

doi: 103969/j.issn.0490-6756.2016.11.016

Yaffs2 文件系统中 NAND Flash 块选择策略的改进

杨 智, 严 华

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 针对 Yaffs2 文件系统中块选择策略引起的 Nand Flash 磨损均衡方面的缺陷, 引入文件更新和块回收热度计算, 将不同热度的文件分离到对应热度的物理块中, 来改进空闲块选择策略。同时引入分散度和磨损度判断机制, 通过在不同情况下选择最有效的回收块选择策略进行垃圾回收, 以提高磨损均衡效果。实验使用 QEMU 搭建嵌入式 Linux 仿真环境, 从垃圾回收页拷贝次数、块总擦除次数、块最大擦除次数、块擦除次数最大差值、块擦除次数标准差等方面进行性能比较。仿真实验结果表明, 改进策略能大大提高 Yaffs2 垃圾回收效率, 并能有效提升磨损均衡效果, 延长 Nand Flash 设备的使用寿命。

关键词: Yaffs2 文件系统; NAND Flash; 块选择; 垃圾回收; 磨损均衡

中图分类号: TP316 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2016)06-1278-05

Improvements on block selection policies of NAND Flash in Yaffs2 file system

YANG Zhi, YAN Hua

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In view of the defects of the NAND Flash wear leveling caused by the block selection policy in Yaffs2 file system, the heat calculation method of file update and block recycling was introduced. The data with different heat was separated into the corresponding physical blocks, thus the free block selection policy could be improved. And the degree of dispersion and wear leveling was adopted to improve the wear leveling by choosing the most effective garbage collection strategy in different situations. The QEMU and embedded Linux was used as the simulation platform. The performance metrics used was the number of copy operations, the number of erase operations, the maximum erase count for all blocks, the maximum erase count for all blocks, the maximum difference in the erase counts, and the standard deviation of the erase counts. The simulation results show that the improved method can greatly improve the efficiency of garbage collection, and can effectively improve the degree of wear leveling and prolong the service life of NAND Flash equipments.

Keywords: Yaffs2 file system; NAND Flash; Block selection; Garbage collection; Wear leveling

1 引 言

Nand 闪存设备正成为一个最有前途的存储介质^[1], 其具有很多优良的特性, 比如数据访问速

度快、存储密度高、耐冲击性强、功耗低、噪音小、价格低等, 使之广泛应用于笔记本电脑、智能手机和平板电脑等消费类电子产品^[2]。基于 Nand Flash 的固态硬盘在移动终端的应用也越来越广, 其不仅

收稿日期: 2015-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61172181)

作者简介: 杨智(1992-), 男, 湖南衡山人, 硕士研究生, 研究方向为模式识别与智能系统。E-mail: yangzhi_cike@foxmail.com

通讯作者: 严华。E-mail: yanhua@scu.edu.cn

可以部分或全部替换硬盘的数据存储功能,还可以替换一些主存和缓存功能模块^[3]。

Nand 闪存设备具有一定的存储空间,这些空间是由有限个物理块组成^[1],每个块包含一定数量的数据页,且 Nand Flash 的擦除操作是以块为单位,数据读写操作是以页为单位。物理块按照块中数据存储状态可分为三种^[4]:(1) 有空闲空间可供数据写入的块,称为空闲块;(2) 块空间已满且各个物理页数据均有效的块,称为满块;(3) 块空间已满但包含若干无效物理页的块,称为脏块。为保证数据可靠性,Nand Flash 设备采用异地更新策略^[5],即当某物理页数据需要更新时,系统将该物理页数据读取到内存中,在内存中修改完毕之后将更新后的数据写入到新分配的物理页中,而原物理页被软删除。

YAFFS2 文件系统的 Nand Flash 存储体系主要包括虚拟文件系统 (Virtual File System)、Yaffs2 文件系统、MTD 驱动和 Nand Flash 存储设备。其中,VFS 向上为用户应用程序提供标准的操作接口,向下整合不同文件系统的物理接口。MTD 为底层存储设备提供统一的读写操作接口,使 Yaffs2 文件操作作用于 Nand Flash 设备上。Nand Flash 存储系统体系结构如图 1 所示。

