

# 一种 G 比特可变编码调制的解调方法设计与实现

罗 强

(西南电子技术研究所,四川 成都 610036)

**摘要:** 随着卫星通信技术的发展,宽带频谱越来越少,提高频谱利用率就愈来愈重要,可变编码调制技术(VCM)就是一种解决方案。根据 DVB-S2 标准中对调制信号的格式的定义,当调制方式在 QPSK、8PSK、16APSK、32APSK 中切换时,帧头和导频仍然采用  $\pi/2$ BPSK 进行调制,基于此提出了对导频和帧头部分进行高码率可变编码的载波同步和均衡处理,实现结果表明,能正常对不同调制方式进行解调,同时保证在不同调制方式进行切换时仍能稳定完成解调,测试结果表明解调性能偏离理论值小于 3 dB,由于只采用了一种载波同步方法和均衡方法,实现方法简单,节省了 FPGA 资源。

**关键词:** 导频; 可变编码调制; FPGA 实现; 高速数传接收机

中图分类号: TN927

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201221

中文引用格式: 罗强. 一种 G 比特可变编码调制的解调方法设计与实现[J]. 电子技术应用, 2021, 47(6): 126–130.

英文引用格式: Luo Qiang. Design and implementation of a demodulation method of G-bit variable coding modulation[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(6): 126–130.

## Design and implementation of a demodulation method of G-bit variable coding modulation

Luo Qiang

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** With the development of satellite communication technology, the broadband spectrum is becoming less and less, so it is more and more important to improve the spectrum efficiency. The variable code modulation technology is a solution. According to the definition of modulation signal format in DVB-S2 standard, when the modulation mode is switched in QPSK, 8PSK, 16APSK and 32APSK,  $\pi/2$ BPSK is still used for frame head and pilot. Based on this, a carrier synchronization and equalization processing based on pilot and frame header with variable coding rate is proposed. The results show that different modulation modes can be demodulated normally, while maintaining the same time. The test results show that the demodulation performance deviates from the theoretical value by less than 3 dB. Because only one carrier synchronization method and equalization method are used, which is simple and which saves the whole FPGA resource.

**Key words:** pilot; variable code modulation; FPGA implementation; high-speed data receiver

## 0 引言

伴随卫星通信技术应用的发展,频段资源越来越紧缺,提高频带利用率就越来越重要。提高卫星过境期间总的传输数据量可以通过提高调制阶数,从 QPSK 提高到 8PSK,进而到 16APSK 和 32APSK 可以明显提高数据量,调制阶数越高对传输的载噪比要求就越高,而卫星过境期间的载噪比随着卫星仰角的不断增加而不断提高,过顶后仰角的不断减小而减小。2005 年,欧洲电信标准化协会(European Telecommunication Standards Institute, ETSI)颁布了新一代数字卫星广播标准 DVB-S2<sup>[1]</sup>(Digital Video Broadcasting—Second Generation Satellite, 第二代数字卫星广播标准)。在此标准中增加了可变编码调制(Variable Coding and Modulation, VCM),此种传输方式可

以根据卫星仰角的不断改变相应地改变调制编码方式,在低仰角时采用 QPSK 调制方式,随着仰角的提高调制方式不断改变为 8PSK 和 16APSK,在接近过顶时载噪比较高,可以采用 32APSK 调制方式,这种 VCM 方式既保证在低仰角时能够进行传输,又保证了高仰角时的数据传输速率。

传统的 DVB-S2 解调均是低码率的处理<sup>[2-3]</sup>,针对符号速率达到 500 MS/s 的高码率的卫星接收处理方法并不多。

图 1 是 DVB-S2 标准中的数据帧结构图,从图中可以看出,每帧数据都包含有帧头、编码调制参数(标准中一共有 28 种调制译码方式,分别对应四种调制方式:QPSK、8PSK、16APSK 和 32APSK)、信息数据和导频,信息数据

