一层次数为数组长度之积 $N_\rho * N_\theta$ 的循环, N_ρ,N_θ 分别表示极坐标的极径和方位的刻度数。这个循环内部进行的是计算转换的极坐标点 (ρ',θ') 与雷达回波

数据点(ρ,θ)的距离的操作，涉及到乘法、加法、开方、比较、赋值等运算，运算量较大，查找表建立困难，不利于通用。

3.3 改进的一一映射查找表

针对上面一一映射法建立查找表过程中，遍历寻找与极坐标点(ρ',θ')最近的雷达回波数据点(ρ,θ)的操作使整个算法的运算量急剧上升的情况，本文提出了一种改进算法。先建立雷达回波数据的刻度数组ρ和θ，其并不包含全部雷达回波数据的ρ与θ，而是对于相同ρ或θ在数组中只用一个数据进行表示；然后直接比较(ρ',θ')与(ρ,θ)，分别寻找与ρ'最近的ρ和与θ'最近的θ，并分别查找其在刻度数组ρ和θ中的位置b和a。从而可以计算出其在雷达回波数据数组中对应的位置$pos=(a-1)*N_\theta+b$。将全部的pos值记录下后即可生成最后所需的映射查找表。相对于一一映射法，新方法就是将一个二维联合寻优的问题分解成两个一维寻优问题，改进的一一映射法的数学表达式为

$$(\rho',\theta')\leftrightarrow\begin{cases}\text{step1}:\rho'\leftrightarrow \underset{\rho}{\operatorname{argmin}}(|\rho-\rho'|,\ \theta')\\ \text{step2}:\theta'\leftrightarrow \underset{\theta}{\operatorname{argmin}}(|\theta-\theta'|,\ \rho')\end{cases}\tag{5}$$

其算法具体实现流程图如图 4 所示。

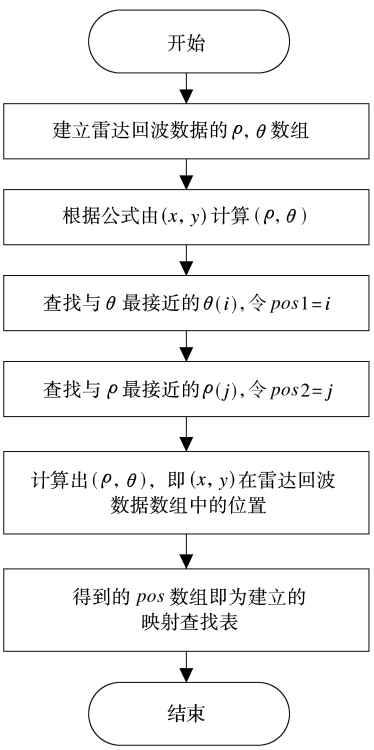

图 4 改进的一一映射法建立查找表流程图

这种改进的一一映射法建立的查找表，虽然并不寻找与极坐标点(ρ',θ')全局最近的雷达回波数据点(ρ,θ)进行对应，但可分别寻找与ρ'最近的ρ和与θ'最近的θ。虽然，新方法在转换精度上略有下降，但与一一映射法相差不大。同时，由于不用对雷达数据进行截取，转换精度高于整体映射法。而因其并不是计算全局最近距离，较一一映射法可呈数量级地节省运算量。

3.4 三种映射查找表建立方式的比较

总之，三种建立映射查找表的方法都是基于逆向映射的思想。但三种方法在具体构建映射查找表时有区别。整体映射法是从宏观出发，将屏幕直角坐标点变换为极坐标点，然后整体进行排序从而形成的映射表；一一映射法、改进的一一映射法是从单点出发，遍历寻找与极坐标点(ρ',θ')最近的雷达回波数据点(ρ,θ)。一一映射法与改进的一一映射法不同在于寻找与极坐标点(ρ',θ')最近的雷达回波数据点(ρ,θ)的方法不同。前者是直接通过计算距离，后者是通过近似的分别寻找与ρ'最近的ρ、与θ'最近的θ。而从数学上进行分析，一一映射法可以归纳为一个遍历二维查找的问题，而改进的一一映射法是两个遍历一维查找的问题。

另外，因为构建映射查找表着手点的不同，其转换精度和映射算法运算量、时间复杂度也不同。从转换精度的角度分析，整体映射法因为屏幕像素点数和接收到的雷达数据点数不相等，需对雷达数据进行截取和接收的雷达数据的方位θ和经坐标转换后的方位θ'的量化精度不一致，导致按照θ量化精度应该处于同一方位的数据最后在与θ'对应时处于了不同方位两方面的原因，其转换精度最低。一一映射法因屏幕像素点与雷达回波数据是一一映射，且不需对雷达回波数据进行截取，故转换精度最高。改进的一一映射法因为也是雷达数据一一对应，故转换精度高于整体映射法。但是，其在对应时是近似地计算最近距离，故转换精度略低于一一映射法，幸运的是对于显示效果而言，基本看不出差别。

