

卫星图象光谱信号快速分类法

(加) S.谢林 和 A.史密斯

摘要: 如果使用资源卫星图象对地物类型自动填图的方法要成为生产工具,就需要精确、迅速又经济地进行分类处理。通常所采用的最精确的分类方案,诸如最大似然判别法则,需要大量的计算。用传统的计算方法处理单帧资源卫星图象的费用很贵,阻碍了在生产的规模上对图象进行分类。设计了一个新的查表的方案,用最大似然高斯判别法则进行分类,减少了计算时间。通过对多光谱扫描器四个波段的光谱强度的高度相关性计算,把一个图象中特异的强度矢量的数目从1,600万个可能的矢量减少到为数千个。从而使得把特异的矢量和地物分类一起储存在计算机的磁心储存器中成为可能。这种查表寻找方案使资源卫星图象的信号分类比通常的方法至少快一个数量级而不损害其精确度,也不要求添加特定的计算机硬件。

序 言

使用遥感数据和最大似然判别法则,对地物类型自动分类和填图的方法已经成为确实可行的工具(Fu, Landgrebe and Phillips, 1969)。假如光谱数据对于不同的类别来说是按多元正态分布的,则最大似然判别法则就减少为一组二次判别式或者最近距离法则(Fukunaga, 1972; Sebestyen, 1960)。遗憾的是如果谁想要处理一个完整的资源卫星图象,计算工作量的庞大令人望而生畏。一个资源卫星的图象由大约750万个分辨象素组成——由2400条扫描线,每条扫描线由3200个象素组成。为了用二次判别式来制作一张10个信号的分类地图,对每个象素必须作出200次乘法运算。结果按照我们自己的DEC SYSTEM 10KL计算机,处理过程的时间是20个小时左右。

这种设备所化费的高昂成本和缓慢的周转速度使之不能成为一项生产工具。此外,用户与分类程序互相配合的能力大大地受到损害。为了提供一个自动的分类法,用户必须判断:
(1) 在光谱信号的基础上,有哪些地物类型可以区分开来。(2) 有哪些实地校验场所可以用来估计二次判别式的统计参数。这些重要的判别通常由尝试的方法作出,那就是要大大地加强交互系统。

由于这些原因,曾经采用了许多不同的手段来加速分类过程。曾经研制了特定的计算机硬件,比如象通用电气公司的IMAGE 100 (Ecnomy et al, 1974) 和 DAS (Foyce and Perdleton, 1974) 以及 MIDAS (Kriegler et al, 1973), 来并行地执行多次重复的分类运算。在计算机软件方面,用各种简化的假设和概算来简化其数学的判别。比如与每种类别的空间强度伴生的多元正态分布具有相同的协方差矩阵,判别法则就简化为一组一次判别式。进一步的简化方法,诸如假设在矩阵内的强度分布是均匀的,可以减少颇多的计算工作 (Goodenough and Shlien, 1974; Shlien and Goodenough, 1974)。可惜,尽管很多近似

计算方法使分类程序加速了一个数量级，但是其成果的精确度却降低了一个相应的因数。

尽管二次判别式的速度缓慢，但是在遥感中，它还是一种最广泛地使用的分类方案 (Chang and Richardson, 1972; NASA, 1973; Wacker, 1972)。关于多光谱扫描器数据处理中正态密度分布的设想已被克兰，马礼勒和理查森 (1972) 所证实是适用的。因此我们的近似计算方法至今仍然保持使用二次判别式，但是为了减少计算工作，采用了查表的方式。在遥感中应用查表来减少计算工作量的自动分类方法的想法并不是新鲜的概念。爱泼拉、海姆克和埃文斯 (1972) 曾经使用这种手段使计算速度改善了30倍。奥特尔、杜召和科伯利 (1972) 根据多元正态设想，探讨了这一算法的多种变更方案，使之相等于最大似然法则。要使用他们的技术，必须将特征空间划分得便于最大限度减少计算时间和储存量，而同时又足够近似于最大似然法则。爱泼拉 (1974) 的改良的查表方案消除了他原来使用的计算方法的局限性。

本文论述了另一个查表方案，——采用地址指示器和杂散地址的方法 (Knuth, 1972; Anble and Knuth, 1974)。正象爱泼拉所设计的方案，它全然是一个软件，并且几乎能够在任何中型计算机系统中执行。这个方案已在我们的 DEC SYSTEM 10KL 的分时系统中执行。而且允许我们非常经济地用二次判别式对大部分资源卫星图帧进行分类，而一点儿也不损害分辨本领。

