



## [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200580004941.1

[43] 公开日 2007 年 2 月 21 日

[11] 公开号 CN 1918598A

[22] 申请日 2005.2.8

[21] 申请号 200580004941.1

[30] 优先权

[32] 2004.2.14 [33] GB [31] 0403331.2

[86] 国际申请 PCT/IB2005/050497 2005.2.8

[87] 国际公布 WO2005/078658 英 2005.8.25

[85] 进入国家阶段日期 2006.8.14

[71] 申请人 皇家飞利浦电子股份有限公司

地址 荷兰艾恩德霍芬

[72] 发明人 D·K·罗伯茨

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 张雪梅 刘杰

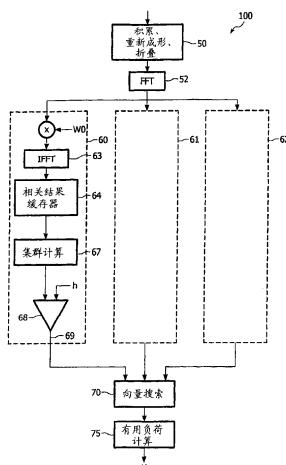
权利要求书 2 页 说明书 12 页 附图 7 页

## [54] 发明名称

水印检测

## [57] 摘要

检测器(100)检测信息信号中水印的存在。把信息信号与预期的水印(Wi)，对于信息信号相对于水印的多个相对位置的每个位置，进行相关，以得到一组相关结果(64)。对于结果(64)的集群计算一个度量值，诸如均方值。把度量值与表示代表相关峰的存在的集群的阈值 h 进行比较。度量值可以是对于在结果缓存器(64)中的每个位置上被形成的集群被计算的。替换地，度量值可以仅仅是对于被识别为可能的相关峰的集群被计算的。



1. 一种检测信息信号中的水印的方法，包括：

通过把信息信号与水印( $W_i$ )，对于信息信号相对于水印的多个相对位置的每个位置，进行相关而得到一组相关结果(64)；

计算基于从总的结果组选择的结果(64)的集群(102)的度量值；以及

把计算的度量值与表示代表相关峰的集群(102)的集群阈值( $h$ )进行比较。

2. 按照权利要求1的方法，其中度量值是对于从总的结果组(64)中选择的多个不同的集群计算的。

3. 按照权利要求2的方法，其中度量值是对于集中于在该组相关结果(64)中的每个相关结果上的结果的集群计算的。

4. 按照前述权利要求的任一项的方法，其中度量值是相关结果的集群(102)的均方值。

5. 按照前述权利要求的任一项的方法，其中集群阈值是根据集群(102)的大小而变化的。

6. 按照前述权利要求的任一项的方法，还包括初始步骤：识别可能代表相关峰的至少一个相关结果集群以及对于每个识别的集群只执行计算度量值的步骤。

7. 按照权利要求6的方法，其中识别相关结果集群的步骤包括确定在该组中超过检测阈值的所有相关结果，和然后确定这些相关结果中的哪些是处在互相预定的距离内的位置。

8. 用于执行按照前述权利要求的任一项的方法的软件。

9. 一种用于检测信息信号中的水印的水印检测器，包括：

用于通过把信息信号与水印( $W_i$ )，对于信息信号相对于水印的多个相对位置的每个位置，进行相关而得到一组相关结果(64)的装置；

用于计算基于从总的结果组选择的结果(64)的集群(102)的度量值的装置；以及

用于把计算的度量值与表示代表相关峰的集群的集群阈值( $h$ )进行比较的装置。

10. 按照权利要求9的水印检测器，还包括用于执行按照权利要求2-7的方法的任一项步骤的装置。

11. 按照权利要求 9 或 10 的水印检测器，其中用于得到一组相关结果的装置、用于计算度量值的装置和用于比较计算的度量值的装置包括被安排来执行用于完成这些功能的软件的处理器。

12. 用于呈现信息信号的设备，包括用于根据在信息信号中有效水印的存在而禁止该设备的操作的装置，其中该设备包括按照权利要求 9-11 的任一项的水印检测器。

---

## 水印检测

本发明涉及检测信息信号中的水印。

加水印是一种把某种标签加到信息信号的技术。在其上加上水印的信息信号代表数据文件、静止图像、视频、音频或任何其它种类的媒体内容。标签在信息信号被分发之前嵌入到信息信号。标签通常以在正常条件下不可感知的方式被加上，以使得它不恶化信息信号，例如被加到音频文件上的水印在正常收听条件下应当是听不见的。然而，水印应当是足够鲁棒的，即使在信息信号在传输期间经受诸如编码或压缩、调制等的正常的处理时仍旧是可检测的。

许多加水印方案利用相关作为检测技术，在测试中的信号与包含已知的水印的信号进行相关。在这些系统中，水印的存在由相关的结果中一个或多个峰表示。Ton Kalker 等，“A Video Watermarking System for Broadcast Monitoring”，Proceedings of the SPIE, Bellingham, Virginia vol. 3657, 25 January 1999, pp. 103-112 的论文描述用于检测广播视频内容中水印的存在的方案。在该论文中，把最终得到的相关峰的高度与阈值进行比较，以决定音频视频内容是否加水印。阈值被选择为使得假阳性概率（当事实上音频视频未加水印时声称存在水印的概率）适当地低。典型的阈值是  $5\sigma$ （即，相关结果的标准偏差的 5 倍）。

在大多数应用中，加水印的内容将经受在水印被嵌入在内容中的点与水印的位置被检测出的点之间的各种处理操作。内容处理的通常的例子是有损压缩，诸如 MPEG 编码。典型地，处理的影响是降低通常预期在水印检测处理期间出现的相关峰。因此，当试图检测经受这样的处理的内容中的水印时，基于寻找相关峰的水印检测技术的性能大大地降低。

本发明寻求提供一种检测信息信号中的水印的改进的方法。

因此，本发明的第一方面提供一种检测信息信号中的水印的方法，包括：

通过把信息信号与水印，对于信息信号相对于水印的多个相对位置的每个位置，进行相关而得到一组相关结果；

计算基于从总的结果组选择的结果的集群的一个度量值；以及  
把计算的度量值与表示代表相关峰的集群的集群阈值进行比较。

已经发现，当试图通过使用相关技术来检测水印时许多信息信号在分发期间的经历会具有模糊相关峰的影响。通过使用基于相关结果的集群的度量值而不是孤立的结果，有可能识别加水印的内容，即使在处理或其它攻击已恶化水印的质量，减小相关峰的高度到低于通常被用于检测的阈值的情形下。这改进水印检测器的性能和水印有用负荷的提取。

