

基于贪婪策略的 NAND FLASH 存储器的磨损均衡算法研究

贾鑫 张少平

(江西农业大学计算机与信息工程学院 南昌 330046)

摘要 NAND FLASH 存储器是无线传感器网络节点的存储设备。传感器节点在监控区域中不断获取数据信息,并进行节点之间的数据交互,使得 NAND FLASH 存储器频繁地进行写操作,从而造成物理块的擦除次数不均衡,缩短了存储器的使用寿命,最终影响整个传感器网络的使用寿命。针对上述问题,提出了贪婪策略的分区地址映射磨损均衡算法。该算法根据磨损擦除的参数进行贪婪选择,选择出擦除次数小的物理块进行写操作,而对擦除次数大的物理块进行配置与实验数据迁移,进入等待擦除。通过软件测试的方式,证明了所提算法可以有效地实现并优化 NAND FLASH 存储器的磨损均衡。

关键词 无线传感器网络,数据存储,NAND FLASH,贪婪策略,分区地址映射

中图分类号 TP311.5 **文献标识码** A

Research on Wear Leveling Algorithm of NAND FLASH Memory Based on Greedy Strategy

JIA Xin ZHANG Shao-ping

(School of Computer and Information Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330046, China)

Abstract NAND FLASH memory is the storage device of sensor node in wireless sensor network. Sensor nodes continuously acquire data from monitoring area, and exchange data between nodes. Frequently writing operations on NAND FLASH memory makes the physical block's erase number unbalanced and reduces the memory's life. Accordingly, it will affect the life of the whole sensor network. In this paper, a partition address mapping wear leveling algorithm was proposed to solve this problem. In this algorithm, when data is written into memory, a new physical block for writing operations is selected according to the wear leveling measurement which it computed with greedy methods. And the configuration and experimental data are exchanged between the old physical block and the new physical block, then the old physical block enters a wait state. It is proved by software testing that the algorithm proposed in this paper can effectively optimize the wear leveling of NAND FLASH memory.

Keywords Wireless sensor network, Data storage, NAND FLASH, Greedy strategy, Partition address mapping

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)涉及大量的数据,这些数据记录了监控区域的各种信息,通过数据链路以及网络拓扑将信息从根节点传递到路由节点,最后通过卫星等手段使用户获得有效的数据。近年来,无线传感器技术逐渐得到国内外的关注,并逐渐趋于成熟。监测实验场中的各类数据信息是 WSN 的根本任务^[1], WSN 的主要核心应用即是监测区域的各类物理信息并报告给用户。因此,有效的数据存储和传输是 WSN 的核心支撑技术之一。

NAND FLASH 存储技术与传统磁盘的存储方式相比,有着读写速度快、抗干扰能力强、体积小、耗电量低等特点,已经成为无线传感器网络节点的主要存储设备^[2]。NAND FLASH 存储器的读写速率、数据的传导所需的载带宽度等各项性能指标都优于目前使用的传统磁盘存储设备,但是由于 NAND FLASH 存储器自身的物理特点,它的每个物理块

都有一定的擦除次数,当使用达到擦除上限时,整个物理区域将会失去其存储效能。上述情况称为该物理块的磨损。

NAND FLASH 存储器可分为:1)单层单元(Single Level Cell)型的 NAND FLASH 存储器,其擦除上限是 100 千次;2)多层单元型(Multi Level Cell) NAND FLASH 存储器,其擦除上限为 10 千次。无线传感器网络在采集数据时会在某些区域出现大量的数据更新,这时对节点的存储器模块的使用将大大增加,由之带来的对 NAND FLASH 存储器物理块的磨损也将大大增加。在 NAND FLASH 存储器存储系统所存储的数据分为配置数据和实验数据,实验信息的更新频率高,而配置信息的更新次数相对较少。因此在 FLASH 存储系统上有些存储实验数据的存储块的磨损程度大于存储配置数据的物理块,这样长久的不均匀磨损就会给 FLASH 存储器带来寿命上的损耗,从而影响网络系统的性能指标和使用时限。为了高效地管理 FLASH 存储器,在文件系统层和驱动层中间的 FLASH 转换层是管理的关键,FLASH 转换层

本文受国家自然科学基金(61462038)资助。

贾鑫(1989—),男,硕士,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:729036808@qq.com;张少平(1968—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:729036808@qq.com(通信作者)。

