

文章编号: 1001-893X(2012)09-1432-06

一种新型无线数字窄带通信系统的设计与实现^{*}

高翔¹, 贾思强¹, 杨絮¹, 陆起涌^{1,2}

(1. 复旦大学 电子工程系, 上海 200433; 2. 复旦大学 无锡研究院, 江苏 无锡 214131)

摘要:提出了一种新型无线窄带通信系统的设计方案, 该方案基于数字化的信源和信道编码方法, 采用了两点调制和二次调制等技术, 可兼容欧洲公众数字对讲机标准(DPMR), 并通过研制得以实现。实测结果表明, 系统接收灵敏度达 -110 dBm, 可满足远距离无线语音通信和中低码率的数据通信的要求。

关键词:数字通信; 窄带通信; 语音通信; 两点调制; 二次调制

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.09.004

Design and Implementation of a Novel Wireless Narrow-band Digital Communication System

GAO Xiang¹, JIA Si-qiang¹, YANG Xu¹, LU Qi-yong^{1,2}

(1. Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Wuxi Research Institute, Fudan University, Wuxi 214131, China)

Abstract: A method is proposed about the design of a novel wireless narrow-band communication system. The method is based on digital source coding and digital channel coding. The method employs techniques such as two-point modulation and second modulation, which is compatible with the standard of Digital Private Mobile Radio (DPMR). The method is implemented through research and development. The result of experiments shows that the receiving sensitivity of the system reaches -110 dBm. The system can meet the demands of long-distance voice communication or long-distance data communication with medium or low bit rate.

Key words: digital communication; narrow-band communication; voice communication; two-point modulation; second modulation

1 引言

众所周知, 频谱资源是一种极其宝贵的自然资源, 然而, 随着无线通信技术和物联网技术的进一步发展, 势必对现有的频谱资源造成巨大的影响和冲击。因此, 在语音和中低数据率要求的通信应用中, 采用数字窄带通信方式不失为一种经济实用的无线通信解决方案。一般而言, 数字窄带通信具有频带

利用率高、稳定性好、抗干扰能力强等优点^[1], 与传统的模拟窄带通信系统相比, 具有更好的安全性、灵活性和可靠性。然而, 现有的数字窄带通信方案形形色色, 调制方式也多种多样, 无统一的标准, 并且功能单一, 不同模块间兼容性差。近些年来, 工作在 ISM(工业、科学、医学) 290 ~ 460 MHz 的免审批频段的幅度键控(ASK) 数字通信系统已经得到广泛应用^[2]。但是该方式对信道特性变化十分敏感, 受无线信道衰落影响较大; 而其他的数字调制方式, 诸如

^{*} 收稿日期: 2012-03-16; 修回日期: 2012-05-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划) 项目(2011AA100701)

Foundation Item: The National High-tech R&D Program(863 Program) of China (2011AA100701)

FSK、MPSK、MSK 和 QAM 等与其相比虽也有一定优势,但多数均是采用正交调制和相干解调的方式,其设备成本相对较高,在不同的场合下,也有各自的局限性^[3]。本文介绍的系统是一种基于无锡士康通讯技术有限公司的 SRT3500、SRT3300 和 SRT3602 射频芯片和以 SCT3252 为核心的基带芯片构建的数字窄带通信系统解决方案。该方案将原本广泛应用于连续语音控制静噪系统(CTCSS)中的两点调制技术移植到数字通信系统中,并运用了二次调制的方式,可兼容欧洲通信标准协会的 DPMR 数字无线电标准协议。与其他的数字无线电协议标准相比,基于 DPMR 协议开发的数字窄带通信系统具有频带利用率高、覆盖范围大和电池寿命长等特点,非常适合应用于无基站的直通通信中^[4]。