从映射算法运算量的角度分析，三种映射查找表建立方式的转换精度和映射算法运算量的对比如表 1 所示。

表 1　运算量的比较

算　法	运算量				转换精度
	乘法次数	加法次数	开方次数	比较次数	
整体映射法	无	无	无	$2*N_x*N_y$	低
一一映射法	$4*N_x*N_y*N_\theta*N_\rho$	$2*N_x*N_y*N_\theta*N_\rho$	$N_x*N_y*N_\theta*N_\rho$	$N_x*N_y*N_\theta*N_\rho$	高
一一映射法改进	无	无	无	$(N_\theta+N_\rho)*N_x*N_y$	较高

注：N_x，N_y 分别表示屏幕直角坐标的刻度数。

进一步，对一一映射法和改进的一一映射法从时间复杂度的角度分析，一一映射法是一个遍历二维查找的问题，其时间复杂度记为 T_1，表达式为

$$T_1=O(N_{\rho'}\cdot N_{\theta'}\cdot N_\rho\cdot N_\theta) \tag{6}$$

改进的一一映射法是两个遍历一维查找的问题，其时间复杂度记为 T_2，表达式为

$$T_2=O(N_{\rho'}\cdot N_{\theta'}\cdot (N_\rho+N_\theta)) \tag{7}$$

对于改进的一一映射法其相对于一一映射法在算法时间复杂度上的优势可以从图 5 明显看出：其中取屏幕坐标分辨率为 1024 * 1024，即 $N_{\rho'}=N_{\theta'}=1024*1024$；方位量化数 N_θ 分别取值 360，3 600，36 000 三种情况。

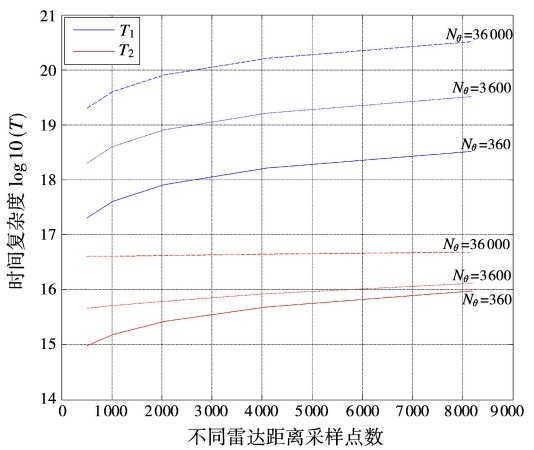

图 5　两种算法在不同距离采样点数和天线转速下的时间复杂度的比较

4　坐标转换的软件化具体实现

改进的一一映射法建立查找表其具体过程如下：

① 将屏幕直角坐标点与实际雷达回波数据一一对应，记录下其在实际雷达回波数据数组中位置。并将位置信息生成映射查找表，以文件的形式存储下来。

② 在界面显示程序初始化时，读取该文件，并将对应的位置信息读入到数组 TempVideoIndex 中。

③ 将接收到的雷达回波数据存储在数组 TempSamplingReady 中。一般情况下，雷达回波数据会按照方位角从小到大排列，而在同一方位角下是按照极径从小到大排列。如果雷达回波数据没有按照这种格式排列，则需要人为调整排列；另外，一般情况下雷达回波数据数据量是在屏幕上显示点数的多倍，此时还需进行数据抽取操作。

④ 最后是将雷达回波数据输出到屏幕进行显示。其中，g_ScreenBuf 为终端显示屏幕图像的内存首地址。其伪代码如下：

```
VideoIndex0←;//定义位置信息数组的指针值
for i←0 to Xmax//Xmax 为 x 轴方向最大像素点值
{
    for j←0 to Ymax//Ymax 为 y 轴方向最大像素点值
    {
        //取屏幕像素点对应的雷达回波数据在雷达回波数据数组中的位置
        num←TempVideoIndex[VideoIndex++];
        //读取该位置的数据赋给屏幕像素点
        TempVideoDATA ←TempSamplingReady[num];
        g_ScreenBuf[i+j* Ymax] ←TempVideoDATA ;
    }
}
```

