

基于 FPGA 的 STA-CORDIC 算法 在 SCME 中的应用 *

王华华，陈雷成，陈发堂，李明，汪朋锐

(重庆邮电大学 重庆市移动通信技术重点实验室, 重庆 400065)

摘要：鉴于 SCME(演进型空间信道建模)过程中, 基于 CORDIC 算法定点嵌套正余弦函数处理的重要性及其结果精度、资源消耗和延时时间之间的博弈性, 提出了 STA-CORDIC 算法, 即在传统 CORDIC 算法结构之外增加算法精度与迭代次数、定点比特数之间多参量误差统计分析模块, 之后基于 Xilinx 公司 Virtex-6 芯片做算法 FPGA 实现。通过 TD-LTE 射频一致性测试仪表 SCME 模块的应用, 验证了算法结果能够较好地解决上述计算精度和处理速度的最优化折中问题。

关键词：STA-CORDIC; 三角函数; SCME; 定点仿真

中图分类号：TN929.5

文献标识码：A

文章编号：0258-7998(2014)08-0109-03

The application in SCME of STA-CORDIC based on FPGA

Wang Huahua, Chen Leicheng, Chen Fatang, Li Ming, Wang Pengrui

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology of Chongqing, Chongqing University of Posts and Telecommunications,
Chongqing 400065, China)

Abstract: In view of the importance of fixed-point Sine and Cosine functions based on CORDIC and the game problem among the algorithm accuracy, resource consumption and delay time in SCME (Spatial Channel Modeling Extended), this article presents the STA-CORDIC which adding a error statistical analysis module of algorithm accuracy, the number of iterations and the fixed-point number of bits after the traditional CORDIC algorithm, and then conducting the FPGA implement based on the Virtex-6 chip of Xilinx company. Through the application in the SCME module in LTE RF conformance testing instrument verified that this algorithm could solve the optimization tradeoff between the accuracy and processing speed.

Key words: STA-CORDIC; trigonometric; SCME; fixed-point simulation

无论 SCM (Spatial Channel Modeling)、SCME 还是 WINNERII 等信道建模过程中, 在信道矩阵欧拉公式展开后都有嵌套三角函数的实时参与。常用的计算三角函数方法有查找表和 CORDIC 算法^[1], 考虑到造价成本, FPGA 资源并非无限大, 而计算结果精度与存储空间相互矛盾, 于是随着需求精度的增加查找表容量成指数增长从而优势渐无, 而 CORDIC 算法则以空间换时间, 只是进行加减和移位运算^[2], 所以其在 FPGA 实现中较为方便。

关于 CORDIC 算法的硬件实现方案, HU Y H 等人提出的角度编码 CORDIC 算法可以大幅度减少迭代次数^[3], 但提高了算法迭代时间和面积消耗; WANG S 等人

提出了一种更好的角度选择函数^[4-5], 但是与 AR CORDIC 算法相比其迭代次数要多很多; 参考文献[6]提出的分解旋转角度的方法与传统 CORDIC 算法比较所需时钟周期要大得多。针对上述现状, 本文提出了 STA-CORDIC 算法, 即在传统 CORDIC 算法仿真结构之外增加算法精度与迭代次数、定点比特数之间多参量误差统计分析模块, 之后基于 Xilinx 公司 Virtex-6 芯片做算法 FPGA 实现。

1 SCME 过程中 CORDIC 算法的应用

经过路径损耗、阴影衰落、收发两端天线增益、MS 端移动速度和方向、天线阵列到达角和离开角处理等相关操作之后, 得到了 $U \times S$ 的(U 和 S 分别为收发端天线数)信道传输矩阵 $H_n(t)$, 其中第 (u,s) 个元素如下^[7-8]:

