

## Design and Implementation of Micro-Satellite Transmitter Using CORDIC Algorithm \*

JIANG Jianwen, ZHANG Chaojie, JIN Xiaojun, JIN Zhonghe \*

(Department of Information and Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The implementation method of fully digital modulation transmitter of micro-satellite affects volume, weight and function reconfigurability of the transponder. The transmitter composed by fully digital modulator and two up-converter stages is able to cope with multiple symbol rates, signal bandwidths, and modulation schemes. The Digital Frequency Synthesizer (DFS) of fully digital modulator which was implemented by Numerically Controlled Oscillator (NCO) and coordinate rotation digital computer (CORDIC) algorithm, not only satisfies the requirement of frequency resolution, but also needs less logic resources than traditional frequency synthesizer solutions. The very high speed integrated circuit hardware description language (VHDL) code of several modulation schemes was synthesized on a specific field programmable gate array (FPGA), and the results showed this methodology was feasible. The fully digital modulation scheme using CORDIC algorithm can be applied to the design of other reconfigurable transmitters.

**Key words:** fully digital modulation; coordinate rotation digital computer (CORDIC) algorithm; digital frequency synthesizer

EEACC: 7210B0

## 基于 CORDIC 算法的微小卫星发射机设计与实现 \*

姜建文, 张朝杰, 金小军, 金仲和 \*

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

**摘要:** 针对微小卫星测控应答机体积小、重量轻及其功能灵活的特点, 研究了全数字调制发射机的实现方法。全数字调制加两次上变频的发射机结构, 可以灵活的实现多种码速率、不同带宽、不同调制方式的调制信号。在全数字调制部分利用 NCO 和 CORDIC 算法实现数字频率合成器, 不仅可以满足副载波、载波调制的频率精度要求, 而且与传统的数字式频率合成技术相比占用了较少的硬件逻辑资源。在一块 FPGA 上实现了几种常用调制方式的 VHDL 代码, 验证了该方案的可行性。基于 CORDIC 算法的全数字调制设计方案可以应用到其他可重构的软件无线电设计中。

**关键词:** 全数字调制; CORDIC 算法; 数字频率合成器

中图分类号: V474.1; TN409

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)01-0057-05

微纳技术(MNT)、微机电技术(MEMS)、新材料技术的迅速发展, 为微小卫星的快速发展提供了技术上的保证。微小卫星具有很好的灵活性和隐蔽性, 可以通过分散的星座式结构实现卫星的组网、编队, 完成空间大范围制图、立体成像、分布式测量等任务。微小卫星具有研制周期短、发射灵活、研制成本低、体积小、重量轻、功耗低的特点, 可广泛应用于通信、导航、科学试验、深空探测、对地观察、军事侦察等任务<sup>[1-3]</sup>。

体积小、重量轻、功耗低、功能灵活等特点要求

微小卫星的发射机结构设计不同于普通的发射机设计。全数字调制的发射机结构, 所需的硬件资源少、结构简单, 从而可以大大降低测控应答机的体积、重量和功耗。全数字的方法增加了设计的灵活性, 其功能可以根据不同的任务需要通过软件来配置, 而无需改变硬件结构, 适合软件无线电的开发和应用。此外, 设计中采用了一种硬件效率很高的 CORDIC 算法来实现数字频率合成器, 该方法可以大大降低 FPGA 的使用资源和处理功耗。

项目来源: “973”国家重点基础研究发展规划项目资助(G1999033110); 教育部科学技术研究重点项目资助(104096)

收稿日期: 2009-06-17 修改日期: 2009-10-09

### 1 CORDIC 算法

CORDIC(COordinate Rotation DIgital Computer) 是一种迭代的算术计算算法,通过相位旋转的方式可求各种基本三角函数的值。基于移位-相加方式的 CORDIC 算法是一种高效的硬件处理算法,非常适合在大规模可编程逻辑器件中应用。直角坐标系中,旋转矢量  $[x, y]$  和相位  $\theta$  的关系图如下:

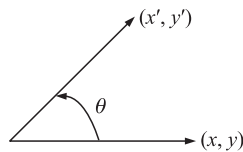


图 1 矢量旋转图

其方程如下:

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta; y' = y \cos \theta + x \sin \theta \quad (1)$$

上式可改写为:

$$x' = \cos \theta (x - y \tan \theta); y' = \cos \theta (y + x \tan \theta) \quad (2)$$

如果把旋转的角度限定为  $\tan \theta = \pm 2^{-i}$ , 即  $\theta = \pm \arctan 2^{-i}$ , 上式中与正切相乘的算法就简化为移位操作, 因此迭代的旋转算法可以表示为:

$$x_{i+1} = K_i (x_i - y_i \cdot d_i \cdot 2^{-i}); y_{i+1} = K_i (y_i + x_i \cdot d_i \cdot 2^{-i}) \quad (3)$$

其中

$d_i = \pm 1$ , 取决于  $\theta$  的符号

$$K_i = \cos(\arctan 2^{-i}) = 1/\sqrt{1+2^{-2i}} \quad (4)$$

以上方程在硬件中实现非常简单, 因为乘  $2^{-i}$  操作可以通过右移来实现。该算法的实现步骤如下<sup>[4-6]</sup>:

**步骤 1** 赋初值  $x_0 = x, y_0 = y, z_0 = \theta, i = 0$ ;

**步骤 2** 若  $z_i < 0$ , 则  $d_i = -1$ ; 反之,  $d_i = +1$ ;

**步骤 3**  $x_{i+1} = x_i - y_i \cdot d_i \cdot 2^{-i}$   
 $y_{i+1} = y_i + x_i \cdot d_i \cdot 2^{-i}$  (5)

$z_{i+1} = z_i - d_i \cdot \arctan(2^{-i})$ ;

**步骤 4**  $i$  加 1, 若  $i < n$  进入步骤 2 继续执行, 否则结束循环过程。

其中  $n$  是 CORDIC 算法的迭代计算次数, CORDIC 算法的实现框图如图 2 所示。

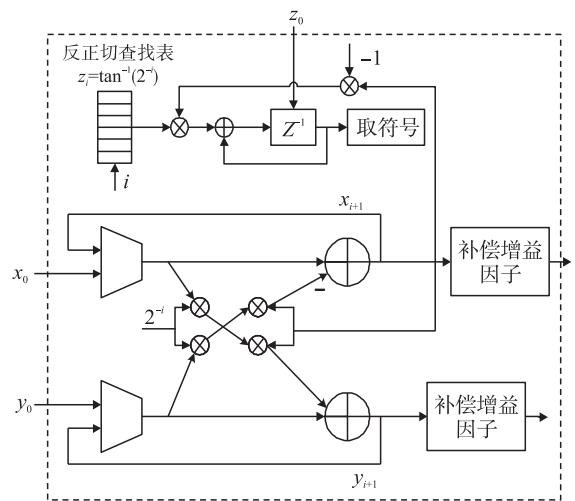


图 2 CORDIC 算法实现框图

该算法在  $-\pi/2 \leq \theta < \pi/2$  范围内的任意角度都能收敛。而对于整个直角坐标系上的角度, 还必须把  $-\pi \leq \theta < -\pi/2$  和  $\pi/2 \leq \theta < \pi$  映射到  $-\pi/2 \leq \theta < \pi/2$ 。此外, 还必须补偿增益因子, 定义  $A_n$  为:

$$A_n = \prod_{i=0}^{n-1} K_i = \prod_{i=0}^{n-1} \cos(\arctan 2^{-i}) = \prod_{i=0}^{n-1} 1/\sqrt{1+2^{-2i}} \quad (6)$$

$A_n$  的值取决于迭代次数  $n$ , 在  $n$  确定的情况可以视为一个常数。当  $n$  趋于无穷大时,  $A_n$  的值为 0.60725。 $\arctan(2^{-i})$  和  $A_n$  是常数, 可以预先存在一个很小的查找表里。