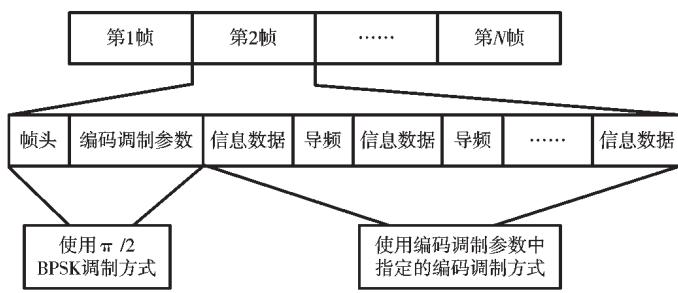


图 1 DVB-S2 标准中的数据帧结构图

的调制方式是根据编码调制参数给定的四种调制方式中的一种进行调制,而帧头和编码调制参数部分和导频部分则是采用  $\pi/2$ BPSK 调制方式进行调制。

### 1 基于帧头与导频的解调方法

信息数据部分的调制方式可以不断变化,而符号速率一直保持不变,同时需要保证在不同调制方式直接进行切换时的稳定接收,根据帧头和导频均采用  $\pi/2$ BPSK 调制方式进行发送数据的特点,提出了如下解调方法,原理框图如图 2 所示。

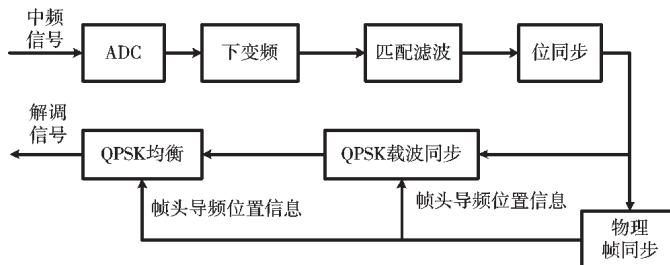


图 2 基于帧头与导频的解调方法原理框图

对输入 1.2 GHz 的中频信号通过 ADC(模拟数字转换器)采样后进行数字下变频处理,然后进行匹配滤波处理,接着采用 GARDEN 算法进行位同步,对位同步后的信号进行物理帧同步得到帧头和导频的位置信息,根据这些位置信息,准确定位出帧头和导频位置,然后对帧头和导频部分按照 QPSK 调制模式进行载波同步,最后对同步后的信号的帧头和导频部分进行均衡处理,从而完成解调过程,整个解调过程通过 FPGA 代码实现,完成所有功能<sup>[4]</sup>。整个解调过程均采用 QPSK 一种调制方式的解调流程完成四种调制方式 500 MS/s 速率(信息速率对应为 1 000 Mb/s~2 500 Mb/s)的解调,而不用针对不同的调制方式采用不同的载波同步和均衡处理方式,节约了资源,同时保证在调制方式切换时能够更顺畅和稳定地完成各种调制方式间随意切换的解调。

#### 1.1 位同步

定时误差的方法有很多,这里选择 Gardner 算法<sup>[5-10]</sup>,它具有独立于载波相位,每个符号只需要两个采样点就可以进行误差计算,不需要累加运算,其实现结构简单,对载波误差不敏感。Gardner 提出了在接收端的解调器中

进行定时误差检测算法,该算法的运算较简单,每个符号仅需要两个采样点。并且两个采样点中的一个是符号的峰值(即最佳采样点)。它的优点是非面向判决,而且定时恢复也完全与载波相位相互独立。此算法的原理如图 3 所示。

