

图像工程与嵌入式零树小波图像编码

雷英杰¹, 华继学¹, 周创明¹, 肖正²

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:介绍了图像工程领域里新颖有效的嵌入式零树小波 EZW 图像编码方法。首先叙述从子带编码到小波编码的演变历程,包括正交小波的多分辨率分析和滤波器组等内容。接着阐述小波分解图像方法和 EZW 编码原理。重点对 EZW 算法进行了详细分析和描述,包括零树及其扫描方法,以及 EZW 算法的实现步骤。最后对上述内容进行了概括。

关键词:图像工程;图像处理;图像编码;小波图像编码

中图分类号:TP393 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)01-0055-06

图像工程从低到高的3个层次——图像处理、图像分析、图理解,组成一个有机的联合体,它们在从图像获取信息方面都起着重要的作用。但目前对高层技术的研究和应用相对比较少。图理解作为图像工程的高层,其重点是在图像分析的基础上,结合人工智能技术和认知理论,进一步研究图像中各目标的性质和它们之间的相互联系,并理解图像内容的含义且解释原来的客观场景,从而指导和规划行动。如果说图像分析主要是以观察者为中心研究客观世界(主要研究可观察到的事物),那么图理解在一定程度上是以客观世界为中心,借助知识、经验等来把握整个客观世界(包括没有直接观察到的事物)。

图理解是要用计算机系统来帮助解释图像的含义,从而实现利用图像信息解释客观世界。它要确定为完成某个视觉任务需要通过图像采集从客观世界获取哪些信息,需要通过图像处理和分析从图像中提取哪些信息,以及利用哪些信息继续加工以获得需要的解释。它要研究理解能力的数学模型,并通过对数学模型的程序化,实现理解能力的计算机模拟^[1]。

小波变换是图像处理领域一种十分有效的数学方法。小波变换技术在20世纪90年代初期已经比较成熟,因此从那时起就开始出现各种新颖的小波图像编码方法,譬如嵌入式零树小波 EZW (Embedded Zerotree Wavelet) 编码方法,以及在 EZW 算法基础上改进的 SPIHT 和 EBCOT 等。由于 EZW 算法的开拓给后来者带来很大的启发,它是一种有效而且计算简单的图像压缩技术,因此本文将集中进行讨论。

1 从子带编码到小波编码

1.1 子带编码

子带编码 SBC (Subband Coding) 的基本概念是把信号的频率分成几个子带,然后对每个子带分别进行编码,并根据每个子带的重要性分配不同的位数来表示数据。由于这个优点,20世纪80年代中期子带编码开始在图像编码中使用。1986年 Woods 等人曾经使用一维正交镜像滤波器组 QMF (Quadrature Mirror Filterbanks) 把信号的频带分解成4个相等的子带,如图1所示。图1(a)表示分解方法,图1(b)表示其相应的频谱。图中的符号 $\downarrow 2$ 表示频带降低 $1/2$, HH 表示频率最高的子带, LL 表示频率最低子带。这个过程可以重复,直到符合应用要求为止。这样的滤波器组称为分解滤波器树。

收稿日期:2003-06-19

基金项目:国家教育部高等学校骨干教师资助计划项目(GG-810-90039-1003),国防科技预研基金(00J6.6.1 DZ0103)

