

# 一种面向无线传输的音频编解码算法的实现和优化<sup>①</sup>

杨 洋<sup>1</sup> 郭斌林<sup>1</sup> 黄 凯<sup>2</sup> (1.杭州电子科技大学 微电子 CAD 所 浙江 杭州 310037;

2.浙江大学 超大规模集成电路设计研究所 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 以面向无线应用的高性能音频编解码算法设计为目标,基于蓝牙 SBC 算法编解码框架,采用近似重构的原型滤波器和动态比特分配技术来改善音质和性能。该算法在自主 32 位 CK510 MCU 平台上实现并优化,并应用于实际无线音频方案设计中。实验结果表明,在码流和功耗损失较小的情况下,采用该算法的无线音频方案音质比原始 SBC 得到了显著提高。

**关键词:** 无线传输; 音频编解码; SBC; 自适应量化; 优化

## Implementation and Optimization of an Audio Compression Algorithm for Wireless Application

YANG Yang<sup>1</sup>, GUO Bin-Lin<sup>1</sup>, HUANG Kai<sup>2</sup> (1. Microelectronic CAD Center, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310017, China; 2. Institute of VLSI Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** This paper presents a new high-performance audio compression algorithm for wireless application. Based on blue-tooth SBC algorithm architecture, the proposed algorithm adopts nearly perfect reconstructable proto filter and dynamic bit allocation technology to improve audio quality and performance. This algorithm was implemented on 32-bit CKA5102 MCU, and successfully applied to current wireless audio solution. Experiments show that compared with blue-tooth SBC, the proposed algorithm gains much improvement on audio quality, while having less cost in bitstream and power.

**Keywords:** wireless communication; audio compression; SBC; adaptive quantization; optimization

近年来,随着无线传输技术的兴起使得多媒体应用日趋多样化。其中,蓝牙传输技术带动的无线音频应用正是典型代表之一。无线传输与有线传输相比,虽然有使用灵活方便的优点,但在带宽、延迟和功耗等方面具有一定局限性。在音频等多媒体应用背景下,如何通过有限的无线带宽实现高品质的媒体应用,仍然是一个巨大挑战。针对无线传输,高效的音频编解码算法必须在低码率、低延迟和低计算复杂度的条件下实现较好的音质。

目前在无线音频领域蓝牙 A2DP SBC(sub-band coding)<sup>[1]</sup>凭借其在码率、延迟和计算复杂度方面的优秀性能得到了广泛应用,但是相对较低的音质也限制

了其在高端领域中的应用。现有的高音质有损编解码如 MP2 和 MP3<sup>[2]</sup>等,虽然压缩比和音质都比 SBC 有较大改善,但由于一帧需处理数据量很大(SBC 一帧处理 128 个数据,MP2/MP3 一帧处理 1152 个数据),造成了较大的系统延迟,不利于无线音频要求的实时编解码。此外,一些无损压缩算法(如 WAVPACK),虽然可配置较小的一帧处理数据量,实现低延时功能,但庞大的计算复杂度和较低的压缩比也使其不适用于带宽相对有限的无线音频领域。

本文提出了一种基于 SBC 编解码框架优化的新型算法。该算法采用了性能优化的近似重构滤波器和比特分配策略。实验证明,在该算法在未增加编码比特

① 收稿时间:2009-10-09;收到修改稿时间:2009-11-30

流的条件下,显著改善了音质,有效提高了无线音频传输质量。全文架构如下:第一部分介绍传统 SBC 算法框架;第二部分介绍编解码算法的优化;第三部分介绍算法在硬件平台上的实现和优化;第四部分介绍实验结果,验证其性能。最后,总结全文。

### 1 SBC编解码算法

SBC(Bluetooth Subband Codec)音频编解码系统最早由蓝牙组织提出,是用于各无线蓝牙设备之间进行音频数据传送的一种音频编解码标准<sup>[1]</sup>。它采用子带编码和自适应量化技术(如图 1)。能在中低码流下实现高音质的声音传输,非常适合在带宽有限且对功耗要求较高的便携式无线设备中使用。

