

# 基于 costas 环的 QPSK 信号解调的研究与实现

刘艳华

(盐城工学院 信息工程学院,江苏 盐城 224051)

**摘要:**在 MATLAB 平台研究 costas 环法 QPSK 信号解调的实现,给出了整个同步过程的仿真模型,各部分的具体实现和关键部分的仿真结果。选择接收信号与本地载波的频差为 10 kHz 进行仿真,观察同步过程和解调结果,改变频差,观察同步时间,最后改变仿真参数,得到 costas 环的锁相范围和锁相精度。仿真结果表明,该模型能够实现 QPSK 信号的快速正确解调,载波同步时间与本地载波和接收信号之间的频率差有关。

**关键词:**QPSK;解调;costas 环;仿真

**中图分类号:**TN914.42

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-5322(2012)01-0053-05

随着基于卫星通信的个人通信和移动通信的应用越来越广泛,如何对信号进行正确的解调和准确的接收,成为我们面临的一个新课题。

四相相移键控(QPSK)是在移动通信、卫星通信、数字电视中广泛应用的一种数字调制技术<sup>[1]</sup>。在数字卫星通信系统中,QPSK 调制方式由于其频谱利用率高、抗干扰性强等优点成为应用最为广泛的调制方式之一<sup>[2]</sup>。

载波同步是数字通信系统中必不可少的一个环节。BPSK、QPSK 信号是抑制了载波的信号,抑制载波跟踪环包括同相正交环即 costas 环、平方环和判决反馈环<sup>[3]</sup>。

本文首先研究了基于 costas 环的 QPSK 信号的解调原理,然后用四相 costas 环法实现 QPSK 信号的解调,借助 MATLAB/Simulink 仿真平台构建了该解调方法的仿真模型,观察仿真结果并作出分析。

## 1 costas 环法 QPSK 解调原理

costas 环法是利用锁相环提取载频,用乘法器和简单的低通滤波器代替平方器,性能与平方环一样。推广到多进制,对于 QPSK 信号,平方环需要对信号进行 4 次方运算,比较复杂。从 QPSK 信号中提取载波的四相 costas 环结构如图 1 所示<sup>[4-5]</sup>。

设输入的 QPSK 信号为  $(D_I(t), D_Q(t))$  为两路相互正交的信号):

$$s(t) = D_I(t) \cdot \cos(\omega t + \phi) + D_Q(t) \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

VCO 输出的载波信号为:

$$c(t) = \sin(\omega t) \quad (2)$$

鉴相器的输出信号为:

$$u_1(t) = -\frac{1}{2}D_I(t)\sin\phi + \frac{1}{2}D_Q(t)\cos\phi \quad (3)$$

$$u_2(t) = -\frac{1}{2}D_I(t)\sin(\phi + \frac{\pi}{4}) + \frac{1}{2}D_Q(t)\cos(\phi + \frac{\pi}{4}) \quad (4)$$

$$u_3(t) = -\frac{1}{2}D_I(t)\sin(\phi + \frac{\pi}{2}) + \frac{1}{2}D_Q(t)\cos(\phi + \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

$$u_4(t) = -\frac{1}{2}D_I(t)\sin(\phi + \frac{3\pi}{4}) + \frac{1}{2}D_Q(t)\cos(\phi + \frac{3\pi}{4}) \quad (6)$$

$$u_5(t) = u_1(t) \cdot u_2(t) = \frac{1}{4}(\cos\frac{\pi}{4} - D_I(t)D_Q(t)\sin(2\phi + \frac{\pi}{4})) \quad (7)$$

