

QPSK 数字化解调相位模糊校正方法研究

郭兴阳, 谢德芳

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:结合 Q-1900 维特比译码器同步状态监测功能,提出了一种校正 QPSK 全数字相干解调的八种数据输出状态的新方法。对四相差分编译码的校正能力作出了理论上的分析。实验结果证明,这种方法具有四相差分编译码无法达到的校正八种数据输出状态的能力。

关键词:相位模糊;维特比译码;差分编译码

中图分类号:TN92 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)01-0041-04

实际的 QPSK 系统解调时会遇到相位模糊问题。这里的讨论以循环码 $\pi/4$ 体系的 QPSK 系统为例。相干解调时恢复的载波与接收信号载波的相位差 θ_0 有四种可能: $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$, 从而导致解调器可能有四种数据输出状态。一般的系统采用四相差分编译码来校正由其它三种恢复载波引起的解调数据的不正常输出状态。这里采用了一种不同于四相差分编译码的方法。

数字微波通信中广泛采用差错控制技术,以使经过传输信道后造成的码符差错减少到最低。尤其在卫星通信中,使信噪比增加 1 dB 所需的费用比通过纠错编码降低 E_b/n_0 所需费用要大得多。Q-1900 维特比译码器以其优良的性价比逐渐得到广泛的应用,因此这里基于 Q-1900 的研究具有实用意义。

1 解调器出现问题分析

前面所提到的相位模糊问题是假设解调器正交支路要对恢复载波移相不发生错误的情况。在实际应用中, QPSK 解调器正交支路要对恢复的载波进行 $\pi/2$ 的相位超前,形成相干载波,而用数字电路进行移相时还可能出现滞后 $\pi/2$ 的现象^[1]。最后导致的结果由下面的计算可以得到。

设输入调制信号为 $\cos(\omega t + \phi_i)$, 恢复载波为 $\cos(\omega t - \theta)$ 。其中 θ 为恢复载波起始相位。I 支路相乘器输出

$$I(t) = \cos(\omega t + \phi_i) \cdot \cos(\omega t - \theta) = 1/2[\cos(2\omega t + \phi_i - \theta)] + 1/2[\cos(\phi_i + \theta)]$$

低频分量为

$$I_{\text{低}} = 1/2[\cos(\phi_i + \theta)] \quad (1)$$

Q 支路相乘器输出

$$Q(t) = \cos(\omega t + \phi_i) \cdot \cos(\omega t - \theta + \pi/2) = -1/2[\sin(2\omega t + \phi_i - \theta)] + 1/2[\sin(\phi_i + \theta)]$$

低频分量为

$$Q_{\text{低}} = 1/2[\sin(\phi_i + \theta)] \quad (2)$$

若移相发生错误则 Q 支路输出为

$$Q'(t) = \cos(\omega t + \phi_i) \cdot \cos(\omega t - \theta - \pi/2) = 1/2[\sin(2\omega t + \phi_i - \theta)] - 1/2[\sin(\phi_i + \theta)]$$