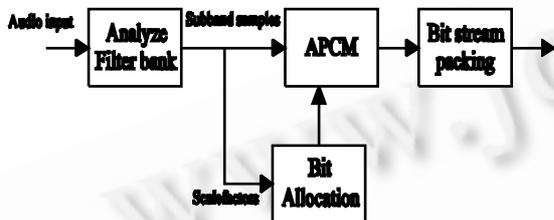


图 1 SBC 编码框架

SBC 的滤波器采用余弦调制<sup>[3,4]</sup>的 8 子带滤波,即通过滤波器组对信号进行重构。SBC 采用的是余弦调制滤波器组,即通过对一个原型低通滤波器余弦调制来实现整个滤波器组。但是如果需要获得近似重构的滤波器组,原型滤波器就必须满足重构条件<sup>[3]</sup>,即原型低通滤波器必须是线性的,且滤波器的长度  $L$  须满足  $L=2Mm$ ( $M$ :子带数,  $m$ 任意大小的正整数)。SBC 的原型滤波器系数虽然长度为 80,满足  $2mM$  条件( $m=5, M=8$ ),但并非线性滤波器,故不满足近似重构条件,音频信号通过滤波器后会出现频谱混叠。1K 正弦波通过 SBC 滤波器组重构后的频谱如图 2(a)所示,在 5K、7K 和 10K 等频点出现由混叠失真导致的谐波,严重降低了音质。因此,优化 SBC 原型滤波器可显著改善其编解码性能,提高音质。

## 2 SBC算法的优化

### 2.1 滤波器的优化

与 SBC 相同, MPEG-layer II(MP2)<sup>[2]</sup>同样采用子带滤波技术,但 MP2 原型滤波器的滤波系数较好满足了线性相位和滤波长度两个重构条件。因此音频信号通过 MP2 的滤波器组能够得到近似重构的音频信号

(如图 2(b))。因此,可以采用该滤波器替代 SBC 原有滤波器。

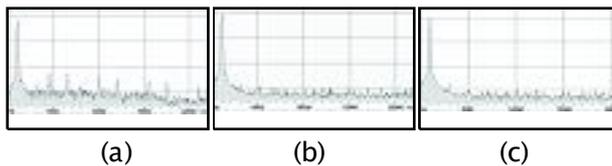


图 2 (a) 1k 正弦波的 SBC 滤波器组重构结果  
(b) 1K 正弦波经 32 子带滤波器组的重构结果  
(c) 1K 正弦波经 32 子带滤波和比特分配、量化后的重构结果

SBC 的一帧输入音频数据定为每声道 128 个数据,在 8 个子带滤波器下运行时分成 16 个块,每块 8 个数据。每次输入一个块的数据,分别通过 8 个滤波器组,最终得到 8 个子带的的数据。而 MP2 的滤波器组是 32 子带滤波,一次需要输入 32 个数据。因此,原 128 数据将分成 4 个块,每个块 32 个数据,一次输入一个块的数据给滤波器组,最终得到 32 个子带的的数据。

### 2.2 比特分配优化

比特分配是为量化做准备的步骤。它决定了每个子频带分配比特数的多少。在原 SBC 中,比特分配的工作流程是(图 3(a)):在保护低频信息的原则下,每个子带独立得到一个分配的比特数用于量化,从而实现了动态量化。此外,各子带的量化噪声被限制在本子带内部,避免了子带间的影响。经过比特分配,编码端结束时只需传输各子带量化后数据,同时作为子带位数标示的各子带的比特分配数也将作为量化参数传输至解码端。

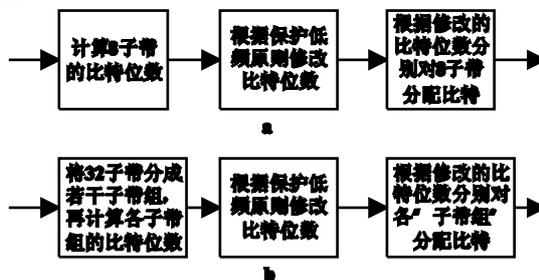


图 3 (a) 原 SBC 比特 (b) 修改后比特分配流程

在引入 32 子带滤波后,由于子带数增加,如果仍然使用原 SBC 的比特分配原则,32 个子带需独立分配比特数,那么需传输的量化参数将从 8 个增加到

32个,显著增加了编码后码流。而且,由于子带数的增加和比特分配总量的限制,分配在各子带的比特数也将相应减少,这将引起各子带内更大的量化噪声的产生。

在有限的比特分配总量前提下,需要保持量化噪声和量化参数的增量都较小,必须对比特分配过程进行修改(图3(b)):主要是将32个子带重新划分成子带组,低频子带独立成组,高频子带多个为一组,这样既能减少增加的量化参数,又能保证低频子带的量化噪声不会传递。经过32子带滤波和优化后的比特分配的算法在保持带宽增量足够的情况下实现了输入信号的重构(图2(c))。

### 3 算法的实现及优化

#### 3.1 硬件平台介绍

本系统的算法的目标硬件开发平台是以CK520为CPU处理器为核心的高性能32位MCU—CKA5102。CK520处理器是32位嵌入式CPU,具有2K的指令和数据高速缓存,可提供DSP扩展指令支持多种32位和16位的向量乘加运算,有效提高多媒体应用性能。

