

DS-QPSK 相位误差检测算法改进与数字化实现

冯文江,张立鹏,王 菊

(重庆大学 通信工程学院,重庆 400030)

(zlp19992000@yahoo.com.cn)

摘 要:根据直接序列扩频通信系统中伪随机序列(PN 码)的相关特性,提出一种适合于直接序列扩频四相相移键控调制(DS-QPSK)系统的载波相位误差检测方法。PN 码具有很好的相关特性,可以简化 DS-QPSK 信号中的一路信号,进而借鉴二相相移键控(BPSK)信号的反正切鉴相方式完成鉴相。完成了计算机仿真与数字化实现。结果表明,采用该方法,可以降低对接收信噪比的要求,提高接收灵敏度。

关键词:载波恢复;四相相移键控;相位误差检测;数字化实现

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Improved algorithm for DS-QPSK phase error detection and its digital implementation

FENG Wen-jiang, ZHANG Li-peng, WANG Ju

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: According to the correlation orthogonality of Pseudorandom Noise (PN) code used in the direct sequence spread spectrum and QPSK modulation (DS-QPSK) system, a carrier phase error detection algorithm for DS-QPSK signal was proposed. One channel of the DS-QPSK signal could be simplified by the high correlation orthogonality of PN code, and then phase error detection was implemented through the reference of detecting phase error for BPSK signal with arc tangent function. This method was simulated and implemented in computer. Experimental results indicate that the phase error detection algorithm can decrease Signal Noise Ratio (SNR) of the receiver and improve the receive sensitivity of the system.

Key words: carrier recovery; Quarter Phase Shift Keying (QPSK); phase error detection; digital implementation

0 引言

QPSK 数字信号调制技术是目前最常用的一种卫星通信和宽带网数字信号调制方式,具有频谱利用率高、频谱特性好、抗干扰能力强和电路实现简单等特点。在 QPSK 通信系统中,接收机的性能是整个系统性能的关键。载波恢复作为数字相干解调的关键技术环节,直接影响到整个系统的性能。相干解调中,接收端首先要恢复相干载波,相干载波要求与发送载波频率相同,相位保持一致。载波恢复就是要实现这一过程,它是相干解调的先决条件。本文针对直接序列扩频 QPSK 调制通信系统的载波恢复问题,利用 PN 码的相关特性,提出一种适合于 DS-QPSK 系统的载波相位误差检测方法。利用 PN 码的互相关值很小,可以使 QPSK 信号中的一路信号得到简化,借鉴 BPSK 信号的鉴相方式完成鉴相。对该方法进行了计算机仿真,给出了环路性能分析结果,并利用 Altera 公司的 FPGA 芯片构建测试平台进行了可行性验证。

1 反正切载波相位误差检测算法

1.1 载波恢复锁相环算法比较

载波恢复主要包括载波相位误差检测、载波恢复环路滤波器以及 VCO。常用的 QPSK 载波恢复锁相环有: M 次方环、判决反馈环、逆调制环和 Costas 环等^[1]。 M 次方环(对于

QPSK 信号可以使用四次方环或者八次方环)由于其工作频率是载波频率的 M 倍,所以在中高频通信系统中实现困难;逆调制环由于其需要一个延迟电路精确地延迟一个码元间隔 T_d ,在实际电路中对器件要求苛刻,也仅适用于低中频工作;判决反馈环由于在低信噪比下判决误差较大,且硬件实现复杂。目前使用最多的是改进型 Costas 环和松尾环,但是,无论是改进型 Costas 环还是松尾环,都存在着相位误差检测范围小、鉴相误差较大、鉴相器增益(K_d)难以确定和量化、环路滤波器设计复杂等缺点^[2-3]。而对于 BPSK 调制信号,可以采用求反正切的方式进行相位误差检测。这种二象限反正切 Costas 鉴别器是唯一一种在输入误差范围的一半(90°)区间上保持线性的 Costas 锁相环鉴相器,且输出斜率与信号幅度无关,适用于信噪比动态范围大的应用场合^[4]。对于直接序列扩频系统,可以借鉴二象限反正切 Costas 鉴相方式,设计一种适合 QPSK 调制信号的反正切鉴相器,以提高接收机性能^[5]。

1.2 反正切鉴相载波恢复算法及改进

在直接扩频 QPSK 系统中,使用的扩频 PN 码都具有很好的自相关性和互相关性。如对 GOLD 码而言,当级数 r 为奇数时, GOLD 码序列族中有约 50% 的码序列归一化互相关值为 $-1/p$,当级数 r 为偶数,但又不是 4 的整数倍时,约有 75% 的码序列归一化互相关值为 $-1/p$,其中 p 为序列长度,其值

收稿日期:2008-12-23;修回日期:2009-03-04。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872038);国家 863 计划项目(2008AA01Z202)。