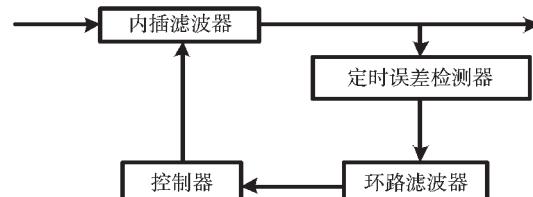


图 3 Gardner 定时恢复框图

图 4 是码钟误差提取的示意图,第一个子图是存在定时误差的情况,第二个子图是没有误差的情况。可见误差的提取必须是在有符号转换的情况下进行的。

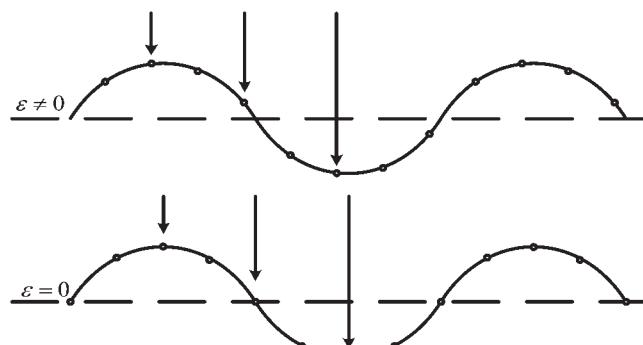


图 4 时钟恢复算法误差提取图

在两路相互正交的码元信号  $I(k)$ 、 $Q(k)$  在每个符号输出两个重采样点,用于进行 Gardner 算法计算,并且两路信号对应点采样时刻是一致的。一个采样点出现在峰值时刻,一个出现在两个相邻峰值时刻的中间值。 $x_I(k)$ 、 $x_Q(k)$  分别是两路信号第  $k$  个码元的判决时刻样点值, $x_I(k-1/2)$ 、 $x_Q(k-1/2)$  分别表示第  $k$  个码元和第  $k-1$  个码元中间的样点值,那么 Gardner 算法的表达式如下所示:

$$e(k) = x_I(k-1/2)[x_I(k)-x_I(k-1)] + \\ x_Q(k-1/2)[x_Q(k)-x_Q(k-1)]$$

该算法可以这样理解,当不存在定时误差  $\tau$  时,两个峰值中间的样点值为零,如果存在定时误差  $\tau$  时,那么两个峰值中间的样点值不为零。如果不为零时,那就代表着有正负的存在,这还为我们提供了  $\tau$  的调整方向。

#### 1.2 多模式物理帧同步

经过 Garden 算法完成位同步后的信号需要通过物理帧同步获取帧头和导频的位置,具体流程如图 5 所示。位同步后的信号与 28 种模式的帧头模板相关,相关峰是否有大于阈值的情况,如果大于设定阈值,就确定此模式为当前帧信号的调制译码模式。进而根据每种调制

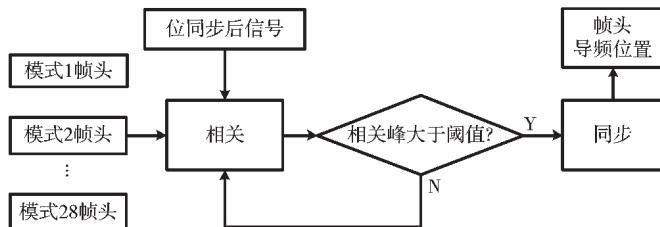


图 5 物理帧同步图

译码模式的数据格式来确定帧头与导频的具体位置。

### 1.3 多模式载波同步

载波恢复环种类很多,本文采用一种性能较好且比较容易实现的四相松尾环进行 QPSK 载波恢复环路,其载波同步结构如图 6 所示<sup>[11-15]</sup>。

