SooPAT

一种用于并行FFT计算的数据存取方法及装置

申请号：201110460582.8
申请日：2011-12-31

申请(专利权)人 中国科学院自动化研究所
地址 100190 北京市海淀区中关村东路95号
发明(设计)人 谢少林 林啸 蒿杰 薛晓军 汪涛 尹磊祖

主分类号 G06F9/302(2006.01)I
分类号 G06F9/302(2006.01)I G06F17/14(2006.01)I
公开(公告)号 102411491A
公开(公告)日 2012-04-11
专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021
代理人 周国城

www.soopat.com

注：本页蓝色字体部分可点击查询相关专利

(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 102411491 B
(45)授权公告日 2014.01.29

(21)申请号 201110460582.8
(22)申请日 2011.12.31
(73)专利权人 中国科学院自动化研究所
地址 100190 北京市海淀区中关村东路 95 号
(72)发明人 谢少林 王东琳 林啸 蒿杰 薛晓军 汪涛 尹磊祖
(74)专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021
代理人 周国城
(51)Int.Cl.
G06F 9/302(2006.01)
G06F 17/14(2006.01)

(56)对比文件
US 2010/0169402 A1,2010.07.01,
WO 2007/127938 A2,2007.11.08,
CN 102063411 A,2011.05.18,
CN 1504890 A,2004.06.16,

审查员 李铎

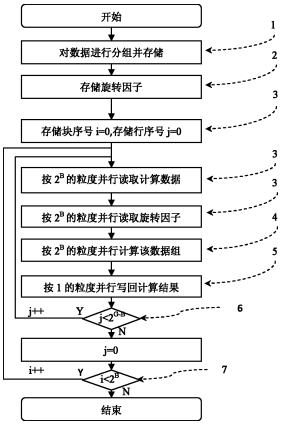
权利要求书2页 说明书7页 附图6页

(54)发明名称

一种用于并行 FFT 计算的数据存取方法及装置

(57)摘要

本发明提供一种用于并行 FFT 计算的数据存取方法及装置。该方法将 FFT 计算数据和旋转因子存放在多粒度并行存储器中，并用统一的蝶形表达式对整个计算过程中的 FFT 数据和对应的旋转因子进行分组，每分组数据包含多个蝶形，可并行计算；同时根据该蝶形表达式，可方便生成各个分组的数据地址和旋转因子系数地址，利用不同的读写粒度，可从多粒度存储器中并行读写数据和对应的旋转因子。本发明还提供一种用于并行 FFT 计算的数据存取装置。利用本发明，数据的读写过程中不会产生存储器冲突，也不需要额外的步骤再对读写数据进行排序，同时，本发明可根据具体实现灵活指定并行粒度。



CN 102411491 B

1. 一种用于并行 FFT 蝶形计算的数据存取方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

步骤 1，按照 2^B 的并行粒度，将长度为 N 的初始 FFT 数据，分为 2^G 个数据组，其中，$G=\log_2 N-B$；并将 2^G 个数据组存放在第一多粒度并行存储器（300）或第二多粒度并行存储器（302）中的 2^B 个存储块（804）的各个存储行（805）中，每个存储块（804）包含 2^{G-B} 个数据组，占用 2^{G-B} 个存储行（805）；

步骤 2，将每个蝶形组（402）计算需要的 2^B-1 个旋转因子依次存放在第三多粒度并行存储器（303）的存储行中；

步骤 3，读取第一多粒度并行存储器（300）或第二多粒度并行存储器（302）中第 i 个存储块（804）的第 j 个存储行（805）中存储的 FFT 蝶形计算所需的数据，读取粒度为 2^B，其中，i、j 的初始值均为 0；并以 2^B 的粒度从第三多粒度并行存储器（303）中按照存储行的顺序依次读取 FFT 蝶形计算所需的旋转因子；

步骤 4，根据读取出的旋转因子，按 2^B 的粒度对读出的第 j 个存储行（805）所存储的数据进行并行蝶形计算；

步骤 5，按 1 的粒度将蝶形计算结果数据并行写回到第一多粒度并行存储器（300）或第二多粒度并行存储器（302）中，当步骤 3 中从第一多粒度并行存储器（300）读取数据时，步骤 5 将蝶形计算结果数据写回到第二多粒度并行存储器（302）中，反之亦然；

步骤 6，判断当前存储行号 j 是否满足 $j<2^{G-B}$，如果满足，则将 j 加 1 后返回到步骤 3；否则将 j 置 0，跳到步骤 7；

步骤 7，判断当前存储块号 i 是否满足 $i<2^B$，如果满足，则将 i 加 1 后跳到步骤 3，否则结束。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述步骤 3 中读取数据的地址由存储块（804）的索引值 i 以及存储行（805）的索引值 j 确定，第 i 个存储块（804）的第 j 个存储行（805）地址为：$i\times$ 存储块大小 $+j\times 2^B$。

3. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述步骤 3 从第三多粒度并行存储器（303）中读取旋转因子进一步包括以下步骤：

步骤 3.1，根据所述步骤 3 读取 FFT 蝶形计算所需的数据时读取的存储块（804）的序号 i 和存储行（805）的序号 j 得到存储行总序号 l：$l=(i<<G)+j$；

步骤 3.2，根据所述存储行总序号 l 计算其对应的蝶形组（402）的编号 g：$g=l$ 循环左移 kB 个比特位，其中，k 为当前计算节的序号；

步骤 3.3，根据蝶形组（402）的编号 g 利用蝶形表达式（500）计算本蝶形组（402）所需的旋转因子指数 T；

步骤 3.4，根据旋转因子指数 T 计算出本蝶形组（402）所需的旋转因子 $e^{-(j2\pi/N)T}$。

4. 根据权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述 2^G 个数据组中，每个数据点的索引值 $g_{G-1}\ldots g_1g_0b_{B-1}\cdots b_1b_0$ 分成两部分：数据组索引值 $g=g_{G-1}\ldots g_1g_0$ 和组内索引值 $b=b_{B-1}\cdots b_1b_0$。

5. 根据权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述步骤 3.3 中的蝶形表达式（500）分为两部分：第一部分（501）用于表达蝶形计算的两个输入数据索引值的比特位；第二部分（505）用于表达该蝶形计算对应的旋转因子指数的比特位。

6. 根据权利要求 5 所述的方法，其特征在于，所述第一部分（501）又分为三部分：第一数据组索引值（502）、第二数据组索引值（503）和组内索引值（504），其中，第一数据组索引

值（502）为数据组索引值 $g=g_{G-1}...g_1g_0$ 的低位部分 $g_{iB-1}\cdots g_1g_0$，其中，i 为当前计算节的序号；第二数据组索引值（503）为数据组索引值 g 去掉低位部分剩下的高位部分 $g_{G-1}\cdots g_{iB}$，组内索引值（504）为 B 个比特位 $b_{B-1}\cdots b_?b_{k-1}\cdots b_1b_0$，其中，k 为当前计算级的序号，$b_?$ 表示蝶形计算的两个输入数据的组内索引值所相差的那一个比特位。

