

# 基于内容的文档图像倾斜校正

吕亚军,陈继荣,鹿晓亮

(中国科技大学电子工程与信息科学系,安徽 合肥 230027)

**摘要:**纸质文档通过图像获取设备转换为文档图像,由于人为因素和一些其它原因,文档图像不可避免地包含一定的倾斜角度。为了便于计算机处理,有必要对文档图像进行倾斜校正。文档版面十分复杂,包含文字、图像、图形、表格等内容。建立一个较为通用的文档图像倾斜校正算法是很困难的。提出了基于内容的文档倾斜自动校正方法,通过小波变换、游长平滑和细化处理,提取表格中的水平线和垂直线或文字行。针对不同的文档版面采用相应的倾斜校正策略。实验表明该方法具有倾斜校正速度快、精度高和适应性强的特点。

**关键词:**版面分析;文档处理;倾斜校正

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**B

## Content Based Document Image Skew Adjusting

LU Ya-jun, CHEN Ji-rong, LU Xiao-liang

(Dept. of Electronic Eng. & Information Science, University of Science & Technology of China,  
Hefei Anhui 230027, China)

**ABSTRACT:** When transferring paper document into document image via image acquisition equipment, it is inevitable to introduce some inclines because of many indefinite reasons. To make it smooth to process those document images utilizing computer, it is necessary to rectify the incline first. The document images, which may contain characters, images, graphics, forms etc., are always very complex and it is very difficult to find a generally-used algorithm to rectify those document images. This paper puts forward a content-based method to rectify the inclines automatically, in which wavelet transform, thinning and other related algorithms are applied. The experimental results show that the proposed method, which varies according to different types of the document images, can achieve high speed and high accuracy.

**KEYWORDS:** Layout analysis; Document image processing; Skew adjustment

### 1 引言

纸质文档通过图像获取设备(如数码相机、扫描仪等)转化为文档图像,由于人为因素和扫描仪走纸机构的机械误差的影响,文档图像普遍存在一定的倾斜角度。倾斜校正是一项重要的文档图像预处理技术,其基本原因在于:

- 1) 倾斜的文档图像影响了版面分析,使得对文字区、图形区和图像区的分割产生误差;
- 2) 倾斜的文档图像使字符分割发生困难;
- 3) 引起字符明显变形,使得 OCR 识别率降低;
- 4) 影响文档版面正确理解。

文档处理是建立在对版面理解基础上的,版面分析算法

对文档的倾斜非常敏感。因此,对文档图像的倾斜校正就显得十分重要。目前已经有许多的二值文档图像的倾斜校正算法,这些算法能较好的处理规范的仅包含印刷体文本的文档。由于中文文档的种类繁多、文档版面复杂,文档中包含了文本、图像和图形,以及可能包含了不规范的手写体文字和数学公式等,有的文档大部分版面是图像或者图形,扫描后的文档图像边缘可能会出现大段黑区或噪声,这些因素增加了文档图像倾斜校正难度,文档图像倾斜校正是文档预处理的难点问题,许多研究者对文档倾斜校正做了大量的研究。迄今,人们已经提出了许多不同的文档倾斜校正算法。其中,绝大多数的文档倾斜校正方法是基于规则和先验知识的,它们利用所处理文档的特点作为先验知识,使算法的精度和效率都得到提高,如基于参考线的方法、文本行的方法等。但是,参考线法仅适用于文档存在较长参考线的场合,而文本行方法在每行字符较少时,倾斜校正效果不理想。因此这类

方法在应用范围上具有很大的局限性,不能适应目前大量复杂版面文档处理的需要。本文提出了一种基于内容的文档倾斜自动校正方法,根据文档的具体内容选择倾斜校正策略,并对倾斜角度的精度进行估计。

## 2 文档图像倾斜校正原理

### 2.1 文档版面的结构特点

随着现代印刷技术的发展,文档的版面日趋复杂。一幅典型文档图像的版面主要包含以下四种区域:

文字区域:主要包括汉字、数字、英文字母、标点符号、公式等;

图形区域:主要包括直线、曲线等;

图表区域:主要包含水平线、垂直线、文字行等;