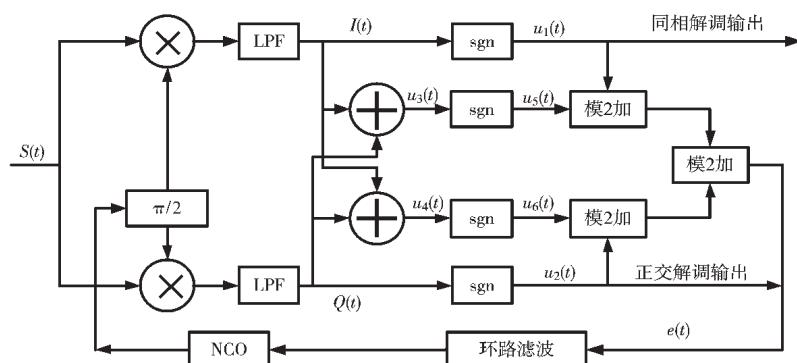


图 6 四相松尾环载波同步框图

其基带处理部分的原理为:输入信号  $S(t)$  经过正交解调后,输出两路基带信号,然后将这两路基带信号送入基带处理部分进行处理。基带处理部分由加法器、判决电路、模二加电路等组成。基带处理部分输出一个和解调码元无关的控制信号  $e(t)$ ,  $e(t)$  通过环路滤波进一步滤除干扰后去控制压控振荡器的相位变化,从而达到 QPSK 载波跟踪的目的。

环路滤波器的控制电压为:

$$\begin{aligned} e(t) &= u_1(t) \oplus u_2(t) \oplus u_5(t) \oplus u_6(t) \\ &= \text{sgn}[I(t)Q(t)u_3(t)u_4(t)] \\ &= \text{sgn}\{\sin[4\theta_e(t)]\} \end{aligned}$$

其中  $I(t)$ 、 $Q(t)$  分别为基带信号。

采用四相松尾环跟踪 QPSK 信号的载波后,数字调制信号  $S(t)$  已被消除,误差信号  $e(t)$  仅与发送载波与本地载波之间的相位差  $\theta$  有关。 $e(t)$  经环路滤波器进行平滑,送到数控振荡器,迫使本地载波与发送载波达到同频同相。

为使接收机对卫星加速度适应,锁相环采用三阶环来实现,三阶环的环路滤波器结构如图 7 所示<sup>[16]</sup>。 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  是各支路的参数,其参数确定将采用 JPL 提供的公式。

JPL 三阶环路滤波器参数设计是在二阶环路的基础上增加一条积分支路构成的,其三阶 3 型 DPLL 环路滤

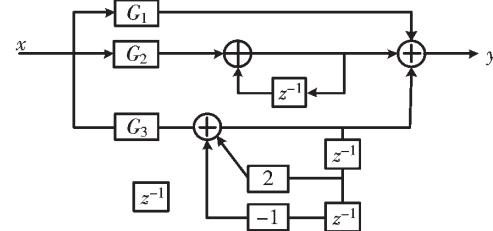


图 7 三阶数字滤波器结构

波器的传输函数的  $z$  域表示为:

$$F(z) = G_1 + \frac{G_2}{1-z^{-1}} + \frac{G_3}{(1-z^{-1})^2}$$

$$G_1 = rd/T_s$$

$$G_2 = rd^2/T$$

$$G_3 = rkd^3/T_s$$

其中: $d=4B_L T_s(r-k)/r(r-k+1)$ ,  $B_L$  为标称环路带宽,  $T_s$  为采样时间,  $r=4\xi=2\sim 4$ ,  $\xi$  是阻尼系数,  $k$  是三阶环路增益参数,当  $k=0$  时为二阶环路,一般为 0.25~0.5。

根据物理帧同步中已经获取的帧头和导频位置,进行 QPSK 调制方式的鉴相和频偏估计。图 8 是载波恢复前的 32APSK 信号,图 9 是经过载波恢复后的信号星座图。从图中可以看出,采用 QPSK 的方式能很好地完成载波同步。

