

高斯小波变换的开关电流电路实现

张江洪

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412000)

摘 要: 提出了采用开关电流电路技术实现连续高斯小波变换的方法. 建立了逼近高斯母小波的优化参数模型, 用非线性最小二乘法求解模型参数最优解. 设计了以开关电流积分器为积木块的小波变换电路, 该电路由冲激响应为母小波逼近函数及其伸缩函数的滤波器组构成. 此方法对于小波变换的模拟 VLSI 实现具有一定的理论价值与实际意义, 仿真结果表明该方法的可行性.

关键词: 小波变换; 开关电流; 非线性最小二乘法

中图分类号: TN911.71

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)09-0151-04

Implementation of Gaussian Wavelet Transform Based on Switched - Current Circuit

ZHANG Jiang-hong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: An novel analog VLSI implementation of continuous Gaussian wavelet transform based on switched - current is proposed. Marr mother wavelet is approximated by a parameterized class of function and with Levenberg - Marquardt nonlinear least square method, the optimum parameters of wavelet approximation function are obtained. The circuits of implementing Marr wavelet transform are composed of analog filter banks whose impulse response is the required wavelet approximation function. The filter design employs switched - current integrators as main building blocks. SPICE simulations indicate a excellent approximations of ideal wavelet.

Key words: wavelet transform; switched - current; nonlinear least square

1 引言

目前针对连续小波变换的电路硬件实现已展开了一些工作^[1-3], 但所报道的小波变换电路都不能实现像 Marr 及 Morlet 之类的常用小波变换, 也没有考虑系统功耗问题. 而 Sandro A. P. Haddad 等^[4-5]设计了低功耗小波变换电路, 用 Pade 法对 Morlet、Gaussian 等母小波在 S 域进行有理逼近而得到小波滤波器传输函数, 用规范正交梯形结构信号流图模拟法综合滤波器, 但电路设计过程复杂, 误差大.

开关电流电路是基于电流模的电路, 它用离散

时间的取样数据系统处理连续时间的模拟信号, 且具有以下优点^[6]: 高频特性好、适于低电压工作、动态范围大, 与标准的 CMOS 工艺完全兼容, 便于电路的大规模集成. 文中以高斯小波为例, 研究开关电流电路的连续小波变换的理论与方法.

2 模拟电路实现小波变换原理

对任意函数 $x(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换按卷积来定义:

$$\begin{aligned} WT_x(a, \tau) &= \frac{1}{a} \int x(t) \Psi\left(\frac{\tau-t}{a}\right) dt \\ &= x(t) * \frac{1}{a} \Psi\left(\frac{t}{a}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\Psi(t)$ 为母小波, $a > 0$, 为尺度因子, τ 为平移因子. 故可用模拟滤波器组实现不同尺度下的小波变换, 其原理如图 1 所示.

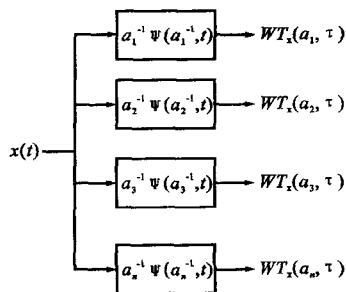


图 1 信号小波变换的滤波器实现

不失一般性, 以高斯一阶导数小波为例, 讨论冲激响应为母小波 $\Psi(t)$ 的滤波器实现问题. 高斯一阶导数母小波: $\Psi(t) = -1.7864te^{-t^2}$, $-\infty < t < \infty$, 由网络理论知, 以 $\Psi(t)$ 为冲激响应的滤波器是非因果系统, 为了设计因果可实现的小波变换电路, 令其冲激响应为母小波的延时, 即 $\Psi(t - t_0)$. 小波滤波器传输函数皆为非有理函数, 通过寻找 $\Psi(t - t_0)$ 的逼近函数作为可实现的小波滤波器冲激响应 $h(t)$, 即令 $h(t) \approx \Psi(t - t_0)$, 且其拉普拉斯变换为稳定的有理多项式:

$$H(s) = \int_R h(t)e^{-st} dt = \frac{b_ms^m + \dots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (2)$$

式中, $n > m$. 则信号 $x(t)$ 通过该滤波器的响应:

$$x(t) * h(t) \approx x(t) * \Psi(t - t_0) = WT_x(1, \tau - t_0) \quad (3)$$

由此可见, 基于模拟电路硬件实现信号小波变换得到是近似结果, 其误差大小取决于 $h(t)$ 对时延母小波 $\Psi(t - t_0)$ 的逼近程度.