图像区域:各种带有灰度信息的图片。

从几何结构的角度出发,把常见的版面分为三种类型:无嵌入式矩形版面、嵌入式矩形版面、非矩形版面。

#### 1) 无嵌入式矩形版面

无嵌入式矩形版面是指这样一种版面:它的每个版面基元可以是矩形、圆形、椭圆形或其他形状不规则的图形,但这些图形的外切矩形互不相交,即各外切矩形的几何位置没有任何重叠或交叉。无嵌入式版面是最简单的一种版面形式,也是最常见的一种版面,它的各个分栏可以用矩形表示。

#### 2) 嵌入式矩形版面

嵌入式矩形版面的版面基元至少包含了一个(非矩形的)直角多边形版面。这种版面的分栏不同于无嵌入式矩形版面,其外切矩形有相交或包含的情况。

#### 3) 非矩形版面

除上述版面类型之外的版面都是非矩形版面,它包含有无法仅用水平边和垂直边来表示的分栏,例如斜多边形、三角形等,这类版面十分复杂,而且不常见,本文不讨论非矩形版面的倾斜校正问题。

文档图像版面具有以下的特点:

1) 矩形块是构成文档版面结构的最基本单位,文档的版面结构由若干个矩形子块组成。大多数的文档中,各子块的几何位置都没有重叠或交叉。

2) 文档版面复杂,包括横排(水平方向),竖排(垂直方向)和横竖混排。

3) 文档的文本区域包含印刷体、手写体汉字、字符和数学公式等。

4) 有的文档具有表格线、边框线和各版面之间的分隔线。这些线条比较长,而且在水平方向和垂直方向上。

5) 通过图像获取设备获得的文档图像会产生一定角度的倾斜,倾斜角度一般在 $\pm 5^\circ$ 以内。

### 2.2 倾斜校正的基本原理

上面讨论了文档版面的几何结构特点,可以总结出文档倾斜校正的基本思路:任何水平方向和垂直方向的线条或者文字行的倾斜方向都与文档的倾斜方向是一致的,因此可以

通过这些线条和文字行估计倾斜角度。主要方法有以下三大类:

#### 1) 基于矩形块的文档图像倾斜校正方法<sup>[1,2]</sup>

矩形子块结构是构成文档版面的最小基元。这些矩形子块的上、下边为水平线条,左、右边为垂直线条。当文档图像产生倾斜时,矩形子块的边线也会产生相应的倾斜角度。通过检测矩形子块边线,然后计算出边线的方程,就可以得到文档图像的倾斜角度。

#### 2) 基于水平线和垂直线的文档倾斜校正方法<sup>[3]</sup>

水平线条和垂直线条在文档中也比较普遍(如版面基元间的分隔线等),特别是在表格文档中(如票据、报表等),水平线条和垂直线运用更为广泛。通过检测这些线条,计算出它的直线方程,然后算出文档的倾斜角度。

#### 3) 基于文本行的文档倾斜校正方法

通常文本行是沿水平方向排列的,且相邻文本行之间的距离相对固定,因此检测页面图像的倾角不必对整个图像进行扫描计算,只需选择合适的文本子区域,其文本行的方向角对应于整个文档图像的倾斜角。

## 3 常用的倾斜估计方法

人们提出了许多的倾斜校正算法,常用的方法有以下三大类:投影方法、Hough 变换法和近邻(nearest-neighbor)法。还有一些别的倾斜估计方法如:BAG(Block Adjacency Graph)算法、基于子空间直线检测、基于 Fourier 谱分析等等。H. K. Kwag 提出了矩形块邻接图 BAG 算法运用于英文和朝鲜语文档的倾斜估计。Fourier 变换的方法是利用页面倾角对应于使 Fourier 空间密度最大的方向角的特性,将文档图像的所有像素点进行 Fourier 变换,计算量非常大,目前很少采用。几乎所有的倾斜校正算法都是针对的二值图像,在这些算法中,主要针对文本占多数的版面,处理图像较多的文档时,倾斜估计的精度较低。

### 3.1 Hough 变换

Hough 变换是最常用的检测倾斜角方法,由于基本 Hough 算法(BHT)计算量非常大,因此一些专门用于倾角检测的 Hough 变换改进算法被提出来,采用了多级 Hough 变换,用由粗到细的角度搜索步长进行倾斜检测。虽然这些算法的核心思想是减少 Hough 变换的数据量,但由于 Hough 变换本身计算量较大,因此改进算法的速度仍较慢。