7. 根据权利要求 6 所述的方法，其特征在于，当 $b_?$ 为 0 时代表该蝶形计算的输入 A；当 $b_?$ 为 1 时代表该蝶形计算的输入 B。

8. 根据权利要求 7 所述的方法，其特征在于，所述第二部分（505）为第一部分（501）所描述的蝶形计算对应的旋转因子指数的二进制值。

9. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述步骤 4 中的蝶形计算为原址运算，即基于输入数据 A、B 和旋转因子 W 的蝶形计算结果之一 A+BW 在输出数据中的序号为 A 在输入数据中的序号，另一蝶形计算结果 A-BW 在输出数据中的序号为 B 在输入数据中的序号。

10. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述步骤 5 中的数据写回地址为递增的存储行序号，第 i 个存储块（804）的第 j 个存储行（805）对应的序号为：$i\times N/2^{2B}+j$。

11. 一种用于并行 FFT 计算的数据存取装置，其特征在于，该装置包括：第一多粒度并行存储器（300），第二多粒度并行存储器（302），第三多粒度并行存储器（303）和蝶形计算模块（301），其中，

第一多粒度并行存储器（300）和第二多粒度并行存储器（302）构成乒乓结构，交替存放一个计算级（401）的输入数据或输出数据；

第三多粒度并行存储器（303）用于存放计算级（401）所需的旋转因子；

蝶形计算模块（301）用于根据所述第三多粒度并行存储器（303）中存放的旋转因子对于从第一多粒度并行存储器（300）和第二多粒度并行存储器（302）中交替取出的待处理数据进行蝶形计算，并将计算得到的结果交替存放在第一多粒度并行存储器（300）和第二多粒度并行存储器（302）中；

第一多粒度并行存储器（300）与蝶形计算模块（301）之间的连线包括数据线（306）、地址线（310）和存取粒度指示线（309）；

第二多粒度并行存储器（302）与蝶形计算模块（301）之间的连线包括数据线（305）、地址线（312）和存取粒度指示线（311）；

第三多粒度并行存储器（303）与蝶形计算模块（301）之间的连线包括数据线（304）、地址线（308）和存取粒度指示线（307）；

其中，如果从第一多粒度并行存储器（300）中读取数据进行蝶形计算，那么计算得到的结果数据写回到第二多粒度并行存储器（302）中，反之亦然。

一种用于并行 FFT 计算的数据存取方法及装置

技术领域

[0001] 本发明主要涉及数据存取领域，尤其是一种用于并行 FFT 计算的数据存取方法及装置。

背景技术

[0002] 信号处理系统经常需要将信号内容在时域和频域进行转换，快速傅立叶变换算法(FFT)可进行时域和频域间的信号转换。相对于其它转换算法来说，快速傅立叶变换算法具有结构统一、计算量少的优点，因此广泛应用于信号处理系统中。

[0003] FFT 算法输入 N 个数据，输出 N 个数据；一般称时域至频域的变换为正向变换，而频域至时域的变换变逆向变换。FFT 算法有多种实现方式，但都由库利－图基算法演变而来。对于 N 个数据点，基 2 的库利－图基算法包括 $\log_2 N$ 个计算级。每个计算级输入 N 个数，输出 N 个数；前一计算级的输出经过一定的排序后作为后一计算级的输入。第一级输入为原始数据，最后一级输出为 FFT 计算结果，计算流程如图 1 所示，图中假定数据点长度为 8，整个计算过程需要三个计算级 103：S0、S1、S2。

[0004] 每个计算级 103 由 N/2 个蝶形 102 组成，蝶形的计算流程如图 2 所示。每个蝶形输入两个数据点 A 和 B，以及一个旋转因子 W，经过蝶形计算后得到两个计算结果：A+BW 和 A-BW。每个蝶形计算中，输入数据 A 和 B 的序号具有确定的对应关系，该对应关系由蝶形所在的计算级以及输入数据 A 或 B 的序号来确定；同时，旋转因子 W 的值由当前蝶形所在的计算级 103、输入数据 A 或 B 的序号、FFT 数据长度确定。如图 1 中 S0 计算级中的第 1 个数据必定与第 0 个数据构成一蝶形，并且第 0 个数据为蝶形输入的 A，第 1 个数据为蝶形输入的 B，而 W 的值为 1。而 S1 计算级中的第 1 个数据必定与第 3 个数据构成一蝶形，并且第 1 个数据为蝶形输入的 A，第 3 个数据为蝶形输入的 B，而 W 的值为 1。

[0005] 计算级之间存在数据相关，后一计算级必须等待前一计算级完成以后才能开始计算。因此，每级计算完成后都需要将结果存放在存储器中，下一级计算从存储器中读取上一级的计算结果作为本级计算的输入。计算级内的蝶形相互独立，蝶形的计算顺序不影响计算结果，但每个蝶形所读取的数据 A、B 和旋转因子 W 必须满足内在的对应关系。

[0006] 在并行 FFT 计算中，运算部件从多粒度并行存储器中读取多个蝶形所需数据及对应的旋转因子，并行计算多个、多级蝶形，然后将计算结果并行写入存储器，以便进行一下级计算，如图 4 所示。图中假定数据长度为 64，并行粒度为 4，即多粒度并行存储器 400 一次可读写 4 个数据。此时，两相邻计算级中存在数据相关的 4 个蝶形 403 构成一个蝶形组 402，两相邻计算级中的蝶形组构成一计算节 401。蝶形计算模块 301 从存储器 300 或 302 中并行读取一个蝶形组所需数据点，从存储器 303 中并行读取所需旋转因子，完成一个蝶形组计算后，再将计算结果并行写回存储器 300 或 320，如图 3 所示。

[0007] 在蝶形组 402 中，每个蝶形的输入 A、B、W 仍必须满足其内在的对应关系，因此，并行 FFT 算法中必须考虑计算数据和旋转因子在存储器中的分布，以及每个蝶形组 402 的读写地址和读写方式，以保证蝶形计算模块每次都能并行读取所需数据和旋转因子。

[0008] 大部分并行 FFT 算法相关的专利都着重讨论如何将长序列的 FFT 数据分解成多个短序列的 FFT，利用多个处理器并行计算各个短序列的 FFT，最后对多个短序列的 FFT 进行交织计算，得到最终的长序列 FFT 结果，如美国专利 US 6,792,441B2(Parallel MultiProcessing For Fast Fourier Transform With Pipeline Architecture)。这一类算法都没考虑多个处理单元同时访问存储器时的冲突问题，以及多个处理器如何交织多个短序列 FFT 结果；而实际应用中，存储器访问冲突以及处理器之间的同步和通信效率将严重影响 FFT 的计算效率。美国专利 US 6,304,887B1(FFT-Based Parallel System For Array Processing With Low Latency) 讨论了 FFT 算法中数据并行读写的问题，该专利将 FFT 数据存放在多个存储器中，利用多个数据缓冲区、多个选择器对数据进行排序，以保证每次读写的数据分布在不同的存储器中，实现并行读写。该专利需要专用的存储器、数据缓冲区和选择器，读写地址计算复杂，难以实现不同数据长度、不同读写粒度的并行 FFT 算法。