低频分量为

$$Q'_{\text{低}} = -1/2[\sin(\phi_i + \theta)] \quad (3)$$

可以看出,若移相电路能保证正确移相时,输出数据会有四种状态;考虑到移相发生错误的情况,判决输出的两路数据可能会有八种状态。由(1)、(2)、(3)式得出表 1。

收稿日期:2000-06-03

作者简介:郭兴阳(1971-),男,陕西临潼人,硕士生,主要从事卫星通信研究。

2 四相差分编译码性能分析

这里主要讨论四相差分编译码解决数据输出问题的能力。四相差分编译码是先将四个双比特码字组成一个集,用{0,1,2,3}表示,即用来表示{(00),(01),(11),(10)}。再将任意两个码字合成的码组组成一个十六元的集合:{00,01,02,03……33}。把该十六元集合内部划分为四个子集:{(00,11,22,33),(01,12,23,30),(02,13,20,31),(03,10,21,32)}。任一子集中,各码组前后码字差值(模四)相同。差分编码器对输入的双比特码字0编码时,输出的码字与前一个输出码字组成的码组为子集一中的一个。输入码字1时对应子集二,依次类推。因为相干解调时本地恢复载波与接收信号载波相差一个固定相位,又因为任一子集中各码组前后码字差值相同,所以在正交支路没有相移错误时,发射端输出的相邻两个码字属于哪一个子集,则解调器输出的相邻码字也属于这一个子集。差分译码则是差分编码的反过程,一个子集对应一个输出码字。此时,本地恢复载波一定能把码字正确恢复出来。示意图如图1所示。

现在需要证明四相差分编译码方法能否将可能出现的八种数据输出状态都校正过来。

根据群的理论,集合{0,1,2,3}对模4加法构成一个加群,则模4减法成为加群的减法,这里分别用+、-来表示。加群的加减法适合交换律和结合律。模2加用⊕表示。设Q、I支路判决输出比特分别为X、Y,则循环码的四进制数与二进制数之间的关系为 $Z = X \times 2 + (X \oplus Y)$ 。用下标*i-1*和*i*分别表示输出码字的前后顺序。在一个恢复载波下,没有发生 $\pi/2$ 移相错误时

$$Z_i - Z_{i-1} = X_i \times 2 + (X_i \oplus Y_i) - [X_{i-1} \times 2 + (X_{i-1} \oplus Y_{i-1})] \tag{4}$$

发生 $\pi/2$ 移相错误时,由式(2)、(3)可知

$$Z'_i - Z'_{i-1} = \bar{X}_i \times 2 + (\bar{X}_i \oplus Y_i) - [\bar{X}_{i-1} \times 2 + (\bar{X}_{i-1} \oplus Y_{i-1})] \quad (\bar{X}_i \oplus X_i = 1) \tag{5}$$

只有当(4)式等于(5)式时 $Z'_{i-1}Z'_i$ 和 $Z_{i-1}Z_i$ 才同属一个子集,差分译码器才能在两种情况下都正确译码。推导(5)式

$$\begin{aligned} Z'_i - Z'_{i-1} &= \bar{X}_i \times 2 + (\bar{X}_i \oplus Y_i) - [\bar{X}_{i-1} \times 2 + (\bar{X}_{i-1} \oplus Y_{i-1})] = \\ &= (X_i \oplus 1) \times 2 + (X_i \oplus 1 \oplus Y_i) - [(X_{i-1} \oplus 1) \times 2 + (X_{i-1} \oplus 1 \oplus Y_{i-1})] = \\ &= (X_i \times 2 + 2) + X_i \oplus Y_i - [(X_{i-1} \times 2 + 2) + \overline{X_{i-1} \oplus Y_{i-1}}] \end{aligned} \tag{6}$$

根据加群的交换律和结合律,由(4)式可得

$$Z_i - Z_{i-1} = (X_i \times 2 - X_{i-1} \times 2) + (X_i \oplus Y_i) - (X_{i-1} \oplus Y_{i-1}) \tag{7}$$

由(6)式可得

$$Z'_i - Z'_{i-1} = (X_i \times 2 - X_{i-1} \times 2) + \bar{X}_i \oplus Y_i - \overline{X_{i-1} \oplus Y_{i-1}} \tag{8}$$

显然,当 $X_i \oplus Y_i$ 不等于 $X_{i-1} \oplus Y_{i-1}$ 时, $Z'_i - Z'_{i-1}$ 不等于 $Z_i - Z_{i-1}$ 。也就是说四相差分译码器此时不能在错误移相的情况下对数据正确译码。

表1 收发端码字对应表

发端	收端				
	正交支路移相	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
QI	QI	QI	QI	QI	QI
00	正确	00	01	11	10
01		01	11	10	00
11		11	10	00	01
10		10	00	01	11
	错误				
00		10	00	01	11
01		11	10	00	01
11		01	11	10	00
10		00	01	11	00