检测在一项媒体内容中仅仅很弱地存在的水印的能力也提供允许水印更弱地嵌入在内容中的任选项，由此减小其在潜在的欺诈方的监视下的可视度，或减小其在正常的观看条件下的感知度。

一个优选的度量值是集群的均方值，已经发现它提供相关峰的存在的特别好的指示。

可以对于从总的结果组中选择的多个不同的集群中的每个计算度量值。实际上，可以对于在相关结果组中其中心为每个相关结果的结果的集群计算度量值。然而，更有效的方法使用识别可能代表相关峰的候选的结果集群的初始级。度量值只需要对于候选的集群进行计算，由此大大地减小计算量。

这里描述的功能可以以软件、硬件或它们的组合被实施。因此，本发明的另一个方面提供用于执行方法的软件。将会看到，软件可以在设备的工作期限期间的任意点被安装在主机设备。软件可被存储在电子存储器装置、硬盘、光盘或其它机器可读的存储媒体。软件可以作为在机器可读的媒体上的计算机程序产品被传递或它可以经由网络连接被直接下载到设备。

本发明的另外的方面提供用于执行该方法的任何步骤的水印检测器，和用于呈现响应于水印检测器的输出的信息信号的设备。

虽然所描述的实施例引用处理图像或视频信号（包括数字影院内容），但将会看到，信息信号可以是代表音频或任何其它种类的媒体内容的数据。

现在参照附图仅仅作为例子描述本发明的实施例，其中：

图 1 显示把水印嵌入到一项内容中的已知方法；

图 2 显示用于检测在一项内容中水印的存在的第一装置；

图 3 显示在检测方法中使用的相关结果的表和结果的集群的选择；

图 4 显示相关结果数据的曲线图；

图 5 和 6 显示说明检测器和方法的性能的曲线图；

图 7 显示用于检测在一项内容中水印的存在的第二装置；

图 8 和 9 显示相关结果数据的表和识别重大的集群的处理过程；

图 10 显示用于呈现体现水印检测器的内容的设备。

作为基础知识，并且为了理解本发明，参照图 1 概略地描述嵌入水印的处理过程。水印图案  $w(K)$  通过使用一个或多个基本水印图案  $w$  被构建。在数据的有用负荷要由水印载送的场合下，使用多个基本水印图案。水印图案  $w(K)$  根据要被嵌入的有用负荷——多比特代码  $K$ ——进行选择。代码通过选择多个基本图案  $w$  和把它们互相偏移特定的距离和方向而被代表。组合的水印图案  $w(K)$  代表可以加到内容的噪声图案。水印图案  $w(K)$  具有  $M \times M$  比特的大小，以及典型地比起该项内容小得多。因此， $M \times M$  图案被重复(贴片)14 成较大的图案，它匹配于内容数据的格式。在图像的情形下，图案  $w(K)$  被拼贴 14 成使得它等于它将与其组合的图像的大小。

内容信号被接收和被缓存 16。在内容信号中的局部活动性  $\lambda(X)$  的测量在每个像素位置处被得到 18。这提供对于加性噪声的可视度的测量，以及该测量被使用来缩放水印图案  $W(K)$ 。这防止水印在内容中是感知的，诸如在图像中相等亮度的区域。总的缩放因子  $s$  在乘法器 22 处加到水印上，以及这确定水印的总的强度。 $s$  的选择是在所需要的鲁棒程度与对于水印应当可感知的程度的要求之间的折衷。最后，水印信号  $W(K)$  被加到 24 内容信号。最终得到的、具有被嵌入在其中的水印的信号然后经受作为该内容的正常分布的一部分的各种不同的处理步骤。

图 2 显示水印检测器 100 的示意图。水印检测器接收可以加水印的内容。在以下的说明，该内容被假设为图像或视频内容。水印检测

可以对于各个帧或对于帧的组被执行。积累的帧被划分成大小  $M \times M$  的块 (例如  $M=128$ )，然后被折叠到大小  $M \times M$  的缓存器。这些初始步骤被显示为块 50。在缓存器中的数据然后经受快速傅立叶变换 52。检测处理的下一个步骤确定在缓存器中保存的数据中水印的存在。为了检测缓存器是否包括特定的水印图案  $W$ ，将缓存器内容和预期的水印图案进行相关。由于内容数据可包括多个水印图案，显示多个并行的支路 60, 61, 62，每个支路执行与基本水印图案  $W_0, W_1, W_2$  之一的相关。其中的一个支路被详细地显示。同时计算对于基本图案  $W_i$  的所有可能的位移向量的相关值。基本水印图案  $W_i$  ( $i=0, 1, 2$ ) 在与数据信号进行相关之前经受快速傅立叶变换 (FFT)。该组相关值然后经受逆快速傅立叶变换 63。相关运算的全部细节在 US 6,505,223 B1 中描述。

在相关运算中使用的傅立叶系数是具有实部与虚部的复数，代表幅度和相位。已经发现，如果摒弃幅度信息而只考虑相位，则检测器的可靠度被大大地提高。可以在按点乘法以后和在逆傅立叶变换 63 之前执行幅度归一化运算。归一化电路的运算包括把每个系数按点除以它的幅度。这个总的检测技术被称为仅仅对称相位的匹配滤波 (SPOMF)。

来自以上的处理的该组相关结果被存储在缓存器 64 中。小的示例组的相关结果被显示于图 3. 加水印的内容通过相关结果数据中存在峰来表示。通过观看曲线图形式的相关结果，可以更好了解峰的形状，相关值被画出为在曲线图的基线以上的高度，如图 4 所示。在本例中，该峰是具有 -4.23 的数值的相对较陡峭的峰。

该组相关结果被检查，以便识别可能是由于在内容数据中存在水印而出现的峰。水印的存在可以由陡峭的孤立的、很大高度的峰来表示，虽然大多数孤立的峰趋于代表由于噪声造成的虚假匹配。更可能地，在内容分发期间的先前处理操作将使得由于水印引起的相关峰在相关结果中几个相邻的位置上变得模糊不清。