作者简介:雷英杰(1956-),男,陕西渭南人,教授,博士生导师,主要从事智能信息处理与模式识别等研究。

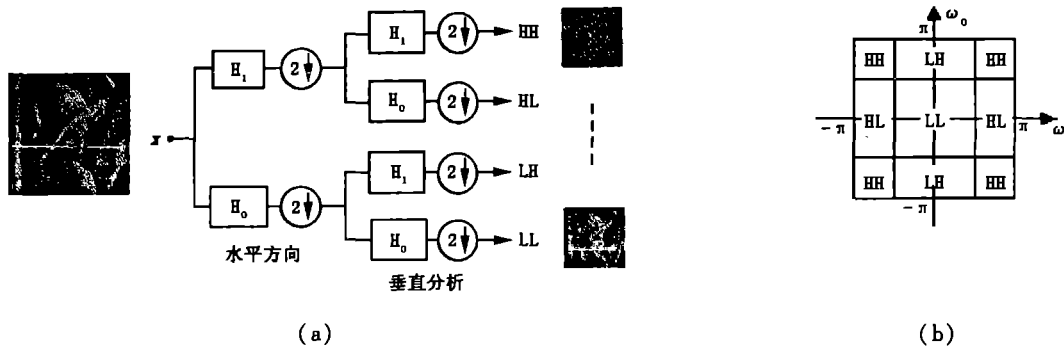


图1 Lena 图像的子带编码

1.2 多分辨率分析

Mallat 于 1988 年在构造正交小波基时提出了多分辨率分析 (Multiresolution Analysis) 的概念, 从空间上形象地说明了小波的多分辨率的特性, 提出了正交小波的构造方法和快速算法, 叫做 Mallat 算法。根据 Mallat 和 Meyer 等人的理论, 使用一级小波分解方法将原始图像首先分解为粗糙图像 1 和细节图像 1。

如果在一级分解之后继续进行分析, 这种分解过程叫做多分辨率分析, 实际上就是多级小波分解的概念。使用多级小波分解可以得到更多的分辨率不同的图像, 这些图像叫做多分辨率图像 (Multiresolution Images)。在多分辨率分解图像中, 粗糙图像 1 的分辨率是原始图像的 $1/4$, 粗糙图像 2 的分辨率是粗糙图像 1 的 $1/4$, 等等。

1.3 滤波器组与多分辨率

为了压缩语音数据, 1976 年 Croisier, Esteban 和 Galand 介绍了一种可逆滤波器组 (Invertible Filter bank), 使用滤波和子采样 (Subsampling) 的方法用来把离散信号 $f(n)$ 分解成大小相等的两种信号, 并且使用叫做共轭镜像滤波器 (Conjugate Mirror filters) 的一种特殊滤波器来取消信号的混叠 (Aliasing), 这样可从子采样的信号中重构原始信号 $f(n)$ 。这个发现使人们花费了 10 多年的努力来开发一套完整的滤波器组理论。

正交小波的多分辨率理论 (multiresolution theory) 已经证明, 任何共轭镜像滤波器都可以用来刻画一种小波 $\Psi(t)$, 它能够生成 $L^2(\mathbb{R})$ 实数空间中的正交基, 而且快速离散小波变换可以使用串联这些共轭镜像滤波器来实现。连续小波理论和离散滤波器组之间的等效性揭示了数字信号处理和谐波分析之间的关系, 这就促使人们一直在致力于从事解决它们之间关系问题的研究。

1.4 从子带编码到小波编码

在小波编码技术 WC (Wavelet Coding) 的旗下, 人们提出了许多与子带编码技术非常类似和密切相关的方法。小波编码技术中的一个重要的问题是如何构造正交的小波基函数系列。正交的小波基函数系列可以在连续的时间域中构造, 但如何在离散的时间域中构造是一个现实问题。

在众多的研究者中, Inrid Daubechies 在离散的时间域中构造小波基函数方面做出了杰出的贡献。她于 1988 年^[1]最先揭示了小波变换和滤波器组之间的内在关系; 离散时间滤波器 (Discrete - Time Filters) 或者 QMF 可以被叠代, 并在某一种匀称 (Regularity, 可粗略理解为函数的平滑性) 条件下可获得连续小波。这是一个非常实际和极其有用的发现, 这就意味着可使用有限冲击响应 FIR (Finite Impulse Response) 的离散时间滤波器来执行小波分解, 使用相同的滤波器可重构小波分解之后的信号。由此可见, 早期开发的子带编码实际上是一种小波变换。

在 Daubechies 揭示小波变换和滤波器组之间的关系之前, 小波技术在图像编码中并不流行。从 20 世纪 90 年代开始, Cohen, Daubechies 和 Feauveau, 简称为 CDF, 系统地开发了构造紧支持双正交小波 (Compactly Supported Biorthogonal Wavelets) 的方法^[2], 以及其他学者提出的各种算法, 使小波技术在图像编码中得到广泛的应用。