### 2 发射机设计与实现

在空间应用中, 需要对卫星测定轨道, 其主要通过对卫星测距、测速和测角来实现, 这就要求星上测控应答机具有灵活、精确的信号处理能力。测控应答机发射机调制部分一般有两种实现方式: 模拟 I/Q 调制和全数字调制。模拟 I/Q 调制方式受硬件设计的限制, 无法灵活地改变调制方式, 而且对外界环境温度的变化很敏感。而全数字调制可以灵活地实现各种调制方式和转发功能, 并且不受外界环境温度的影响。另外考虑到锁相环实现的灵活性及难易程度, 本文采用一种基于 CORDIC 算法的全数字调制和两次上变频的测控应答机发射机结构<sup>[7-10]</sup>, 见图 3。该结构的主要特点是: (1) 基带调制算法是

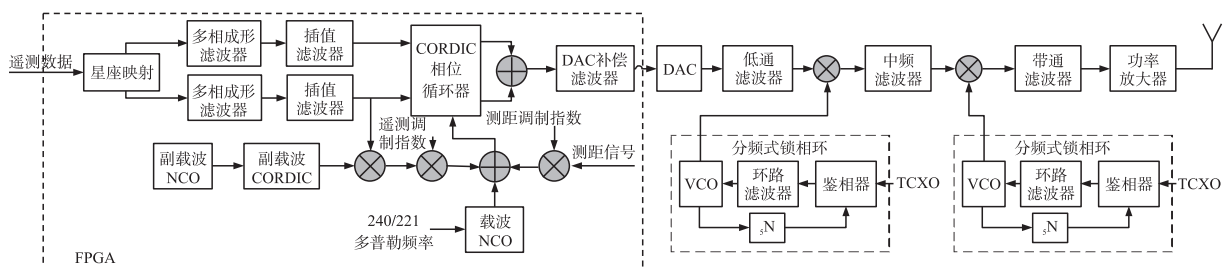


图 3 全数字调制发射机结构

在 FPGA 中实现的,可根据不同的调制方案来灵活的改变调制算法;(2)利用 CORDIC 算法来实现数字式频率合成器,其实现结构(图 2)与传统的查找表方式相比节省了大量的存储空间<sup>[11]</sup>,尤其是在遥测数据与测距信号同时调制的时候;(3)发射本振采用可配置芯片实现,可根据不同的频点进行灵活的配置。

全数字调制主要包括数字调制和遥测数据信号预处理两个部分。当遥测信号对载波调相(残留载波调制)时,遥测数据不通过星座映射(即图中上面一路多相成形滤波器和插值滤波器不起作用),经副载波调制和调制指数处理(NRZ/PSK/PM 调制方式),或直接进行调制指数处理(SP-L/PM 调制方式),再对载波进行调制。若选用抑制载波调制(只传遥测数据,例如 QPSK、OQPSK 调制等)以提高遥测速率时,遥测数据经映射分成二路,对载波调制,最后经 CORDIC 单元和 DAC 补偿滤波器送到 DAC。DAC 转换得到的模拟信号经过低通滤波器后进行一级上变频、中频滤波、二级上变频、带通滤波、功率放大,最后通过天线将信号发射。

全数字调制主要包括如下功能块:

**基带成形滤波器** 基带成形滤波器紧跟在星座映射器后面,它是由多相滤波器实现,主要完成采样率转换和赋形处理。

**DAC 补偿滤波处理** 对于高速的 DAC,由于保持处理会引入频谱幅度失真。一般采用模拟后滤波器在模拟域完成补偿,更有效的方法是在数字域采用数字补偿滤波器与在模拟域采用传统补偿滤波器相结合的方式完成补偿。

**遥测副载波和中频载波综合** 利用 NCO 产生遥测副载波和低中频载波的相位,经坐标旋转数字计算机 CORDIC 产生对应频率的信号,NCO 和 CORDIC 共同实现了数字频率合成器。

## 2.1 数控振荡器 NCO (Numerically Controlled Oscillator)

数字频率合成器需要用一个时钟来驱动一个相位累加器,生成所需要的相位信号。NCO 由一个累加器和一个寄存器组成,提供了无调制的载波和副载波相位信号。NCO 频率控制字的设置如下:

$$\phi_{in} = \frac{f_0}{f_{clk}} 2^M \quad (7)$$

其中,  $f_0$  是输出频率,  $f_{clk}$  是时钟频率,  $M$  是 NCO 的位数,决定信号频率的精度。

NCO 的频率控制精度为:

$$f_{res} = f_{clk} / 2^M \quad (8)$$

本设计中工作时钟 40 MHz, NCO 相位累加器采用 32 bit, 因此 NCO 的频率控制精度约为 10 mHz。

## 2.2 坐标旋转数字计算机 CORDIC

由式(1)可知,当 CORDIC 模块的输入  $x = 1$ ,  $y = 0$  时,其输出值为:

$$\begin{aligned} x' &= \cos\theta \\ y' &= \sin\theta \end{aligned} \quad (9)$$

将 NCO 的输出值作为 CORDIC 模块的相位输入,那么 CORDIC 模块便输出了无调制的载波和副载波信号,与 NCO 一起实现了数字频率合成器。其实现框图如下:

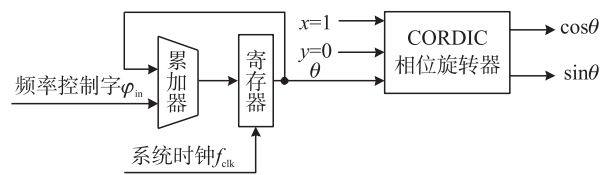


图 4 数字式频率合成器

## 3 几种调制方式的实现

在航天任务中,调制方案的选择需要根据几个主要的通信参数进行折衷,如误比特率、带宽效率和功率效率等。在不同的通信速率下,空间数据系统咨询委员会(CCSDS)推荐了 3 种不同的调制方式<sup>[7,12-13]</sup>:

- ① NRZ/BPSK/PM, 速率为 7.8125 bit/s - 128 kbit/s
- ② SP-L/PM, 速率为 4 kbit/s - 5 Mbit/s
- ③ GMSK, (O)QPSK, SQPSK, FQPSK, 速率为 64 kbit/s - 10 Mbit/s

下面利用全数字调制结构实现几种调制方式,并测出其相应的频谱图。

### 3.1 NRZ/BPSK/PM 调制方式

在 NRZ/BPSK/PM 调制方式中,需要两次用到 CORDIC 算法,分别用来产生 BPSK 调制信号和载波调相信号。BPSK 信号的表达式为:

$$s(t) = D(t) \cos(\omega_{sc}t + \varphi_{sc}) \quad (10)$$

其中  $D(t)$  是 NRZ 信号经矩形或升余弦脉冲成形后的信号,  $\omega_{sc}$  和  $\varphi_{sc}$  分别是幅载波的频率和初相。由公式(1)可以看到,只需设  $y = 0$ ,  $x = D(t)$ , 得到

$$\begin{aligned} x' &= D(t) \cos\theta \\ y' &= D(t) \sin\theta \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $\theta = \omega_{sc}t + \varphi_{sc}$  是 NCO 的输出。

取其中任何一路输出就得到 NRZ/BPSK 信号。把 NRZ/BPSK 信号调制到载波的相位上,就得到 NRZ/BPSK/PM 信号,其信号形式为:

$$s(t) = \sin(\omega_c t + \alpha D(t) \cos(\omega_{sc} t + \varphi_{sc}) + \varphi_c) \quad (12)$$

同样,由公式(1)可以看到,只需设  $x = 1, y = 0$ , 就得到载波输出见式(9)。其中

$$\theta = \omega_c t + \alpha D(t) \cos(\omega_{sc} t + \varphi_{sc}) + \varphi_c,$$

$\omega_c t$  是 NCO 的输出,  $\alpha$  是调制度,  $\varphi_c$  是载波的初相。取其中任何一路输出就得到 NRZ/BPSK/PM 信号。矩形脉冲成形的 NRZ/BPSK/PM 实际测试图见下图,码速率 128 kbit/s,副载波 512 kHz,低中频载波 9.58 MHz。