在下一个步骤，集群计算单元 67 从在缓存器中的该组结果形成结果集群，并且计算集群的均方值。作为例子，通过围绕被标记为 101 的结果取一系列结果，形成一个这样的集群。这里，集群是  $3 \times 3$  方块的结果 102。计算该集群的均方值。通过围绕点 103 取  $3 \times 3$  的结果集群，形成另一个集群。计算该集群的均方值。方法继续进行，直至已

对于缓存器中每个可能的结果集群计算均方值为止。集群的大小 C 可以事先设置，或它可以在使用中变化。在生成该组相关结果 64 时，使用循环相关。因此，在底部行中的项是与顶部行中的项相邻的。查看图 3，以及取 -3.8172 的顶部行数值作为集群的中心，这个集群中的其它结果是从缓存器的顶部行、第二行和底部行取得的。

在比较器 68 处把该组均方值与阈值 h 进行比较。如果均方值之一超过阈值，则该集群被取为代表相关峰的位置。通过把阈值设置为适当的数值，几乎不可能一个以上的均方值将超过阈值。然而，如果找到多个峰，则应当根据它们的由于水印造成概率，在多个峰之间作出判决。输出 69 表示相关峰的位置。

现在描述均方技术的简化的数学例子。考虑通过使用前面描述的 SPOMF 技术已把一项内容与感兴趣的水印图案进行相关以及已把相关结果存储在缓存器 64 中。缓存器 64 中的相关结果是相关值的向量 y，每个元素相应于水印图案相对于内容信号的不同的（循环）移位。为了简明起见，假设 y 是一维的，虽然将会看到，对于大多数内容，缓存器 64 中的相关结果将是相应于水平和垂直方向的移位的二维矩阵。在未加水印材料 ( $\bar{H}_w$ ) 的情形下，已经显示，y 的元素是近似独立的白色高斯噪声 (WGN)。在加水印材料 ( $H_w$ ) 的情形下，实验示出，缓存器结果再次是近似高斯噪声，但还存在峰。假设相关峰的形式包括 C 个相邻的点，以使得峰的形状向量  $S_r$  是：

$$S_r(k) = A \sum_{i=0}^{C-1} a_i \delta(k - r - i) \quad (1)$$

峰的形状由参数的向量控制：

$$a = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{C-1}]^T$$

使用峰形状的这个具体模型的动力在于，它比起假设特定的数学形状（例如，正弦函数）是更通用的，以及它使用关于峰是在大的缓存器内的小的特性的知识，即，峰的程度 C 比起缓存器 y 的长度 N 小得多。

检测准则是的点最高集群，而不是单个最高点。判决法则是：

$$\sum_{i=0}^{C-1} y^2(\hat{r} + i) > h \Rightarrow H_w \text{ else } \bar{H}_w$$

其中  $\hat{t}$  被选择为在  $y$  中的、具有  $C$  个相邻点的最高集群的位置：

$$\hat{t} = \arg \max_k \left[ \sum_{i=0}^{C-1} y^2(k+i) \right]$$

这代表：

- 寻找在相关存储器结果 64 中拥有最高的平方高度和值的  $C$  点的集群的位置  $\hat{t}$ ；

- 把在位置  $\hat{t}$  处的平方高度的和值与阈值  $h$  进行比较。

对于达到  $\alpha$  的想要的假阳性概率所需要的检测阈值  $h$  可以如下地找出。首先，定义  $\chi$  为：

$$\chi(k) = \sum_{i=0}^{C-1} y^2(k+i)$$

对于未加水印的内容， $\chi$  具有阶数  $C$  的 Chi-平方概率分布阶数。 $h$  的适当的值可以通过使用 Chi-平方分布的表从下式被确定：

$$\Pr[\chi < h] = (1-\alpha)^{\frac{1}{N}}$$

这个检测准则和阈值设置在附录中推导。

不同的集群大小 ( $C$ ) 导致 Chi-平方分布的不同的阶数，这将导致不同的阈值设置。

图 5 显示对于水印检测所需要的阈值  $h$ ，这是对于使用由 Philips 开发的 WarteCast™ 加水印方案的 PAL 视频所需要的。阈值  $h$  提供与单个  $5\sigma$  峰相同的虚警率。图 6 显示为了水印被声称为存在的而对于这  $C$  个点的需要的最小 RMS 高度。可以看到，对于非常扩散的峰形状，即，大的  $C$  点集群，水印可以在比起由当前的检测器所需要的  $5\sigma$  电平低得多的峰高度下被检测。

在刚才描述的实施例中，对于结果缓存器 64 中的每个位置计算均方值。有可能通过在集群计算级 67 之前识别可能代表模糊的相关峰的、一个或多个候选的结果集群，而大大地减小计算量。均方值计算然后只施加到这些候选的集群。图 7 显示集群搜索级 65 的添加，以及现在将描述这一点。集群算法形成多个点的集群，其中任意的点的集群可相应于真正的相关峰。算法包括以下步骤：

1. 设置阈值和找出在相关数据中大于这个阈值的所有点。满足

这个准则的所有的点被存储在表--`ptsAboveThresh` 中。建议的阈值是  $3.3\sigma$  ( $\sigma$ =缓存器中的结果的标准偏差)，虽然这可被设置为任何优选值。优选的范围是  $2.5-4\sigma$ 。如果阈值被设置得太低，则不相应于水印的存在的大量的点将被存储在表中。相反，如果阈值被设置得太高，则有相应于有效的、但模糊的峰的点将没有加到表中的风险。

2. 找出具有最高绝对值的点。

3. 形成候选集群，即相关点的集群。候选集群是通过收集不单具有重大的值（大于阈值的值）而且还与至少一个另外的具有重大值的点非常接近的点而形成的。这是如下地达到的：

(i) 从表 `ptsAboveThresh` 中去除第一点，并输入它作为新的集群的第一点  $p$ ；

(ii) 搜索表 `ptsAboveThresh`，寻找处在点  $p$  的距离  $d$  内的点。从表中去除所有这样的点，并把它们加到集群中；

(iii) 取集群中下一个点作为当前的点  $p$ 。重复步骤 (ii)，以便把在表 `ptsAboveThresh` 中的、处在新的点  $p$  的距离  $d$  内的所有点加到集群中；