实现了 FLASH 的地址映射、垃圾回收以及磨损均衡等关键技术^[3]。

目前针对 NAND FLASH 存储器的磨损均衡算法主要分为动态和静态两种方式^[4-5]。动态磨损均衡算法的原理为在 FLASH 存储器进行垃圾回收时进行各个物理块的擦除次数的判别,选择擦除次数相对少的块进行数据的写操作;静态磨损均衡算法的原理是在 FLASH 存储器上进行周期性的配置数据和实验数据交换,使得更新频率次数少的配置数据迁移至擦除程度大的物理块上。

本文提出了贪婪策略的分区地址映射的静态磨损均衡算法,该算法以分区地址映射机制为基础,将平均擦除次数和部分擦除次数作为贪婪策略的重要参数,选择擦除次数总体小的区域与预留块进行配置数据和实验数据交换,从而在不影响 FLASH 存储器的写操作的基础上达到延长其使用寿命的目的。

2 相关工作

2.1 NAND FLASH 存储器的动态磨损均衡

NAND FLASH 存储器的动态磨损均衡^[4]首先在整个存储物理块上设置一个预留区域,等待更新数据的进入。当文件管理系统需要更新数据时,预留区会从物理块中挑选擦除次数最少的块,先将挑选出来的块进行擦除数据操作,然后将新数据写上去。

上述过程简单叙述了动态磨损均衡的工作原理,可以看出动态磨损均衡处理主要针对动态数据进行均衡处理,对于存储在存储器中的静态数据如传输路径、传感器的地理定位信息等也能够进行良好的处理。

采用动态磨损均衡算法进行 FLASH 存储优化可以在一定程度上延长存储器的使用寿命,但是效果有限。根据“二八法则”,主要动态数据将被存储在预留的 20% 的预留块中,而大约 80% 的存储空间将被分配至静态数据的存储空间,这样就使得 20% 的存储空间块将很快被磨损。

2.2 NAND FLASH 存储器的静态磨损均衡

NAND FLASH 存储器的静态磨损均衡^[4-5]在记录下所有物理块的擦除次数,以及在一定擦除次数之后,将不同物理块上的配置、实验数据进行交换,从而使得整个存储器的物理块擦除次数达到均衡。

静态磨损均衡算法需要定义配置、实验数据的分区机制,以及对数据存储块整体进行擦除次数的记录,因此相对于动态磨损均衡算法会增加一些开销,但是从延长整体存储器与传感器节点寿命的角度来看,这部分开销和擦除次数是值得的。由于静态的均衡算法需要获得全部块的擦除记录,因此静态均衡算法会定时进行不同数据的交换迁移,使得物理块的使用率能够得到均衡,进而延长存储器的使用时长。

2.3 闪存转换层

闪存转换层(Flash Translation Layer,FTL)对以物理块为级别的映射机制进一步细分,利用页层地址映射机制(Page-level Address Translation Mechanism),页层地址映射表中存储逻辑地址和相对应的物理块地址,表中对象的个数与 NAND FLASH 存储器的页数相对应,因为是更加细化的

映射分配,所以其具有映射精准度高、性能优越等优点。但是由于细分的逻辑块地址(Logical Block Address,LBA)相对于物理块映射机制多,造成了内存开销大的问题。图 1 给出了 FTL 映射机制。假设 LBA=2 被映射到物理块地址(Physical Block Address,PBA)(0,7),其中 LBA 是操作系统可识别的逻辑块地址,物理块地址则是 NAND FLASH 存储设备上实际存放数据的地址。PBA 由两部分组成:所在的物理块号和块内的页号。读取 LBA=2 上的数据时,先根据 LBA 查找地址映射表,找到其对应的物理地址为(0,7),然后再读取 NAND FLASH 设备上的物理地址上的数据,包括备用区的数据。当 LBA 上的数据需要更新时,FTL 必须分配一个空闲页来存放新数据,同时更新地址映射表中的这个 LBA 对应的物理地址。当没有足够的空闲页可供分配时,FTL 的垃圾回收机制将被触发,通过擦除无效页所在的块来释放空间以进行数据更新。但是,在擦除之前,还有一个关键的动作要完成,即这些块上不一定所有的页都是无效的,需要将有效的数据复制到其他空间页,同时更新地址映射表^[8]。