在本文的其余部分中，对查表计算方法作了更详细的论述并探讨其成功的原因。

查 表 分 类 程 序

根据资源卫星多光谱扫描器四个光谱的反射率，分类程序把一个给定的象素指定为一个特定的地物类型。在这四个光谱波段里，光强矢量 (X_1, X_2, X_3, X_4) 代表象素的光谱强度。同时可把光谱分类程序看作是函数 F ，它把光强矢量 (X_1, X_2, X_3, X_4) ，填图为地物类型 K_1, K_2, \dots, K_n

$$F(X_1, X_2, X_3, X_4) = K_i \quad (1)$$

假设这四个波段的光强矢量分布得象一个多变量正态密度函数，其平均的光强矢量为 M^i ，协方差矩阵为 C^i ，运用最大似然判别法则，就获得下列判别算法 (Van Trees, 1968)。求出方程式 (2) 的几个四元判别式值 (似然函数的对数) $L(1), L(2), \dots, L(N)$ 。

$$L(i) = -\frac{1}{2}y_1Q^i_{11}y_1 - y_1Q^i_{12}y_2 - \frac{1}{2}y_2Q^i_{22}y_2 - y_1Q^i_{13}y_3 - y_2Q^i_{23}y_3 - \frac{1}{2}y_3Q^i_{33}y_3 - y_1Q^i_{14}y_4 - y_2Q^i_{24}y_4 - y_3Q^i_{34}y_4 - \frac{1}{2}y_4Q^i_{44}y_4 - \ln(4\pi^2|C^i|^{\frac{1}{2}}) \quad (2)$$

其中 Q^i 是反协方差矩阵， $|C^i|$ 是类别 i 的协方差矩阵的因子，而 (y_1, y_2, y_3, y_4) 是光强矢量，与该类别的平均光强矢量 M^i 略有偏离。如果最大的 $L(j)$ 超过一个任意选择的阈值，则将该光强矢量指定为类别 K_j ，否则无法作出判别。因为 $L(i)$ 必须求出每个类别和象素的值，所以运算的数目就变得很大。

这一快速分类程序利用查表来节省矢量的分类，从而减少计算工作量。如果再次遇到同一个的矢量，这种分类法就不需要计算而很快地找到答案。这样，这种分类程序吸取了它以往的经验教训。

图象经过二个过程进行分类（一种过程已由Shlien, 1975, 论述了）。在第一个过程中根据图象里的矢量取样来制作查考表。查考表里包含了在该样品中所找到的特异的光强矢量，但是在这个阶段，矢量还没有进行分类。在第二个过程中，图象按一个个象素，一行行象素，逐个逐行进行分类。这一快速分类程序检验各个光强矢量并判断在查考表里是否有这个矢量，如果找到了，则进一步判断是否在以前已经分类过（图 1 的流程图）。如果没有找到该矢量或尚未分类，就使用标准分类程序。答案回来后就插进邻近于表格中其他矢量的位置中去。另一方面，如果矢量以前已经分类过了，就越过标准分类程序，直接从查考表中马上获得其答案。

虽然快速分类程序的概念是简单的，但是储存和选取一个特定的矢量的方法并不清楚。资源卫星的多光谱扫描器把光谱反射率转换为64个灰阶（NASA 1972）。因为每个光谱的灰阶基本上是独立的，在理论上有着 64^4 或者1,600万个可能的矢量。然而由于光强分布的不均匀和各光谱之间的相关性，在一张资源卫星图象里找到的特异的矢量数目只占整个可能矢量数很小一部分。

为了估算出实际的矢量数，我们对 E-1372-17164图帧的一个广大区域取样100,000个象素。按图帧顶部每五条扫描线进行了扫描，并对每第五个象素进行取样。制成一张四维矩形图。根据这一矩形图计算出由最少数目的光强矢量所能反映的图区百分比，标绘在图 2

中。这个光强矢量的数目是惊人地少。图区的一半以上可由500个矢量形成。2500个矢量可反映百分之九十五的图区。对剩下的百分之五图区却需要另外数千个矢量。在其他资源卫星图帧上发现了同样的状况（Shlien and Goodenough, 1974）