(iv) 重复步骤 (iii)，直至表 `ptsAboveThresh` 对于集群中的所有的点都被处理为止；

(v) 如果最终得到的集群只包含单个点并且该点不等于在上述的步骤 2 中找到的最高峰，则丢弃这个集群；

(vi) 重复步骤 (i) 到 (v)，直至表 `ptsAboveThresh` 为空为止。

在这个程序过程结束时，在以上步骤 1 中原先进入表 `ptsAboveThresh` 的所有的点或者被：

- 分配给包含来自表 `ptsAboveThresh` 的、接近于它的其它点的集群，或者

- 被丢弃，因为它们没有类似的高度的邻居，所以不是集群的一部分。

集群仅仅允许包括单个点，如果该点具有在相关缓存器中所有的点的最大的绝对值高度的话。这避免陡峭的、非模糊的相关峰被丢弃，但避免代表真正的噪声的其它的孤立的峰被使用。

参照图 8 和 9，图上显示由检测器计算的那种类型的相关数据的某些示例组。图 8 显示对于模糊的峰的一组结果，数值范围为在 -3.8172

与 4.9190 之间。水印可以用负的幅度被嵌入，给出负的相关峰。4.9190 的最高值被显示在方块 130 内。虽然这是低于 5 的典型的检测阈值，但最高值由类似的数值的其它的相关值包围。这表示通过在分发期间处理而被模糊的峰。在上述的程序过程和设置 3.3 的阈值  $T$  和 1 的距离后，可以发现在环 140 内的相关值满足这个准则。在处理工作后，重大值的结果都是互相并靠的。查看图 9 所示的数据，数值的范围在 -3.7368 与 10.7652 之间。应用同一个检测准则，只有一个点 160 超过阈值。这个点的数值明显地超过阈值，因此可被看作为有效的峰。通过检查相邻的数值，可以看到，这代表陡峭的相关峰。

被表示为有用负荷代码  $K$  的嵌入信息例如可以标识版权保持者或内容的说明。在 DVD 复制保护中，允许把材料被标记为‘复制一次’、‘永不复制’、‘无限制’、‘不再复制’等等。图 10 显示用于检索和呈现被存储在诸如光盘、存储器装置或硬盘的存储媒体 200 中的内容信号的设备。内容信号由内容检索单元 201 进行检索。内容信号 202 被加到处理单元 205，它译码数据和使得数据用于呈现 211, 213。内容信号 202 还被加到先前描述的水印检测单元 220。处理单元 205 被安排成使得只允许在信号中检测到预定的水印的情况下处理内容信号。从水印检测单元 220 发送的控制信号 225 通知处理单元：应当允许还是拒绝内容的处理，或把与内容有关的任何复制限制通知处理单元 205。替换地，处理单元 205 可被安排成使得只允许在信号中没有检测到预定的水印的情况下处理内容信号。

在以上的说明中，考虑一组三个水印。然而，将会看到，技术可被应用来在只承载单个水印的内容数据中或在承载任意数目的多个水印的内容数据中寻找相关峰。

在以上的说明中，以及通过参照附图，描述了检测在信息信号中水印的存在的检测器 100。把信息信号与预期的水印  $W_i$  对于信息信号相对于水印的多个相对位置的每个位置进行相关，得到一组相关结果 64。计算结果的集群 64 的均方值。把均方值与表示代表相关峰的存在的集群的阈值  $h$  进行比较。对于在结果缓存器 64 中每个位置处形成的集群计算均方值。替换地，可以只对于被识别为可能的相关峰的集群计算均方值。

## 附录

这节推导先前给出的示例性检测算法，以及描述如何设置检测阈值，以得到想要的假阳性概率。

假设对于加水印的内容 ( $H_w$ )，相关结果是由于水印造成的峰加 WGN。这是通过观察被支持的，除了峰本身以外，在加水印的内容的情形下，相关结果再次为近似高斯分布。然后可以对于检测水印的存在写出下面的假设测试：

$$\overline{H_w} : \quad y = n$$

$$H_w : \quad y = n + s_r$$

其中  $n$  是独立的 WGN 值的长度  $N$  向量以及  $s_r$  是相应于水印相关峰形状的长度  $N$  向量，在相关缓存器内循环移位  $\tau$  个位置。在以后的工作中，假设噪声具有 1 个单位的标准偏差。这是通过在水印检测先前将相关结果归一化而达到的。暂时假设峰形状  $s$  和有用负荷移位  $\tau$  是已知的，在每个假设下的 PDF 为如下。在  $\overline{H_w}$  下， $y$  中的数值是具有 PDF 的纯 WGN：

$$\begin{aligned} p(y|\overline{H_w}) &= \prod_{k=0}^{N-1} (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}y^2(k)\right] \\ &= (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\sum_{k=0}^{N-1} y^2(k)\right] \end{aligned}$$

在  $H_w$  下，缓存器包含峰加 WGN 以及具有 PDF：

$$\begin{aligned} p(y|H_w, s, \tau) &= \prod_{k=0}^{N-1} (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(y(k) - s_r(k))^2\right] \\ &= (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\sum_{k=0}^{N-1} (y(k) - s_r(k))^2\right] \end{aligned} \tag{3}$$

通过使用或然率比值测试将作出在两个假设之间的判决：

$$\text{Likelihood } (y|s, \tau) = \frac{p(y|H_w, s, \tau)}{p(y|\overline{H_w})} > \lambda \Rightarrow H_w \text{ else } \overline{H_w} \tag{4}$$

其中对数或然率比值是：

$$\begin{aligned}
 L(y|s, \tau) &= \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} (y(k) - s_r(k))^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} y^2(k) \right] \\
 &= \exp \left[ \sum_{k=0}^{N-1} y(k) s_r(k) - \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} s_r^2(k) \right]
 \end{aligned} \tag{5}$$