Hough 变换具有较高的倾斜估计精度,但是它的计算量大,也不适用于版面大部分为图像的文档。

### 3.2 投影法

投影法是最常用的倾斜校正方法,它是基于对投影图形状进行分析的方法。其基本方法是计算每个倾斜角度的投影形状,并定义一个目标函数,实际的倾斜角度就是使目标函数最优。由于这种方法需要计算每个倾斜角度的投影形状,要使得倾斜估计精度较高,这种方法的计算量非常大。

最简单的方法是将文档图像向不同的方向投影。当投影

方向和水平文字行方向一致时,文字行对应的投影图上的峰值最大,行间空白对应投影的峰谷。

投影法是一种基于文字行的倾斜校正方法,不适用于版面复杂的文档,计算量比较大,而且精度不高。

### 3.3 近邻法

文献[5]提出了一种新的倾斜角检测的算法。该算法选取文本图像的某个子区域中字符连通区的中心点作为特征点,利用基线上的点的连续性,计算出对应的文本行的方向角,从而得到整个页面的倾斜角。该方法通过检测连通区域,然后找出最近的连通区域,通过连通区域间隔的中心线计算出倾斜角度。不同的近邻连通区域可计算出多个倾斜角度,根据大多数倾斜角度的方向确定实际的倾斜方向。近邻法也具有较高的估计精度,对于具有较多相互邻近的组成部分时,也很费时。

## 4 基于内容的文档图像倾斜估计

文档的版面是多种多样的,大多数文档版面中都包含水平方向或垂直方向的线条和文字行。利用线条和文字行来估计文档的倾斜角度,具有通用性好的特点。文字行中的字符(例如标点符号和上下标等)不完全共线,所以,采用文字行进行倾斜估计会产生较大的误差,而采用水平线和垂直线条求倾斜角度时,可使倾斜估计的误差较小。

本文提出了基于内容的文档校正方法,首先通过小波变换检测出所有水平和垂直方向上的线条,通过计算这些线条的倾斜角度来估计文档的倾斜角度。当文档中没有线条时,将水平和垂直的文字行通过游长平滑和细化处理,将文字行转化为水平或垂直线条,利用最小二乘法估计这些直线的参数,然后计算出直线倾斜角,并对倾斜角度进行精度估计。

为了保证文档版面理解的精度,倾斜校正后的误差应该小于一个阈值 $\theta$ 。

$$\theta = \text{tg}^{-1}(\Delta d/L) \quad (1)$$

其中 $\Delta d$ 为文本行之间的距离, $L$ 为文本行的长度。从(1)式可以看出:文字行的长度越长,对倾斜校正要求的精度越高。

由于文字行的长度难以确定,我们直接采用文档图像的长度 $W$ 来代替。 $\Delta d$ 通常也取一个经验值,采用需要处理文档中文字的最小行间距 $\Delta d'$ 。

实际的倾斜校正的误差应满足:

$$\theta' = \text{tg}^{-1}(\Delta d'/W) < \theta \quad (2)$$

就能正确的分割出文字图像。

多数倾斜估计方法选用一行文字或一个局部区域来求倾斜角度,由于文档图像容易受到噪声等干扰,倾斜估计的精度得不到保证。也有的倾斜估计方法采用整篇文档信息来估计倾斜角度,对于图像占多数的文档估计的误差也比较大。本文通过预处理,将文字行变换为水平或垂直的线条,用最小二乘法估计线条的倾斜角度和估计角度误差,如果精度满足文档处理的要求,则停止计算倾斜角度。当文档中噪声较多、文字行、线条较短、图像污损严重时,计算出的倾斜角

度的误差大于 $\theta'$ ,则再加入其它的线条进行倾斜角度的计算。将所有计算出的倾斜角度及其标准差采用误差理论中误差合成的方法进行处理,有效的减小倾斜估计的误差,使精度满足文档的处理要求。

### 4.1 基于小波变换的文档水平线和垂直线检测

直线的检测对图像分辨率的要求不高,为了减小计算量,降低图像分析时的计算复杂度,采用金字塔形的方块算法降低图像的分辨率。该具体算法为:设变换后的低分辨率图像的尺度为 $n$ ,图像中的每一个像素点 $s^{(n)}$ 与尺度为 $n-1$ 图像中对应的四个像素点 $s_i^{(n-1)}$ ( $i=1,2,3,4$ )的取值有关。如果4个像素点 $s_i^{(n-1)}$ 中有一个点是黑色,则它的子像素点 $s^{(n)}$ 也为黑色:

$$s^{(n)} = \bigcup_{i=1}^4 S_i(n-1) \quad (3)$$

这样, $S^{(n)}$ 中的像素点的数目为 $S^{(n-1)}$ 中像素数目的1/4。本文中的图像扫描分辨率为100DPI,原始图像为 $S^{(0)}$ ,实际采用 $S^{(1)}$ 对图像降低图像的分辨率。对于更高分辨率的扫描图像,可以采用更大的尺度以降低分辨率。