在构造小波和开发小波变换算法中, 比利时学者 Wim Sweldens 在 1994 年的博士论文中首先提出了 “The Lifting Scheme”^[3], 简称 Lifting/lifting (提升法)。该方法的基本思想是首先把信号分成偶数号样本和奇数号样本, 根据信号本身的相关性, 奇数号样本使用偶数号样本进行预测, 由预测丢失的信号叫做信号的细节信息, 然后调整偶数号样本以保存原始信号的粗糙信息和细节信息。该方法保留了小波分析的特性 (时间频

率局部化和快速计算),通过放弃小波的平移和缩放,并且放弃用傅立叶分析来构造小波,从而解决了非无限信号或者非周期信号的小波和小波变换问题,也使计算速度得到很大的提高,因此被称为第二代小波,现在也成为制定 JPEG2000 标准中小波部分的基础。

2 小波分解图像方法

使用小波变换把图像分解成各种子带的方法有很多种^[4]。例如,均匀分解(uniform decomposition),非均匀分解(non-uniform decomposition),八带分解(octave-band decomposition)和小波包分解(wavelet-packet decomposition),根据不同类型的图像选择不同小波的自适应小波分解(adaptive wavelet decomposition)等。其中,八带分解是使用最广泛的一种分解方法。这种分解方法属于非均匀频带分割方法,它把低频部分分解成比较窄的频带,而对每一级分解的高频部分不再进一步分解。图 2 表示图像的数据分解。

3 EZW 编码原理

1992 年 Lewis 和 Knowles 首先介绍了一种树形数据结构来表示小波变换的系数^[5]。1993 年 Shapiro 把这种树形数据结构叫做“零树(Zerotree)”,并且开发了一个效率很高的算法用于熵编码,他的这种算法叫做嵌入式零树小波 EZW 算法^[6]。EZW 主要用于与小波变换有关的二维信号的编码,但不局限于二维信号。

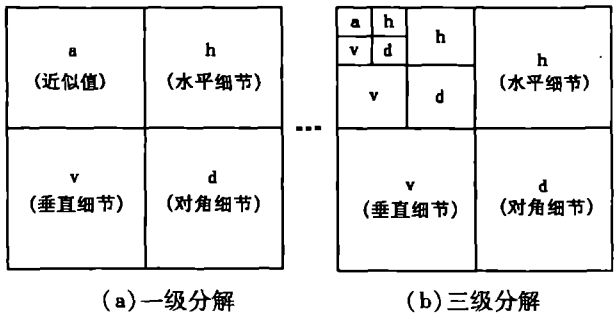


图 2 图像的数据分解

嵌入式零树小波中的“小波”是指该算法以离散小波变换为基础,以大的小波变换系数比小的小波变换系数更重要,以及高频子带中的小系数可以被抛弃的事实为背景。“零树”是指小波变换系数之间的一种数据结构,因为离散小波变换是一种多分辨率的分解方法,每一级分解都会产生表示图像比较粗糙的低频图像和比较精细的高频图像的小波系数,在同一方向和相同空间位置上的所有小波系数之间的关系可用一棵树的形式表示,如果树根和它的子孙的小波系数的绝对值小于某个给定的阈值 T(Threshold),那么这棵树就叫做零树。“嵌入”是渐进编码技术(Progressive Encoding)的另一种说法,其含义是指一幅图像可以分解成一幅低分辨率图像和分辨率由低到高的表示图像细节的许多子图像,图像合成的过程与分解的过程相反,使用子图像生成许多分辨率不同的图像。EZW 编码指的是,按照用户对图像分辨率的要求,编码器可以进行多次编码,每进行一次编码,阈值降低 1/2,水平和垂直方向上的图像分辨率各提高 1 倍。编码从最低分辨率图像开始扫描,每当遇到幅度大于阈值的正系数就用符号 P 表示,幅度小于阈值的系数用符号 N 表示,树根节点上的系数幅度小于阈值而树枝中有大于阈值的非零树用符号 Z 表示,零树用符号 T 表示。