2 系统设计方案

2.1 射频系统

本方案的射频系统是由士康公司的射频专用芯片 SRT3500、SRT3300 和 SRT3602 构成。其中, SRT3500 芯片集成了低噪声放大器、混频器、锁相环和 VCO 等模块,同时配置有寄存器,是一款可编程的射频收发芯片,它通过三线控制方式与 MCU 相连, TX 部分采用锁相环频率调制, RX 部分采用超外差接收方式,构成了整个射频系统的核心; SRT3300 对中频信号完成第二中频的频率转换、限幅放大和鉴频等功能,与 SRT3500 一起使用可以构成一个完整的接收机; SRT3602 是射频专用 PA 芯片,以满足远距离通信的要求。该三款芯片及其外围器件构成了本文介绍的完整射频系统,如图 1 所示。

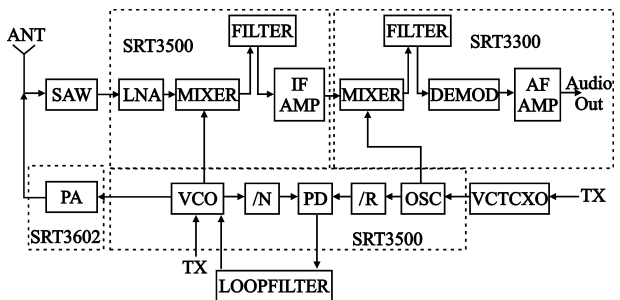


图 1 射频系统方案图
Fig. 1 Schematic diagram of RF system

2.2 基带系统

本方案的基带系统是由士康公司的 SCT3252 基

带处理器芯片和 Wolfson 公司的 WM8758B 的 codec 芯片以及 C8051F120 单片机组成。其中, SCT3252 芯片包含了欧洲通信标准协会的标准 ETSI TS 102 490 和 ETSI TS 102 658 中规定的 DPMR 的物理层、数据链路层以及大部分的呼叫控制层的内容^[5-6], 构成一个数字语音系统的基带信号处理部分。该芯片有 DSP 内核, 用于数字滤波、语音编码、数据压缩等数字信号处理。对于语音信号, 采用的是基于先进多带激励算法的 AMBE2000 的语音编解码方式。芯片内置有 4FSK 调制与解调器, 可完成信号的基带调制。在基带系统中, SCT3252 中的 DSP 内核和 C8051F120 单片机构成信号处理和控制核心。

基带系统的方案图如图 2 所示。

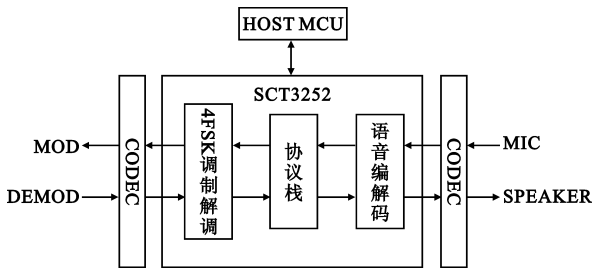


图 2 基带系统方案图
Fig. 2 Schematic diagram of baseband system

3 系统原理分析

3.1 系统原理概述

以语音信号的通信为例, 信源端的语音信号经 WM8758B 的 codec 芯片数字化后被送入 SCT3252, 先是进行信源编码, 此时的数字语音信号经过 AMBE 编码压缩后获得码率为 2 400 bit/s 的语音编码, 再通过信道编码, 加入前向纠错数据, 从而使数据码率变为 3 600 bit/s, 之后通过加入 DPMR 帧头和相关的协议控制信息, 使得信息码率达到 4 800 bit/s, 最后该信号通过 4FSK 调制后进行增益调控, 分两路进入射频系统。

在射频系统中, 两路基带信号分别通过 VCO 和 VCTCXO 送入锁相环, 锁定频率由 MCU 对 SRT3500 的寄存器配置设定, 并对参考晶振分频后通过锁相环频率合成获得, 本系统设计的射频频率是 446 MHz。两点调制后的射频信号被送入到 SRT3602 进行功率放大, 经由输出匹配至天线。