#### 3.2 代码的实现和优化

本文原始SBC音频编解码算法的C代码参考蓝牙官方网站的SBC编解码库。优化后算法的32子带滤波器C代码则参考MP2标准来实现,其比特分配的代码也参考原始代码自行实现。

由于设计所面向的应用是低功耗的便携式设备,因此编解码程序执行的效率十分重要。算法实现过程必须考虑到减小算法实现复杂度,优化代码执行效率,从而降低处理器运行频率。

首先分析滤波运算的流程(图4):

- 1) 音频采样数据移位
- 2) 输入新的32个音频采样数据
- 3) 滤波器系数和音频采样数据相乘,得到向量组Z[512]。
- 4) 向量组Z[512]做累加,得到向量组Y[64]
- 5) 向量组Y[16]与余弦调制系数矩阵M[32][64]相乘,得到8个子带的输出值。

步骤3)中原来的滤波系数和步骤5)中的余弦调制系数都是浮点系数,为了提高效率必须将其整数化。为了保证精度,整数化之后的系数达到了

18位,而输入音频采样信号X是16位,经过3)、4)步的乘法和累加操作,将会出现64位精度的结果。而5)步的乘累操作也会达到64位,因此,乘加运算需要使用到64位的乘法。而CKA5102为这样精度较高的中间运算设计了64位的汇编乘加运算指令:首先,用32位寄存器HI和LO分别存储64位数据的高32位和低32位。做64位乘加操作时,调用64位乘法指令MULS,将2个32位的数据相乘并赋值到HI/LO寄存器中,然后调用乘加指令,将新的2个32位数据相乘并和HI/LO中原有的值进行累加。运算的中间结果一直保存在HI/LO寄存器中,在运算结束后,再从HI/LO中取出。将乘加运算用上述流程修改成汇编指令后,实现了64位的乘加运算,运算效率比用C语言运行得到显著提高。

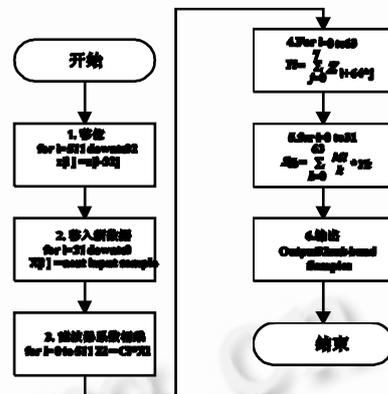


图4 32子带滤波运算流程

另外,结合滤波流程的特点和CKA5102的特点。可以对滤波操作执行效率进一步优化:观察图6第3和4步,由于调用乘加指令,已将两步运算合并(式(1)):

$$Y_i = \sum_0^7 C_{i+64*k} * X_{i+64*k}; (0 \leq i \leq 63) \quad (1)$$

根据编译器,调用变量的寻址操作首先是确定基址,应用到上式中,就是先确定基址C[i]的地址,然后再加上偏移量64、128等来确定后面各个变量的地址,而CKA5102编译器ld指令操作数为5位,即偏移量范围是0到31,而上式的偏移量过大,消耗的指令就会变得较多。那么,重新排列C[512]的存储排列,减小偏移量,就能够减少多余消耗的指令

数。具体操作如下:将 C[512]中原用于一次乘加运算的系数  $C[i+64*j]$ ( $i$  取值从 0 到 63,  $j$  取值从 0 到 7)存储到  $C[8*i+j]$ 中, 如 C[0]、C[64]、C[128]、C[192]、C[256]、C[320]、C[384]、C[448]转换成 C[0]、C[1]、C[2]、C[3]、C[4]、C[5]、C[6]和 C[7]中。这样基址变成  $8*i$ , 偏移量变成  $j$ , 每次乘加操作时, 只要计算出基址之后, 偏移量将会被限制在 31 内, 节省了乘加操作寻址使用的时间, 使得算法的速度得到了优化。

解码是编码的逆运算, 与编码优化实现方法一致。

#### 4 实验结果分析

本文算法的实验平台是基于 CK510MCU 的无线音频实验平台系统如图 5: 在主机 Dongle 端, 采用 TI 公司的 CC2500 RF 作为 2.4G 无线收发器件, 使用 CMedia 公司的 CM108 USB 芯片实现 USB 声卡功能。从机 Remote 端的模板功能由 CC2500、CKA5102 和 TLV320AI 组成, 支持耳塞/音箱输出。