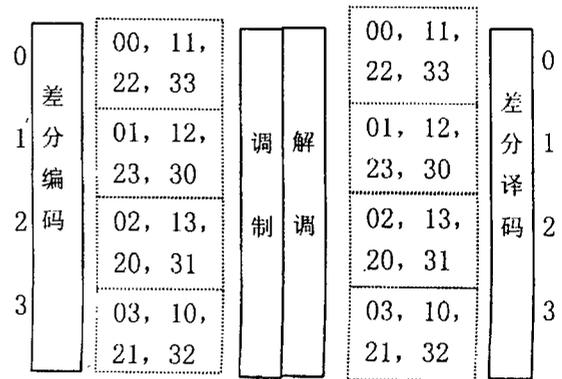


图1 四相差分编译码原理示意图

3 电路实现

由表 1 可以看出,解调输出数据与应该正确的数据之间有一个逻辑变换对应关系。如果能确定当前数据的输出状态,再利用相应的对应关系,对输出的数据进行逻辑变换,就能得到正确的数据。因此,只要在解调输出端加一识别及变换电路即可。根据表 1,可得出对于这八种情况相应的有八种变换电路,如表 2 所示。

用于 QPSK 调制解调方式时,Q-1900 工作方式可设置为:二相差分编码——卷积编码——并行输出,并行输入——维特比译码——二相差分译码。当相位差 θ_0 等于 0 或 π ,而且正交支路 $\pi/2$ 移相无错时,维特比译码器不对输入的无误码数据进行校正。Q-1900 允许使用者在两个初始化寄存器里分别设置一个检测周期和一个与之相应的校正率门限。两个初始化寄存器和相关电路构成一个同步状态监测器。如果该检测周期的长度和门限值设置的比较合适,则一旦相位差 θ_0 等于 $\pi/2$ 或 $3\pi/2$,或者正交支路 $\pi/2$ 移相错误时,任何一个检测周期内译码器的校正率都将超过门限值,而一般的突发误码却不会使译码器校正率超过该门

表 2 变换电路表

$\pi/2$ 移相	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
正确	I,Q	Q 路反	I,Q 路	I 路反
	直通	相,两 路交叉	反相, 不交叉	相,两 路交叉
错误	Q 路反	I,Q	I 路反	I,Q 路
	相,不 交叉	两路交 叉	相,不 交叉	反相,两 路交叉

限。Q-1900 在一个检测周期完成之后如果校正率超过门限值,则同步状态监测器会使其 OUTOFSYNC 引脚产生一个标志脉冲。否则,由 INSYNC 引脚输出标志脉冲。

当译码器输入的两支路都是正确数据的反码时,经译码器译码输出的数据也为相应正确数据的反码。此时译码器不产生校正,OUTOFSYNC 标志信号不会出现。而且由于二相差分编译码器的作用,输出数据仍是正确的。由表 2 可见,相位差为 π 时所对应的变换与相位差为 0 时所对应的变换,输出数据完全相反。 $3\pi/2$ 与 $\pi/2$ 也是一样。因此只需四种变换电路。

在 Q-1900 使用过程中,用单片机对其进行初始化设置。这里用 FPGA 实现数据变换、解调器数据输出状态识别和变换电路之间的切换^[2]。把 Q-1900 的引脚 OUTOFSYNC 和 INSYNC 信号提供给 FPGA。最后通过实验成功地对方案进行了验证。整体电路结构和 FPGA 内部电路分别如图 2、图 3 所示。