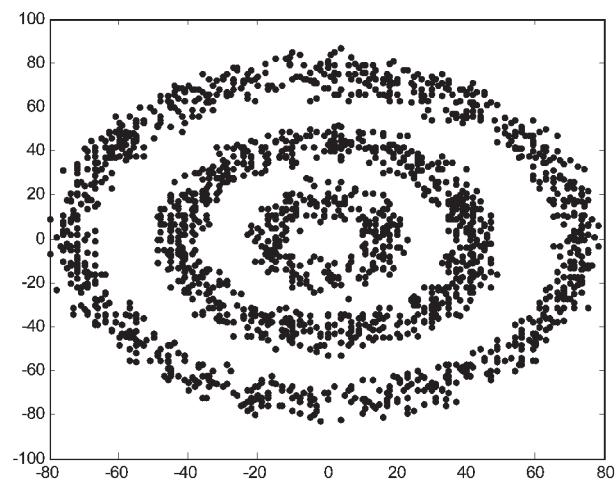


图 8 载波恢复前 32APSK 信号星座图

### 1.4 QPSK 均衡

根据物理帧同步中已经获取的帧头和导频位置,对完成载波同步后的信号进行 CMA 均衡处理,均衡器系数更新仅在帧头和导频位置进行更新,其余位置保持不变。图 10 是经过均衡后的 32APSK 信号星座图。从图中可以看出,采用 QPSK 的方式能够完成 32APSK 的均衡。

## 2 测试结果

### 2.1 各模式测试结果

通过以上过程完成了单模式的位同步,载波同步和

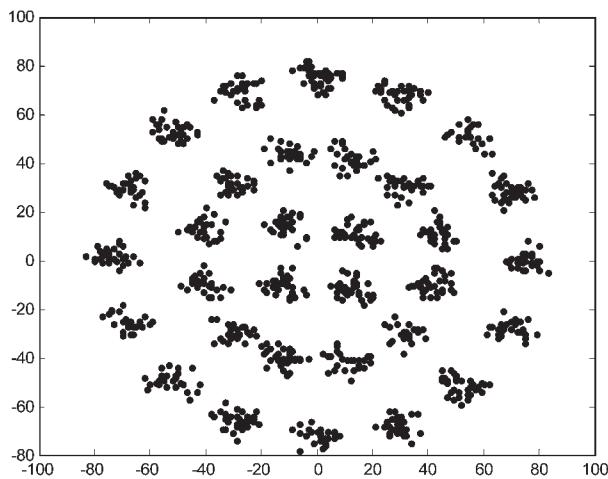


图 9 载波恢复后 32APSK 信号星座图

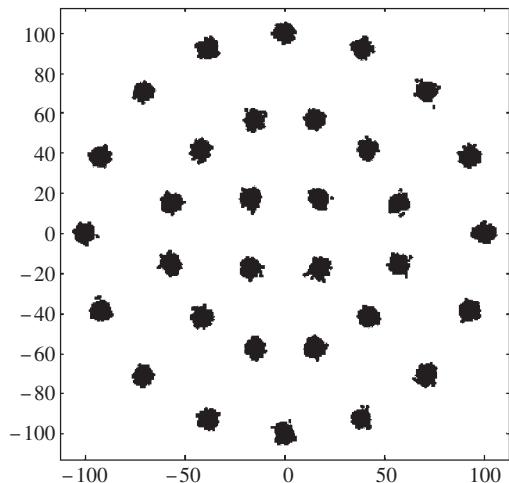


图 10 均衡后 32APSK 信号星座图

均衡,在此基础上,需要进行多模式间的切换。图 11 是 QPSK、8PSK、16APSK 和 32APSK 每种调制方式单一接收时的星座图,图 12 中包含有 32APSK 和 16APSK,32APSK