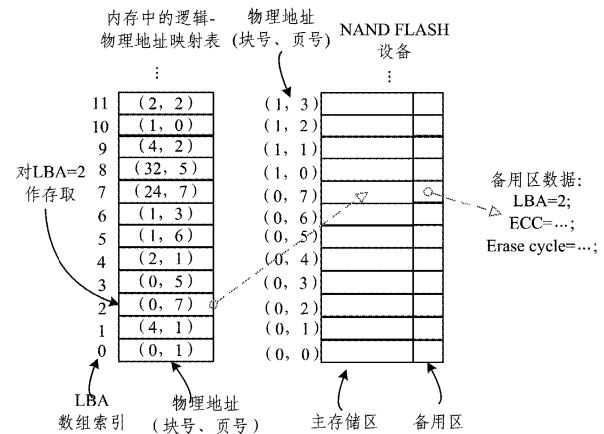


图 1 FTL 映射机制

FTL 映射机制的优点有:1)对页的使用效率高;2)细分页管理的映射机制使得算法运行得更加便利;3)通过映射表能够快速找到需要的物理块号与逻辑块的对应关系,这样在读取数据时就能够快速地进行读写操作。

FTL 映射机制的缺点有:1)由于页的管理所需要的系统开销大,当 NAND FLASH 存储设备的规模提升时会带来比较大的内存压力;2)初始化时间长,由于存储器的页数量庞大,当对其进行初始化时,地址映射表的部署时间较长,尤其在 NAND FLASH 存储器的容量加大时延长的时间更为明显。

3 基于贪婪策略的分区地址映射的静态磨损均衡算法

根据 FLASH 存储器的写操作特性,即以块级为单元进行先擦除再写入的操作流程,大部分对于 FLASH 存储器的优化算法都是首先查询物理块的擦除次数信息,然后根据擦除的次数多少来进行有效的排序,进一步来选择进行擦除操作的物理块。然而这样简单地选择擦除物理块的算法存在诸多漏洞,其中非常重要的一点是未完全考虑到不同的物理块存储数据的类型是有区别的,有的物理块存储的是系统和映

射关系等配置数据,一般这种数据的更新频率小,而有些物理块存储的是传感器的实验数据,这类数据的更新频繁,所以一般的磨损均衡算法不能很好地进行数据存储优化。分区映射的磨损均衡算法就是基于上述不同类型的数据考虑进行设计的,在充分考虑实验数据和配置数据的交换后,再依据逻辑-物理映射表中的关联进行不同类型的数据的迁移。

3.1 贪婪策略

对于一种求最优解的问题,贪婪策略可以给出更加快速、优良的解决方案。贪婪策略的核心是选择好解决问题的最优参数。在选择参数时需要谨慎选择,因为贪婪策略是根据实际问题产生的数量关系进行分级处理的策略。

通过上述分析和研究,在无线传感器网络节点 FLASH 存储器的数据优化问题上,将选取区域磨损擦除次数作为贪婪策略的参数进行分级处理。

3.2 配置数据与实验数据迁移

在无线传感器初始化时会分配出一块物理存储单元进行配置数据的存储,称这块存储区域为预留块(配置块),并将映射表关系以及传感器的路由协议等重要的配置数据写入预留块(配置块)。而当没有足够的空闲物理块被分配为预留块时,垃圾回收机制将被触发以回收空闲物理块。配置、实验数据的迁移是本次算法的核心,当需要存储数据时就会触发此机制,即将擦除次数少的物理块上的配置数据与擦除次数多的物理块上的实验数据进行交换,然后进行擦除操作,进而达到磨损均衡的目标。

依据上述描述,当传感器搜集到实验场范围内的有效实验数据后,对 FLASH 存储器进行更新数据操作,触发此机制。进行分区磨损均衡算法之前需要定义一个参数阈值 γ (此阈值的定义将在后文介绍),检索空闲和预留块的擦除次数并作差运算,然后将其与阈值进行比较,根据差的大小来判断是否进行配置数据与感知数据迁移^[2]。虽然算法过程会造成一定的系统开销,但是在之后的实验仿真中将会证明此算法的可行性。