发明内容

[0009] 为了解决上述问题，本发明提出一种用于并行 FFT 计算的数据存取方法及装置。

[0010] 本发明所提出的一种用于并行 FFT 蝶形计算的数据存取方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

[0011] 步骤 1，按照 2^B 的并行粒度，将长度为 N 的初始 FFT 数据，分为 2^G 个数据组，其中，$G = \log_2 N - B$；并将 2^G 个数据组存放在多粒度并行存储器 300 或 302 中的 2^B 个存储块 804 的各个存储行 805 中，每个存储块 804 包含 2^{G-B} 个数据组，占用 2^{G-B} 个存储行 805；

[0012] 步骤 2，将每个蝶形组 402 计算需要的 2^B-1 个旋转因子依次存放在多粒度并行存储器 303 的存储行中；

[0013] 步骤 3，读取多粒度并行存储器 300 或 302 中第 i 个存储块 804 的第 j 个存储行 805 中存储的 FFT 蝶形计算所需的数据，读取粒度为 2^B，其中，i、j 的初始值均为 0；并以 2^B 的粒度从多粒度并行存储器 303 中按照存储行的顺序依次读取 FFT 蝶形计算所需的旋转因子；

[0014] 步骤 4，根据读取出的旋转因子，按 2^B 的粒度对读出的第 j 个存储行 805 所存储的数据进行并行蝶形计算；

[0015] 步骤 5，按 1 的粒度将蝶形计算结果数据并行写回到多粒度并行存储器 300 或 302 中，当步骤 3 中从存储器 300 读取数据时，步骤 5 将蝶形计算结果数据写回到存储器 302 中，反之亦然；

[0016] 步骤 6，判断当前存储行号 j 是否满足 $j < 2^{G-B}$，如果满足，则将 j 加 1 后返回到步骤 3；否则将 j 置 0，跳到步骤 7；

[0017] 步骤 7，判断当前存储块号 i 是否满足 $i < 2^B$，如果满足，则将 i 加 1 后跳到步骤 3，否则结束。

[0018] 另一方面，本发明还提出一种用于并行 FFT 计算的数据存取装置，其特征在于，该装置包括：多粒度并行存储器 300、302，多粒度并行存储器 303 和蝶形计算模块 301，其中，

[0019] 多粒度并行存储器 300、302 构成乒乓结构，交替存放一个计算级 401 的输入数据或输出数据；

[0020] 多粒度并行存储器 303 用于存放计算级 401 所需的旋转因子；

[0021] 蝶形计算模块 301 用于根据所述多粒度并行存储器 303 中存放的旋转因子对于从多粒度并行存储器 300、302 中交替取出的待处理数据进行蝶形计算，并将计算得到的结果交替存放在多粒度并行存储器 300、302 中；

[0022] 多粒度并行存储器 300 与蝶形计算模块 301 之间的连线包括数据线 306、地址线 310 和存取粒度指示线 309；

[0023] 多粒度并行存储器 302 与蝶形计算模块 301 之间的连线包括数据线 305、地址线 312 和存取粒度指示线 311；

[0024] 多粒度并行存储器 303 与蝶形计算模块 301 之间的连线包括数据线 304、地址线 308 和存取粒度指示线 307；

[0025] 其中，如果从多粒度并行存储器 300 中读取数据，进行蝶形计算，那么计算得到的结果数据写回到多粒度并行存储器 302 中，反之亦然。

[0026] 本发明方法将 FFT 数据和旋转因子存放在多粒度并行存储器中，并用统一的蝶形表达式对整个计算过程中的 FFT 数据和对应的旋转因子进行分组。每分组数据包含多个蝶形，可并行计算；同时根据该蝶形表达式，可方便生成各个分组的数据地址和旋转因子系数地址，利用不同的读写粒度，可从多粒度存储器中并行读写数据和对应的旋转因子。读写过程中不会产生存储器冲突，也不需要额外的步骤再对读写数据进行排序。同时，本发明方法可根据具体实现灵活指定并行粒度。

附图说明

[0027] 图 1 是数据长度为 8 时按时间抽取的基 2FFT 算法流程图。

[0028] 图 2 是蝶形结构示意图。

[0029] 图 3 是本发明并行 FFT 计算的数据存取装置结构图。

[0030] 图 4 是本发明中蝶形、蝶形组、计算级、计算节的示意图。

[0031] 图 5 是蝶形表达式的构成示意图。

[0032] 图 6 是并行粒度为 4 数据长度为 64 时各计算节、计算级的蝶形表达式示意图。

[0033] 图 7 是并行粒度为 8 时一个蝶形组所需旋转因子在存储行中的存储方式示意图。

[0034] 图 8 是根据本发明所述方法 64 点 FFT 数据在存储器中的分布以及一个计算节的读、写方式示意图。

[0035] 图 9 是并行 FFT 计算中一个计算节的数据存取方法流程图。

具体实施方式

[0036] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白，以下结合具体实施例，并参照附图，对本发明进一步详细说明。

[0037] 描述过程中约定以下符号：

[0038] ■ N：FFT 数据长度，必须为 2 的幂次方；

[0039] ■ B：并行粒度比特位宽，2^B 即为并行粒度；

[0040] ■ G：数据组索引值比特位宽，$G = \log_2 N - B$；

[0041] ■ g：数据组索引值；

[0042] ■ b：组内索引值。

[0043] 为了实现并行 FFT 的读写和计算，首先定义并行粒度 2^B，(B 为正整数)，并行粒度是指从存储器并行读取并且可独立进行蝶形计算的数据个数。如图 4 所示，图中假定 FFT 数据长度 N = 64，并行粒度为 2^2。此时，64 个数据点被分为 16 组数据组并行进行处理，每个数据组包括 4 个数据点，该组数据可独立进行两级基 2 的 FFT 计算，每级计算包括两个蝶形 403。当并行粒度为 2^B 时，每组数据可独立进行 B 级基 2 的 FFT 计算，每级计算包括 $(2^B)/2$ 个基 2 的蝶形。因此，蝶形计算模块读取一组数据后，可独立进行 $B\times(2^B)/2 = B\times 2^{B-1}$ 个蝶形计算，然后将计算结果写回多粒度并行存储器 400。

[0044] 对于长度为 N 的 FFT 数据，每个数据点的索引地址需要 $\log_2 N$ 个比特位来表示。对该 N 点数据以 2^B 的粒度进行分组后，每个数据点索引值分解成两部分：数据组索引值和组内索引值。对于 N 点数据，一共有 $N/2^B$ 个数据组，数据组索引值需要 $\log_2(N/2^B) = \log_2 N-B$ 个比特位来表示，我们定义 $G = \log_2 N-B$；此时数据组索引值可表示为 $g = g_{G-1}\ldots g_1 g_0$。同时每个数据组包括 2^B 个数据点，组内索引值需要 B 个比特位来表示，此时组内索引值可表示为 $b = b_{B-1}\ldots b_1 b_0$。在 FFT 计算开始之前，每个数据点的索引可表示为：