3 高斯一阶导数母小波函数的时域逼近

式(2)所描述的 n 阶可实现系统, 其冲激响应一般具有如下形式:

$$h(t) = \sum_{i=1}^k a_i e^{b_i t} + \sum_{j=1}^m [c_j e^{d_j t} \sin(f_j t) + g_j e^{d_j t} \cos(f_j t)], (k + 2m = n) \quad (4)$$

故式(4)为时延母小波 $\Psi(t - t_0)$ 的逼近函数模型. 当滤波器的阶数取 5 时, 逼近误差可以满足工程需要. 令 $t_0 = 2$, $n = 5$, 有

$$h(t) = a_1 e^{a_2 t} + a_3 e^{a_4 t} \sin(a_5 t) +$$

$$a_6 e^{a_4 t} \cos(a_5 t) + a_7 e^{a_8 t} \sin(a_9 t) + a_{10} e^{a_8 t} \cos(a_9 t) \quad (5)$$

式中, $t > 0$, a_i 为待求模型参数, 要求 a_2, a_4, a_8 全为负(确保系统稳定). 则逼近误差定义为:

$$F(a) = \sum_{n=0}^{400} [h(n\Delta T) - \Psi(n\Delta T - 2)]^2 \quad (6)$$

式中, $a = (a_1 \ a_2 \ a_3 \dots a_{10})^T$ 为待求模型参数向量. 按最佳平方逼近法求 a_i 等价于选取合适的待定模型参数 a_i 使误差平方和最小, 即:

$$\min F(a) = \min \sum_{n=0}^{400} [h(n\Delta T) - \Psi(n\Delta T - 2)]^2 \quad (7)$$

这是一个非线性最小二乘问题, $F(a)$ 为目标函数. 此非线性最小二乘问题的数学模型:

$$\begin{cases} \min F(a) \\ \text{s.t. } a_2 < 0, a_4 < 0, a_8 < 0 \\ a = (a_1 \ a_2 \ a_3 \dots a_{10})^T, a_i \in R \end{cases} \quad (8)$$

文中采用 Levenberg - Marquardt 非线性最小二乘法^[7] 求解. 求得最优解见表 1, 逼近误差平方和仅为 0.0275.

表 1 模型参数最优解

i	a_i	i	a_i	i	a_i
1	-1.0811	5	1.4292	9	-2.8308
2	-0.6488	6	0.8281	10	0.2921
3	3.2392	7	1.2416		
4	-0.7469	8	-0.6675		

对所求得的冲激响应作拉普拉斯变换, 尺度为 1 时高斯一阶导数小波滤波器传输函数, 如图 2 所示.

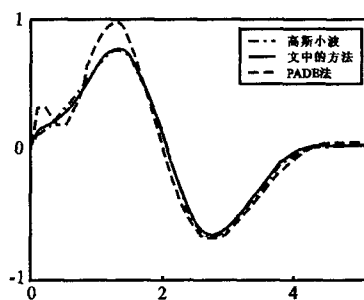


图 2 高斯一阶导数小波基逼近

$$H(s) = \frac{0.0391s^4 + 1.1387s^3 - 2.0495s^2 + 24.7113s - 0.5805}{s^5 + 3.4776s^4 + 14.889s^3 + 24.5769s^2 + 32.448s + 14.2719} \quad (9)$$

这是一个 5 阶滤波器. 其他尺度的小波滤波器

传输函数由拉普拉斯变换尺度变换性质可得.

4 基于开关电流积分器的连续小波变换电路设计与仿真

开关电流电路具有高频特性好、适于低压工作、动态范围大、电路简单且与标准的 CMOS 工艺完全兼容等优点.文中尝试以开关电流积分器^[8]为积木块,对高斯小波滤波器进行设计,实现连续小波变换电路.

4.1 开关电流积分器

构成开关电流滤波器的基本单元是开关电流积分器,采用基于第二代开关电流延迟单元可构成第二代开关电流积分器.图3所示为一个广义积分器结构,它由前向欧拉输入、后向欧拉输入、前馈输入组成.输入电流被加权 a_1 、 a_2 、 a_3 ,这由定标提供这些电流的输出级权重(宽长比 W/L)完成,并使输出级有单位权重,如图3所示.给出其 z 域输出电流为:

$$i_0(z) = \frac{a_1 z^{-1}}{1 + k - z^{-1}} i_1(z) - \frac{a_2 z^{-1}}{1 + k - z^{-1}} i_2(z) - \frac{a_3 (1 - z^{-1})}{1 + k - z^{-1}} i_3(z) \quad (10)$$