3.3 分区磨损程度分析

本分区磨损均衡算法需要确切地知晓每一个物理块的擦除次数,因此要详细地记录擦除数据信息,这样才能保证在算法进行配置数据和感知数据迁移时有可靠的参数进行参考。

根据算法介绍,最直接和简单的参数选择就是将每个分区上的物理块的擦除次数进行统计,然后进行平均计算。设区中平均擦除次数为 $average$,在此物理块集合中如有次数从 ag_1 变为 ag_2 ,则按下式进行操作:

$$average = average + (ag_2 - ag_1) / N \quad (1)$$

但是仅用区域的平均擦除次数无法准确地描述某区域当前的磨损程度,在经过分析和研究后发现,当数据迁移完成后分区中由于擦除次数大的物理块的加入会使得整体的擦除次数有明显的提升,因此会使得分区中其他擦除次数小的物理块在下一次的数据迁移的选择中受到影响,以至于被误认为是擦除次数大的物理块。因此我们需要加入一个新的参数,即去除分区中擦除次数明显过高的块之后的部分擦除平均次数为 $average_p$,定义区域的平均擦除次数为 $average_t$,如图 2 所示。

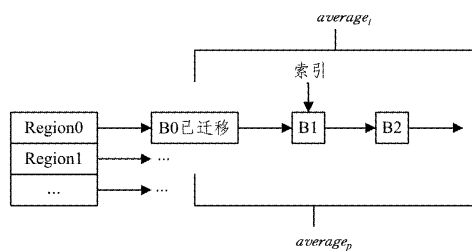


图2 区域磨损度量标准

数据变换和位置变动之后对上述两个参数进行如下操作:

$$average_t = average_t + (ag_{old} - ag_{young}) / N \quad (2)$$

$$average_p = ((average_p \times n) - ag_{young}) / (n - 1) \quad (3)$$

其中, ag_{old} 和 ag_{young} 分别代表分区中交换来的擦除次数大的物理块的擦除指标和分区中擦除次数小的物理块的擦除指标; N 代表分区中的总存储块数; n 代表未曾进行配置数据和实验数据变换的物理块数。首先查询 FLASH 存储器个分区的部分擦除次数 $average_p$ 并从中选择最小的 $average_p$, 然后与即将分配为预留块的物理块进行比较,如果差值大于阈值 γ , 则进行配置和实验数据迁移。最后在进行过数据迁移的物理块区域上设置索引,以备下次进行数据迁移时可以方便地查找到所需物理块。

3.4 阈值选取与算法执行

阈值是本次实验数据交换的基础参数,它决定着磨损均衡算法的执行效率,不能选择固定的阈值,也不随 NAND FLASH 存储器的使用状况变化,因此在阈值的选取上我们采取动态的方式:

$$\gamma = (ag_{life} - ag_{max}) \times \lambda \quad (4)$$

其中, ag_{life} 代表物理块的最大使用上限(一般为 10k 或者 100k); ag_{max} 代表所有存储器中使用次数最多的物理存储单元; λ 为参考系数,它是基于目前 NAND FLASH 存储器的使用情况和读写情况计算出的,本文将在仿真实验中对 λ 的选择进行分析和说明,本文取 50% 作为 λ 的运算值。

3.5 贪婪法的分区地址映射磨损均衡执行

根据 NAND FLASH 存储器的存储特点,以物理页为单位进行先擦除后写入的操作流程。本贪婪策略的分区地址映射磨损均衡算法不同于传统的存储映射机制。其原理为当读写数据时首先查找逻辑地址,然后根据磨损擦除系数(平均擦除次数 $average_t$ 与部分平均擦除次数 $average_p$)进行贪婪选择,选择出擦除次数小的物理块进行读写操作,对擦除次数大的物理块进行配置、实验数据迁移,之后进入等待擦除。

图 3 给出贪婪算法的分区地址映射磨损均衡算法的流程。

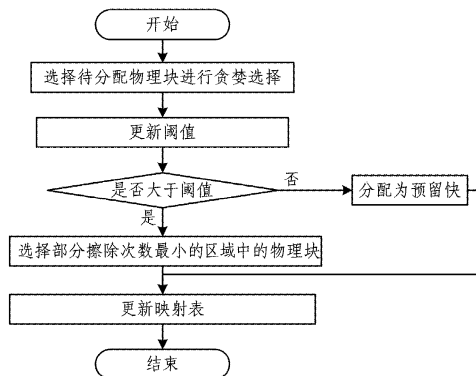


图3 贪婪策略的分区地址映射磨损均衡算法流程

贪婪策略的分区地址映射磨损均衡算法的处理流程如下:

- 1) 首先选择待分配物理块进行贪婪选择,即选取 $average_i$ 最大的区域和 $average_p$ 最小的区域;
- 2) 根据平均擦除区域 $average_i$ 与该区域最大物理块擦除上限更新阈值 γ ;
- 3) 判断部分擦除次数与待分配块的擦除次数之差是否大于 γ ;
- 4) 当差大于阈值 γ 时,选择部分擦除次数最小的区域中的物理块;
- 5) 更新映射表中的逻辑-物理映射信息,将新块的物理号映射到待分配物理块号集合中与逻辑号相关联;
- 6) 进行读写操作并更新物理块上的擦除信息。

4 仿真实验

4.1 仿真方法

在 Windows 操作系统的环境下,用 Java 语言编写的一条命令行接口的应用程序,利用软件仿真的方法对此算法进行实验。软件模拟的主要目标是仿真出磨损均衡算法对传感器节点 NAND FLASH 存储器的使用效果的优化,由于模拟的条件有限,不能够实现真实的传感器数据存储和传输的流程,因此 Java 命令应用程序只能利用内存来仿真 NAND FLASH 存储器的物理页预留区域,读写数据流操作只是在备用区进行模拟。图 4 给出了模拟程序流程。

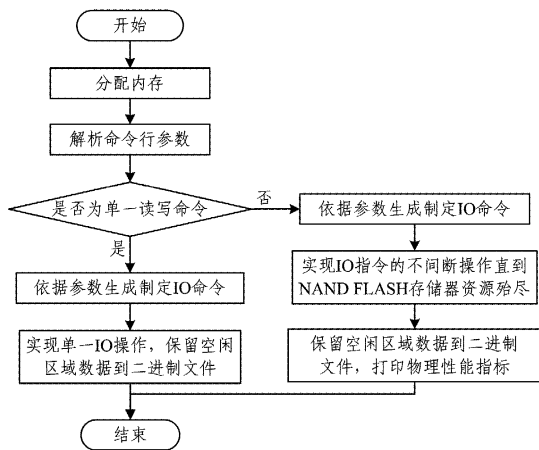


图 4 模拟程序流程

4.2 与闪存转换层(FTL)的比较

NAND FLASH 存储器的读写操作是以物理页为单位进行的,FTL 运用页级地址映射的方法进行精准的操作,即用 4bit 来存储逻辑页的映射表信息,相对应的物理页也需要 8bit 来存储其映射表信息。以本次实验采用的 128MB NAND FLASH 存储器为例,在利用率为 95.34% 的情况下 6MB 用于模拟贪婪分区均衡算法的空闲块,剩余存储器空间为 122MB,因此 FTL 的总系统开销为:

$$128\text{MB}/512\text{B} \times 8 + 122\text{MB}/512\text{B} \times 4 = 2.95\text{MB} \approx 3\text{MB}$$

即需要 3MB 的额外内存开销进行管理操作。

本实验设计的内存空间主要是存储映射表。逻辑块组包含了两个参数数据(逻辑块关联的物理块、逻辑块关联物理块

在已配置堆中的映射关系),每个元素占用 8bit,逻辑块数决定元素的个数。擦除次数元素拥有 4 个属性(分区物理块平均擦除次数、分区物理块部分平均擦除次数、物理块号以及物理块映射到的逻辑块号),因此擦除次数的每个元素需要 16 个字节。本磨损均衡算法的设计过程中牵扯到配置、实验数据的迁移,所以在迁移的运行中需要占用一部分的内存。综合以上条件分析,以 128M NAND FLASH 存储器为例,一个物理块由 64 个页组成,每个页的大小为 512bit,一个块的大小为 32k,因此得到总的管理成本为:

$$128\text{M}/32\text{k} \times 16 + 122\text{M}/32\text{k} \times 8 = 491\text{kB} \approx 512\text{k}$$