收稿日期:2011-11-22

作者简介:刘艳华(1983-),女,河北唐山人,助教,硕士,主要研究方向为扩频通信与信号处理。

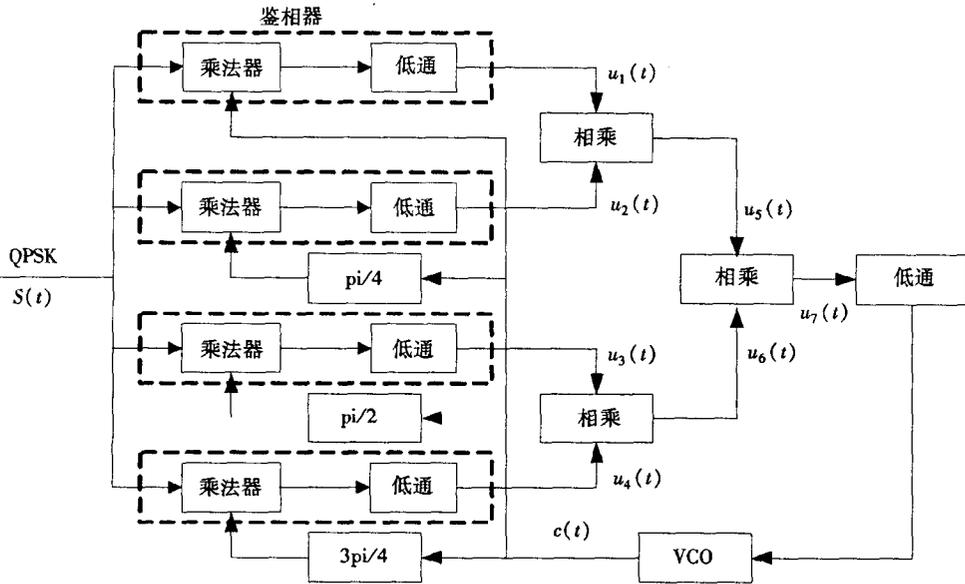


图 1 四相 costas 环结构

Fig. 1 Structure of four - phase costas loop

$$u_6(t) = u_3(t) \cdot u_4(t) = \frac{1}{4} (\cos \frac{\pi}{4} - D_I(t)D_Q(t) \sin(2\phi + \frac{5\pi}{4})) \quad (8)$$

$$u_7(t) = u_5(t) \cdot u_6(t) = \frac{1}{16} (\cos^2 \frac{\pi}{4} - \sin^2(2\phi + \frac{\pi}{4})) = -\frac{1}{16} \sin(4\phi) \quad (9)$$

通过 costas 环路处理, 提取出 VCO 的输出信号与接收的 QPSK 信号的相位差, 来控制 VCO 的输出频率, 使 VCO 的输出与接收的 QPSK 信号载波达到完全同步, 用同步的载波对 QPSK 信号进行解调, 即可获得基带信号。在图 1 中,  $u_1(t), u_3(t)$  即为解调的两路正交信号, 经过简单处理即可恢

复出基带信号, VCO 的输出即为同步后的载波。

## 2 costas 环法 QPSK 解调的仿真实现

根据上面介绍的解调原理, 在 MATLAB/Simulink 上搭建 QPSK 信号解调的仿真模型。采用四相 costas 环实现载波同步、解调整体仿真模型如图 2 所示。

图 2 中, 信号源(SIGNAL SOURCE)产生一个 QPSK 信号, 通过解调子模块(pi/4 costas demodulate)进行解调, 得到两路正交的基带信号(I 和 Q), 最后由并-串转换模块(parallel to serial), 将两路正交信号合并为一路信号, 即为解调出的原始基带信息。示波器用来观察仿真结果。

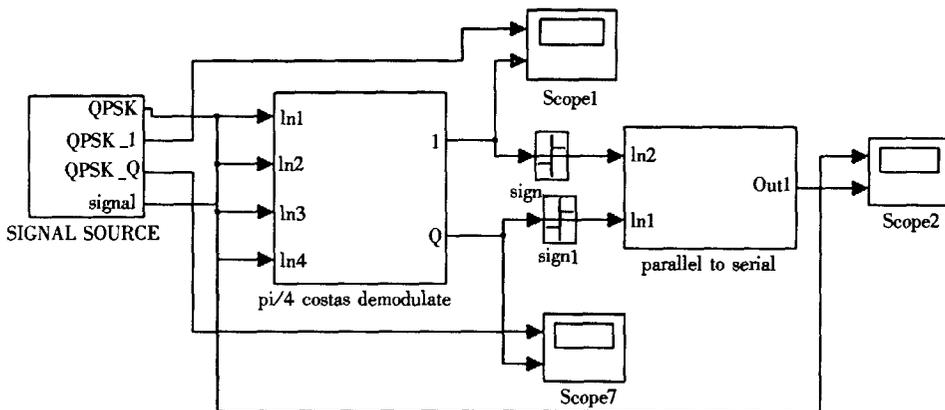


图 2 四相 costas 环仿真实现

Fig. 2 Simulation model of four - phase costas loop

### 2.1 四相 costas 环模型

根据四相 costas 环结构框图搭建解调模块 (即图 2 中 pi/4 costas demodulate 模块内部结构) 如图 3 所示。图 3 中环路滤波器 (即 LF) 的输出控制 VCO 产生  $0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}$  个初相位的载波,