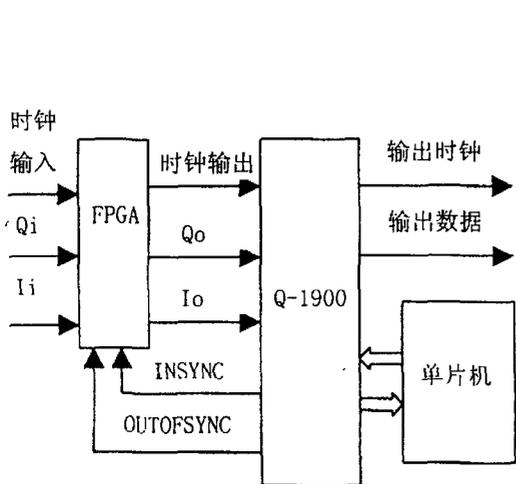


图 2 电路结构

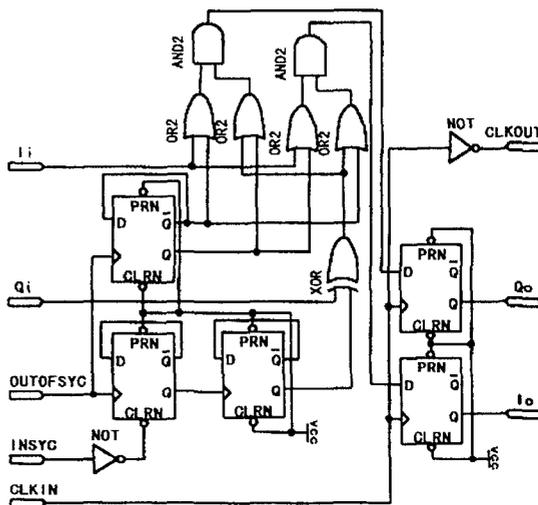


图 3 FPGA 内部电路结构

解调器数据输出状态识别是通过 OUTOFSYNC 和 INSYNC 信号进行的。在电路初始状态,根据 OUTOFSYNC 脉冲循环地对四种变换进行切换,直到 INSYNC 脉冲信号出现。

解调电路开始正常工作后,由于噪声干扰,可能出现的不稳定现象首先是跳周。其结果是恢复载波相位变化 π 。由前面的分析可知,载波相位变化 π 后所用的变换电路与变化前相同,不发生切换,也不产生误码。

考虑到更小概率的情况:在特定干扰情况下恢复载波相位跳变 $\pi/2$ 、正交支路 $\pi/2$ 移相变化和两者兼有的情况,在解调电路开始正常工作后,FPGA 会按这个顺序切换,能使平均切换时间达到最小。

4 与四相差分编译码的比较

四相差分编译码只能解决不考虑 $\pi/2$ 移相错误时的四种情况。本文所提方案能解决所有八种情况。而且,在解调电路不发生 $\pi/2$ 移相错误时,FPGA 在解调电路开始正常工作后只会在两种变换电路之间进行切换,使切换效率达到最高。

电路不稳定因素中,跳周发生的概率最高。采取一种前馈相位抵消加跳周校正的载波恢复电路时,在 $E_b/n_0=5.5$ dB, $P_b=10^{-2}$ 条件下,跳周率为每码符 10^{-12} 。而且跳周时不用切换。可见更小概率的其它情况所引起的切换对输出数据产生的影响是很小的。

5 结束语

PSK 的调制解调可全部数字化,集成化的调制解调功能模块成本也不高。Q-1900 性价比良好,两者都逐渐得到了广泛的应用。对于 QPSK 数字化相干解调所遇到的相位模糊问题,结合 Q-1900,这里给出了较理想的解决方案。

参考文献:

- [1] 吕海,蔡剑铭,甘仲民,等. 卫星通信系统[M]. 北京:人民邮电出版社,1994.
- [2] 赵雅兴. FPGA 原理设计与应用[M]. 天津:天津大学出版社,1999.

Study on phase ambiguity resolution of QPSK digital demodulation

GUO Xing-yang, XIE De-fang

(The Telecommunication Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710077, China)

Abstract·Based on the function of the synchronization status monitor of Q-1900, a new method for correcting output data status of all digital coherent QPSK demodulation is presented. The correcting capability of the quadriphase differential coding and decoding is also analysed in theory. The experiment results show that this method is of the complete performance which the quadriphase differential coding and decoding can not achieve.

Key words:phase ambiguity; viterbi decoding; differential coding and decoding