以下的水印相关峰  $s_r$  的模型被假设为：

$$s_r(k) = A \sum_{i=0}^{C-1} a_i \delta(k - \tau - i) \tag{6}$$

峰的形状由参数的向量被控制：

$$\mathbf{a} = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{C-1}]^T$$

实际上，需要根据水印相关点的扩散的程度来使用估计的值，或 C 的数值可以通过使用先前描述的集群检测技术而得到。

把公式 6 代入到公式 5 的对数或然率表示式，给出：

$$\begin{aligned}
 L(y|\mathbf{a}, \tau) &= \exp \left[ \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \left( \sum_{i=0}^{C-1} a_i \delta(k - \tau - i) \right) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \left( \sum_{j=0}^{C-1} a_j \delta(k - \tau - j) \right) \left( \sum_{l=0}^{C-1} a_l \delta(k - \tau - l) \right) \right] \\
 &= \exp \left[ \sum_{i=0}^{C-1} a_i y(\tau + i) - \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{C-1} a_j^2 \right]
 \end{aligned} \tag{7}$$

未知的参数  $(\mathbf{a}, \tau)$  被假设为取得得观察数据  $(y)$  的或然率最大化的数值。首先，相对于峰形状参数的最大化给出：

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L(y|\mathbf{a}, \tau)}{\partial a_m} &= 0 \Rightarrow y(\tau + m) - \frac{1}{2} 2 \hat{a}_m = 0 \\
 \hat{a}_m &= y(\tau + m)
 \end{aligned}$$

即，峰形状估值被取为围绕相应于有用负荷移位的点的相关值缓存器内容，以及或然率比值变为：

$$\hat{L}_{ML}(y|a, \tau) = \frac{\left( \sum_{i=0}^{C-1} a_i y(\tau+i) \right)^2}{2 \sum_{j=0}^{C-1} a_j^2}$$

选择使得或然率最大化的有用负荷移位的估值  $\hat{\tau}$ , 给出:

$$\begin{aligned}\hat{L}_{ML}(y|\tau) &= \exp \left[ \sum_{i=0}^{C-1} y^2(\tau+i) - \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{C-1} y^2(\tau+j) \right] \\ &= \exp \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{C-1} y^2(\tau+i) \right]\end{aligned}\tag{8}$$

选择有用负荷移位的估值  $\hat{\tau}$  以使得这个表示式最大化, 相应于找出在  $y$  上具有  $C$  相邻的点的最高集群的位置:

$$\hat{\tau} = \arg \max_k \left[ \sum_{i=0}^{C-1} y^2(k+i) \right]$$

以及

$$\hat{L}_{ML}(y) = \exp \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{C-1} y^2(\hat{\tau}+i) \right]$$

这寻找点的最高集群, 而不是单个最高点。公式 4 的判决法则变为:

$$\sum_{i=0}^{C-1} y^2(\hat{\tau}+i) > h \Rightarrow H_w \text{ else } \overline{H}_w\tag{9}$$

为得到值  $\alpha$  可接受的低的假阳性概率值的所必须的阈值  $h$  由下式给出:

$$\Pr[\text{False positive}] = \Pr \left[ \sum_{i=0}^{C-1} y^2(\hat{\tau}+i) > h | \overline{H}_w \right] = \alpha\tag{10}$$

在假设  $\overline{H}_w$  下,  $y$  的元素是具有零平均值和单位标准偏差的独立高斯分布。变量  $\chi$  被定义为:

$$\chi(k) = \sum_{i=0}^{C-1} y^2(k+i)$$

所以也具有阶数  $C$  的 Chi-平方分布。通过使用这个符号表示法, 公式 10 变为:

$$\begin{aligned}1 - \Pr[\chi(k) < h, \forall k] &= \alpha \\ \Rightarrow 1 - (\Pr[\chi < h])^N &= \alpha \\ \Rightarrow \Pr[\chi < h] &= (1 - \alpha)^{\frac{1}{N}}\end{aligned}$$