QPSK 信号通过鉴相器 (图 3 中的乘法器) 分别与 4 个初相位的载波相乘, 然后经低通滤波滤除倍频分量, 把四路低通滤波器的输出相乘, 作为环路滤波器的输入, 用环路滤波器的输出控制 VCO 的频率。

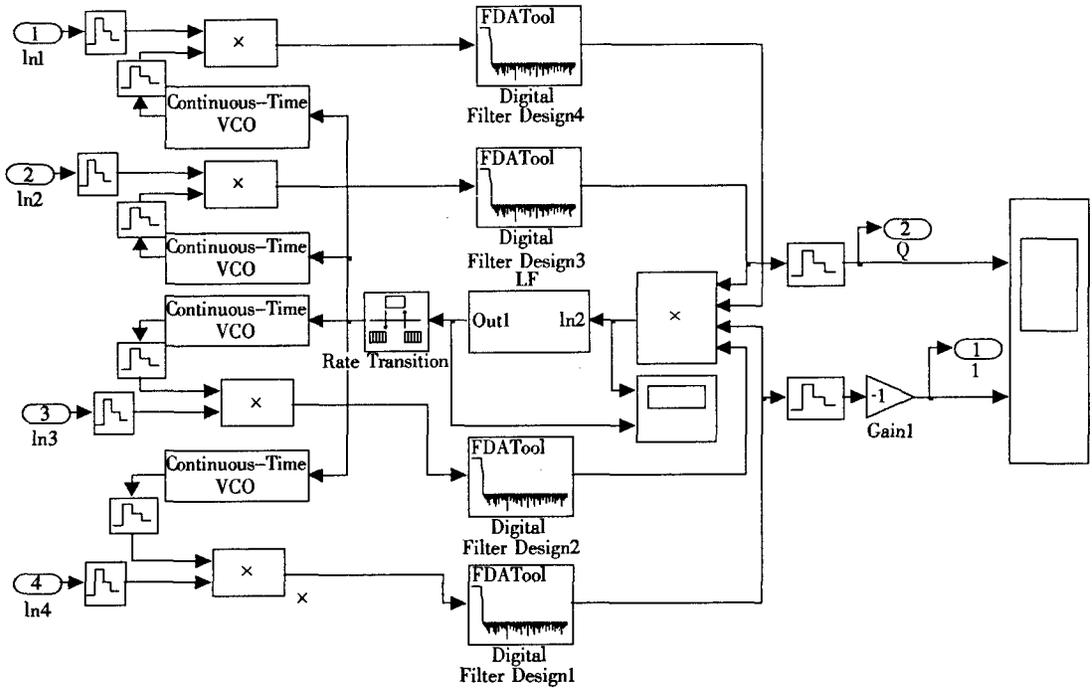


图 3 pi/4 costas demodulate 模块内部结构

Fig. 3 Internal structure of pi/4 costas demodulate model

### 2.2 并串变换

并 - 串变换与串 - 并变换互为逆变换, 分别用于 QPSK 信号的调制端与解调端, 是比较重要也比较常用的子模块。图 2 中实现并 - 串变换的 parallel to serial 模块内部结构如图 4 所示。模块中两个脉冲发生器产生相差半个周期的正交脉冲信号, 用来交替提取 In1、In2 两路信号的信息, 得到一路码速率为输入信号速率 2 倍的串行数据, 即为解调的输出。