提取直线最常见的方法是Hough变换法,对于质量较差的文档图像,用Hough变换来提取直线是很困难的。本文采用二维多分辨率分析的方法,采用正交紧支小波将文档图像变换成几个子图像,利用小波变换具有空间上的方向选择性,将文档中的水平方向成份和垂直方向的成份变换到不同的子图像中实现水平或垂直的线条的检测。

### 4.2 基于游长平滑的图像处理

通过游长平滑算法[6]对文档图像进行预处理可以将文字行合并成为同一个区域,以方便文字行的检测。游长平滑算法是将图像上长度小于某一阈值的连续白点转换成黑点的算法。图像经过游长平滑处理后,距离相近的黑点连接成了一个较大的连通成份。在中文文档中,文本以横排为主,以水平游长平滑算法为例对文档图像预处理。

文档图像经过游长平滑预处理后,文字行就连成了一个连通的区域,将该图像进行细化,图像中的文字行就变成了一条线。

文字行经过游长平滑、细化处理后转换成了线条,线条的倾斜方向就是文档图像的倾斜方向。利用该线条计算文档图像的倾斜角度可以大大地降低计算量。一般情况下,线条的长度越长,计算出图像倾斜角度的误差就越小,所以采用图中最长的线条计算文档图像的倾斜角度。

### 4.3 文档图像倾斜校正

#### 4.3.1 最小二乘法原理

最小二乘法是一种在多学科领域中得到广泛应用的数据处理方法,采用该方法可以妥善地解决参数的最可信估计、数据处理、回归分析等问题。本文将该方法应用到文档图像的倾斜估计中。文档图像通过小波变换,滤除了文本、图像、噪声等成份,保留了水平和垂直线,文档中的水平文字行经过游长平滑等预处理也变成了水平和垂直的线条。通过投

影可以找到一条最长的直线。在数字图像中,这条直线实际上是一组位于直线上的点。这些点中包含了噪声。从这组包含噪声的点中求出直线方程,就能通过直线方程求出整个文档的倾斜角度。采用线性参数的最小二乘法来估计直线方程的参数,可以得到最可信的直线方程,从而求得倾斜角度值。

数据  $l_1, l_2, \dots, l_n$  的残余误差为:

$$\begin{aligned} v_1 &= l_1 - (a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n) \\ v_2 &= l_2 - (a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n) \\ &\vdots \\ v_n &= l_n - (a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n) \end{aligned} \quad (4)$$

根据最大或然原理,最小二乘法原理可表示为

$$[v^2] = v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2 = \text{最小} \quad (5)$$

最小二乘法原理即测量结果的最可信值应在残余误差平方和为最小的情况下求出。按最小二乘法原理给出最终结果能充分利用误差的抵偿作用,有效地减小随机误差的影响,因而结果最具有可信性。

#### 4.3.2 线性参数最小二乘法处理的正则方程

求估计量的值可利用求极值的方法来求满足最小二乘条件的要求。对残余误差平方和求导,并令其为零,有:

$$\begin{aligned} \frac{\partial [v^2]}{\partial x_1} &= -2a_{11}\{l_1 - (a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n)\} - 2a_{21}\{l_2 - (a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n)\} - \dots - 2a_{n1}\{l_n - (a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n)\} \\ \frac{\partial^2 [v^2]}{\partial x_1^2} &> 0 \end{aligned} \quad (6)$$

同理  $[v^2]$  对  $x_2, x_3, \dots, x_n$  求偏导,各二阶导数为正,所以上面方程求得的极值是极小值,满足最小二乘的误差平方和最小的条件,将它们写成正则方程:

$$\begin{aligned} a_{11}v_1 + a_{21}v_2 + \dots + a_{n1}v_n &= 0 \\ a_{12}v_1 + a_{22}v_2 + \dots + a_{n2}v_n &= 0 \\ &\vdots \\ a_{1n}v_1 + a_{2n}v_2 + \dots + a_{nn}v_n &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