* 基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX03001-003-01); 重庆邮电大学青年科学基金工程(A2012-89)

$$\begin{aligned}
 h_{n,m}(t) &= \sqrt{\frac{P_n \sigma_{sp}}{M}} \sum_{m=1}^M \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})} \exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \phi_{n,m}]) \times \\ \sqrt{G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})} \exp(j[kd_u \sin(\theta_{n,m,AoA})]) \times \\ \exp(jk\|v\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v)t) \end{array} \right\} \\
 &= \sqrt{\frac{P_n \sigma_{sp}}{M}} \sum_{m=1}^M \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoD}) G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})} \\ \exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \phi_{n,m} + d_u \sin(\theta_{n,m,AoA}) + \|v\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v)t]) \end{array} \right\} \\
 &= \sqrt{\frac{P_n \sigma_{sp}}{M}} \sum_{m=1}^M \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoD}) G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})} \\ \cos(kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \phi_{n,m} + d_u \sin(\theta_{n,m,AoA}) + \|v\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v)t) + \\ j \sin(kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \phi_{n,m} + d_u \sin(\theta_{n,m,AoA}) + \|v\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v)t) \end{array} \right\}
 \end{aligned} \quad (1)$$

从式(1)中可以看出在 $\theta_{n,m,AoD}$ 和 $\theta_{n,m,AoA}$ 正弦值的处理过程中以及自然指数的欧拉展开式中,嵌套三角函数的实时处理极为关键。

2 CORDIC 算法的性能分析

根据式(2)分别求得最大误差 E_{max} 、平均误差 \bar{E} 和均方根误差 E ,以便分析计算仿真后数据与真实数据之间的误差。

$$\begin{aligned}
 E_{max} &= \max(|y_i(n) - y|) \mid_{n=1,2,3 \dots CNT} \\
 \bar{E} &= \frac{\sum_{n=1}^{CNT} |y_i(n) - y|}{n} \\
 E &= \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{CNT} |y_i(n) - y|^2}{n}}
 \end{aligned} \quad (2)$$

虽然理论上迭代次数越大、定点比特数越多仿真效果会越好,但是由于实际环境下软硬件资源的限制、运行延时时间以及成本等方面的考虑,在应用CORDIC算法计算正余弦函数时,在满足研究具体要求的前提下,迭代次数和定点比特数应该尽可能小。

2.1 迭代次数对仿真结果精度的影响

设定定点比特数为BYTE=32 bit,当迭代次数CNT低于5时,计算结果精度太低不予考虑。本文选择CNT=[5,6,7,8,9,10,11,12,13],根据式(2)在[0,2π]内分析不同迭代次数对仿真结果的影响,如图1所示。

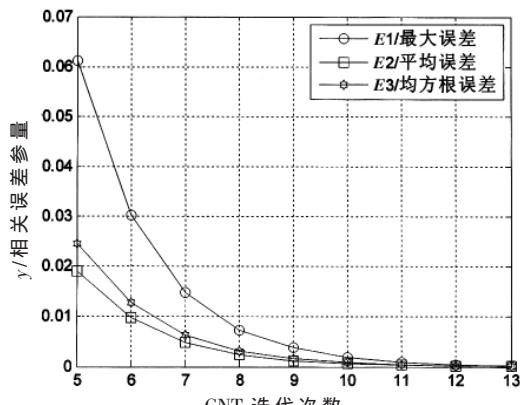


图1 各误差参量随CNT变化情况

从图1知道,随着CNT的增大,各误差参量急剧降低。在CNT=10以后,各误差参量变化差别较小,即在精度要求不太高时,10次迭代足以满足一般情况下研究对算法精度的要求。

2.2 定点比特数对仿真结果精度的影响

固定迭代次数CNT=13,一般情况下,定点比特精确位数不会超过32 bit,所以此时取BYTE=[10,32]区间中的数值,同样根据式(2)分析不同定点比特数对仿真结果精度的影响,如图2所示。