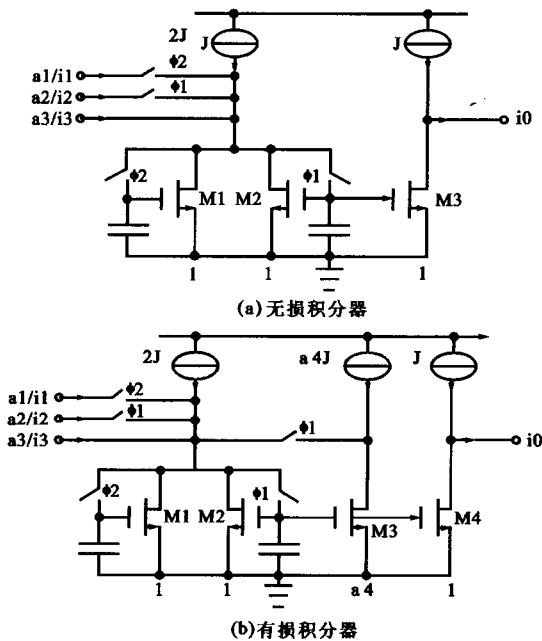


图3 开关电流广义积分器

4.2 开关电流小波滤波器电路设计与仿真

滤波器的基本组成单元是一阶和二阶滤波器.通过级联实现滤波器的综合方法具有模块性和简易性等优点,在基于开关电流技术的集成滤波器电路

设计与实现中有着良好的应用.

4.2.1 开关电流一阶节

开关电流一阶节电路如图4所示.由一个开关电流反相积分器来构成.

由图4可得到的一阶节的传输函数为:

$$H(z) = -\frac{(a_0 + a_1)z - a_1}{(1 + a_2)z - 1} \quad (11)$$

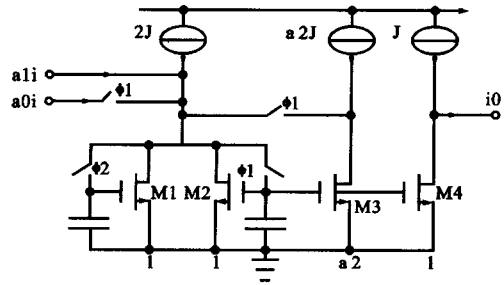


图4 开关电流一阶节电路

4.2.2 开关电流二阶节

用反相无损积分器来综合,得到图5所示二阶节的电路实现.该二阶节的传递函数为

$$H(z) = \frac{i_0(z)}{i_i(z)} = -\frac{(a_5 + a_6)z^2 + (a_1 a_3 - a_5 - 2a_6)z + a_6}{(1 + a_4)z^2 + (a_2 a_3 - a_4 - 2)z + 1} \quad (12)$$

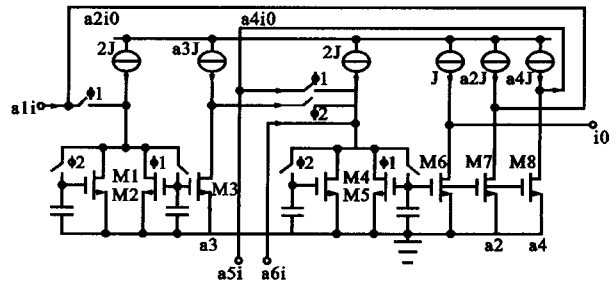


图5 开关电流二阶节电路

4.2.3 小波变换电路设计与仿真

重写尺度为1的连续高斯一阶导数小波滤波器传输函数:

$$H(s) = \frac{0.39}{s + 0.65} \cdot \frac{s^2 + 31.5s - 0.74}{s^2 + 1.3s + 8.5} \cdot \frac{s^2 - 2.3s + 20.1}{s^2 + 1.49s + 2.6} \quad (13)$$

可见,用一个一阶节和两个二阶节的级联可以实现该高斯一阶导数函数小波滤波器.本文采用开关电流的专用仿真软件 ASIZ 进行仿真.用 ASIZ 的专用绘图软件 Edfilw 所绘开关电流小波变换电路如图6所示.

开关电路小波变换电路图中,所有电流源应 ASIZ 仿真要求而省略,且除表2所列晶体管的宽长

比(W/L)外,所有晶体管的宽长比均为 1. 为了产生尺度分别为 $a=1$ 、 $a=0.1$ 的小波函数,在仿真时设定时钟频率分别为 100kHz、1000kHz,晶体管 M36(电流镜输出)的宽长比分别为 1、 $\sqrt{10}$. 图 7

(a)、(b)分别是尺度分别为 $a=1$ 、 $a=0.1$ 时用 A-SIZ 仿真所得小波电路的冲激响应. 可见开关电流小波电路的冲激响应逼近高斯一阶导数函数的效果理想.