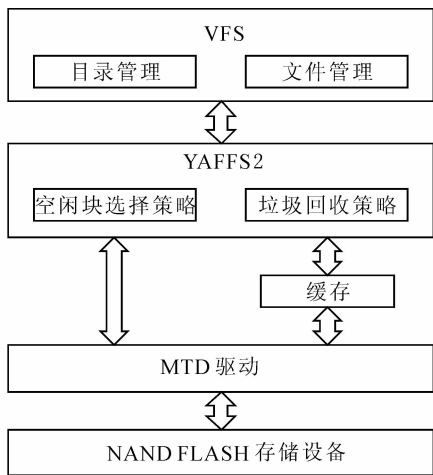


图 1 Nand Flash 存储系统体系结构

Fig. 1 System architecture for NAND flash-based consumer electronics

目前针对 Yaffs2 文件系统中闪存设备应用的改进主要集中于 NAND Flash 物理层面的垃圾回收策略改进,比如文献^[6]中通过引入温度概念对垃圾回收策略进行改进,但并没有考虑用户实际操作的数据源的逻辑热度。而本文通过引入新的热度

计算方法,对 Yaffs2 文件系统中的文件更新热度和物理块回收热度进行计算,并将热度计算结果应用于文件系统中空闲块选择和垃圾块选择,不仅考虑数据源更新热度,还考虑物理设备读写热度,实现文件系统中数据逻辑热度和物理热度的结合。

2 Yaffs2 在磨损均衡方面的缺陷

Yaffs2 文件系统中,Nand Flash 闪存设备磨损均衡效果的不足,主要是由两种应用机制引起的,一是空闲块选择机制,另一个是回收块选择机制。

Yaffs2 中空闲块选择策略是通过顺序遍历 Nand Flash 中的物理块,选取其中有剩余空闲页的块作为将要写入的数据的存储载体。当系统在更新文件或者回收某个块时,需要将有效数据写入到一个有剩余空闲页的块中,直到该块的存储空间填满为止。但是若剩余有效数据不足以填满物理块时,物理块剩余存储空间将由下一次需要操作的数据填充,这就会造成一个块中存在不同更新频率的数据。由于更新频率高的数据快速更新时会导致更新频率低的数据被迫更新,在这种空闲块选择策略下可能再次将不同更新频率的数据存放到同一物理块中,随着这种更新方式不断进行,将导致一系列不必要的读、写以及块的擦除操作^[6]。

Yaffs2 中回收块选择主要是通过贪心策略 (GR) 来选取脏块中有效页最少的物理块作为垃圾回收块。贪心策略在均匀访问时效果较好,但是在有较高访问局部性时性能很差,尤其在空间负载较高且数据更新较频繁的情况下,剩余的空闲块将反复的被选中写入和擦除,造成物理块擦除次数急剧增加,垃圾回收性能急剧下降进而影响写入速率^[7]。垃圾回收的直接目的是释放尽可能多的存储空间,所以 Yaffs2 中优先选择无效页最多的块作为垃圾回收,但这样会影响 Nand Flash 设备整体的磨损均衡。从提高损耗均衡性能的角度看,垃圾回收应首先选择擦除次数最小的块,但这样可能会增加擦除次数,增大系统消耗,降低写入数据的速度^[8],所以需要在 Yaffs2 中采用高效的空闲块选择策略和垃圾回收策略,在保证回收效能的情况下,尽可能提升磨损均衡效果。

3 Yaffs2 的改进

3.1 文件和回收块热度计算

Yaffs2 文件系统进行数据更新时,采用的是

异地更新的策略^[5],文件被当做系统读写操作的整体,其操作过程隐含了文件更新的频繁程度信息,因此可以选择将文件作为热度计算的对象,根据其更新时间间隔来表示文件更新操作的热度。

另外,系统进行垃圾回收时,是直接以物理块为对象进行回收,每个块被回收的时间间隔和次数在不同系统负载情况下的表现均不同,为统一定量物理块更新频繁度,这里选择将物理块作为热度计算的对象,通过物理块被回收时的时间间隔计算块回收操作的热度,来体现块被回收的频繁度。