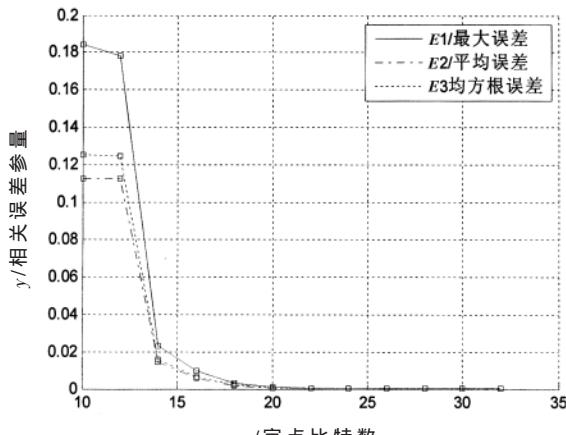


图2 各误差参量随BYTE变化情况

从图2中看到,随着BYTE的增大,各误差参量骤然降低。尤其在BYTE=20以后,各误差参量变化差别较小,数值已在很小的数量级上。即在精确度不甚高的时候,只取BYTE=20就能够满足研究需求。

3 固定弧度值处CNT和BYTE对算法精度的联合影响

为了研究采取不同CNT和BYTE时,计算结果精度随之变化情况,固定角度为 $\pi/4$ 进行仿真研究。角度为 $\pi/4$ 时,仿真函数值和真实函数值的图像如图3所示,图4为此时仿真值与真实值之间的误差绝对值图像。

图3显示采取不同的CNT和BYTE时,一定范围内

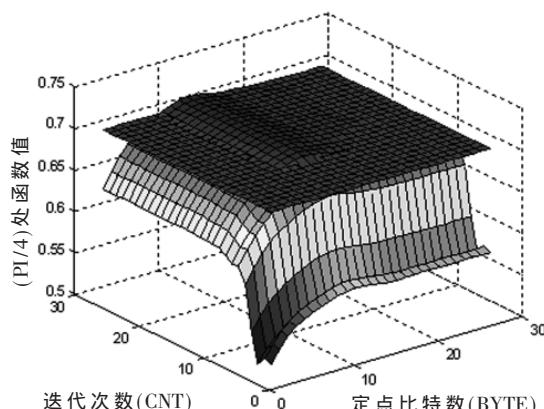
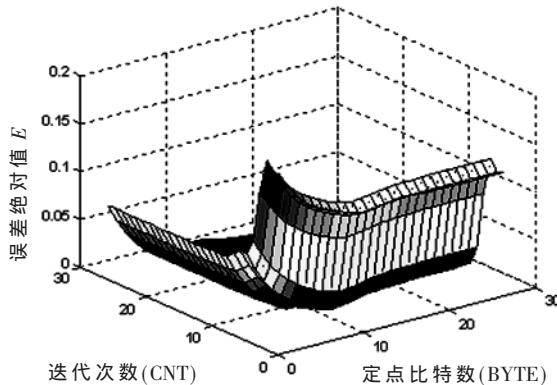


图3 角度 $\pi/4$ 时仿真和真实函数值图像

图 4 角度 $\pi/4$ 时仿真函数值误差绝对值

迭代次数比定点比特数对结果精度影响大。图 4 显示在 CNT 小于 10 时, 误差绝对值迅速增高, 即计算结果精度迅速降低, 而一定范围内精度误差绝对值随 BYTE 变化较缓慢。

4 算法 FPGA 设计及仿真分析

4.1 算法设计流程

STA-CORDIC 在传统算法结构之外, 添加了一个统计分析模块。通过特定角度及其正余弦函数值对所建模型进行需求精度循环优化, 在满足精度要求后, 确立好最优模型, 之后计算目标角度的函数值。具体结构如图 5 所示。