设:

$$L = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

正则方程可表示为  $A^T V = 0$ , 式(4)可表示为  $V = L - AX$ , 方程的参数估计值  $X$  为:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (8)$$

#### 4.4 文档图像的倾斜估计

文档图像经过预处理,得到了一组水平线条或垂直线条上的点,这些点中仍然包含了一些随机的噪声。采用最小二

乘法得到误差平方和最小的直线方程。

设图像的倾斜角度  $\delta$ , 最长的一根线条为水平线,则该水平线与  $X$  轴的夹角为  $\delta$ , 令  $b = \tan \delta$ , 则该线条的直线方程:

$$Y = a + bX \quad (9)$$

将预处理后的图像沿  $Y$  轴方向投影:

$$P_y = \sum_{y=0}^{h-1} \sum_{x=0}^{w-1} f'(x, y) \quad (y = 1, 2, \dots, h-1)$$

其中,  $h$  为图像  $f'(x, y)$  的高度值,  $w$  为图像宽度值,  $P_y$  为图像在  $Y$  轴方向上的投影值。文档中的水平线都会在投影图上产生对应的峰值,峰值越大,线条越长,通过投影峰值位置,可以得到一组边框线上的点  $P(x_i, y_i)$ 。

下面通过  $n$  个点  $P(x_i, y_i)$  求该线条的直线方程。设这些点满足(9)式,即:

$$\begin{aligned} y_1 &= a + bx_1 \\ y_2 &= a + bx_2 \\ &\vdots \\ y_n &= a + bx_n \end{aligned}$$

假设这些点相互独立,满足正态分布条件,采用线性参数的最小二乘法来估计直线方程  $Y = a + bX$  的参数  $a$  和  $b$ ,可以有效地抵消随机干扰点。残余误差  $v_i$  为:

$$v_i = y_i - (a + bx_i)$$

最小二乘原理的矩阵形式如下:

$$\text{设: } A = \begin{pmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{pmatrix}; X = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}; L = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}; V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

列向量  $X$  为参数  $a$  和  $b$  的值,可由式(8)求出。实质上,按最小二乘条件给出最终结果能充分地利用误差的抵偿作用,可以有效地减小随机误差的影响,因而所得结果具有最可信性。

## 5 实验

采用该方法对中国期刊网发表的部分文章进行了实验,选用了 50 幅各类文档图像,图像分辨率为 100dpi,将每幅图像以  $1^\circ$  为间隔旋转(从  $-5^\circ$  到  $5^\circ$ ),一幅图像可以生成 10 幅倾斜的图像样本。将这 500 幅倾斜的文档图像用来实验。所有测试均在 PC 机上运行,其主要配置为 CPU Pentium 1700M, 256M 内存;将本文方法与文献[4]实验结果比较,结果表明,本文提出的基于内容的文档图像倾斜估计方法处理速度快、平均误差很小。

表1 两种倾斜估计方法比较

平均处理时间 /s	平均误差	误差小于 $0.1^\circ$ 的 比例/%	倾斜估计方法
2.34	0.08	93.15	文献[4]
0.25	0.02	98.57	本文方法

## 参考文献:

- [1] H K Kwag, S H Kim, S H Jeong, G S Lee Efficient Skew Estimation and Correction Algorithm for Document Images[J]. Image and Vision Computing 2002 20.
- [2] 明底烈, 柳健. 小角度倾斜图像的倾斜快速检测和校正方法[J]. 华中理工大学学报, 2000. 28.
- [3] Seong - Whan Lee. Parameter - Free Geometric Document Layout Analysis. [J] Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2001. 23.
- [4] D S Le, G R Thoma, H Wechsler. Automated page orientation and skew angle detection for binary document images[J]. Pattern Recognition. 1997 - 2, 7(10).

- [5] 王朱华, 李佐, 蔡士杰. 基于连续性的页面倾斜检测与校正[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001. 13.
- [6] 戴汝为. 汉字识别的系统与集成[M]. 浙江科学技术出版社, 1998.