下面结合操作的时间局部性^[4],对系统中文件更新和块回收操作引入热度的概念 T 。

$$T_{i+1} = \begin{cases} 1, & T_{i+1} < 1 \\ T_i * u, & 1 \leq T_{i+1} \leq N_{\text{block}} \\ N_{\text{block}}, & T_{i+1} > N_{\text{block}} \end{cases} \quad (1)$$

$$u = \left(\frac{1}{2}\right)^{\left(\left|\frac{t_{i+1}-t_i}{N_i}\right| - 1\right)} \quad (2)$$

其中, T_i 初始化为设定的固定值 T_{freq} , 当 T_i 大于 T_{freq} 时, 表示对应更新操作较频繁, 反之, 表示更新操作频率较低。 $t_{i+1} - t_i$ 表示当前更新操作进行的时间点与上一次更新操作时间点的间隔; N_{block} 是整个 NAND Flash 存储空间总的物理块数, N_i 是自行设定的用来调节时间敏感度的参数, 文件热度和块回收热度计算时采用的 N_i 是不同的数值, 以匹配逻辑热度和物理热度计算的不同。

3.2 空闲块选择策略改进

当系统中有文件执行更新操作时, 需要从 Nand Flash 存储空间中找寻合适的空闲块, 将新文件写入。对于 Yaffs2 文件系统中空闲块选择的缺陷, 可以通过选取热度对应的块来解决。

改进的空闲块选择策略: 根据修改或更新的文件的热度, 选择热度最小或者热度最大的空闲块作为新文件将要写入的物理存储空间。即如果文件本次更新, 通过热度计算公式所得热度值大于 T_{freq} , 则选择热度最小的空闲块作为写入对象, 反之, 选择热度最大的空闲块, 保证热数据存放到冷操作块中, 冷数据存储到热操作块中, 以提高物理块擦写的磨损均衡效果。

3.3 回收块选择策略改进

针对 Yaffs2 回收块选择策略的改进, 是通过引入分散度和磨损度判别机制^[1] 来提高 Nand Flash 的空间利用率和磨损均衡效果。

分散度, 定义为 Flash 存储空间中, 所有空块包含的空闲页占所有空闲页的比重, 公式如下。

$$f_{\text{scattered}} = (N_{fp} - N_{fb} * N_p) / N_{fp} \quad (3)$$

其中, N_{fp} 是存储空间中剩余的空闲页; N_{fb} 是剩余的空块; N_p 是每块包含的页数。 $f_{\text{scattered}}$ 越大, 表示页越分散, 需要采取更高效的垃圾回收。为了避免不必要的垃圾回收操作, 只有当 $f_{\text{scattered}}$ 大于阈值 T_f 时才进行垃圾回收, 而这里采取的垃圾回收策略是选择热度最小且同等热度下有效页最少的块作为回收块。

定义物理块的最大最小擦除次数之差为磨损度, 公式如下。

$$T_e = T_{\text{wl}} - (e_{\text{max}} - e_{\text{min}}) \quad (4)$$

其中, T_{wl} 是预设的用来控制磨损均衡的阈值; e_{max} 是块最大擦除次数; e_{min} 是块最小擦除次数, 如果 T_e 小于 0, 则设置为 0。

由于最小更新频率的块被选中作为回收块的可能性很小, 会造成不好的均衡效果, 所以再引入一个有效的回收块选择策略: 选择擦除次数最小且同等擦除次数下有效页最少的块。当最近一段时间内块的擦除次数超过 T_e 时, 启用该策略。 T_e 的值在每次启用该策略时更新, 以供下次使用。

当上述两种判别机制其中一种满足时, 按照其对应的垃圾回收策略选择回收块。当两种判别机制均满足时, 优先选择磨损度回收策略, 否则暂不进行垃圾回收。

4 实验测试

4.1 实验设置

本文主要对 Yaffs2 文件系统原策略和改进策略进行实验比较, 实验环境是在 Linux 12.04 LTS 下使用 QEMU 建立的嵌入式 Linux 仿真环境, 测试使用一系列随机生成的大小在 16~1024 KB 的文件, 在 Nand Flash 90% 的空间利用率下, 更新其中 15% 的数据。仿真实验各项参数和改进策略各项阈值设置如表 1 所示。