[0045]

$$\text{数据索引值} = g\times 2^B + b = (g << B) + b = (g_{G-1}\ldots g_1 g_0 b_{B-1}\ldots b_1 b_0)$$

[0046] 对于组内 2^B 个数据点，根据 FFT 计算的内在对应关系，可组成 $2^B/2 = 2^{B-1}$ 个蝶形，因此，每个蝶形的索引值需要 B-1 个比特位来表示。在进行数据分组时，本发明规定蝶形计算的两个输入数据的组内索引值只相差一个比特位，我们以“$b_?$”表示这一比特位；并且规定当“$b_?$”所示比特位为 0 时，表示该蝶形的输入 A；当“$b_?$”所示比特位为 1 时，表示该蝶形的输入 B。此时一个蝶形的组内索引值可表示为：$b = b_{B-2}\ldots b_?\ldots b_1 b_0$。比特位“$b_?$”可以位于组内索引值二制值表示中的任意位置，不同的位置表示了不同计算级中每个蝶形的“蝶距”，即蝶形的两个输入数据的索引值差。比如当“$b_?$”位于组内索引值第 k 个比特位时，表示该级所有蝶形的蝶距为 2^k。

[0047]

$$\text{蝶距} = \text{B 索引} - \text{A 索引} = (b_{B-2}\ldots 1 b_{k-1}\ldots b_1 b_0) - (b_{B-2}\ldots 0 b_{k-1}\ldots b_1 b_0) = 2^k$$

[0048] 图 4 描述了数据分组及并行 FFT 计算流程图，图中假定 FFT 数据长度 N = 64，并行粒度为 2^2。在以 2^B 的并行粒度进行数据分组后，每个数据组可独立进行 $B\times(2^B)/2$ 个基 2 蝶形计算，我们将这 $B\times 2^{B-1}$ 个蝶形称为一蝶形组 402，所有可并行的蝶形组构成一计算节 401。每个计算节具有相同的蝶形结构，纵向由多个蝶形组 402 构成，横向由多个计算级 404 构成。整个 FFT 计算过程由多个计算节 401 组成，计算节从多粒度并行存储器 400 中读取数据，经过多个计算级 404 后将计算结果写回多粒度并行存储器 400。

[0049] 对于不同的计算级，数据组索引 g 与组内索引 b 的相对位置可能不同。本发明通过控制每个计算节中蝶形组的读写地址和读写粒度，使得第 i 个计算节的第 k 个计算级中的某个蝶形数据索引，以及与该蝶形数据对应的旋转因子指数可以统一表达为图 5 所示的蝶形表达式 500。图 5 中，蝶形表达式 500 分成两部分，第一部分 501 用于表达某蝶形计算的两个输入数据索引值的比特位；第二部分 505 用于表达该蝶形计算对应的旋转因子指数的比特位。对于长度为 N 的 FFT 数据来说，一共需要 N/2 个旋转因子。每个旋转因子的值

可以表示为 $e^{-(j2\pi/N)T}$(0 ≤ T < N/2)，因此，旋转因子的值完全可以由 T 来决定，称 T 为旋转因子的指数。输入数据索引值 501 仍可理解成两部分：数据组索引值 502、503 和组内索引值 504。其中 502 为数据组索引值的低位部分，对于第 i 个计算节中的表达式，该部分一共有 iB 个比特位；503 为数据组索引值去掉低位部分 502 剩下的高位部分。组内索引值 504 仍为 B 个比特位，对于位于第 i 个计算节，第 k 个计算级的蝶形，“$b_?$”标志位于组内索引值 504 的第 k 个比特位。

[0050] 对于表达式 501 所描述的蝶形，它对应的旋转因子指数的二进制值即图 5 中的 505，505 为 G+B-1 个比特位，它由比特位 507 和比特位 506 两部分构成，其中，比特位 507 为蝶形索引值 501 中“$b_?$”右部分的 k+iB 个比特位，而比特位 506 则由 G+(1-i)B-1-k 个比特 0 组成。

[0051] 图 6 示出了当 N = 64，B = 2 时，各计算节、计算级的蝶形表达式。

[0052] 图 1 所示为按时间抽取的库利 - 图基流程图，在该流程图中，第 i 个计算级 103 中蝶形的蝶距为 2^i。为使各蝶形组 402 能独立计算，数据分组时必须从原数据序列中按蝶距抽取数据。本发明中，利用多粒度并行存储器可实现各种间距的数据抽取。

[0053] 本发明提出的数据存储方法如图 8 所示，图中假定 N = 64，B = 2，图中的数字编号为初始 FFT 数据的索引值，图中多粒度并行存储器 801 即图 3 中的多粒度并行存储器 300，多粒度并行存储器 802 即图 3 中的多粒度并行存储器 301。当并行粒度为 2^B 时，多粒度并行存储器 801 内部可分成 2^B 个存储块 804，本发明将长度为 N 的 FFT 数据分成 2^B 份，依次存放在 2^B 个存储块 804 中，每个存储块中的一个存储行 805 对应一个蝶形组数据。

[0054] 图 9 是一个计算节的数据存取方法流程图，本发明按照图 9 所示的步骤将初始 FFT 数据存储到多粒度并行存储器中，并依次读取多粒度并行存储器各个存储块 804 中的各个存储行 805 的数据，如图 9 所示，本发明所提出的用于并行 FFT 蝶形计算的数据存取方法包括以下步骤：

[0055] 步骤 1，按照 2^B 的并行粒度，将长度为 N 的初始 FFT 数据，分为 2^G 个数据组，其中，$G = \log_2 N - B$；并将 2^G 个数据组存放在多粒度并行存储器 300 或 302 中的 2^B 个存储块 804 的各个存储行 805 中，每个存储块 804 包含 2^{G-B} 个数据组，占用 2^{G-B} 个存储行 805；

[0056] 对于长度为 N 的 FFT 数据，当并行粒度为 2^B 时，一共有 2^G 个数据组。

[0057] 步骤 2，将每个蝶形组 402 计算需要的 2^B-1 个旋转因子依次存放在多粒度并行存储器 303 的存储行中；

[0058] 第 i 个计算节 401，第 k 个计算级 404 的蝶形 403 对应的旋转因子指数 $T = (b_{k-1}...b_1b_0g_{iB-1}...g_1g_00...0)$，其中，0 ≤ k ≤ B-1，如图 5 中的 505 所示。对于某一蝶形组 402，507 中的 $g_{iB-1}...g_1g_0$ 是固定不变的，但 $b_{k-1}...b_1b_0$ 是变化的，因此，该蝶形组的第 k 个计算级需要 2^k 个旋转因子，而蝶形组有 B 个计算级，所以整个蝶形组 402 需要 $\sum_{k=0}^{B-1}2^k = 2^B - 1$ 个旋转因子。