小波图像编码的一般结构如图 3 所示,它主要由小波变换(Wavelet Transform)、量化(Quantization)和熵编码(Entropy Encoding)等 3 个模块组成。小波变换不损失数据,是 EZW 算法具有渐进特性的基础;量化模块对数据会产生损失,数据损失的程 度取决于量化阈值的大小,EZW 算法指的就是这个模块的算法。它的输出是符号集 {P, N, T, Z, 0, 1} 中的一系列符号;熵编码模块对每个输入数据值精确地确定它的概率,并根据这些概率生成一个合适的代码,使输出的码流(Code Stream)小于输入的码流。

4 EZW 算法

EZW 算法是多分辨率图像的一种编码方法。对整幅图像编码一次,生成一种分辨率图像,编码一次叫做一遍扫描。每一遍扫描大致包含 3 个步骤:设置阈值、每个小波系数与阈值进行比较、量化系数和重新排序。在扫描过程中需要维护两种表,一种是小波系数的符号表,另一种是量化表。



图 3 EZW 算法结构

4.1 零树

回顾二维小波变换的计算过程,不难想象各级子图像中的系数是相关的。在说明零树的概念之前,需要对小波变换得到的系数、名称和符号加以说明。现以3级分解的离散小波变换为例,图4表示Lena图像使用3级滤波器组做小波变换输出的子图像(Sub Image)。需要注意的是,分解之后的图像的名称在文献上有很多种,除了子图像之外,有的叫做子带图像(Sub-Band Image),有的把子图像进一步区分为高频子图像和低频子图像,或者粗糙图像和精细图像等名称。这些名称从不同的角度反映图像的特性,在不同的场合下使用可以收到异曲同工的效果。图中的数字1,2和3表示分解的级数编号,LL3表示第3级的低频子图像,在这个例子中,它是分辨率最低的子图像,HL3表示第3级分解在水平方向上的子图像,LH3表示第3级分解在垂直方向上的子图像,HH3表示第3级分解在对角线方向上的子图像,其他的组合符号依此类推。由于低频子图像的系数要比高频子图像的系数大,零树编码技术就是利用这个事实来设计编码/解码过程中每一级使用的量化器。

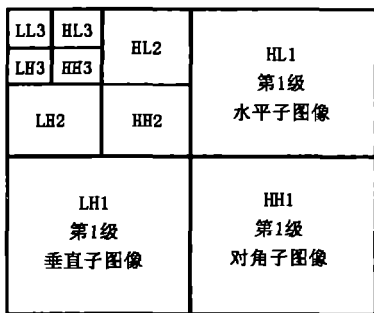


图4 三级分解图像

各级子图像中的系数之间的关系可以用树的形式描述。如图5(a)所示,最低频率的子图像在左上角,最高频率的子图像在右下角,由同一方向和相同空间位置上的所有小波系数组成一棵树。例如,从第3级子图像HH3、第2级子图像HH2到第1级子图像HH1的相应位置上的所有系数构成一棵下降树。按箭头所指的方向,各级系数的名称分别用祖系数、父系数、子系数和孙系数来称呼。举例来说,LL3的系数为{63}, HH2和HH1中的系数分别为{3}和{4, 6, 3, -2},由这些系数构成的树如图5(b)所示。如果把{63}指定为父系数,{3}就称为子系数,而{4, 6, 3, -2}中的4个系数就称为孙系数。

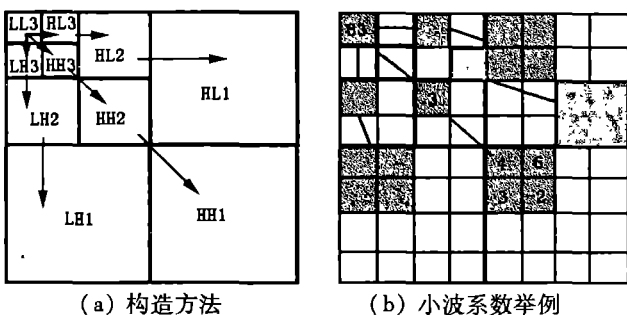


图5 EZW编码树的构造

现在再来看零树的概念。为便于比较,把图5(b)所示的两棵树用图6(a)、6(b)表示。假设编码时开始的阈值 $T_0 = 32$,由于63比32大,这样的树叫做非零树,如图6(a)所示。假设下一次编码时的阈值 $T_1 = 16$,把-13当作父系数,它的幅度比16小,而它的所有4个子系数的幅度都比16小,这样的树叫做零树,系数-13叫做零树根,如图6(b)所示。根据以上的分析,零树的定义可概括为一句话:子孙系数都为零的树。定义零树的重要意义在于,如果一棵树是零树,那么这棵树就可以用一个预先定义的符号来代表整棵树,从而提高了压缩比。顺便要指出的是,小波图像系数结构的形式不只是上面介绍的一种,它也可能不是最好的一种。