作者简介:冯文江(1963-),男,四川南充人,教授,博士,主要研究方向:宽带无线接入技术、通信信号处理、认知无线网络;张立鹏(1984-),男,黑龙江宝清人,硕士研究生,主要研究方向:通信信号处理、宽带无线接入技术;王菊(1986-),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向:通信信号处理。

一般都在 128 以上^[4]。由此可见,对于大部分 PN 码,其互相关值都是非常小的。利用 PN 码互相关值很小的这一特点,可以将 QPSK 信号中的一路信号简化,然后借鉴 BPSK 信号的反正切鉴相方式完成鉴相。鉴相过程中,同时判断 I 、 Q 两路信号的符号,确定相位的象限位置,可以简化查表数量,便于硬件实现。反正切鉴相载波恢复环路结构框图如图 1 所示。

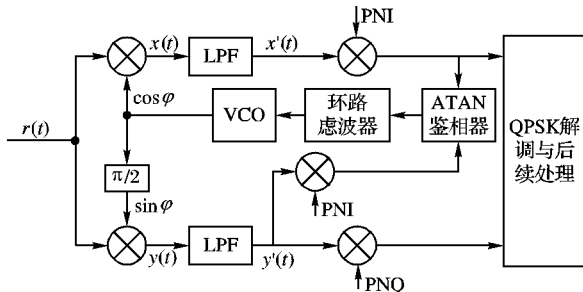


图 1 载波恢复环算法结构原理

直接序列扩频 QPSK 信号表达式为:

$$r(t) = a_k(t)PN_i \cos(\omega t) + b_k(t)PN_q \sin(\omega t) \quad (1)$$

其中: $a_k(t)$ 、 $b_k(t)$ 分别为 I 、 Q 两路数据基带信号, PN_i 和 PN_q 为 I 、 Q 两路不同的 PN 码, ω 为载波角频率。

该信号是经过 A/D 转换后获得, $r(t)$ 分别与载波恢复环路输出的本地载波进行混频,实现基带信号的数字下变频,由此得到 I 、 Q 两路信号表达式为:

$$\begin{aligned} r_i(t) &= r(t) \cos(\omega t + \Delta\varphi) = \\ &= \frac{a_k}{2} PN_i [\cos(\Delta\varphi) + \cos(2\omega t + \Delta\varphi)] - \\ &= \frac{b_k}{2} PN_q [\sin(\Delta\varphi) - \sin(2\omega t + \Delta\varphi)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r_q(t) &= r(t) \sin(\omega t + \Delta\varphi) = \\ &= \frac{a_k}{2} PN_i [\sin(\Delta\varphi) + \sin(2\omega t + \Delta\varphi)] + \\ &= \frac{b_k}{2} PN_q [\cos(\Delta\varphi) - \cos(2\omega t + \Delta\varphi)] \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\Delta\varphi$ 为本地载波和发送载波之间的相位差值,是一个随时间 t 变化的数值。上述信号经过滤波器后,信号频率中的高频分量被滤掉,得到:

$$r'_i(t) = \frac{a_k}{2} PN_i \cos(\Delta\varphi) - \frac{b_k}{2} PN_q \sin(\Delta\varphi) \quad (4)$$

$$r'_q(t) = \frac{a_k}{2} PN_i \sin(\Delta\varphi) + \frac{b_k}{2} PN_q \cos(\Delta\varphi) \quad (5)$$

由此可见,上述信号中都同时含有 PN_i 和 PN_q 因子,采用同一个 PN 码对这两个信号解扩,忽略互相关值项,可以得到:

$$r''_i(t) \approx Ka_i \cos(\Delta\varphi) \quad (6)$$

$$r''_q(t) \approx Ka_i \sin(\Delta\varphi) \quad (7)$$

其中: K 为 PN 码的自相关值,如果 PN 码的位同步精确, K 在数值约等于 PN 码的码长。则通过鉴相器,则可以得到:

$$\Delta\varphi = \arctan[r''_q(t)/r''_i(t)] \quad (8)$$

通过查表即可以准确获得实际相位误差 $\Delta\varphi$ 。在查表过程中,首先判断 $r''_q(t)/r''_i(t)$ 的符号来确定鉴相输出值所在的象限。由于反正切函数具有奇对称性,将输出值统一映射到第一象限($0^\circ \sim 90^\circ$)进行查表,这样可以减少表的长度,降低硬件占用资源。该方法还具有线性性好、估计准确、鉴相范围宽等特点。