与图 1 相同的雷达回波数据，运用改进的一一映射法建立映射查找表后，按照以上流程软件化实现时，其最后的雷达 PPI 显效果如图 6 所示。

由图 6 可知，无量化漏点和区域重叠问题，显著提高了图像显示质量。而且，因为运用查找表，减少了大量的坐标转换运算，故计算机绘制图像时非常流畅，很好地满足了雷达图像显示的实时性要求。

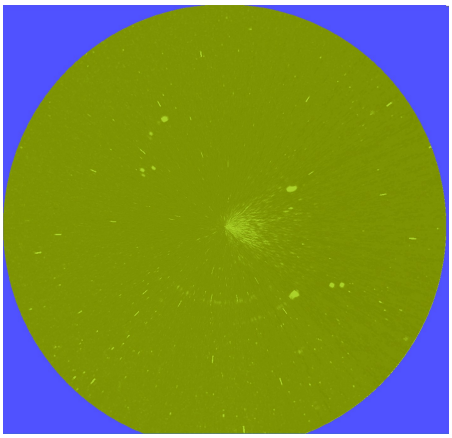

图 6 无量化漏点和区域重叠问题的雷达 PPI 显效果图

另外，如果想实现屏幕显示数据的更新，只需不断将新的雷达回波数据读入到 TempSamplingReady 数组中即可；如果想实现按方位角对屏幕显示数据进行更新，则只需在将雷达回波数据读入 g_ScreenBuf 数组时加入方位角的限制，即在某一时间点只写入不大于方位角的 θ_1 的雷达回波数据，下一次写入不大于方位角的 θ_2 的雷达回波数据($\theta_2 > \theta_1$)。显然，本文软件化实现方式相当简便，无需额外设备进行坐标转换，且软件实现也很简单，只需在程序初始化时将查找表中的数据从硬盘读入内存，查表赋值即实现了坐标转换。雷达 PPI 显工作起来以后，要进行屏幕数据更新时，不需要进行类似于式(1)的复杂的数学运算或者其他的复杂操作，只需将接收到的雷达回波数据存入指定数组即可。

5 结束语

本文运用映射查找的思想，在整体映射法和一一映射法的基础上，提出了改进的一一映射法。本文所述方法解决了量化漏点和区域重叠问题，显著提高了图像显示质量，并能确保雷达图像显示的实时性。从转换精度、算法运算量、算法时间复杂度等方面论证了改进的一一映射法具有很高的转换效率并满足转换精度，特别适于量程、天线转速和脉冲重频可变的雷达实时显示。

参考文献：

[1] 江胜利，徐晓靖. 基于数字化软件化平台的全时空探测雷达[J]. 雷达科学与技术，2011，9(3)：197-201.
JIANG Sheng-li，XU Xiao-jing. Study on Ubiquitous Radar System Based on a Digitalized and Softwarized Platform[J]. Radar Science and Technology，2011，9(3)：197-201.(in Chinese)

[2] 陈靖宇. 高分辨率雷达显示坐标变换及相关设计[J]. 舰船电子对抗，2001(1)：14-17.

[3] 张宏群，孙雪涛，王建. 软件化雷达视频显示的实时坐标变换方法[J]. 微计算机信息(测控自动化)，2010，26(2-1)：218-220.

[4] 项凌云. 船舶导航雷达显示与控制终端的研究与设计[D]. 上海：华东师范大学，2011.

[5] 刘翠海，王文清，袁满. 一种支持雷达 P 显仿真的实时坐标变换策略[J]. 系统仿真学报，2002，14(9)：1136-1137.
LIU Cui-hai，WANG Wen-qing，YUAN Man. A Kind of Coordinate Conversion Strategy for PPI Radar Indicator Simulation[J]. Journal of System Simulation，2002，14(9)：1136-1137.(in Chinese)

[6] 刘春旭. 雷达图像数字化显示[D]. 大连：大连海事大学，2010.

[7] 孙雪涛. 软件化雷达信息实时处理与显示[D]. 南京：南京信息工程大学，2009.

[8] 徐展翼，欧阳宁，韩传久. 高速 PPI 光栅扫描显示系统坐标转换设计与实现[J]. 桂林电子工业学院学报，2003，23(1)：57-60.

[9] 梁景新，薛余网. PPI 雷达信号计算机显示中的快速极坐标-直角坐标映射[J]. 上海交通大学学报，1991，33(1)：58-60.

作者简介：

管 行 男，1988 年 10 月生于湖北监利，武汉理工大学信息学院通信与信息系统专业硕士研究生，主要研究方向为基于多线程的雷达软件系统集成。E-mail：gh_1232008@163.com