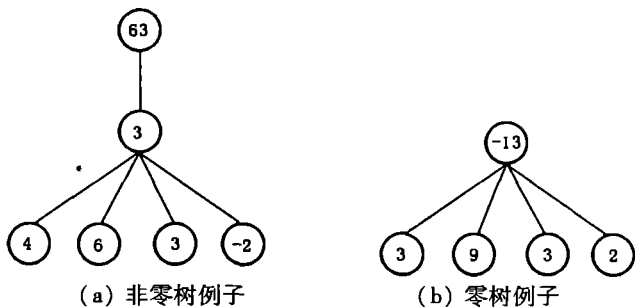


图6 非零树与零树的概念

4.2 扫描方法

EZW算法对小波系数进行编码的次序叫做扫描。扫描子图像系数的方法有两种,一种叫做光栅扫描(Raster Scan),另一种叫做迂回扫描(Morton Scan)

4.3 算法描述

EZW算法可归纳为下面几个主要步骤。

1) 阈值 T 的选择开始时的阈值 T_0 通常按下式估算

$$T_0 = 2^{\lfloor \log_2(\max(|X_i|)) \rfloor}$$

其中, $\max(\cdot)$ 表示最大的系数值, X_i 表示小波变换分解到第 i 级时的系数。以后每扫描一次,阈值减少一半。

2) 给系数分配符号 使用EZW算法编码图像时每一次扫描需要执行两种扫描,并产生两种输出的符号。第一种扫描叫做主扫描(Dominant Pass),它的任务是把小波系数 X 与阈值 T 进行比较,然后指定一个符号,我们把这种符号叫做系数符号,对整幅图像扫描之后产生系数符号序列。第二种扫描叫做辅扫描

(Subordinate Pass),其任务是对主扫描取出的带有符号 P 或者 N 的系数进行量化,产生代表对应量化值的符号“0”和“1”,我们把这种符号称为量化符号。

主扫描:扫描每一个系数以产生系数符号。如果系数幅度大于阈值 T 且为正数,输出符号 P(Positive);如果系数幅度小于阈值 T 且为负数,输出符号 N(Negative);如果系数是零树根,输出 T(Zerotree);如果系数幅度小于阈值但树中有大于阈值的子孙系数,输出孤立零符号 Z(Isolated Zero)。

为了确定一个系数是否为零树根 T 或者是孤立零 Z ,需要对整个 4 叉树进行扫描,这样就需要花费时间。此外,为了保护已经被标识为零树的所有系数,需要跟踪它们,这就意味需要存储空间来保存。最后要把绝对值大于阈值的系数取出来,并在图像系数相应的位置上填入一个标记或者零,这样做可防止对它们再编码。

辅扫描:量化带符号 P 和 N 的系数。在量化系数之前要构造量化器。量化器的输入间隔为 $[T_{i-1}, 2T_{i-1}]$,该间隔被 $1.5 T_{i-1} - 1$ 分成两个部分: $[T_{i-1}, 1.5T_{i-1})$ 和 $[1.5T_{i-1}, 2T_{i-1})$,量化间隔为 $0.5 T_{i-1}$,其中 i 为第 i 次编码。量化器的输出为量化符号“0”和“1”,“0”对应量化值为 $(1.5 - 0.25) T_{i-1}$,“1”对应量化值为 $(1.5 + 0.25) T_{i-1}$ 。