将 BPSK 载波恢复中常用的反正切鉴相方式引入 QPSK 系统相位误差检测,改进了 QPSK 鉴相方法和环路结构。采

用反正切鉴相方式,可以避免计算或测量鉴相器增益,环路滤波器的参数设计更加简单,同时采用象限判决还能降低硬件资源占用,便于数字化实现。

2 算法性能仿真及 FPGA 实现

采用 Matlab 软件的 Simulink 模块构建一个直接序列扩频 QPSK 调制通信系统,使用定点仿真。仿真参数为:扩频码率 20.48 MHz,数据速率 160 kHz,扩频增益 21 dB,采用 M 序列作为扩频码,中频 70 MHz,采用高斯信道。分别采用改进型 Costas 环和反正切鉴相载波恢复环,比较两个环路对系统性能的影响。

图 2 为反正切鉴相载波恢复环的鉴相特性曲线,与改进型 Costas 环的鉴相特性相比,前者具有更宽的鉴相范围,更好的线性输出特性。

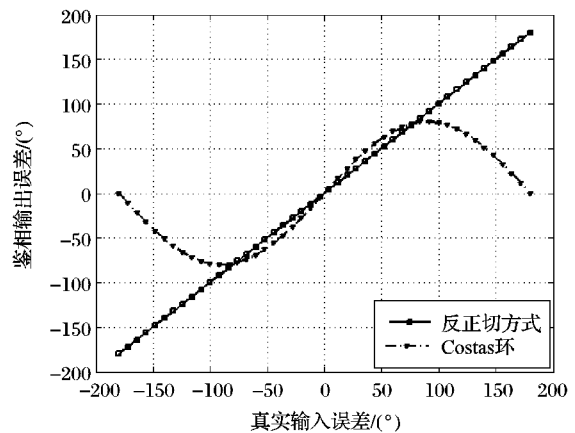


图 2 环路鉴相曲线

图 3(a)为反正切鉴相载波恢复环在环路稳定时的输出波形,其中输入 SNR 为 -10 dB,频偏为 1 kHz。图 3(b)为相同条件下改进型 Costas 环在环路稳定时鉴相器输出波形。由此可见,采用反正切鉴相载波恢复环的鉴相误差在环路稳定的情况下,其输出抖动仅为 $-0.5 \sim 0.5$,小于采用改进型 Costas 环的输出抖动范围,前者的输出结果更加准确。

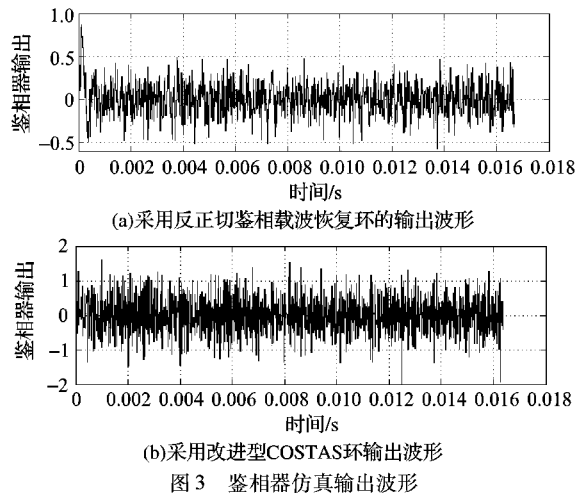


图 3 鉴相器仿真输出波形

图 4 比较了两种鉴相环路对接收信噪比的影响。由图可见,采用反正切鉴相载波恢复环的系统能够在较低的信噪比下稳定工作,性能要优于采用改进型 Costas 环的系统,其接收信噪比可以减小 3 dB ~ 5 dB。

此外,本文还对采用不同载波恢复环的通信系统能够支持的最大频偏进行了仿真研究,结果表明,采用反正切鉴相载波恢复环的系统能够支持的最大频偏为 1 kHz。 (下转第 1516 页)

一致,初始能量值为2 J,数据包长度为500 B,发送和接收数据的能量消耗为50 nJ/bit,放大电路功耗为100 $\mu\text{J}/(\text{bit} \cdot \text{m}^{-2})$ 。

节点死亡率与时间(轮)的关系如图3所示。

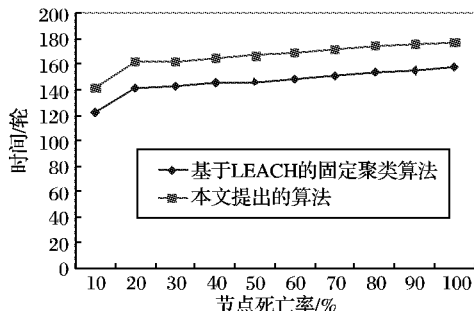


图3 节点死亡率与时间关系

从图3可以看出,本文所提出的算法节点死亡率与基于LEACH的固定算法相比,有一定的延迟。这说明本算法在一定程度上是有效的,通过减少节点间的通信量,节约了能量消耗,从而延迟了节点的死亡时间。