[0059] 当并行粒度为 2^B 时，多粒度并行存储器 303 的读写位宽为 2^B，因此，可将蝶形组 402 各计算级 404 所需的旋转因子事先计算好，依次存放在多粒度并行存储器 303 的一个存储行中，计算时可以以 2^B 的粒度并行读取该蝶形组旋转因子。图 7 示出了并行粒度为 8 时，蝶形组 402 各计算级 404 所需旋转因子在存储行 700 的存储方式，其中 701 为第 1 个计算级所需的旋转因子；702 为第 2 个计算级所需的 2 个旋转因子；703 为第 3 个计算级所需

的 4 个旋转因子。

[0060] 步骤 3，读取多粒度并行存储器 300 中各个存储块 804 的各个存储行 805 中存储的 FFT 蝶形计算所需的数据，读取粒度为 2^B，其中，i、j 的初始值均为 0；并以 2^B 的粒度从多粒度并行存储器 303 中按照存储行的顺序依次读取 FFT 蝶形计算所需的旋转因子；

[0061] 读取蝶形计算所需的数据时，将读取粒度设置为 2^B，依次读取多粒度并行存储器 300 中各个存储块 804 的各个存储行 805 中存储的 FFT 蝶形计算所需的数据，即先读第 0 个存储块 804 中的第 0 个存储行 805，再读取第 0 个存储块 804 中的第 1 个存储行 805，直到读完该存储块 804 中的所有被数据组占用的存储行 805；读完第 0 个存储块 804 的所有被数据组占用的存储行 805 后，再开始读取第 1 个存储块 804 的存储行 805，直到读完所有存储块 804 中被数据组占用的所有存储行 805。读取地址由存储块 804 的索引值 i 以及存储行 805 的索引值 j 确定，第 i 个存储块 804 的第 j 个存储行 805 地址为：$i\times$ 存储块大小 $+j\times 2^B$。

[0062] 将步骤 3 读取 FFT 蝶形计算所需的数据时读取的存储行 805 按顺序排列，得到的存储行总序号为 $l=(i<<G)+j$，其中 i 表示存储块 804 的序号，j 表示存储行 805 的序号，$i<<G$ 表示将 i 左移 G 个比特位。该存储行总序号 l 和蝶形表达式 500 中蝶形组 402 的编号 g 的对应关系与计算节 401 的序号有关，该关系可描述如下：

[0063]

在第 k 个计算节读取数据时，对于总序号为 l 的存储行，其对应的蝶形组 402 的编号 g=(l 循环左移 kB 个比特位)。 (公式 1)

[0064] 以 2^B 的粒度从多粒度并行存储器 303 中按照存储行的顺序依次读取 FFT 蝶形计算所需的旋转因子：

[0065] 对于步骤 3 读取 FFT 蝶形计算所需的数据时的数据读取顺序，可以根据存储块 804 的序号 i 和存储行 805 的序号 j 得到存储行总序号 l；根据该序号可以根据（公式 1）得到存储行 l 对应的蝶形组 402 的编号 g，根据该编号 g 可利用蝶形表达式 500 得出本蝶形组 402 所需的旋转因子指数 505，进而可计算出本蝶形组 402 所需的旋转因子。

[0066] 进行 FFT 计算前，将每个计算节 401 中的每个蝶形组 402 所需旋转因子组织成存储行 700 依次存放在存储器中，如图 7 所示。按步骤 3 所述读取蝶形计算所需的数据时，依次读取存储行 700 即可得到蝶形组 402 对应的旋转因子。

[0067] 步骤 4，根据读取出的旋转因子，按 2^B 的粒度对读出的第 j 个存储行 805 所存储的数据进行并行蝶形计算；

[0068] 蝶形计算时要求原址运算，即图 2 中计算结果 A+BW 在输出数据中的序号必须为 A 在输入数据中的序号，A-BW 在输出数据中的序号必须为 B 在输入数据中的序号。

[0069] 步骤 5，按 1 的粒度将蝶形计算结果数据并行写回到多粒度并行存储器 300 或 302 中，当步骤 3 中从存储器 300 读取数据时，步骤 5 将蝶形计算结果数据写回到存储器 302 中，反之亦然；

[0070] 写回地址即为递增的存储行序号，第 i 个存储块 804 的第 j 个存储行 805 对应的序号为：$i\times N/2^{2B}+j$。

[0071] 步骤 6，判断当前存储行号 j 是否满足 $j<2^{G-B}$，如果满足，则将 j 加 1 后返回到步

骤 3；否则将 j 置 0，跳到步骤 7；

[0072] 步骤 7，判断当前存储块号 i 是否满足 $i < 2^B$，如果满足，则将 i 加 1 后跳到步骤 3，否则结束。

[0073] 一个计算节 401 只进行一次读写。多粒度并行存储器 801、802 构成乒乓结构，当计算节 401 按图 9 中步骤 3 读取存储器 801 时，步骤 5 应当写回存储器 802，反之亦然。当前一计算节 401 将结果写回存储器 801 时，下一计算节所需的数据应从存储器 801 中读取。

[0074] 为实现本发明所描述的数据存取方法，本发明提出一种用于并行 FFT 计算的数据存取装置，如图 3 所示，该装置包括：多粒度并行存储器 300、302，多粒度并行存储器 303 和蝶形计算模块 301，其中，

[0075] 多粒度并行存储器 300、302 构成乒乓结构，交替存放一个计算级 401 的输入数据或输出数据；

[0076] 多粒度并行存储器 303 用于存放计算级 401 所需的旋转因子，其中，旋转因子的生成方法由（公式 1 确定；

[0077] 蝶形计算模块 301 用于根据所述多粒度并行存储器 303 中存放的旋转因子对于从多粒度并行存储器 300、302 中交替取出的待处理数据进行蝶形计算，并将计算得到的结果交替存放在多粒度并行存储器 300、302 中；

[0078] 多粒度并行存储器 300 与蝶形计算模块 301 之间的连线包括数据线 306、地址线 310 和存取粒度指示线 309；多粒度并行存储器 302 与蝶形计算模块 301 之间的连线包括数据线 305、地址线 312 和存取粒度指示线 311；多粒度并行存储器 303 与蝶形计算模块 301 之间的连线包括数据线 304、地址线 308 和存取粒度指示线 307。

[0079] 假定某计算节从存储器 300 中读取数据，计算完成后写回存储器 302，按照图 9 所示的存取方法，则每个计算节各个存储器对应的读写地址与读写粒度为：

[0080] 地址线 310：$i\times$ 存储块大小 $+j\times 2^B$；

[0081] 存取粒度指示线 309：2^B；

[0082] 地址线 312：$i\times N/2^{2B}+j$；

[0083] 存取粒度指示线 311：1；

[0084] 地址线 308：$i\times N/2^B+j\times 2^B$；

[0085] 存取粒度指示线 307：2^B。

[0086] 以上所述的具体实施例，对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明，所应理解的是，以上所述仅为本发明的具体实施例而已，并不用于限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内，所做的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