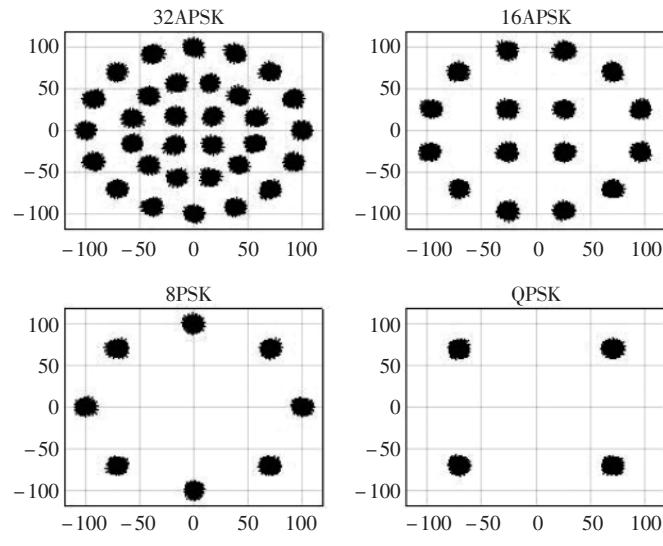


图 11 单一调制方式解调星座图

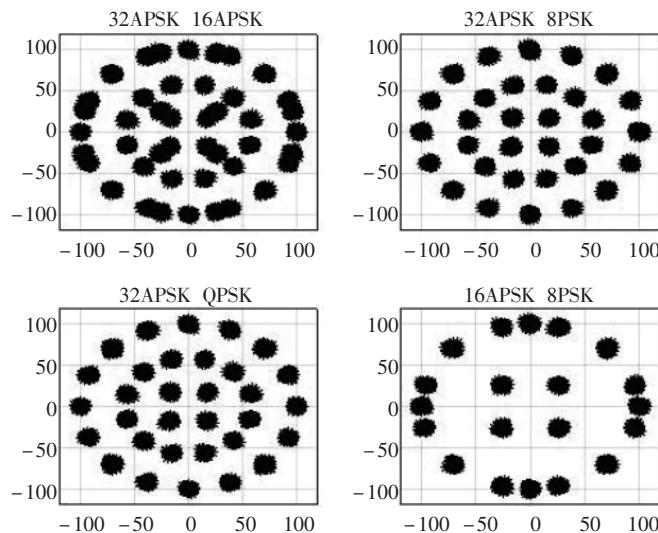


图 12 两种调制方式切换时的星座图

和 8PSK,32APSK 和 QPSK,16APSK 和 8PSK 之间进行切换时的星座图,从图中可以看出,在切换时星座图正常,解调方式切换顺利。

## 2.2 性能测试结果

根据 DVB\_S2 标准发送 LDPC8/9 编码码率的信号进行单模式解调误码率测试结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,采用 QPSK 方式进行解调的载波同步与均衡处理,能稳定对四种不同调制方式进行解调,解调损耗在 3 dB 以内。

表 1 解调性能

调制方式	编码码率(LDPC)	理论 ES/N0 <sup>[1]</sup> /dB	误码率	实测 ES/N0/dB	解调损耗/dB
QPSK	8/9	6.50	$7.1 \times 10^{-8}$	7.1	0.6
8PSK	8/9	10.99	$8.2 \times 10^{-8}$	13.8	2.81
16APSK	8/9	13.19	$6.9 \times 10^{-8}$	16.0	2.81
32APSK	8/9	15.99	$7.7 \times 10^{-8}$	18.9	2.91

## 3 结论

在当今的电子的设计中,占用相对少的资源和具有最快运行速度是设计的方向。在本设计中,采用 QPSK 单一模式下对 DVB\_S2 标准中有导频的 QPSK、8PSK、16APSK 和 32APSK 四种调制方式完成解调,节省了资源,然而解调损耗较大,仍需进一步提升,以更好地进行实际应用。

## 参考文献

- [1] ETSI TR 302 307 V1.2.1.Digital Video Broadcasting(DVB) Second generation framing structure,channel coding and modulation systems for Broadcasting ,Interactive Services , News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)[S].2009.
- [2] AVVOPOULOS P,PAPANDREOU N,ANTONAKOPOULOS T. Architecture and DSP implementation of a DVB-S2 baseband demodulator[C].Proceedings of 12th Euromicro Conference on Digital Signal Processing.