表 1 仿真实验参数

Tab. 1 Parameter values for the simulation experiments

N_{block}	N_p	N_{if}	N_{tb}	T_{freq}	T_{wl}	T_f
512	64	50	5	128	60	90%

其中, N_{if} 是文件热度计算中设置的 N_i 值; N_{tb} 是回收块热度计算中设置的 N_i 值。

性能度量采用的指标主要是垃圾回收页拷贝

次数、块总擦除次数、块最大擦除次数、块擦除次数最大差值、块擦除次数标准差.

4.2 实验结果

图 2 和图 3 显示 Yaffs2 文件系统 Nand Flash 块选择策略改进前和改进后垃圾回收页拷贝次数和块总擦除次数的测试结果, 展示垃圾回收机制的回收性能, 可以发现改进后的回收效能优于改进前一倍左右.

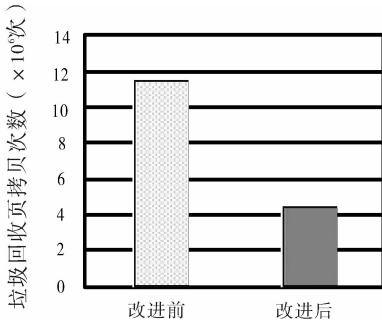


图 2 垃圾回收页拷贝次数

Fig. 2 The number of copy operations performed by each algorithm

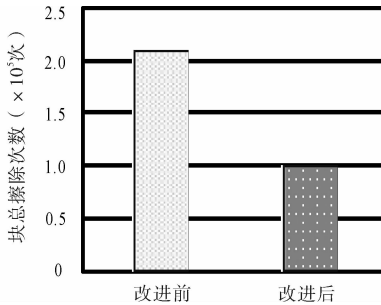


图 3 块总擦除次数

Fig. 3 The number of erase operations performed by each algorithm

图 4~图 6 分别展示块最大擦除次数、块擦除次数最大最小差值和块擦除次数标准差, 反映闪存块磨损均衡效果. 可以发现改进前 Nand Flash 中数据更新是在少部分块中进行的, 造成闪存设备磨损均衡效果很差, 而改进后的策略中, Nand Flash 数据更新是在大部分块中进行的, 使得各个物理块的擦除次数十分接近, 均衡效果优良. 并且从图 6 实验结果中可以发现, 随着擦除次数的增加, 改进后的方法对应的块擦除次数标准差基本保持在一个较小的常量, 远低于改进前的擦除次数标准差.

本文提出的对 Yaffs2 文件系统的改进策略具有很好的磨损均衡效果, 是因为改进策略结合文件更新热度与空闲块热度进行判断, 并将更新频繁的文件写入到回收操作不频繁的物理块中, 将更新频

率较低的文件保存到经常被回收的块中, 通过将不同热度的文件分离到对应热度的物理块中, 有效地阻止热块继续被擦除, 并使冷块得到及时的更新. 另外, 改进策略还引入分散度和磨损度判断机制, 在不同情况下选择最有效的回收块选择机制进行垃圾回收, 保证良好的磨损均衡效果.