因为我们没有对图片上的每个象素进行取样，特异光强矢量的真实数目或许会更大些。在图 3 中，把特异光强矢量的总数及其累积率标绘为这个地区扫描线的函数。正如所预料的，累积率开始很高，但是很快地就平坦下来。到第 200 行扫描线，矢量的总数达到6000，而在每 100 个矢量中只有 2 个是没有遇到过的矢量。

这一实例研究至今已经表明，只要用 3000 个矢量就能把查考表分类系统掌管得很好。大多数的计算机系统可在其磁心储存器里储存整个表格，从而可以实施一种分类系统。分类程序的速度决定性地取决于检索查考表的时间。计算机最终的节省费用直接正比于在查考表中寻找一个矢量所需要的时间和用通常方法进行分类所需要的时间之间的

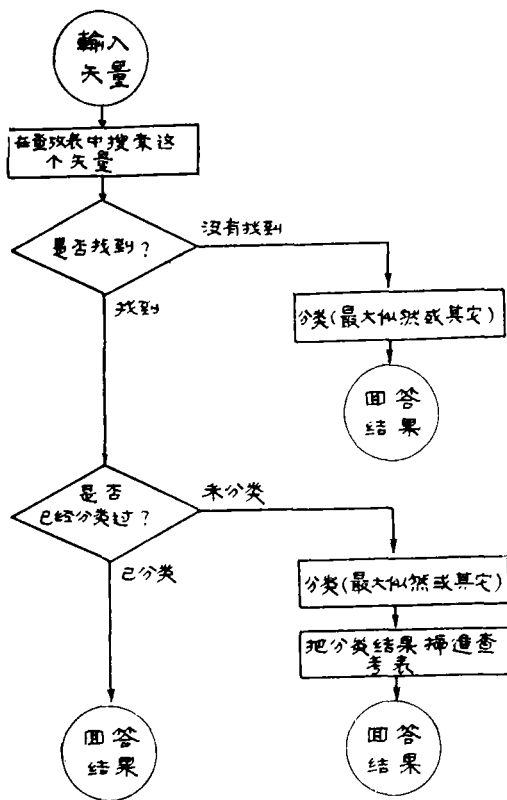


图 1 快速分类程序的流程图

比例。

用快速分类程序处理一个资源卫星图象的大面积所需的计算时间是三个项目之和。第一项是制成一张包含了大多数特异矢量的查考表所需要的时间。使用现代的杂散方法，比如象爱泼拉和克内斯（1974）所提供的那种方法，可以很迅速地制作一张合适的查考表。例如取样100,000个像素制作一张6000个矢量的查考表仅用一分钟的计算时间。

第二项是用通常分类程序对特异矢量进行分类所需的时间。在大多数场合下，此项目也不是很重要。用我们的计算机系统，发现二次判别式的速度大约是一个类别、一个矢量需要一毫秒。6000个矢量可在一分钟的处理时间内分为10个类别。

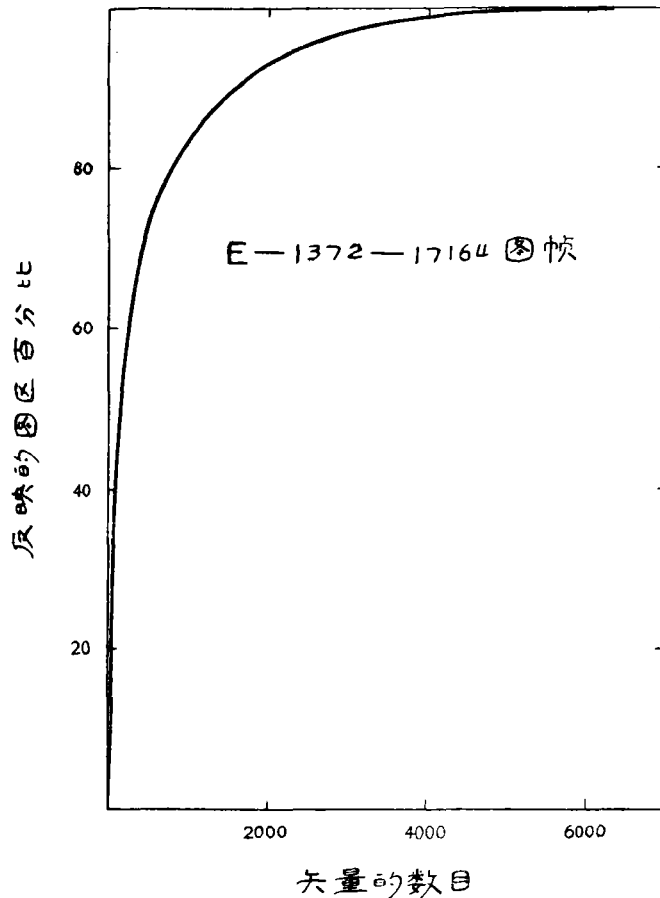


图2 在一个资源卫星图象中由4、5、6、7波段的特异光强矢量所反映的图区百分比的最大值。这是通过在E-1372-17164图帧顶部平均地取样100,000个像素而求出的