节点总能耗与BS接收到的信息总量关系如图4所示。

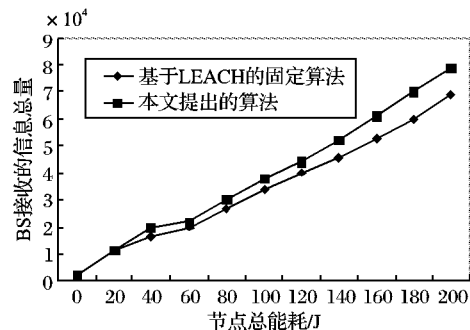


图4 节点总能耗与BS接收信息总量关系

可以看出,本算法中BS接收到的信息总量比基于LEACH的固定聚类算法要高,说明节省下来的能量,传送了更多的有效数据,更加合理有效地利用了节点能量。同时,阈值比例 x 的设定也比较重要, x 要取一适合的值,使整体上节点之间不会频繁轮换。

3 结语

本文在基于LEACH的固定聚类算法的基础上,通过减少聚类区域内节点之间的控制通信量,从而减少不必要的能量消耗,更高效地传送有用数据,并且聚类区域内的节点轮换担任聚类首领,均衡了网络负载,极大地延长了网络生命周期。仿真实验结果也说明,本算法与基于LEACH的固定聚类算法相比,节约了节点能量,延长了网络生命周期。具有一定的有效性。

参考文献:

- [1] 崔莉,鞠海玲,李天璞,等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.
- [2] 任丰原,黄海宁,林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1281-1292.
- [3] 杨洋,周小佳. 一种基于LEACH的无线传感器网络路由协议[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [4] 杨云升,李娟. 基于LEACH的无线传感器网络路由协议的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2005.
- [5] 李岩,张曦煌,李彦中. LEACH-EE——基于LEACH协议的高效聚类路由算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(5): 1103-1105.
- [6] 赵巧梅,陈治平,易叶青. 一种节能的分簇路由算法[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(13): 3526-3529.
- [7] 蔡峰,蒋铃鸽. 无线传感器网络分簇路由算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [8] 肖伟茂,王力. 一种基于LEACH的无线传感器网络路由算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.

(上接第1498页)

波恢复环,鉴相最大频偏比采用改进型Costas环能够提高1.5 kHz。

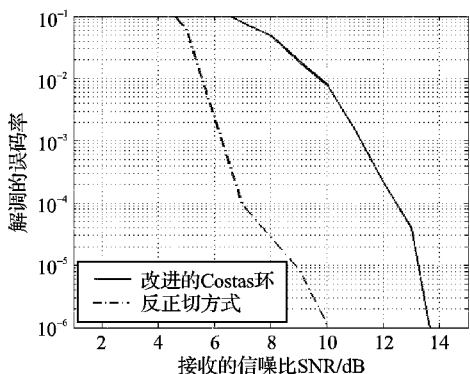


图4 误码率曲线

利用Altera公司的Stratix II系列的FPGA芯片构建测试硬件平台,采用查表法实现反正切鉴相,系统工作正常。实际测量表明,采用反正切鉴相载波恢复方式能够使系统的接收灵敏度提高5 dBm~8 dBm,能显著提升通信系统的整体性能。

3 结语

利用直接扩频系统QPSK中不同PN码的正交性,将QPSK信号近似转化为BPSK信号,再利用BPSK信号中常用的反正切鉴相方式进行相位误差检测,鉴相范围宽,鉴相输出

准确,线性性好,无需计算鉴相增益,环路滤波器设计更加简单;同时,在接收信噪比动态范围大的应用场合,鉴相输出与信号幅度无关。硬件实现过程中采用象限判断,减少了查找表的表长,降低了硬件资源的消耗。当然,采用反正切鉴相载波恢复方式对系统的性能改善还是有限的,寻求更好的载波恢复相位误差检测方法仍是需要关注的关键技术。

参考文献:

- [1] ZHANG Z C, WU J J, LIU Y Z. Research and performance simulation on a carrier recovery phase error detection algorithms in satellite communications [C]// WiCOM2007: The 3rd IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai: IEEE Press, 2007: 1295-1298.
- [2] FRANKS L E. Carrier and bit synchronization in data communication - A tutorial review [J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(8): 1107-1120.
- [3] GAO W, FEHER K. All-digital reverse modulation architecture based carrier recovery implementation for GMSK and compatible FQPSK [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1996, 42(1): 55-62.
- [4] KAPLAN E D, HEGARTY C J. GPS原理与应用[M]. 2版. 寇艳红,译. 北京: 电子工业出版社, 2007: 111-179.
- [5] 误玉成,高珊,侯剑辉. OQPSK载波相位捕获算法的改进及数字化实现[J]. 电路与系统学报, 2005, 10(5): 120-124.