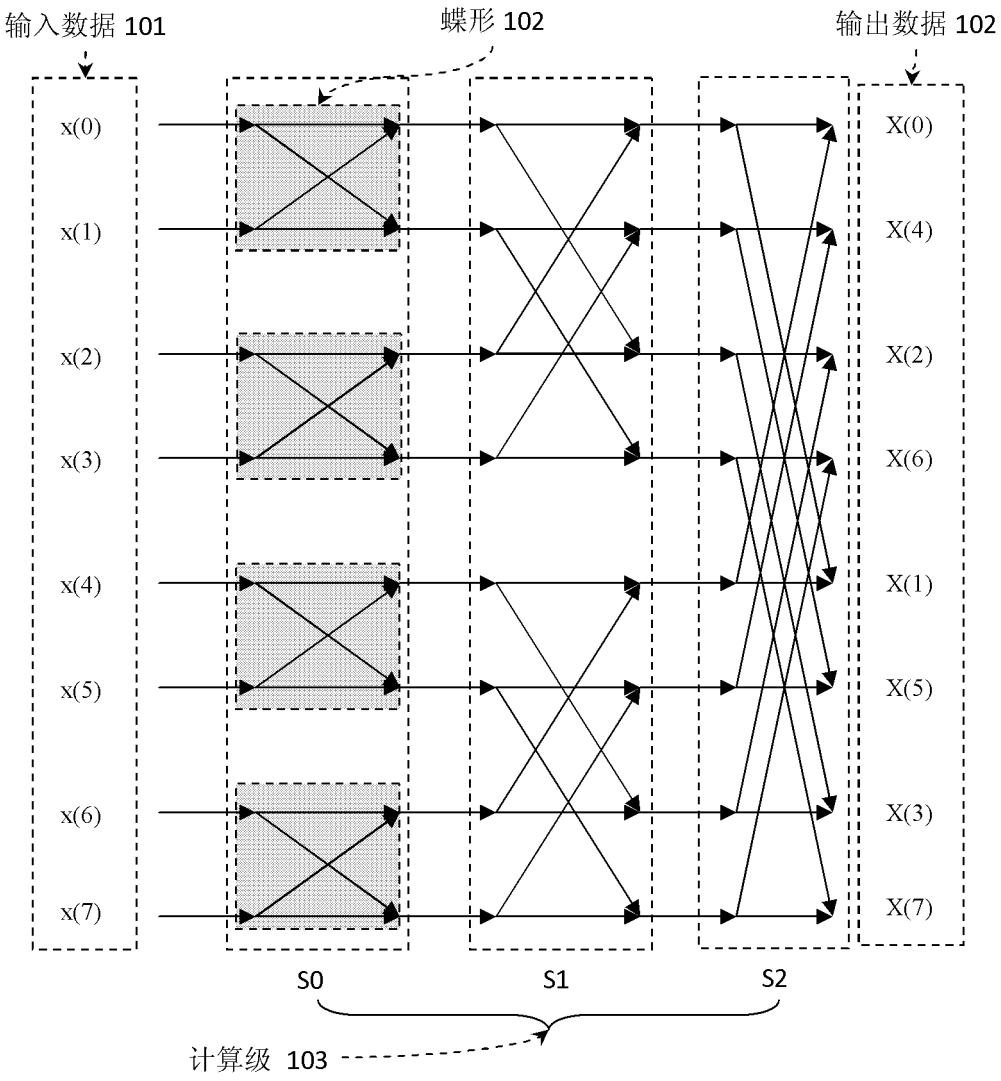

输入数据 101
蝶形 102
输出数据 102
x(0)
x(1)
x(2)
x(3)
x(4)
x(5)
x(6)
x(7)
X(0)
X(4)
X(2)
X(6)
X(1)
X(5)
X(3)
X(7)
S0
S1
S2
计算级 103

图 1

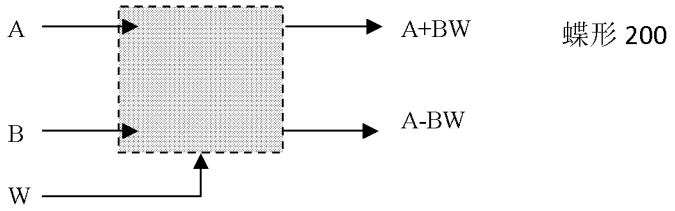

A
B
W
A+BW
A-BW
蝶形 200

图 2

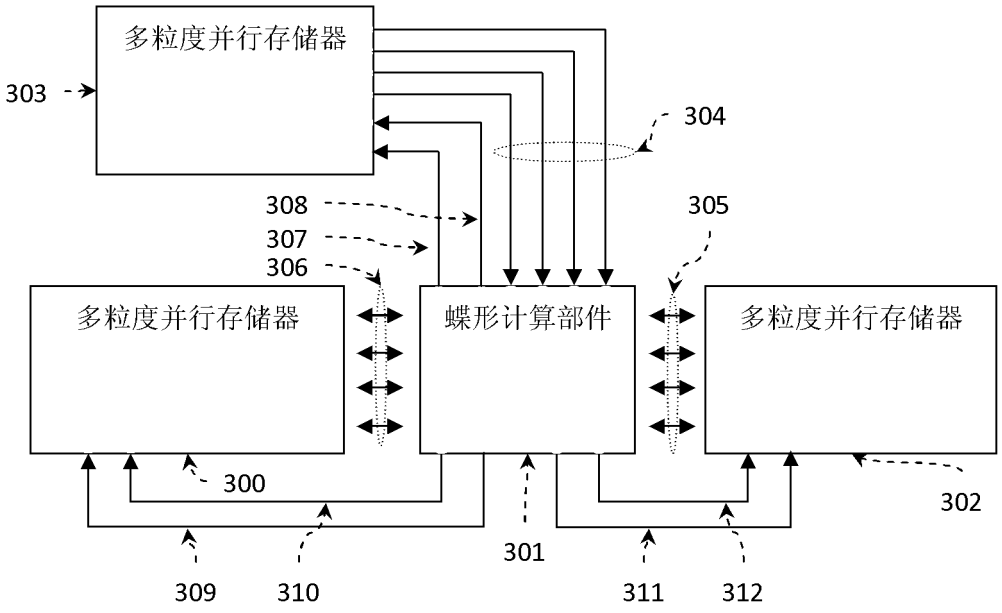

多粒度并行存储器
303
304
308
307
306
305
多粒度并行存储器
蝶形计算部件
多粒度并行存储器
300
302
301
309
310
311
312