例如,第一次扫描时的阈值 $T_0 = 32$,量化器的间隔就为 $[32, 64]$,该间隔 $[32, 64]$ 被 48 分成两个相等的部分: $[32, 48]$ 和 $[48, 64]$,量化间隔为 16。对系数进行量化时,如果幅度在 $[32, 48]$ 的范围里,该系数的量化值为“0”,对应的量化值为 $(1.5 - 0.25) T_0 = 40$;如果幅度在 $[48, 64]$ 的范围里,该系数的量化符号为“1”,它的量化值为 $(1.5 + 0.25) T_0 = 56$ 。

5 结束语

近年来,以 EZW 为基础的各种改进算法及其在图像工程中的应用研究呈现越趋活跃的发展态势。其中重要的一点是针对 EZW 算法本身实现效率或其他相关问题进行改进的一系列改进算法的研究,如在 EZW 算法基础上改进的 SPIHT 和 EBCOT 等,使之得到进一步完善。

参考文献:

- [1] Daubechies I. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1988, 41 (11) : 909 - 996.
- [2] Cohen A, Daubechies I, Feauveau J C. Biorthogonal Bases of Compactly Supported wavelets [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1992, 45 (5) : 485 - 560.
- [3] Sweldens W. The Lifting Scheme: A Construction Of Second Generation Wavelets[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1998, 29 (2) : 511 - 546.
- [4] Jain A K. Fundamentals of Digital Image Processing[M]. New Jersey:Prentice - Hall, Englewood Cliffs, 1999.
- [5] Lewis A S, Knowles G. Image Compression Using the 2 - D Wavelet Transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1 (2) : 244 - 250.
- [6] Shapiro J M. Embedded Image Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41 (12) : 3445 - 3462.
- [7] Said A, Pearlman W. A new, Fast and Efficient Image Codec Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6 (3) : 243 - 250.
- [8] 雷英杰. 图像工程的基本概念和理论基础 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2003,4 (4) :60 - 64.
- [9] 雷英杰. 典型并行算法的实现性能分析 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2003,4 (5) :67 - 70 .

(编辑:田新华)

Image Engineering with Embedded Zero - tree Wavelet Image Coding

LEI Ying - jie¹, HUA Ji - xue¹, ZHOU Chuang - ming¹, XIAO Zheng²

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China; 2. College of Aero-

space and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: An image coding method is introduced in the field of image engineering which is a new and efficient image coding technique i. e. Embedded zero - tree wavelet EZW image coding. First, the course of evolvement from sub - band coding to wavelet coding, including multi - resolution analysis and filter bank on orthonormal wavelet bases is described, and then the wavelet technique for image decomposition and the fundamentals on EZW coding. Emphasis on detailed analysis and illustration of EZW algorithm is given, including zero - tree, scanning fashion and the approach in implementing steps. Finally contents mentioned above are summarized.

Key words: image engineering; image processing; image code; wavelet image coding

(上接第 38 页)

参考文献:

- [1] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉:华中工学院出版社,1990.
- [2] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1992.
- [3] 王莲芬,许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京:中国人民大学出版社,1990.
- [4] 申卯兴,薛西锋,张小水. 灰色关联分析中分辨系数的选取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2003,4(1):68-70.
- [5] 罗小明,杨惠鹄. 灰色综合评判模型[J]. 系统工程与电子技术,1994,(9):18-25.
- [6] 王鹤磊. 一种雷达系统效能的综合评估模型[J]. 系统工程与电子技术,2001,(3):40-42.
- [7] 郑孝勇,姚景顺. 基于模糊层次分析法的雷达效能评估方法[J]. 现代雷达,2002,(2):7-9.
- [8] 张丽艳,郑晋军. 一种雷达系统效能的评估模型[J]. 系统工程与电子技术,1997,(4):41-44.

(编辑:田新华)

Grey Comprehensive Evaluation for Effectiveness of Radar System

HUANG Jian - xin, DU Wen - yu, ZHANG Zhi - feng

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: To counter the relativity, incomparability and grayness of radar system performance targets, by applying the theory of gray relational grade (GRG) system, a model based on the GRG - AHP is proposed to evaluate the effectiveness of radar system. Through analyzing the comparison of four types of alert radar with this evaluation model, the result shows that this model method is more effective than the fuzzy comprehensive evaluation method.

Key words: radar system; GRG - AHP; effectiveness evaluation