由此，可以经由 Chi-平方分布的表确定  $h$  的适当的数值。

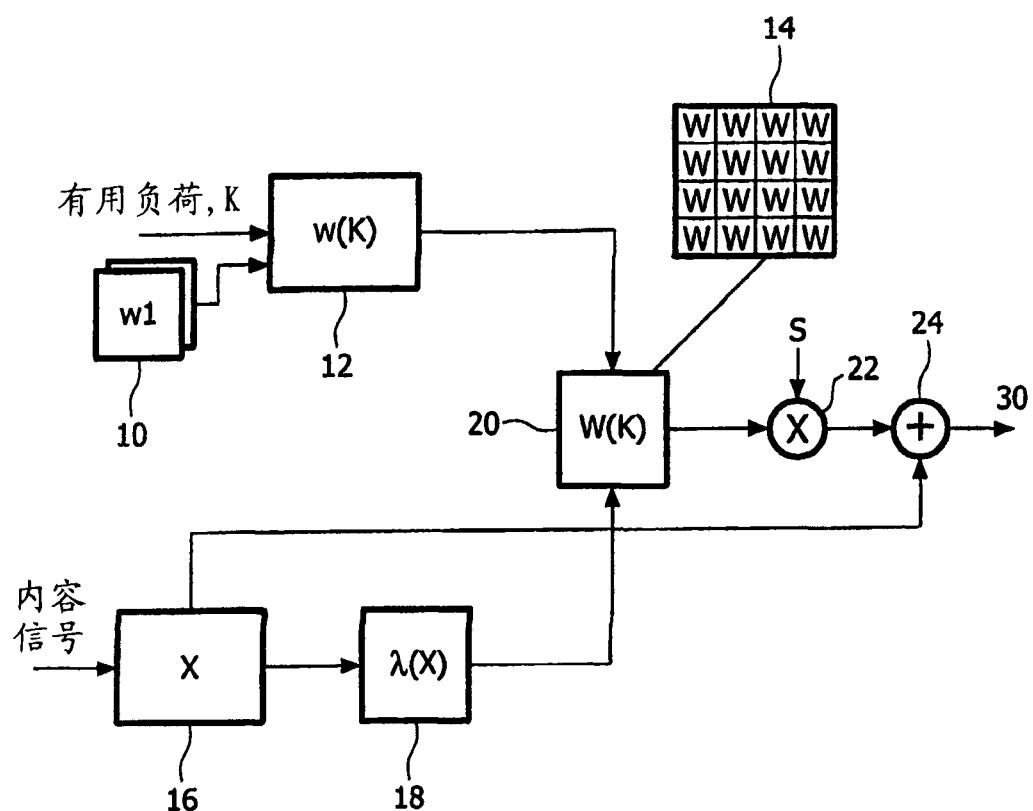


图 1

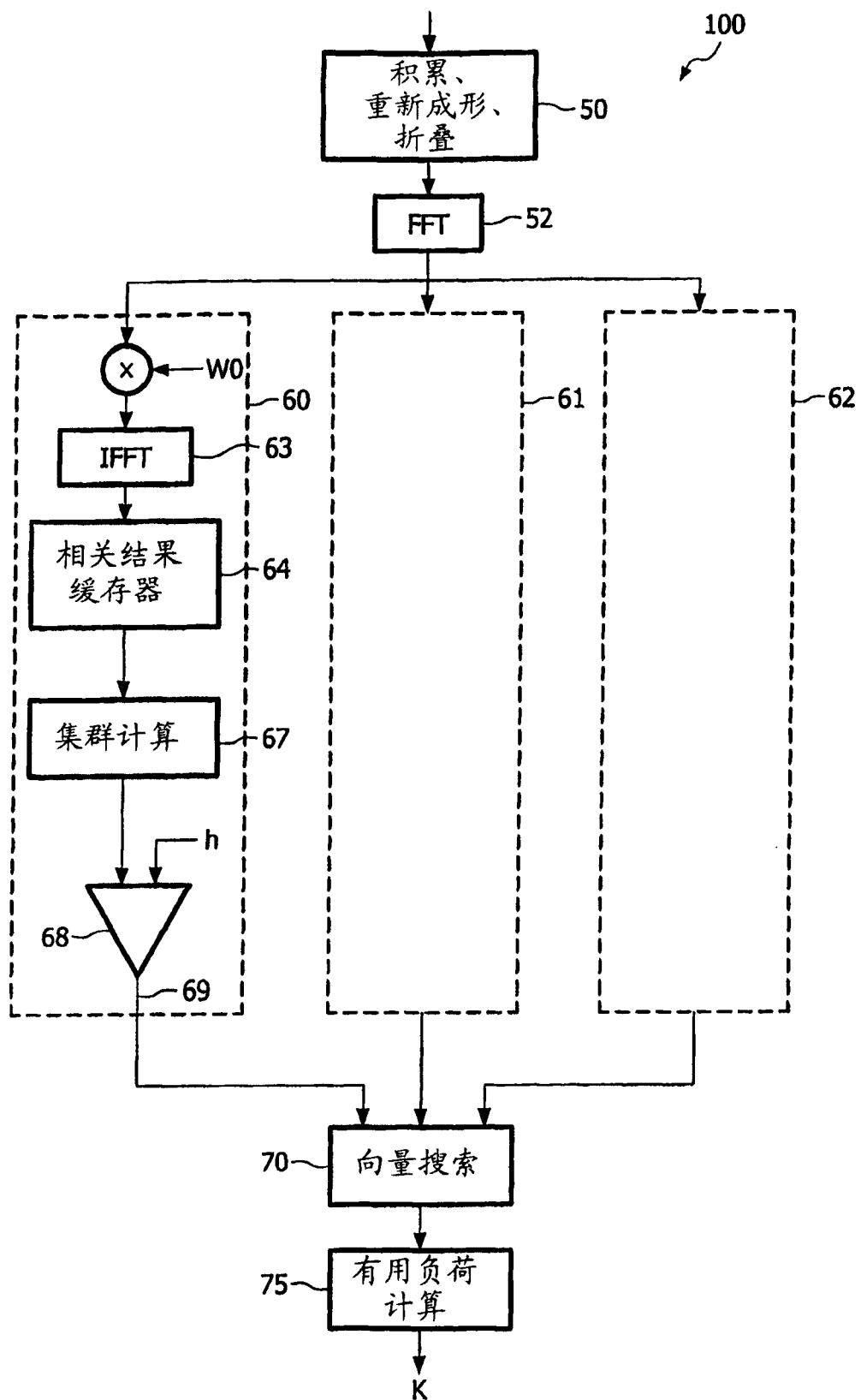


图 2

101	102	103					
1.5374	-1.0894	-1.0414	-0.7068	-3.8172	0.0258	3.8432	
1.6173	-1.2352	-0.3060	-2.3445	-3.4377	-0.9221	0.5022	
-2.6396	0.9311	4.2915	4.4842	4.7005	2.8471	-1.0316	
-1.4806	-1.7463	3.6366	4.9190	4.6754	1.1515	0.5831	
1.6518	-1.5449	-0.7832	-2.3342	-2.0166	-0.5394	1.3519	
2.4447	1.8766	0.2752	-2.5537	-1.8379	-2.4692	0.9730	
0.6230	0.3602	0.8597	1.1619	0.5720	1.0094	-0.4520	