图 3

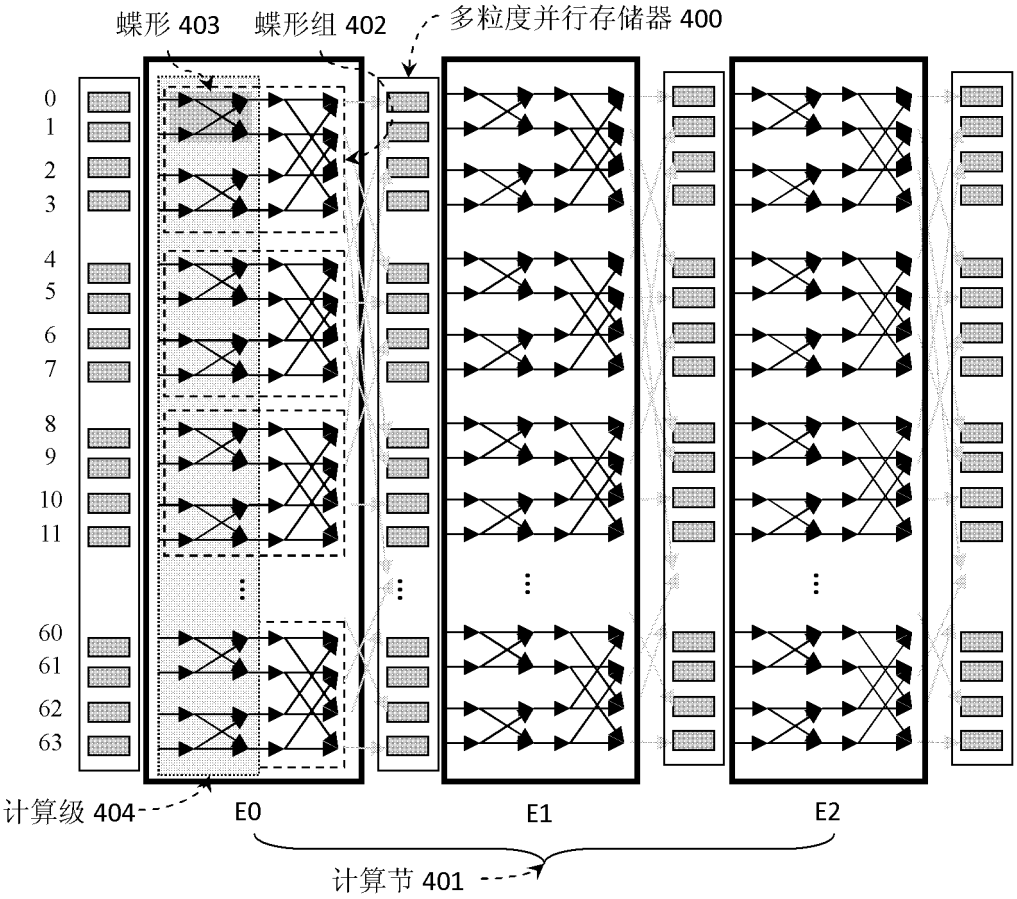

蝶形 403
蝶形组 402
多粒度并行存储器 400
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
60
61
62
63
计算级 404
E0
E1
E2
计算节 401

图 4

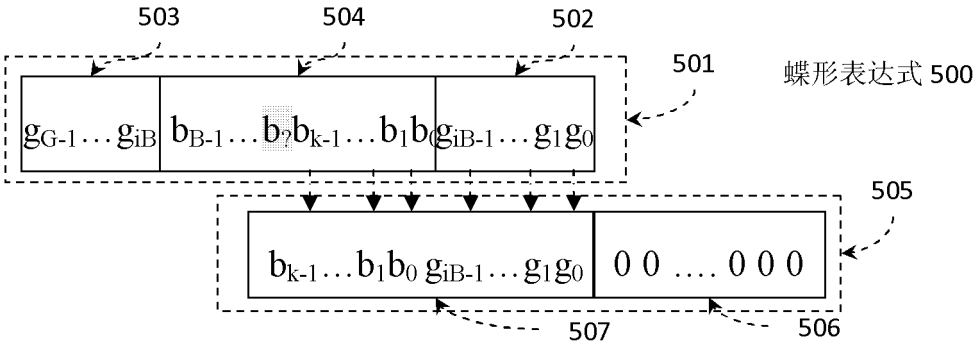


图 5

计算节	计算级	蝶形数据索引 (600)	旋转因子指数 (601)
0	0	$g_3g_2g_1g_0b_0b_?$	00000
	1	$g_3g_2g_1g_0b_?b_0$	$b_0$0000
1	0	$g_3g_2b_0b_?g_1g_0$	$g_1g_0$000
	1	$g_3g_2b_?b_0g_1g_0$	$b_0g_1g_0$00
2	0	$b_0b_?g_3g_2g_1g_0$	$g_3g_2g_1g_0$0
	1	$b_?b_0g_3g_2g_1g_0$	$b_0g_3g_2g_1g_0$