第三项，也是最重要的一项，取决于以下四个因素：

f 在查考表中寻找一个特定的矢量或者查明矢量不在表中所需的时间。

q 用最大似然法则（或者其他方法）计算法对一个特定的矢量进行分类的时间。

n 要进行处理的像素总数。

m 要处理的其光强矢量可在查考表中查到的象素的数目。

在查考表已经制成的条件下，处理这些n个象素所需的时间， $T(n)$ ，由下式表示：

$$T(n) = fn + q(n - m) \quad (3)$$

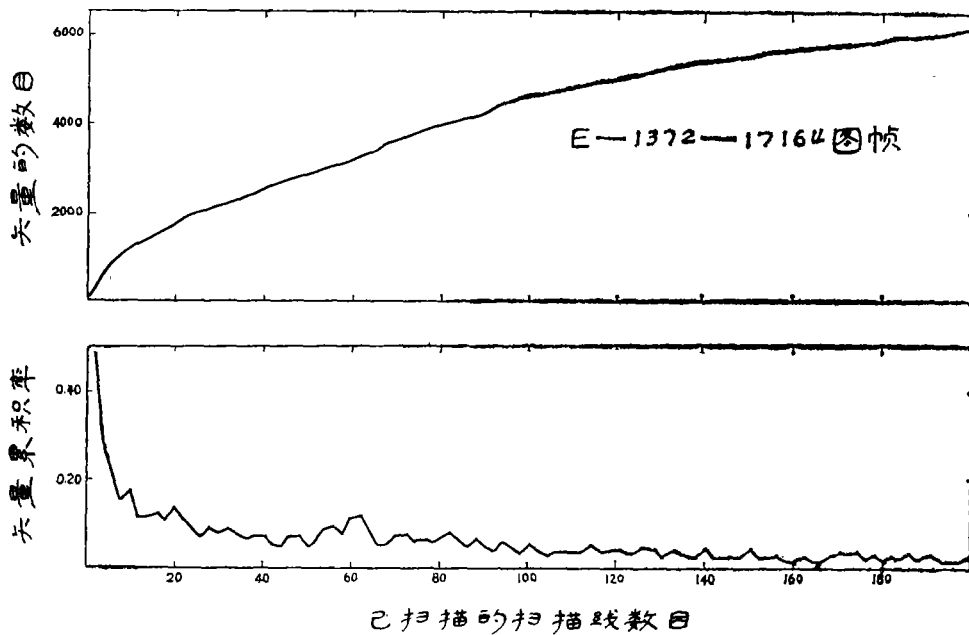


图3 上图：特异光强矢量的累积数与扫描过的扫描线数目(每条扫描线500个象素)
 下图：特异光强矢量的累积率与已经扫描过的扫描线数目。所涉及地区与图2相同

我们使用这一快速分类程序的经验至今已经表明在不到10分钟的计算时间内能处理100万个象素。

为了减少检索矢量的时间， f ，到最低限度，同时尽可能地保持查考表的简洁，用PDP 10汇编程序语言，对这快速分类程序编码。鉴于在写作本文时受到我们的分时系统储存容量的限制，在查考表制成后没有用杂散的方法。在附录里简要地叙述了这种查考表的结构和检索方法。

在Shlien (1975) 的文献里，叙述了并用Fortran 语言子程序阐明了用单过程杂散法执行快速分类程序的情况。

为了评价快速分类程序的性能，研究了下述实例。把资源卫星E-1372-17164图帧感兴趣的部分分类成七种信号并显示在我们多光谱分析显象器上 (Goodenough et al, 1974)。在我们的显示系统中，每条显示数据的扫描线限于558个象素。查考表就是由这些象素制作而成的，对这些象素应进行分类，以便确保查考表贮有那个地区中的全部光强矢量。首先，我们使用标准分类程序对图象进行分类。计算时间是每条扫描线为3½秒。然后用快速分类程序和查考表对该地区进行分类。在这一过程中，查考表中的全部光强矢量在起始时尚未分类。快速分类程序在第一次遇到一个特异矢量时，需要用标准分类程序对它分类并把结果插进查考表。如图4、图5所示，起先几行扫描线的计算时间是最长的，但是逐渐地接近每