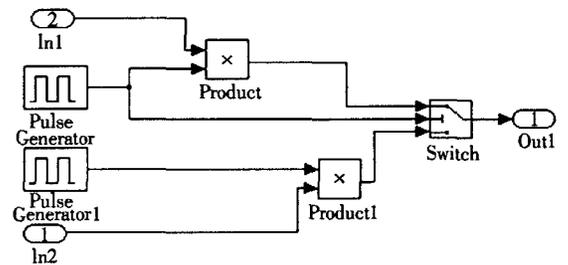


图 4 并串变换模块的结构

Fig. 4 Structure of parallel to serial model

## 3 仿真结果分析

将本地 VCO 载波频率与接收的 QPSK 信号的调制载波之间的频率差设为 10 kHz, 运行四相 costas 环解调模型, 得到仿真结果如下。

并串变换后, 得到的解调信号与原始信号对比如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 解调后的信号在开始时刻存在一定数量的误码, 大约 0.5 ms 后解调的波形

与原始信息波形相同, 只是存在一定时间的延迟, 该仿真模型对 QPSK 信号成功地进行了解调。开始一段时间的误码是 costas 环锁相过程中达到同步之前产生的错误信息, 解调信号时间的延迟是串并变换造成的。

环路滤波器的输入和输出波形如图 6 所示。第 1 路为输入的误差信号, 第 2 路为输出的补偿载波的频率。

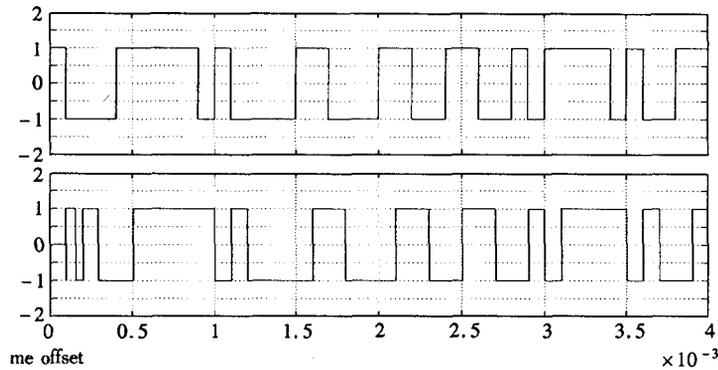


图 5 解调信号与原始信号对比

Fig. 5 Contrast of demodulated signal with the original signal

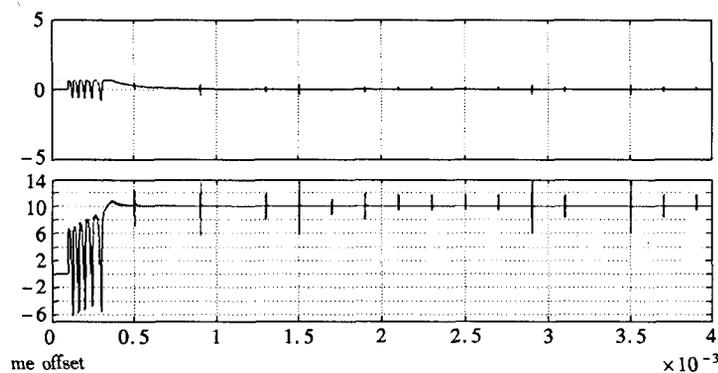


图 6 LF 输入输出波形

Fig. 6 Input and output waveform of LF

由图 6 中可以看出,在约 0.5 ms 已完成锁相,误差信号稳定在 0 附近,锁相的频率值稳定在 10 kHz,恰好等于前面设定的载波频率差,将锁相频率补偿给 VCO 的载波,即可得到相干载波。

最后改变设定的载波频率差,分别使载波频率差为 4 kHz、8 kHz、12 kHz 和 16 kHz,运行仿真模块,仍然可以正确解调,并且得到锁相时间分别约为 0.12 ms、0.25 ms、0.6 ms 和 1.6 ms。由此可见,载波频率相差越大,达到同步所需的锁相时间越长。

继续增大本地载波与已调信号中载波频率差,直至系统失锁,不能正确解调。经过测试,本锁相环所能达到的锁相范围为  $[-20 \text{ kHz}, +20 \text{ kHz}]$ ,锁相精度为 1 kHz。