图 3

峰值高度 : -4.23

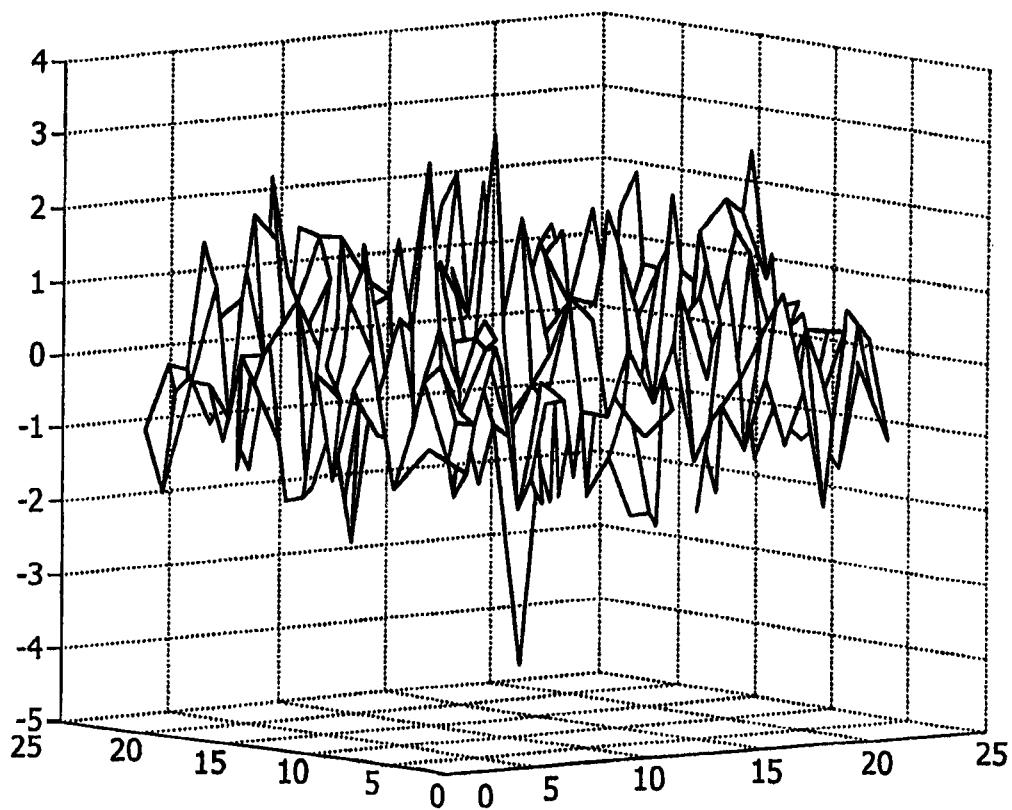


图 4

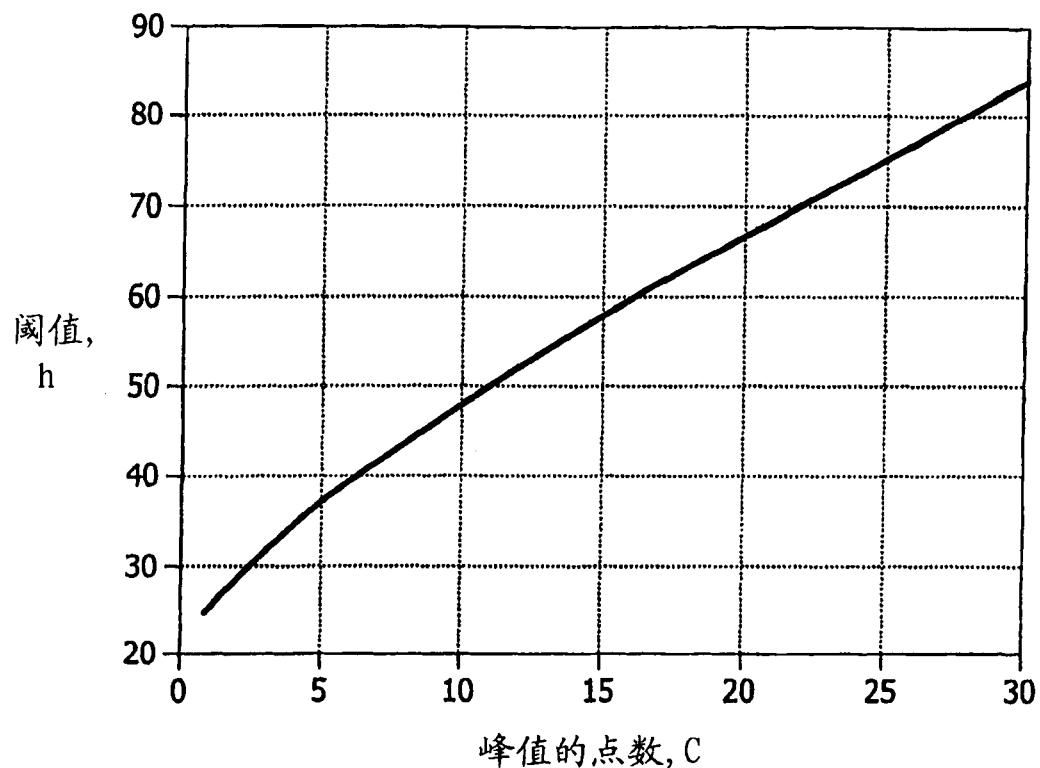


图 5

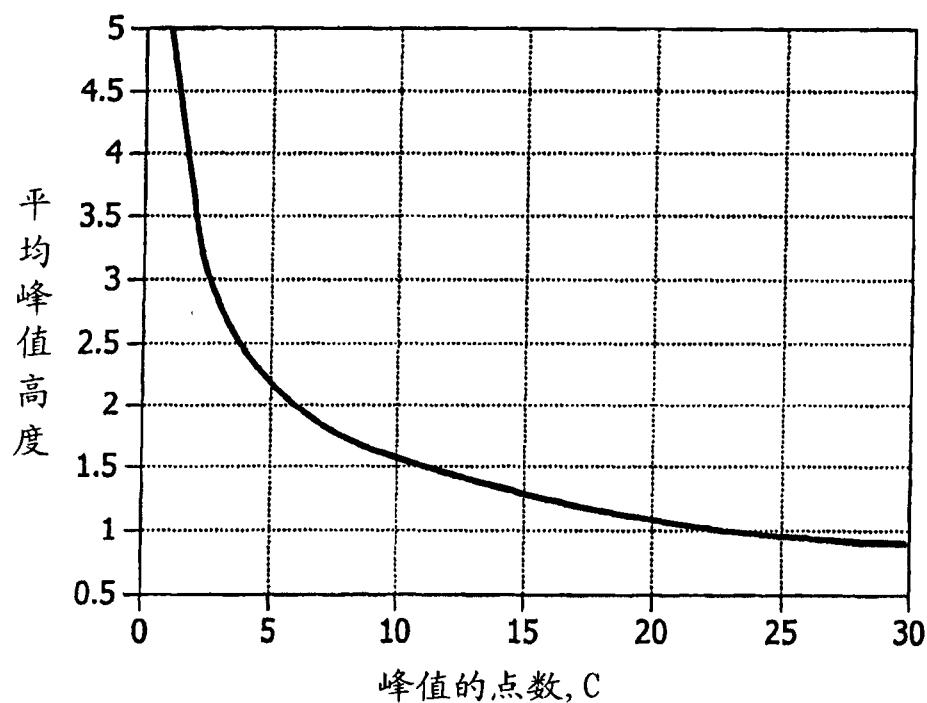


图 6

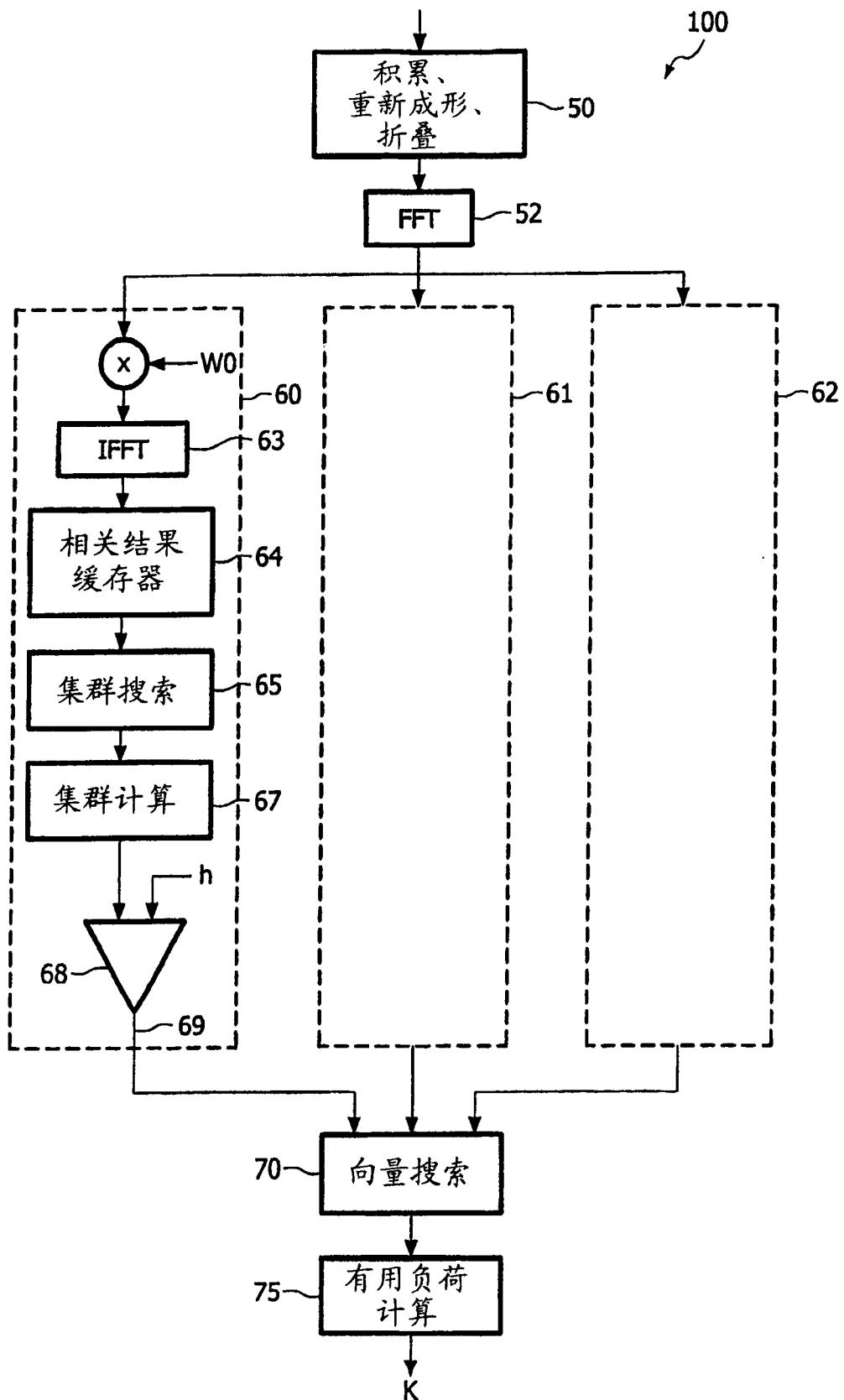


图 7

1.5374	-1.0894	-1.0414	-0.7068	-3.8172	0.0258	140
1.6173	-1.2352	-0.3060	-2.3445	-3.4377	-0.9221	3.8432
-2.6396	0.9311	4.2915	4.4842	130 4.7005	2.8471	0.5022
-1.4806	-1.7463	3.6366	4.9190	4.6754	1.1515	-1.0316
1.6518	-1.5449	-0.7832	-2.3342	-2.0166	-0.5394	0.5831
2.4447	1.8766	0.2752	-2.5537	-1.8379	-2.4692	1.3519