- ence on Digital System Design: Architectures, Methods and Tools.IEEE , 2009 : 441–448.
- [3] 张颖.卫星数传 VCM/ACM 链路的关键技术研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心),2019.
- [4] 夏宇闻.VerilogHDL 数字系统设计教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2015.
- [5] MUELLER K H, MULLER M.Timing recovery in digital synchronous data receivers[J].IEEE Transactions on Communications , 1976 , 24(5) : 516–531.
- [6] Gardner F M.A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers[J].IEEE Transactions on Communications , 1986 .
- [7] BARLETTA L, MAGARINI M, SCARDONI F, et al.Impact of loop delay on the performance of Gardner timing recovery[J].IEEE Photonics Technology Letters , 2013 , 25(18) : 1797–1800.
- [8] Huang Zhen , Yang Pan , Zhang Weihan.Improved gardner suppression timing jitter synchronization algorithm[J].Journal of Electrical and Electronic Engineering , 2020 , 8(1) : 21–26.
- [9] 韩孟来,倪永婧.一种 16 倍采样的 Gardner 定时同步方法[J].电讯技术 , 2019 , 59(2) : 223–228.
- [10] 杜勇.数字通信同步技术的 MATLAB 与 FPGA 实现[M].北京:电子工业出版社,2015.
- [11] 吴大维.一种 QPSK 解调器(松尾环)的研制[J].电讯技术 , 1990(4) : 22–26.
- [12] SANGRIOTIS M, XEZONAKIS I.Digital costas loop-like PLL for the carrier recovery of a QPSK signal[J].Electronics Letters , 1993 , 29(10) : 897–899.
- [13] LINN Y.Robust M-PSK phase detectors for carrier synchronization PLLs in coherent receivers : theory and simulations[J].IEEE Transactions on Communications , 2009 , 57(6) : 1794–1805.
- [14] 何宗苗,姚远程,秦明伟.基于 System Generator 的盲均衡器设计与实现[J].电子技术应用 , 2014(7) : 33–36.
- [15] 刘俊杰.全数字锁相环电路的设计与实现[D].成都:电子科技大学 , 2011.
- [16] 杜瑜.三阶数字锁相环环路参数的设计方法[J].电讯技术 , 2007(5) : 156–158.

(收稿日期:2020-12-21)



扫码下载电子文档

(上接第 118 页)

- (5) : 1619–1622.
- [13] 赵洪锟.基于嵌入式 Linux 的 IEEE1588 协议的分析与实现[D].济南:山东大学 , 2012.
- [14] 王晋祺,陈鸿.基于 ARM 的 IEEE1588 精密时钟同步协议实现[J].电子器件 , 2019(6) : 1527–1531.
- [15] 陈炯聪.IEEE 1588 同步技术在电力系统中的应用[M].北京:中国电力出版社 , 2012.
- [16] 王延年,宋小伟.高精度时钟同步系统的研究与实现策

略[J].国外电子测量技术 , 2018(3) : 30–33.

(收稿日期:2020-12-02)

作者简介:

宋艳(1975–),女,高级工程师,主要研究方向:信息、通信技术及调度自动化技术。

应斌杰(1991–),男,硕士,工程师,主要研究方向:通信工程。

毛立振(1993–),通信作者,男,学士,工程师,主要研究方向:电力系统及自动化,E-mail:137356994@qq.com。



扫码下载电子文档

(上接第 125 页)

- [15] BOIYO D K, CHABATA T V, KIPNOO E K R, et al. Reconfigurable high-speed optical fiber networks : optical wavelength conversion and switching using VCSELs to eliminate channel collisions[J].Optical Fiber Technology , 2017 , 33 : 30–35.

(收稿日期:2020-12-17)

作者简介:

朱敏(1981–),男,博士,副教授,主要研究方向:电子系统自动化测试。

吴楠(1997–),男,硕士研究生,主要研究方向:FPGA 应用及数字图像处理。

杨春玲(1965–),通信作者,女,博士,教授,主要研究方向:电子系统设计,E-mail:yangcl1@hit.edu.cn。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所