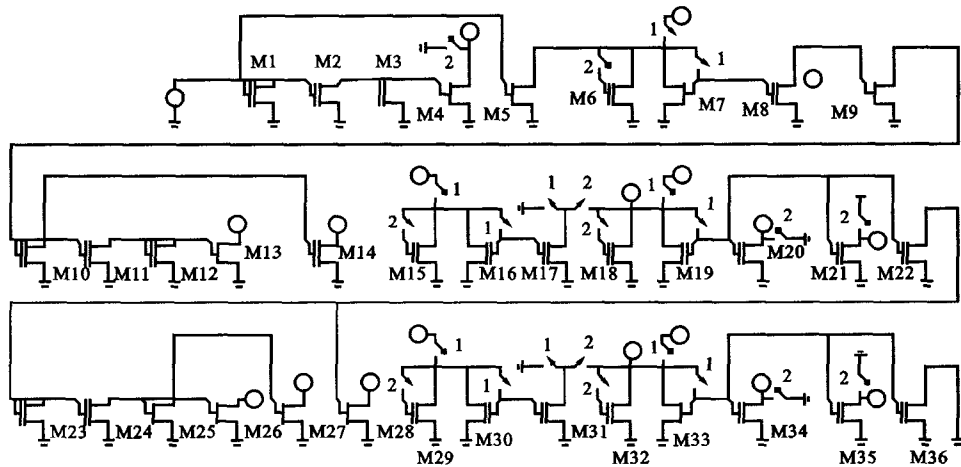


图 6 小波变换的开关电流电路实现

表 2 MOS 管宽长比 (W/L)

M4	M5	M8	M13	M14	M20
0.637	0.319	0.216324	0.05691	0.113817	0.312586
M21	M26	M27	M28	M34	M35
0.07251	0.193855	0.38393	1.446786	0.050732	0.438076

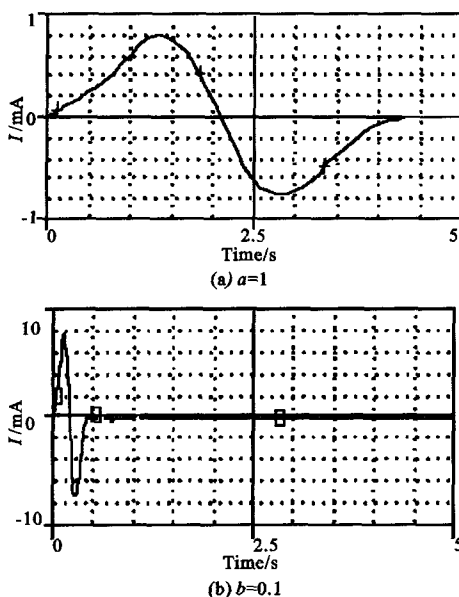


图 7 小波滤波器冲激响应

5 结束语

文中研究了基于开关电流技术的高斯一阶导数小波变换模拟 VLSI 实现方法,构造了高斯一阶导

数母小波的时域逼近模型,用 Marguardt 非线性最小二乘法求解模型参数最优解,得到母小波时域最佳平方逼近函数及小波滤波器传输函数. 设计了以开关电流积分器为积木块的小波变换电路,该电路由冲激响应为母小波逼近函数及其伸缩函数的滤波器组构成. 仿真结果表明该方法完全可以用于连续小波变换模拟 VLSI 的设计.

参考文献:

- [1] Edwards R T, Godfrey M D. An analog wavelet transform chip[C]// Proc. IEEE Int. Conf. Austria: Vienna, Neural Networks, 1993:1247-1251.
- [2] Edwards R T, Cauwenberghs G. A VLSI implementation of the continuous wavelet transform[C]// Proc. of IEEE Int. Symp. Cir. & Sys. Cambridge, 1996:368-371.
- [3] Moreira - Tamayo O, Pineda de Gyvez J. Time-domain analog wavelet transform in real-time[C]// Proc. of IEEE Int. Symp. Cir. & Sys. San Diego, 1995:1640-1643.
- [4] Haddad S A P, Verwaal N, Houben R. Optimized dynamic translinear implementation of the Gaussian wavelet transform[C]// Proceedings IEEE Int. Symp. Cir. & Sys. Atlanta, 2004:145-148.
- [5] Haddad S A P, Sumit Bagga, Serdijn W A. Log-domain wavelet bases[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. I, 2005, 52 (10):2023-2032.