## [作者简介]

吕亚军(1976 -), 男(汉族), 山西太谷人, 硕士研究生, 从事文字识别方面的研究。

陈继荣(1944 -), 男(汉族), 安徽宿州人, 副教授, 主要研究方向: 多智能体认知与嵌入式系统、机器人视觉、蓝牙通信网络。

鹿晓亮(1980 -), 男(汉族), 河南漯河人, 硕士研究生, 从事图像处理、车牌识别方面的研究。

## (上接第 80 页)

5) 在以上四步的基础上, 将任意距离  $r$  值和发射机功率值  $P_0$  代入公式(4) 即可得到该时刻天线辐射功率的空间分布。改变仿真时刻重新计算即可得到天线辐射功率在时间上的分布。表2为0.5s时刻一些空间点的辐射功率值, 表3为1s时刻相同空间点的辐射功率值。

表2 0.5s时刻一些空间点的辐射功率密度

$(\theta, \varphi)$	$r/m$			
	500	1000	1500	2000
$(207^\circ, -12^\circ)$	8.332932e-007	2.083233e-007	9.258813e-008	5.208082e-008
$(208^\circ, -13^\circ)$	0.001764984	0.0004412459	0.0001961093	0.0001103115
$(209^\circ, -14^\circ)$	0.08984784	0.02246196	0.009983093	0.00561549
$(210^\circ, -15^\circ)$	0.3183049	0.07957747	0.03536777	0.01989437
$(211^\circ, -16^\circ)$	0.08984784	0.02246196	0.009983093	0.00561549
$(212^\circ, -17^\circ)$	0.001764984	0.0004412459	0.0001961093	0.0001103115
$(213^\circ, -18^\circ)$	8.332932e-007	2.083233e-007	9.258813e-008	5.208082e-008

表3 1s时刻与表2相同空间点的辐射功率密度(假定此时  $G_{\max}(\lambda)$  为120)

$(\theta, \varphi)$	$r/m$			
	500	1000	1500	2000
$(207^\circ, -12^\circ)$	0	0	0	0
$(208^\circ, -13^\circ)$	0	0	0	0
$(209^\circ, -14^\circ)$	0	0	0	0
$(210^\circ, -15^\circ)$	0	0	0	0
$(211^\circ, -16^\circ)$	0	0	0	0
$(212^\circ, -17^\circ)$	0	0	0	0
$(213^\circ, -18^\circ)$	0	0	0	0

在仿真时刻为1s时, 天线波束指向角为 $(30^\circ, 30^\circ)$ 。由表3可见, 在0.5s时刻的辐射功率较大的一些点由于与1s时的天线波束中心偏离了较大的角度, 天线增益大幅度衰减, 功率密度降低到了0, 即没有功率辐射到这些点。

## 5 结束语

本文系统分析了天线辐射功率的时间和空间分布的影响因素, 在此基础上推导出了对其进行仿真的方法和步骤, 是对解决天线仿真中经常出现的参数重复设置, 相互制约导致仿真信号失真的问题的一个尝试。本文所论述的方法已应用到某型模拟训练器中, 实际应用证明可行。要建立完善的模型, 还要经过实践的不断检验和在此基础上的反复修正。

## 参考文献:

- [1] 李云刚, 等. 电磁环境仿真中雷达天线的数学建模[J]. 航天电子对抗, 2003(5): 27 - 31.
- [2] 王国玉, 等. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 国防工业出版社, 2004.
- [3] [美] David L Adamy 著, 吴汉平, 等译. 电子战建模与仿真导论[M]. 电子工业出版社, 2004.
- [4] [美] Merrill I Skolnik 主编, 王军, 等译. 雷达手册(第2版)[M]. 电子工业出版社, 2003.
- [5] 李勇, 等. MATLAB 辅助现代工程数学信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.



## [作者简介]

张志伟(1981 -), 男(汉族), 河北秦皇岛人, 在读硕士研究生, 海军工程大学电子工程学院, 主要研究方向为电子信息战战场环境仿真。

金国庆(1967 -), 男(汉族), 浙江义乌人, 高级工程师, 海军工程大学电子工程学院电子信息战研究室, 主要研究方向为雷达侦察情报处理。

朱强华(1966 -), 男(汉族), 江苏泰州人, 硕士, 海军工程大学电子工程学院电子信息战研究室主任, 主要研究方向为电子信息战理论和装备。

董颖辉(1971 -), 女(汉族), 陕西户县人, 硕士, 海军工程大学电子工程学院对潜通信教研室讲师, 主要研究方向为天线理论和天线设计。