图 6

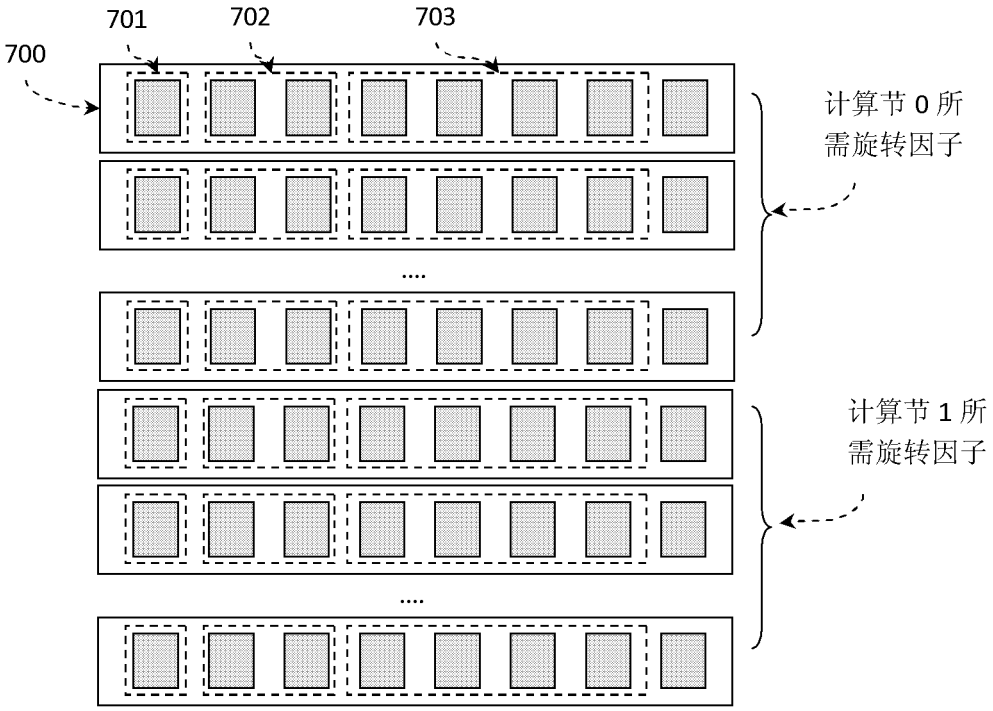


图 7

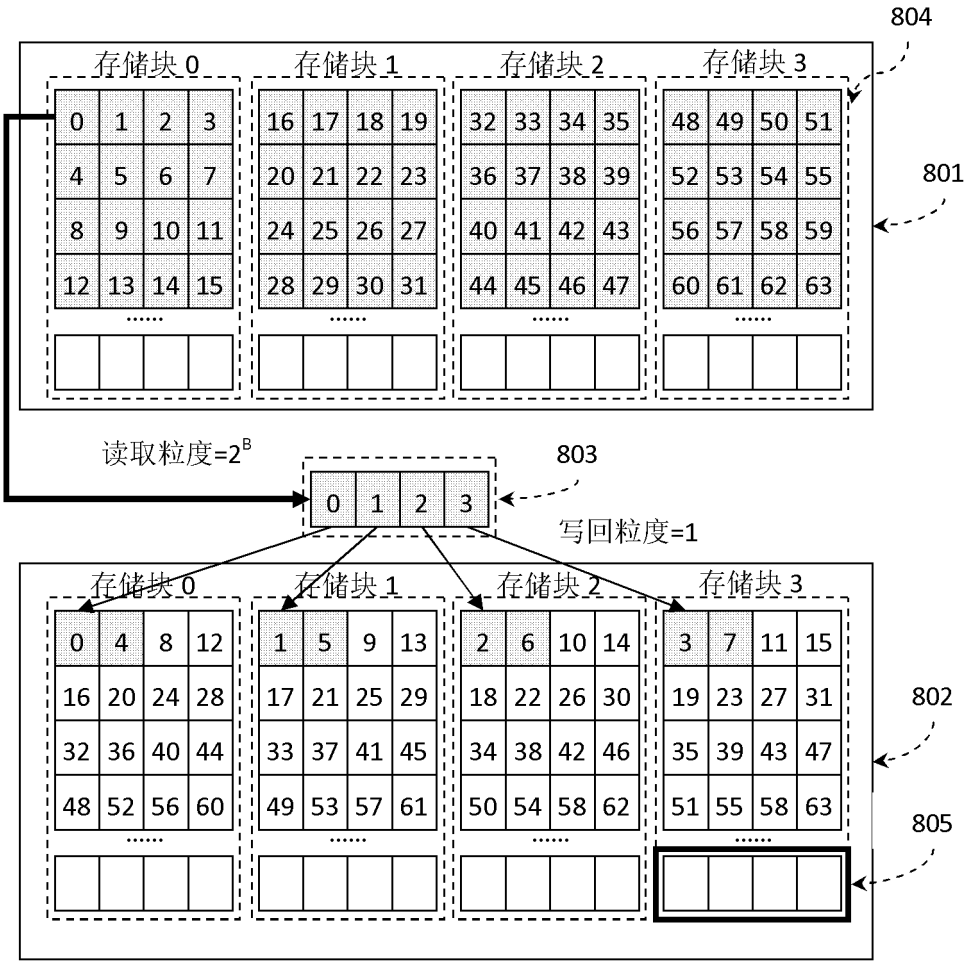

804
存储块 0
存储块 1
存储块 2
存储块 3
0 1 2 3
4 5 6 7
8 9 10 11
12 13 14 15
16 17 18 19
20 21 22 23
24 25 26 27
28 29 30 31
32 33 34 35
36 37 38 39
40 41 42 43
44 45 46 47
48 49 50 51
52 53 54 55
56 57 58 59
60 61 62 63
801
读取粒度=2^B
803
0 1 2 3
写回粒度=1
存储块 0
存储块 1
存储块 2
存储块 3
0 4 8 12
16 20 24 28
32 36 40 44
48 52 56 60
1 5 9 13
17 21 25 29
33 37 41 45
49 53 57 61
2 6 10 14
18 22 26 30
34 38 42 46
50 54 58 62
3 7 11 15
19 23 27 31
35 39 43 47
51 55 58 63
802
805

图 8

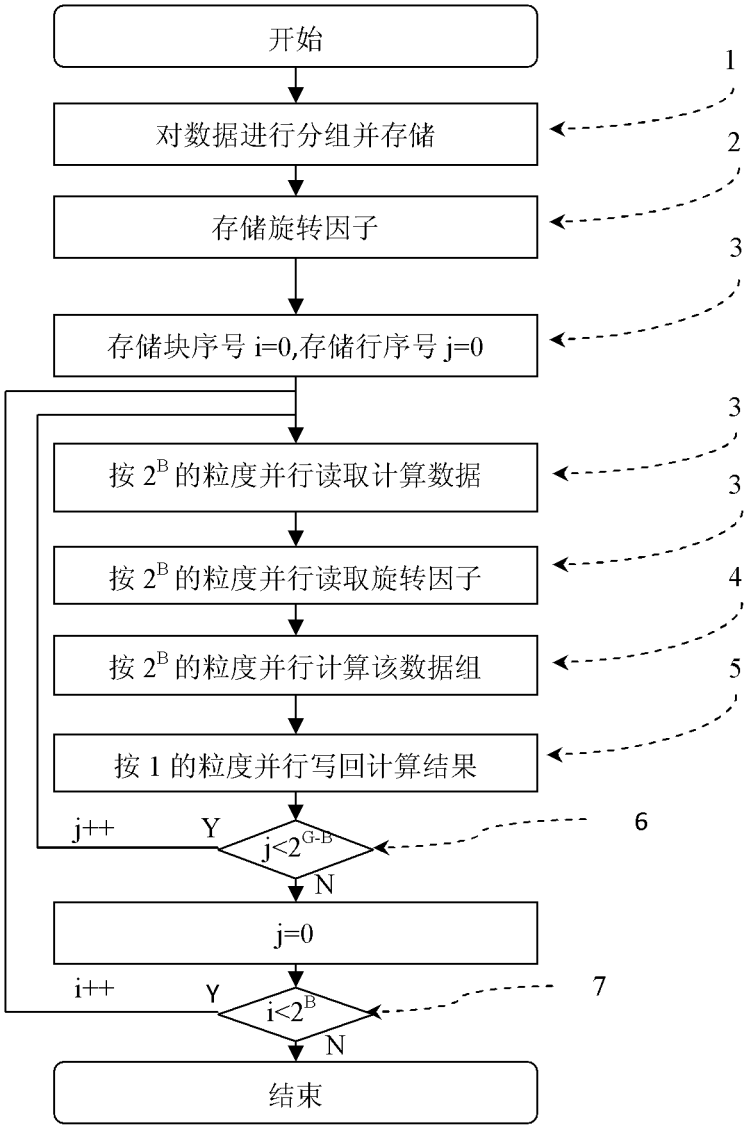

开始
对数据进行分组并存储
存储旋转因子
存储块序号 i=0,存储行序号 j=0
按 2^B 的粒度并行读取计算数据
按 2^B 的粒度并行读取旋转因子
按 2^B 的粒度并行计算该数据组
按 1 的粒度并行写回计算结果
j++
Y
j<2^(G-B)
N
j=0
i++
Y
i<2^B
N
结束
1
2
3
3
3
4
5
6
7

图 9