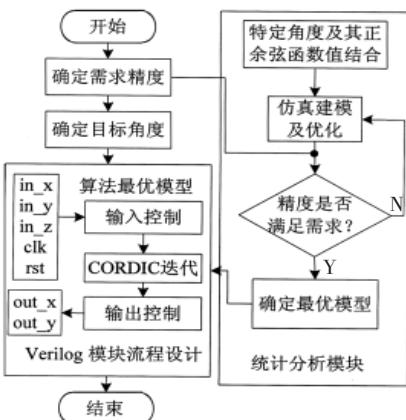


图 5 STA-CORDIC 算法结构

CORDIC 算法的实质即为硬件移位与加减操作, 首先确定需求精度进而得出收缩因子 K 值, 之后输入待求角度, 通过基础角度集合中角度的积累, 逐渐逼近目标角度, 剩余角度渐趋为零。CORDIC 算法硬件实现流水线结构如图 6 所示。

4.2 算法的仿真分析

基于以上分析, 选取 BYTE=32、CNT=13 和 BYTE=20、CNT=10 两种情况下做硬件仿真实现。算法 ModelSim 仿真图如图 7 和图 8 所示。

对比图 7 和图 8, 可以看出两者之间的误差值在允许范围之内。但图 7 条件下(情形 2)所用资源能比图 8(情形 1)所用资源节省许多, 两者对比如表 1 所示。

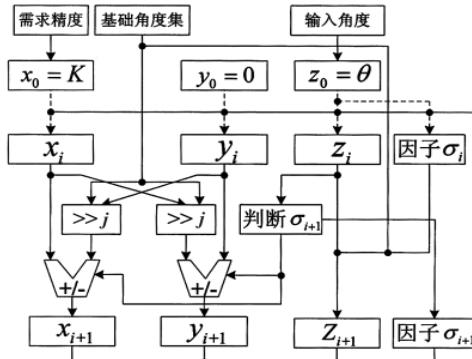


图 6 CORDIC 算法的 PIPELINED 结构

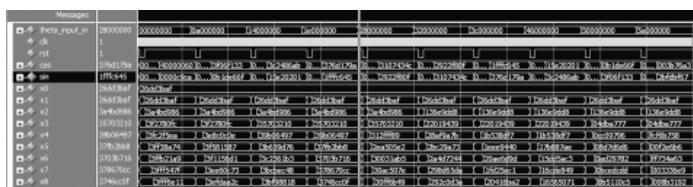


图 7 BYTE=32, CNT=13 条件下仿真图像

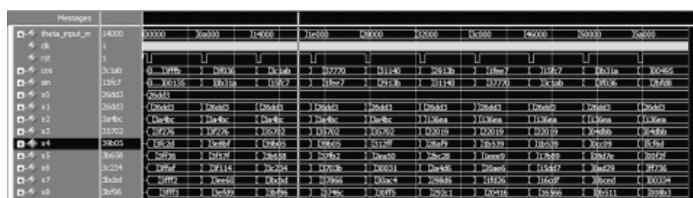


图 8 BYTE=20, CNT=10 条件下仿真图像

表 1 两种情形下算法结果精度与资源消耗对比

情形	逻辑单元	寄存器	存储资源	结果误差值/%	输出时延(CLK)
1	1 276	772	57	0.13	13
2	1 027	651	46	0.19	10

从表 1 中可以看出, 情形 2 比情形 1 精度稍有欠缺, 但尚在误差允许范围内。另一方面, 在逻辑资源、寄存器、存储资源消耗和延时对比中, 情形 2 有较大的优势。即此时用较小的精度差值换得了资源上的节省。

本文在理论可行性分析基础上, 提出了在传统 CORDIC 算法增加了优化模块的 STA-CORDIC 算法, 在 MATLAB 仿真之后基于 Xilinx 公司 Virtex-6 芯片做了算法 FPGA 实现, 通过资源消耗和延时等因素对比得出了 STA-CORDIC 算法操作的优势性。