相比于 FTL 的内存空间使用量,本设计大大节省了内存的使用量。

4.3 阈值中 λ 的选择与比较

存储利用率、数据读取效率是 FLASH 存储器的两个重要指标参数:

$$\text{存储利用率} = \text{逻辑块组大小} / \text{物理块组大小}$$

$$\text{数据写入效率} = \text{实际写入数据量} / \text{计划可写入数据量}$$

存储利用率指的是 NAND FLASH 存储器的逻辑存储块组的存储空间大小与物理块组的存储空间大小之比,逻辑块组需要留有足够的空间块,因此逻辑块组的大小小于物理块组。

数据写入效率指的是实际写入数据量与计划写入数据量的比值,由于磨损均衡算法的引入会带来额外的配置信息和存储信息的开销,因此实际写入数据量小于计划写入数据量。磨损均衡算法的引入开销越小,实际写入的数据越多,那么数据写入效率就越大,NAND FLASH 的使用寿命就会越长。与此相反,如果数据写入效率低,那么实际写入的数据就少,在同一条件下的 NAND FLASH 存储器的使用寿命就会相对较短。

本贪婪策略的磨损均衡算法定义了分区部分平均磨损系数 $average_p$,因此在实际应用仿真时避免了由于配置、实验数据迁移时部分区域的擦除次数小的物理块被替换为擦除次数较高的物理块,使得整体分区的平均擦除次数大幅度上升,算法误以为本区域擦除次数很高,造成本分区的符合条件的物理块不能进行数据写入操作。

下面用实验来验证上述设计的可行性。模拟一块 128MB 的 NAND FLASH 存储器,此存储器共有 4000 个物理块,其中 256 块作为预留块(空闲块),设块上最大擦除次数为 1000 次,设定随机逻辑区域地址和随机大小的数据为操作对象在目标存储器上进行写操作,在资源耗尽之后统计出数据写入效率、剩余擦除次数的和、在不同剩余擦除次数上的物理块个数(小于 2, 2~5, 5~10, 10~20, 20~50, 50~100 以及大于 100)。实验中将阈值 λ 设定为 1, 5, 10, 50, 100 来观察统计数据的具体情况,结果如表 1 所列。图 5 给出不同 λ 下的数据写入效率分布曲线图。当 λ 为 1 时,数据写入效率为 36.09%,此时数据写入效率很低,影响存储器的使用寿命。由图 5 可知在不断加大 λ 取值后,数据写入效率不断提升,当 λ 为 50 时,数据写入效率为 66.59%,而再提升 λ 时数据的写入效率趋于平衡。

表1 不同 λ 下的统计数据表

λ	1	5	10	50	100
数据写入效率/%	36.09	40.70	61.98	66.59	66.62
总剩余擦除次数	5417	10177	19890	55013	56672
剩余擦除次数<2的块数	1631	606	300	277	203
2≤剩余擦除次数<5的块数	1893	2703	1105	575	617
5≤剩余擦除次数<10的块数	0	315	2149	813	803
10≤剩余擦除次数<20的块数	0	0	161	1015	1036
20≤剩余擦除次数<50的块数	0	0	0	1083	960
50≤剩余擦除次数<100的块数	0	0	0	10	96
剩余擦除次数≥100的块数	0	0	0	0	0

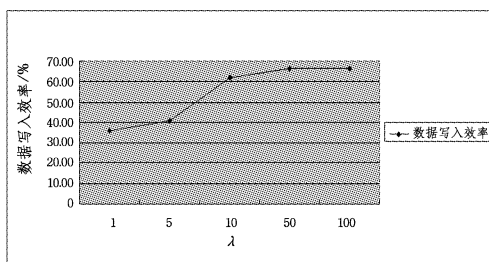


图5 不同阈值下的数据写入效率

根据表1中的擦除次数来分析 λ 与磨损均衡的关系。如表1所列,NAND FLASH存储器的总擦除次数为 $4k \times 1000 = 4096000$ 次,当 λ 为1时,物理块的剩余擦除总次数为5417次,剩余擦除次数分布得很均匀,但是数据写入效率很低。在加大 λ 后,剩余擦除次数的总和不断加大,剩余擦除次数的分布不断趋于离散,磨损的次数也越来越不均匀,但是数据写入效率明显提升。当 λ 到达50时,物理块的擦除总次数为55030,与 λ 为60相比其剩余擦除次数分布在50~100的物理块明显较少,而数据写入效率的提升效果不是很明显,因此再次加大 λ 没有实际意义。