0.6230	0.3602	0.8597	1.1619	0.5720	1.0094	0.9730
						-0.4520

图 8

-0.4706	0.2683	-0.2476	0.2473	-0.5944	-1.2646	2.6646
-0.1287	2.4397	-1.9263	-0.0096	-0.3430	0.7224	-0.7079
0.3627	2.4380	0.5204	-3.1964	160 -1.5999	1.1939	0.6727
-0.0912	-3.0423	-0.9919	(10.7652)	-0.8770	-3.7368	-0.2270
-0.6600	0.7110	-0.2546	-2.7441	-0.1776	1.7626	1.0920
0.2049	-0.2373	-1.6054	-1.9650	-0.3317	-0.1824	-0.6591
-0.2696	-0.2906	1.4185	1.2969	-1.7576	-0.1594	-0.1653

图 9

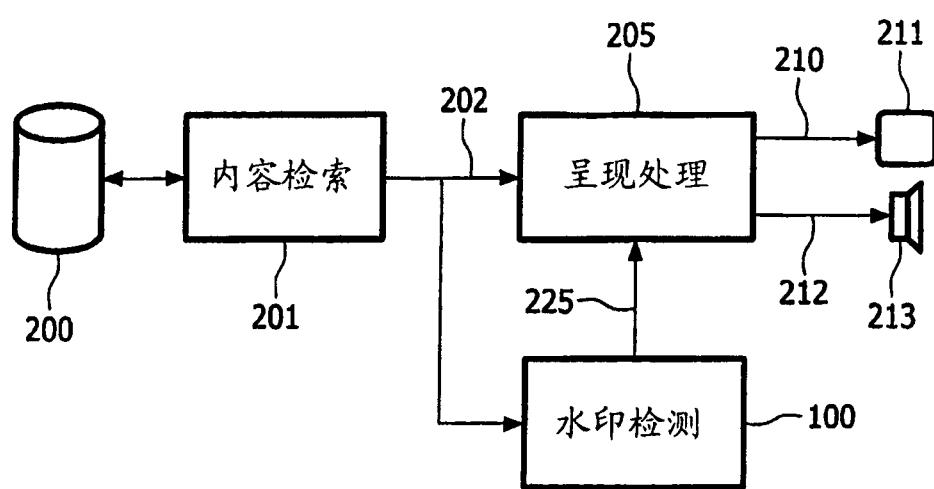


图 10