条扫描线100毫秒的速度（第66行扫描线上的尖峰是由于传感器的失灵）。最后，对同一地区再次用快速分类程序运算一次。这次查考表中所有矢量已经进行分类，所以计算时间完全取决于查考表的检索时间。图象分类的速度是每秒10条扫描线。检索时间， f ，是每个象素0.2毫秒。因此，如果把制作查考表的时间略去不计，则对七种信号的分类来说计算时间减少了35倍。

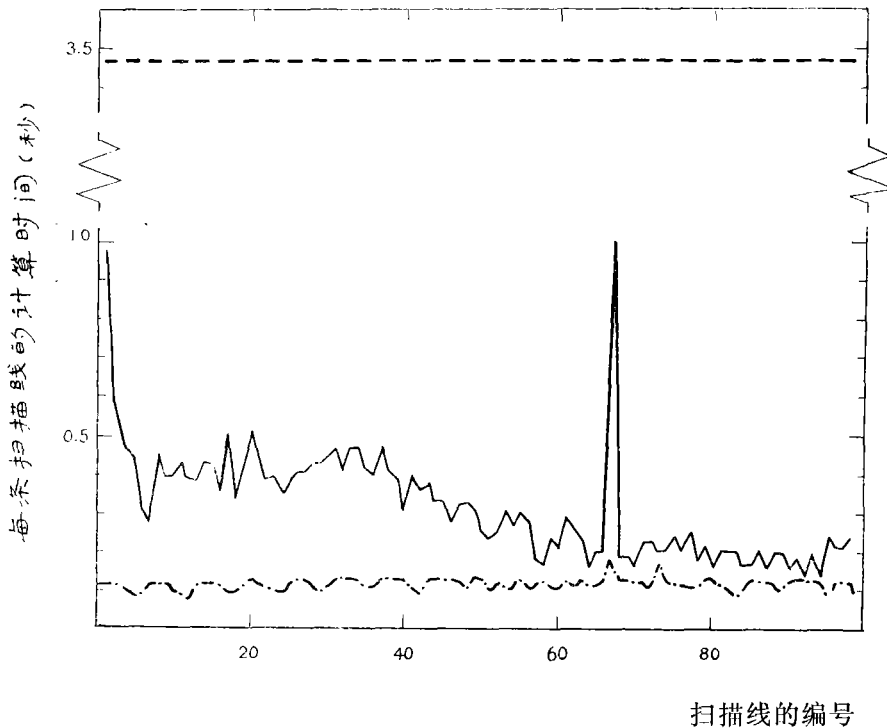


图4 在PDP-10计算机上分类时，资源卫星多光谱传感器数据的每条扫描线（558个象素）所需的时间与已经分类的扫描线数目的关系。短线是七种信号的标准最大似然分类程序。实线是快速分类程序（开始时全部矢量未曾分类过）。虚线是快速分类程序（全部矢量已分类过）

结 论

在多变量正态分布的假设下，最大似然判别法则是资源卫星图象按分类填图的一种已经被确认的方法，但是通常计算机的算法相当缓慢。利用这一查考表可以排除不必要的计算，并且资源卫星图象的分类能够加快一个数量级。本文的主要结论可分下列几点：

(1) 若在一个资源卫星的多光谱扫描器图象的四个波段里，把光强矢量定义为一个最小分辨单元的光谱反射率，则在一个图象中大概有10,000个特异矢量，只有其中的一小部分才比较频繁地出现。

(2) 把这些矢量储存到一个查考表里，并且利用这一查考表来节省每个矢量的分类时间，就能够消除不必要的计算。

(3) 在我们的PDP-KL-10计算机上用汇编语言程序和一个合适的查表机构，能够

把查考表压缩到5K磁心中去，并且在0.2毫秒里存取一个特定的光强矢量。这就使它能在不到一个小时的计算处理时间内不用特别的硬件对整幅资源卫星的图帧进行分类，而一点也不损害其分辨本领。