综上所述,本实验的 λ 受数据写入利用率和物理块磨损均衡的影响, $\lambda=50$ 为最佳实验阈值。

结束语 本文提出了基于贪婪策略的分区地址映射的磨损均衡算法,由于传感器节点中的NAND FLASH存储器的存储方式的特点,在数据处理时如何使得存储器上的物理块的磨损次数得到最广泛的分布,从而使得整个FLASH存储器的应用时限尽可能延长,进而优化无线传感器网络的网络数据存储是本文的重要研究问题。

通过软件的方法对NAND FLASH存储器进行模拟,验证了本文设计的贪婪策略的分区磨损均衡算法对存储器的磨损均衡起到了优化作用。之后将本算法与FTL进行比较,本算法的内存占用大小为512k,大大减小了系统开销。在阈值的 λ 选择比较中,经过磨损均衡量和数据写入效率的综合考量,本文取阈值 λ 为50作为算法的理想阈值,这样NAND FLASH存储器的数据写入效率为66.59%,物理块的擦除次数分布得更加均衡。

参考文献

- [1] 滕飞. 小型无线传感器网络的实现与无线局域网互联[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [2] 杜明,王志军,乐嘉锦. 一种基于Flash DBMS的动态日志方法[J]. 计算机应用与软件,2010,27(4):171-173,193.
- [3] 郑文静,李明强,舒继武. Flash存储技术[J]. 计算机研究与发展,2010,47(4):716-726.
- [4] 张骏,樊晓樨,刘松鹤. 一种Flash存储器静态负载平衡策略[J]. 计算机应用,2006(5):1205-1207.
- [5] YUAN H C, JEN W H, TEI W K. Endurance Enhancement of Flash Memory Storage Systems[C]// An Efficient Static Wear leveling Design National Taiwan University. 2007.
- [6] 王佳英. 基于蚁群优化的无线传感器网络路由协议研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [7] 王冬,杨琼,徐晓光. 基于区域地址映射的NAND Flash静态磨损均衡算法[J]. 航空计算技术,2015,45(2):122-125.
- [8] 陈晓敏. 基于NAND FLASH的大容量SSD磨损均衡算法的仿真及其性能测试[D]. 上海:上海交通大学,2010.
- [9] SHI L, ZHANG B, MOUFTAH H T, et al. DDRP: An efficient data-driven routing protocol for wireless sensor networks with mobile sinks[J]. International Journal of Communication Systems, 2013, 26(10):1341-1355
- [10] WANG Y, WEI C. Lightweight, latency-aware routing for data compression in wireless sensor networks with heterogeneous traffics[C]// Wirel. Commun. Mob. Comput. . 2015.
- [11] LIU B H, NGUYEN N T, PHAM V T, et al. Novel methods for energy charging and data collection in wireless rechargeable sensor networks[J]. Int. J. Commun. Syst. , 2015.
- [12] DI PIETRO R, MICHIARDI P, MOLVA R. Confidentiality and integrity for data aggregation in WSN using peer monitoring [J]. Security & Communication Networks, 2010, 2(2):181-194.
- [13] DE SALVO B. Research on Advanced Charge Storage Memories [C]// Silicon Non-Volatile Memories: Paths of Innovation, ISTE, London, UK, 2009.
- [14] ARITOME S, et al. Advanced Operation for Multilevel Cell[C]// Nand Flash Memory Technologies. Hoboken, NJ, USA, 2015.
- [15] GURUMURTHI S, SIVASUBRAMANIAM A. Energy-Efficient Storage Systems for Data Centers[C]// Energy-Efficient Distributed Computing Systems. Hoboken, NJ, USA, 2012.
- [16] MARINELLA M J, ZHIRNOV V V. Emerging Memory Devices: Assessment and Benchmarking[C]// Emerging Nanoelectronic Devices. Chichester, United Kingdom, 2014.
- [17] FORNI G, ONG C, RICE C, et al. Flash Memory Applications [M] // Nonvolatile Memory Technologies with Emphasis on Flash: A Comprehensive Guide to Understanding and Using NVM Devices. John Wiley & Sons, Inc. 2007:19-62.
- [18] DE SALVO B. Research on Advanced Charge Storage Memories [M] // Silicon Non-Volatile Memories: Paths of Innovation. ISTE, 2010:77-170.