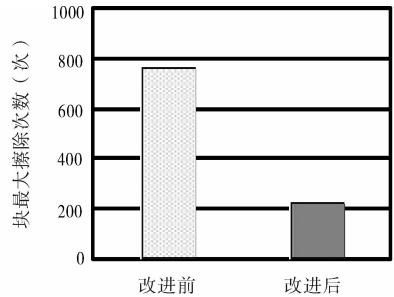


图 4 块最大擦除次数

Fig. 4 The maximum erase count for all blocks obtained with each algorithm

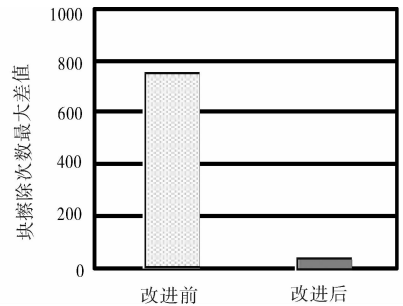


图 5 块擦除次数最大差值

Fig. 5 The maximum difference in the erase counts obtained with each algorithm

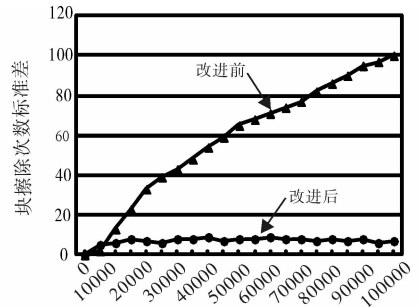


图 6 块擦除次数标准差

Fig. 6 The standard deviation of the erase counts obtained with each algorithm

由于闪存设备擦除寿命有限, 且当一个物理块损坏后, 将不能继续使用, 导致设备可用空间逐渐减少. 在闪存设备操作中, 理想情况下的页写入操作次数 $theo_writes$ 等于总的页写入次数 (n_page_writes) 减去总的页读取次数 (n_page_reads), 而实际情况下, 每次写入数据都将带来额外的操作代

价,这里引入 $\text{theo_writes}/\text{n_page_writes}$ 表示闪存存储操作中理想写操作占据的比重,构建 Nand Flash 设备使用寿命计算公式:

$$y_{\text{life}} = N_{\text{b_life}} * N_{\text{block}} * \frac{\text{theo_writes}}{\text{n_page_writes}} * \frac{365}{N_{\text{erase}}} \quad (5)$$

其中, $N_{\text{b_life}}$ 为单个物理块的擦除寿命; N_{erase} 为理论上每天进行的有效擦除次数. 假设 Nand Flash 每个物理块的擦除寿命 1.0×10^5 次,按照每天需要做 500 次擦除操作来计算, yaffs2 未改进之前,可以使用的寿命为 7.5 年,而改进之后的可使用寿命为 15.6 年,有效的延长了闪存设备的使用寿命.

5 结 论

本文针对 Yaffs2 文件系统中 Nand Flash 的操作特性,从三个方面对 Yaffs2 文件系统进行改进:一是引入文件更新和块回收热度计算,二是空闲块选择策略改进,三是使用分散度和磨损度双重判别选择适合的垃圾回收策略,实现文件系统中逻辑热度和物理热度的结合. 仿真实验表明,在改进后的 Yaffs2 文件系统中, Nand Flash 块擦除次数大大减少,磨损均衡效果得到明显的提升,并且有效的延长 Nand Flash 设备的使用寿命.

参考文献:

[1] Yan H, Yao Q. An efficient file-aware garbage col-

lection algorithm for NAND flash-based consumer electronics [J]. IEEE Trans Consumer Electron, 2014, 60 (4): 623.

- [2] Li H L, Yang C L, Tseng H W. Energy-aware flash memory management in virtual memory system [J]. IEEE Trans VLSI Syst, 2008, 16 (8): 952.
- [3] Sun C, Arakawa A, Takeuchi K. SEA-SSD: a storage engine assisted SSD with application-coupled simulation platform [J]. IEEE Trans Circuits and System, 2015, 62 (1): 120.
- [4] 胡志刚, 蒋湘涛, 贺建飏. 考虑操作时间局部性的 NAND 闪存脏块回收算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29 (10): 1925.
- [5] 黄德才, 邢春波, 吕莲. 闪存磨损均衡算法综述[J]. 浙江工业大学学报, 2009, 37 (1): 73.
- [6] 温朝建, 严华. Yaffs2 文件系统中对 NAND Flash 磨损均衡的改进 [J]. 电子技术应用, 2015, 41 (6): 16.
- [7] 时正, 纪金松, 陈春兰. 一种基于差分进化的 Flash 文件系统垃圾回收算法 [J]. 电子学报, 2011, 39 (2): 280.
- [8] 朱念好, 周玉洁. Flash 文件系统及存储管理技术研究与实践 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 31 (3): 511.