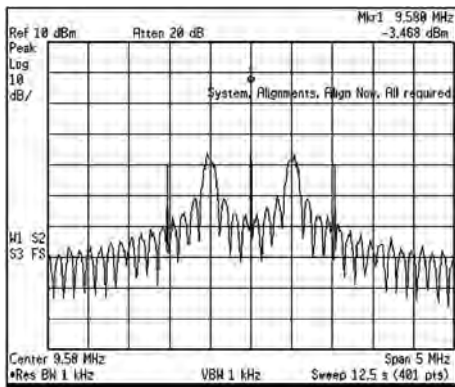


图 5 NRZ/BPSK/PM 调制信号

### 3.2 SP-L/PM 调制方式

随着通信速率的增加, NRZ/BPSK/PM 调制方式的输出信号频谱会逐渐展宽, 占用较多的频带资源, 此时可以选择 SP-L/PM 调制方式, 提高带宽效率。该调制方式只需用到一次 CORDIC 运算, 其调相实现方式同 NRZ/BPSK/PM 调制方式中的调相一样, 信号表达式为:

$$s(t) = \sin(\omega_c t + \alpha D'(t)) \quad (13)$$

$D'(t)$  是 NRZ 信号经过如下变换得到的: ①将 NRZ 信号中的 1 由 10 来表示, 0 由 01 来表示, 变换后的 0 或 1 的码元周期为 NRZ 码元周期的一半, 即将 NRZ 码的时钟信号与 NRZ 码异或之后得到的码型, 如图 6 所示; ②将变换后得到的 SP-L 信号进行矩形或升余弦脉冲成形。

从图 6 可以明显的看出, SP-L 码带有自己的时钟信息, 有利于接收端直接从编码中提取时钟信号。512 kbit/s 的矩形脉冲成形的 SP-L/PM 调制信号测试图如图 7 所示。

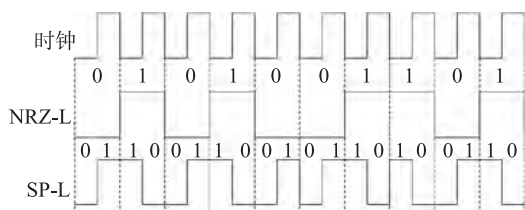


图 6 NRZ-L 与 SP-L 码型

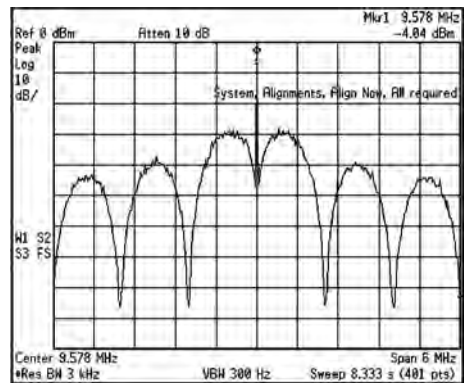


图 7 SP-L/PM 调制信号

### 3.3 QPSK 调制方式

由 QPSK 信号的产生原理可知, 两路 BPSK 信号合成之后便可得到 QPSK 信号。在相同的信息速率下, QPSK 信号的码长比 BPSK 的增加了一倍, 所以它的频带是 BPSK 信号的一半, 即 QPSK 信号在单位频带内的信息速率是 BPSK 信号的二倍<sup>[14]</sup>。QPSK 调制方式也只需用到一次 CORDIC 运算, 此处, CORDIC 还起到了复数混频的作用。由公式(1)可以看到, 设  $x = I(t), y = Q(t)$ , 得到

$$\begin{aligned} x' &= I(t) \cos\theta - Q(t) \sin\theta \\ y' &= Q(t) \cos\theta + I(t) \sin\theta \end{aligned} \quad (14)$$