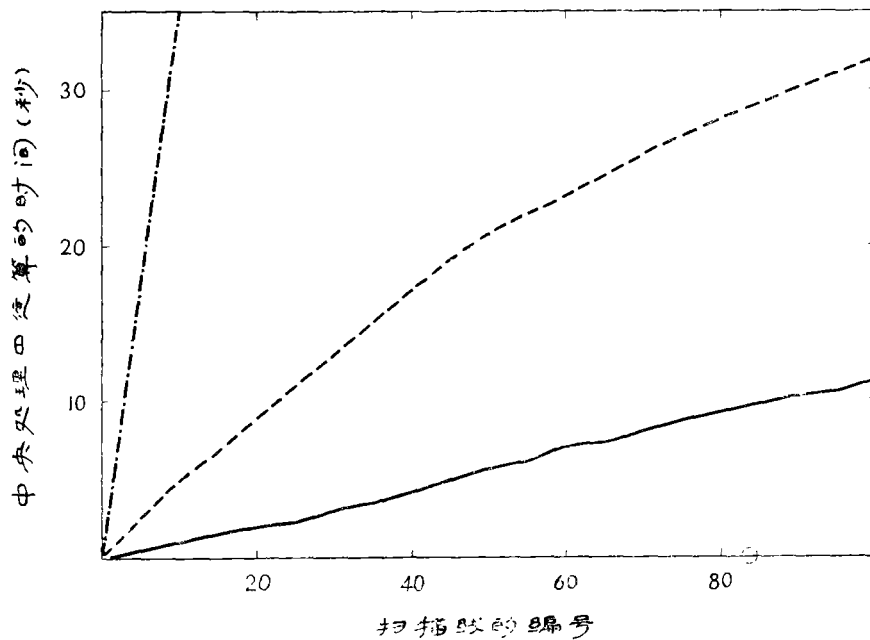


图5 PDP—10中央处理器的运算时间总额与资源卫星多光谱传感器数据上的扫描线（每条扫描线为558个象素）编号之间的关系。点线表示标准分类程序。短虚线表示快速分类程序，开始时全部矢量未分类过。连续线表示快速分类程序，全部矢量已分类过。

附 录

为了更好地运算，储存的矢量阵列的确切结构以及相应的刷新和检索算法必须设计得能与一个特定的计算机结构格式和运算设施匹配。本文所叙述的系统是用来满足下列条件的：

(1) 分类程序必须在一个具有36位字长的DEC PDP—10计算机上运算，在TOPS—10分时监控器下运算。

(2) 矢量阵列必须存入磁心存储器。即图象的一个部分的分类（也许是一条扫描线的某一段）必须在没有输入和输出（例如参考磁盘储存的数据库中的矢量）的条件下进行。经常的输入和输出会显著地延长运算时间，同时在分时设施里也会使这一工作处在不利的状态。因为它会连续不断地要求计算机的外围设备为它服务。

(3) 在一个分时设施里进行有效的运算时，交换设施限制了矢量阵列的规模为10K字磁心存储器（最好是6K）。这就使程序的长短限定在10K字范围内，使它与其他在计算机上初期也必须运算的程序不相上下。就当前而言，分类任务的交互特性使得大型、脱机、批量运算的系统变得不太需要了。

在这一快速分类程序中储存矢量的数据库由两个阵列组成。这两个阵列是指示器阵列和矢量阵列。它们由一个程序构成，该程序取样和储存光强的矢量，这些矢量组成一个后来再进行分类的一个特定的图区。

相应于资源卫星多光谱传感器 4、5、6、7 波段的四维光强矢量被分成二个部分。头两个组份作为一个直接指数存入指示器阵列。每个指示器储存矢量阵列的一部分，而矢量阵列包含了具有同样前两个组份的全部矢量的数据。然后，在这个部分中，按顺序检索所需要的确切矢量（即一个具有同样的后者两个组份的入口）。为了对那个矢量或者对一个表示还没有进行分类的编码进行相应的分类，也要把该分类储存在这一位置中。请注意只把矢量的后者两个组份储存起来，大大地节约了储存容量。因此一个18位半个字已足够用来储存附有分类编码的矢量。

我们采用了这种方案，而不是采用杂散方法，从而进一步节约了储存容量。“快速分类程序”算法的其余部分相对地与机器无关，请参见图 1。

张文成译自《环境的遥感》1975年第四期 张义纲校