参考文献

- [1] VORDER J E. The CORDIC trigonometric computing technique[J]. IRE Transactions on Electronic Computers, 1959, EC-8(3):330–334.
- [2] MEHER P K, VALLS J, JUANG T B, et al. 50 Years of CORDIC: algorithms, architectures and applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers, 2009, 56(9):1893–1907.
- [3] HU Y H, NAGANATHAN S. An angle recoding method (下转第 115 页)

以看出, T 取 35 时 MAE 的值最优(下文 T 取 35)。

3.2.2 算法对比实验

本实验选取标准 LDA 模型^[3]和 Twitter–User^[4](简称 T–U)模型作为本文的对比算法。此外,当前在预测用户关注时,一些场合也采用简单统计的方法(称为 General 方法),该方法统计过去一段时间用户关注分布情况当作用户当前关注,本文也将此方法作对比。

图 4 为 3 种对比算法和本文算法的预测误差平均值对比图。从图中可以看出,MUAD 算法的预测误差都要低于其他 3 种方法。

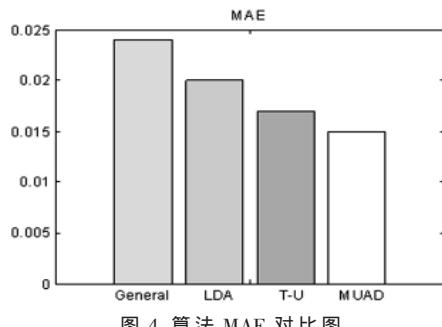


图 4 算法 MAE 对比图

MUAD 算法优于 LDA 和 T–U,是因为 MUAD 直接通过用户历史关注信息预测未来关注的领域,而 LDA 和 T–U 更侧重于用户主观上的兴趣。

MUAD 算法优于 General 方法,是因为相比于 General 方法,MUAD 考虑的因素更全面更合理,主要体现在:(1)考虑了近因效应,距离当前时间越近,影响效果越明显;(2)人类的记忆是会遗忘的,而不是一经学习永久存储的;(3)随着对同一知识记忆量的增加,每次重复学习产生的新记忆量不断下降,总的记忆量逐渐收敛。

本文首先对微博用户关注信息分成了 10 个类别;然后利用用户历史关注信息,借鉴人类遗忘规律的相关知识,提出了一种用户关注度计算方法;最后设计了 MUAD 算法,得到了用户的关注度分布向量。实验表明,该方法能够准确地发现微博用户的关注分布情况,具有

较强的实用性。

参考文献

- [1] WENG J, LIM E P, HE Q, et al. What do people want in microblogs Measuring interestingness of hashtags in twitter[C]. Data Mining (ICDM), 2010 IEEE 10th International Conference on. IEEE, 2010:1121–1126.
- [2] WU W, ZHANG B, OSTENDORF M. Automatic generation of personalized annotation tags for twitter users[C]. Human Language Technologies: The 2010 Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. Association for Computational Linguistics, 2010:689–692.
- [3] HONG L, DAVISON B D. Empirical study of topic modeling in twitter[C]. Proceedings of the First Workshop on Social Media Analytics. ACM, 2010:80–88.
- [4] Xu Zhiheng, Long Ru, Liang Xiang, et al. Discovering user interest on twitter with a modified author-topic model[C]. International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology. IEEE/WIC/ACM, 2011:422–429.
- [5] HERMANN E. Memory:a contribution to experimental psychology[EB/OL].(2011-12-09)[2014-01-16].<http://psy.ed.asu.edu/~classics/Ebbinghaus/index.htm>.
- [6] Zeng Donghong, Wang Tao, Yan Shuifa, et al. A collaborative filtering recommendation algorithm based on exponential forgetting function[J]. Science Mosaic, 2013(7):10–15.

(收稿日期:2014-03-16)

作者简介:

崔瑞飞,男,1989 年生,硕士研究生,主要研究方向:通信与信息系统。

于洪涛,男,1970 年生,教授,主要研究方向:通信与信息系统。

张考,男,1989 年生,硕士研究生,主要研究方向:通信与信息系统。