一路是相加, 一路是相减, 取其中任何一路输出就得到 QPSK 信号。码速率 512 kbit/s 的矩形脉冲成形的 QPSK 调制信号测试图如图 8 所示。

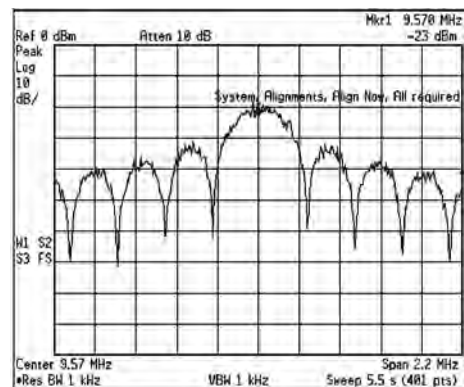


图 8 QPSK 调制信号

从以上几种调制方式的实现可以看出, 在不改变硬件设计的前提下, 全数字调制结构可以根据不同的调制算法灵活地实现不同的调制器。

## 4 总结

本文介绍了基于 CORDIC 算法的全数字调制部分的实现方法, 该方法只利用移位、相加等简单的逻辑操作便可以产生正弦信号, 节省了大量的硬件逻辑资源。此外全数字调制方法结构灵活, 对 NRZ/

BPSK/PM、SP-L/PM、QPSK 等几种调制方式进行了实现,并给出了其输出调制信号的频率图。全数字调制结构可以实现很高的调制精度,而且不受外界环境温度的影响,很适合用于空间飞行器的测控应答机中。虽然本文讨论的是微小卫星的发射机结构与实现,但全数字调制部分可以应用到其他可重构的软件无线电设计当中。

#### 参考文献:

- [1] 张更新,张杭. 卫星移动通信系统[M]. 北京:人民邮电出版社,2001.
- [2] 石卫平. 微小卫星的现状与发展趋向[J]. 国防科技(北京) 武器技术,2001(08):14-17.
- [3] 詹亚锋,马正新,曹志刚. 现代微小卫星技术及发展趋势[J]. 电子学报,2000,28(7):102-106.
- [4] Shoari A, Kamarei M, Radmand A. Implementation of Costas Loop Using CORDIC Algorithm for Software Radio Applications. Communications, IEE Proceedings. 24 Feb, 2005, 152(1): 113-118.
- [5] ANDRAKA R. A Survey of CORDIC Algorithms for FPGA Based Computers[C]//Proceedings of ACM International Symposium on FPGA. Mentery, USA: IEEE, 1998:191-200.
- [6] HU Y H. CORDIC Based VLSI Architectures for Digital Signal Processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1992, 9(3): 16-35.
- [7] Simone L, Gelfusa D, Cocchi S, et al. A Novel Digital Platform for Deep Space Transponders: the Transmitter Side [C]//IEEE Aerospace Conference. Big Sky;IEEE,2004:1446-1452.
- [8] Cardarilli G, Del Re A, Giancristofaro D, et al. Digital Modulator Architectures for Satellite and Space Applications. Circuits and Systems for Communications, 2002:166-169.
- [9] De Tiberis F, Gelfusa D, et al. X/X/Ka Deep Space Transponder for Mercury: Design & Test [C]//The 4th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications, 11-14 September 2007.
- [10] Simone L, Gelfusa D, et al. Compact X-Band Near Earth Transponder for Lisa Pathfinder and Gaia Missions[C]//The 4th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications, 11-14 September 2007.
- [11] Boscagli G, Cardarilli G C, et al. Direct Digital Frequency Synthesis Techniques in the View of Implementation on FPGA [C]// 2<sup>nd</sup> ESA Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications. 2001.
- [12] Consultative Committee for Space Data Systems, "Radio Frequency and Modulation Systems", CCSDS 401.0. B.
- [13] European Co-operation for Space Standardization, "Space Engineering :Radio Frequency and Modulation"[S]. ECSS E50-05.
- [14] 樊昌信,张甫翊,徐炳祥等. 通信原理[M]. 第5版. 北京:国防工业出版社,2001.5. 162-173.



姜建文(1981-),男,博士研究生,研究方向为微小卫星数字测控应答机及数字信号处理、伪码测距系统,jwjiang@zju.edu.cn;



金仲和(1970-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为射频集成通信系统、微小卫星、微机械技术、惯性传感器等,jwjiang@zju.edu.cn.