#### 4 结束语

文中研究了 QPSK 信号解调的原理, costas 环

和并串变换的 MATLAB 仿真设计,给出了关键的仿真结果及分析。

经过以上分析,在 Simulink 仿真平台上,成功实现了 costas 环法 QPSK 信号的解调。建立了整个解调过程的仿真模型,给出了各部分的具体实现和关键部分的仿真结果,分析了频差为 10 kHz 时的仿真过程,给了解调后信号与基带信号的对比和环路滤波器的工作工程。

最后修改参数,观察不同频率差时的仿真结果。并经过测试,得到了锁相范围为  $[-20 \text{ kHz}, +20 \text{ kHz}]$ ,锁相精度 1 kHz。此锁相环的锁相范围已经完全能够满足大部分解调的需要,即使在存在多普勒频移的情况下,此解调模型仍然是可以正常工作的。

本文的仿真证明基于 costas 环的 QPSK 信号解调方案是可行的,为 QPSK 信号的解调提供了一种思路。

## 参考文献:

- [1] 樊昌信,曹丽娜.通信原理[M].6版.北京:国防工业出版社,2010:216-220.
- [2] 常青,毕存磊,张其善.直扩 QPSK 系统中 Costas 环原理及其实现[J].微计算机信息,2006,22(12-2):241-243.
- [3] 陈荣,管吉兴,张喜明.数字 Costas 环的设计与实现[J].无线电工程,2010,40(3):24-26.
- [4] 王智文,李绍滋,刘美珍,等.基于科斯塔斯环法的载波提取的设计[J].微电子学与计算机,2010,27(10):193-196.
- [5] 张欣.扩频通信数字基带信号处理算法及其 VLSI 实现[M].北京:科学出版社,2001:150-200.

## Research and Implementation of Demodulation of QPSK Signal Based on the Costas

LIU Yan-hua

(School of Information Engineering, Yancheng Institution of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

**Abstract:** The achievement of demodulation based on Costas method using MATLAB is discussed and the entire synchronization process simulation model, the detail structure of each part and simulation results of critical part are given. In simulation, choosing deviation of received signal and local carrier frequency is 10 KHz, observing the synchronization process and the demodulation result, change the frequency deviation, observe the synchronization time, and finally change the simulation parameters, the range and accuracy of Costas loop are obtained. Simulation results show that the model can demodulate QPSK signal correctly. Synchronization time depends on deviation between the local carrier frequency and received signal frequency.

**Keywords:** QPSK; demodulation; Costas; simulation

(责任编辑:沈建新)

(上接第 18 页)

- [12] 袁剑民,邓剑如,蒋卫和.新型环氧稀释剂环己二醇-1,2-二缩水甘油醚的合成[J].热固性树脂,2004,19(5):24-27.
- [13] Xue-Ping Gu, Lsao Ikeda, Mitsuo Okahara. Synthesis of glycol diglycidyl ethers using phase-transfer catalysis[J]. Synthesis, 1985(6/7):649-651.

## Study on The Synthesis of Tert-Butyl Glycidyl Ether

XU Jie-wu<sup>1</sup>, CAI Zhao-sheng<sup>2</sup>

(1. Funing Anqin Chemical Co. Ltd., Funing Jiangsu 224403, China;  
2. Department of Chemical and Biological Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

**Abstract:** The tert-butyl glycidyl ether (TBGE) was synthesized through additive reaction and cyclic action with epichlorohydrin (ECH) and tert-butanol (TBA) as raw materials. The effects of catalyst type, the amount of catalyst, the temperature and time of addition reaction and the molar ratio of ECH versus TBA on the yield of TBGE were investigated. The content of TBGE in product was determined by GC and the structure of product was characterized by GC-MS and FT-IR. When the BF<sub>3</sub>-etherate was utilized as catalyst and the mass ratio of BF<sub>3</sub>-etherate versus TBA was 3.0%, the temperature of addition reaction was 50.0 °C, reaction time was 5.0 h, and the molar ratio of ECH versus TBA was 2.5, experimental results indicated the yield of TBGE was above 85%. The result of GC showed the content of TBGE in the product surpassed 99.0%.

**Keywords:** tert-butyl glycidyl ether; additive reaction; cyclic action; catalysis

(责任编辑:沈建新)