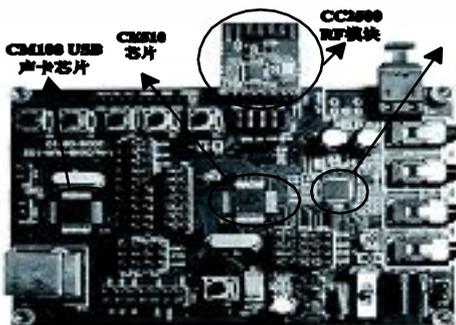


图 5 不同比特率下本文算法与 SBC 的 SNR

音质的测试: 音质评测的标准是单频点信号经编解码得到的重构信号的信噪比, 编解码时 Cool Editor 录制的重构声音文件用专业音频测试软件 SpectraLAB 测试, 可以直接观测信噪比(SNR)。图 6 显示了输入信号为 1KHz 到 20KHz 的单频点信号经 SBC 与本文算法重构后信号的信噪比(SNR)的比较。通过比较可以发现, 本文算法的信噪比基本保持在  $-80\text{db}$  以下, 并且在各频点间信噪比波动不明显, 而 SBC 信噪比基本在  $-70\text{db}$  以上, 并且随频率的增加, 重构信号的信噪比越来越差。本文算法的音质明显优于原始 SBC 算法。

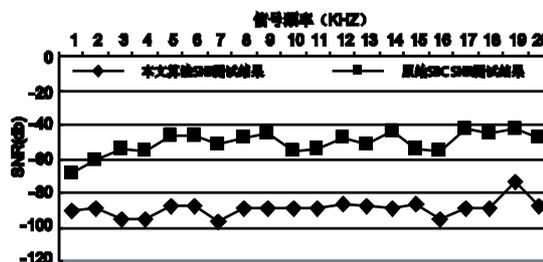


图 6 不同频点下本文算法与 SBC 的 SNR

功耗的测试: 动态功耗的计算公式是( $F$ : CPU 工作频率,  $V$ : 电压), 所以功耗与系统时钟频率成正比。实验中, 主要通过实时编解码所需的 CPU 最低时钟频率来比较功耗变化。表 1 显示了本文算法和 SBC 算法的 CPU 工作频率的测试结果。原始 SBC 需要 80M 时钟频率实现 48K 双声道立体声音乐的编解码。本文算法在优化前后分别需要 180M 和 90M 的时钟频率。由此可见, 经过事先优化, 本文算法在系统时钟频率上已经接近 SBC, 具有较低的功耗性能。

表 1 SBC、32 子带滤波、优化后 32 子带滤波运算量

	原始 SBC	本文算法	本文算法实现优化
SBC 算法运算量	80M	180M	90M

带宽的测试: 由于采用定长编码, 所以带宽可以通过用户自定的帧长计算得出。实验表明: 当无线距离需求在 10 米左右时, 音频码流必须控制在 210K~250K 左右。因此, 采用 SBC 的无线音频传输时码率在 212kbps 时已经达到了其最好音质 ( $-69\text{db}$ ), 本文算法在 242kbps 时能达到最高音质 ( $-91\text{db}$ ), 能够满足无线传输的需求。

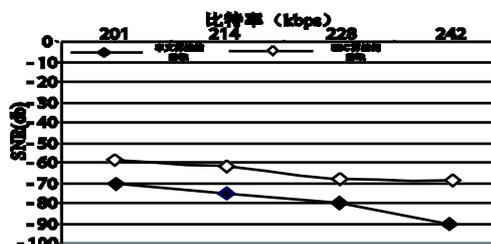


图 7 不同比特率下本文算法与 SBC 的 SNR

另外, 本文算法及其实验平台已应用于实际的无线耳机方案中。该方案由 Dongle 端与 Remote 端组成, Dongle 通过 USB 连接至 PC 端, 音频数据经 USB 传入

(下接第 89 页)

(上接第 73 页)

Dongle 端并编码, 经 RF 模块 CC2500RF 传输至 Remote 端解码, 通过耳机播放。该方案传输稳定距离最大 10 米, 功耗与系统延迟均满足无线方案的要求。

## 5 结论

本文从设计面向无线应用的低功耗高音质的音频编解码算法的角度出发, 根据音频重构原理和现有音频编解码算法缺陷提出了一种改良型算法, 并根据实现平台的硬件构架对算法进行优化。实验结果表明, 在功耗和码流没有明显增加的情况下, 实现了数字音频信号的近似重构, 显著提高了音质。

### 参考文献

1 Bluetooth SIG Inc Audio Vedio working Grope. Adv-

anced Audio Distribution Profile Version 1.0. 2003.

2 International Organization for Standardization (ISO). ISO/IEC 11172-3, Information Technology: Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1.5Mbit/s, Part 3: Audio. 1993.

3 Vaidyanathan PP. Quadrature mirror filter banks, M-band extensions and perfect-reconstruction techniques. IEEE ASSP Magazine, 1987, 4(3): 4 - 20.

4 Koilpillai R D, Vaidyanathan PP. Cosine-modulated Filter banks satisfying perfect reconstruction. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(4): 770 - 783.

Research and Development 研究开发 89