(下转第 158 页)

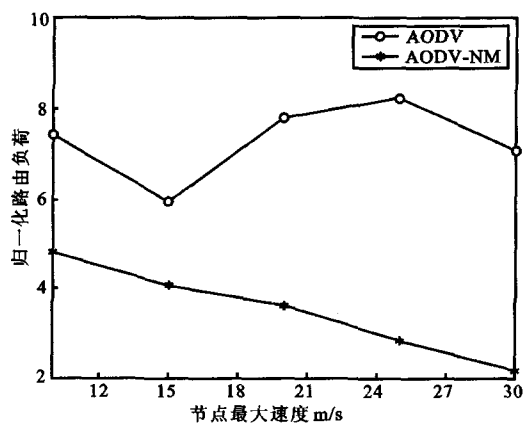


图5 稀疏环境下路由负荷比较

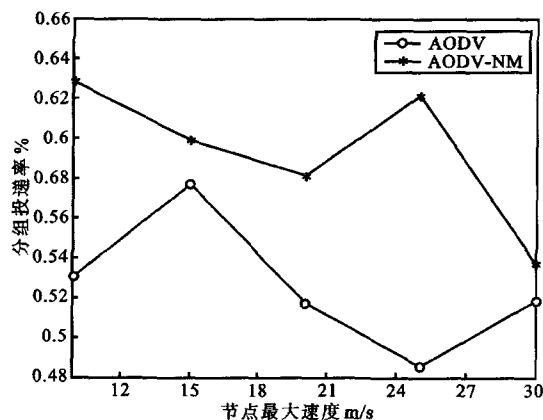


图6 稀疏环境下分组投递率比较

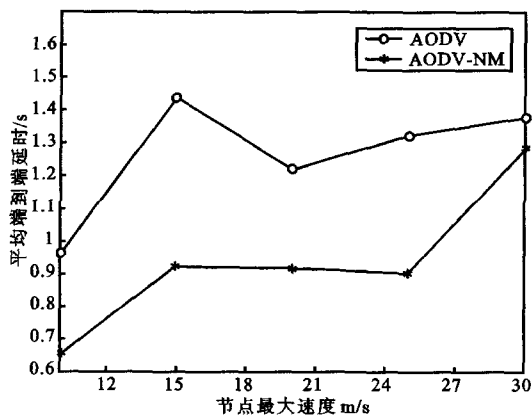


图7 稀疏环境下延时性能比较

5 结束语

文中对 AODV 协议进行了基本分析,基于节点移动性,提出了一种新的 AODV 协议的改进协议 AODV-NM. 仿真结果表明,AODV-NM 能够较大幅度的降低路由负荷,同时在延时性能与分组投递率方面也有不同程度的提高,尤其是应用于稀疏环境下. 本研究接下来的工作在于分析 AODV-NM 中 RREQ 泛洪频率与协议性能之间的关系,最终实现能够根据网络拓扑与流量情况自适应选取最优参数的路由协议.

参考文献:

- [1] Royer E, Toh C K. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks[J]. IEEE Personal Communications Magazine, 1999, 6(2):46-55.
- [2] 方旭明. 下一代无线因特网技术: 无线 Mesh 网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 103-105.
- [3] Ram Ramanathan, Jason Redi. A brief overview of ad hoc networks: challenges and directions[J]. IEEE Comm. Magazine 50th Anniversary Commemorative Issue, 2002 (5):20-22.
- [4] Johnson D B. Routing in ad hoc networks of mobile hosts [C]//Proceedings of Work Shop on Mobile Computing Systems and Applications. Pittsburgh, 1994:158-163.
- [5] 李平均, 谷宁静. 一种基于 AODV 协议的改进协议 Q_AODV[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(1):89-92.
- [6] Li Jinyang, Blad Charles, Douglas S J, et al. Capacity of Ad hoc wireless network[C]//Proceedings of MOBICOM. Rome, 2001:61-69.
- [7] 庄雷, 孙智军. 一种增加时限和延迟的 AODV 协议改进算法[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(8):180-182.

作者简介:

陈哲愚 男, (1985-), 硕士研究生. 研究方向为无线 Mesh 网络路由协议、无线网络跨层设计等.

(上接第 154 页)

- [6] Hughes J B, Bird N C, Macbeth I C. Switched current - A new technique for analog sampled - data signal processing [C]// Proc. IEEE. ISCAS. USA: Oregon, Portland, 1989:1584-1587.
- [7] Marquardt D. An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters[J]. Soc. Ind. Appl. Math, 1963

(3):431-441.

- [8] 雷焱, 何怡刚. 一维离散小波变换的 VLSI 设计[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(2):48-51.

作者简介:

张江洪 男, 教师. 研究方向为电路与系统设计.