在接收端, 射频接收机采用的是二次变频的超

外差方式,由天线获得的无线电信号先经446 MHz的声表面滤波器抑制镜频干扰后送入 SRT3500 的低噪放进行放大,进行第一次混频。在本设计中第一级本振频率为467.7 MHz,故对446 MHz射频信号经差频后获得的第一中频信号为21.7 MHz,然后经过21.7 MHz晶体滤波器送入 SRT3300 进行二次变频,二次变频的本振频率为21.25 MHz,故第二中频为450 kHz,第二中频信号经低通滤波后限幅送入鉴频单元,最终恢复出基带 4FSK 信号并将该基带信号送至 SCT3252 和 WM8758B 进行 4FSK 解调、信道解码、信源解码和 D/A 处理,最终获得源端语音信号。

数据信号的通信过程和语音信号类似,仅是略去了语音压缩和编码的步骤。

在整个系统中,除了数字通信系统必备的信源和信道编解码技术,两点调制和二次调制技术的应用是该无线数字窄带通信系统设计的关键。

3.2 系统关键技术分析

3.2.1 两点调制原理

在锁相环调频电路设计中,锁相环单点调制是无线模拟通信中一种常用的技术,但是其缺陷是信号的低频调制特性差^[7]。而对数字通信系统,往往基带信号有大量的低频分量,不适合采用单点调制,故在本系统中采用了两点调制技术,可以有效地克服单点调制的这一弊病。两点调制的原理如图 3 所示。

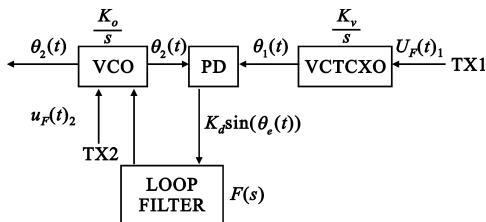


图 3 两点调制原理图

Fig.3 Schematic diagram of two-point modulation

对以上两点调制的非线性模型可以进行简单的线性化处理,不妨设 $\theta_e(t) = |\theta_1(t) - \theta_2(t)|$, 则当 $\theta_e(t) \leq \frac{\pi}{6}$ 时,近似有, $\sin(\theta_e(t)) = \theta_e(t)$ 。

对于锁相环路的分析而言,传递函数具有重要的意义,锁相环有开环传递函数、系统传递函数和误差传递函数 3 类传递函数^[8],分别为

$$G(s) = \frac{\theta_2(s)}{\theta_e(s)} = \frac{K_d K_o F(s)}{s}$$

$$H(s) = \frac{\theta_2(s)}{\theta_1(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{K_d K_o F(s)}{s + K_d K_o F(s)}$$

$$E(s) = \frac{\theta_e(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{1 + G(s)} =$$

$$1 - H(s) = \frac{s}{s + K_d K_o F(s)}$$

在本系统中,对于 TX1,

$$H_1(s) = \frac{\theta_2(s)}{U_F(s)_1} = \frac{K_v \theta_2(s)}{s \theta_1(s)} = \frac{K_v}{s}$$
$$\frac{K_v}{s} H(s) = \frac{K_v K_d K_o F(s)}{s^2 + s K_d K_o F(s)}$$

可得

$$s \theta_2(s) = \frac{K_v K_d K_o F(s)}{s + K_d K_o F(s)} U_F(s)_1 \tag{1}$$

式中, $s \theta_2(s)$ 表示输出频率。而 $H_1(s)$ 显然是一个低通函数,所以对于 TX1 输入的调制信号具有良好的低频调制特性。

对于 TX2,由如下方程:

$$\theta_1(s) \cdot K_d \cdot F(s) = U_F(s)_2$$

可得

$$\theta_1(s) = \frac{U_F(s)_2}{K_d \cdot F(s)}$$

$$\theta_2(s) = H(s) \cdot \theta_1(s) =$$

$$\frac{K_d K_o F(s)}{s + K_d K_o F(s)} \cdot \frac{U_F(s)_2}{K_d F(s)} =$$

$$\frac{K_o U_F(s)_2}{s + K_d K_o F(s)} =$$

$$\frac{K_o U_F(s)_2}{s} \cdot E(s)$$

$$s \theta_2(s) = K_o U_F(s)_2 E(s) \tag{2}$$

同样地, $s \theta_2(s)$ 表示输出频率,而 $E(s)$ 是一个高通函数,所以对于 TX2 输入的调制信号具有良好的高频调制特性。

综合以上系统函数的分析,将式(1)与式(2)相加,可以得到如下的结果:

$$s \theta_2(s) = H_1(s) \cdot U_F(s)_1 + K_o U_F(s)_2 E(s)$$

因此,从理论上而言,选择合适的系数,可以使这种高通和低通的特性互相补偿,利用这种两点调制的方式可以得到较宽的基带信号调制后的 FM 信号,既满足了对调制系统的频率响应特性,又可以保证较高的载频稳定度^[9]。本系统的两路基带信号从 SRT3500 的 19 号引脚 Mod 和 VCTCXO 的压控输入端进入。

3.2.2 二次调制技术

所谓二次调制技术,指的是数字信号经过两次调制后进入信道输送,这是一种提高数字通信系统可靠性和降低误码率的方法。在该系统中,由于数字码元的频谱范围较宽,受到无线传输信道的影响,导致接收到码元的信噪比较差。故在基带系统中增加合适的数字调制会有助于提高系统的可靠性。实验证明,以 4FSK 为基带信号的调频通信系统在传输速率合适时,只有频率交替的时间点会出现一定失真,其他时间点的波形很好,完全可用 4FSK 解调器解调出原始数字信号^[10]。这种方法不仅实现了数字信号的有效传输而且能在射频发射功率一定的条件下提高接收端信号的信噪比,减少误码率。在本系统中,由 SCT3252 完成基带的 4FSK 调制,由 SRT3500 完成射频 FM 调制。

4 系统硬件和软件设计

4.1 硬件系统设计

整体硬件系统的框图如图 4 所示,射频系统和基带系统通过 3 根连线相连,分别为 Demodulation、Mod1 和 Mod2。SRT3500 与 MCU 通过 SRT3500 规定的三线方式连接,SCT3252 与 MCU 通过 HPI 总线方式连接,而 WM8758B 和 SCT3252 通过串口方式连接。

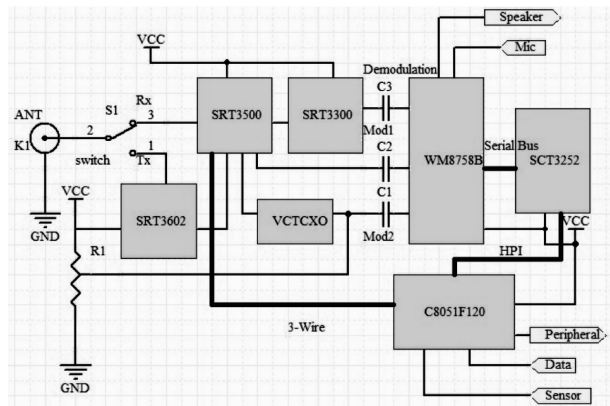


图 4 系统整体原理图
Fig.4 The schematic diagram of the entire system

在实际硬件系统的构建中,有以下几点尤其需要注意。

(1)SRT3500 芯片 VCO 周围的 LC tank 非常敏感,由于高频电路线间的寄生电感和寄生电容的影响,在 PCB 板设计时,必须减短该部分的走线并采

用良好的电磁屏蔽措施,而元件也必须用绕线电感和精度较高的电容。在本设计中,射频工作频率在 446 MHz,其 tank 值选择 $L = 6.8\text{ nH}$ 和 $C = 7.8\text{ pF}$ 比较理想。

(2)图中 R1 可变电阻用于调节 VCTCXO 中的直流偏置,当将发射机的发射频率调整到 446 MHz 后,保证其不再变动,否则会影响射频工作频率和载频稳定度。

(3)两点调制的高低通频率补偿特性与 Mod1 和 Mod2 两路信号的幅度有关,只有当两路信号的幅度合适时才能够对数字信号进行调制和解调。在本设计中,一般 Mod1 信号的 V_{pp} 为 100 mV 左右,Mod2 信号的 V_{pp} 为 1.3 V 左右能够达到比较理想的效果。

4.2 软件系统设计

射频部分的软件控制采用的是 SRT3500 定义的三线控制方式,在时钟信号的上升沿写入数据,数据的结尾以 STB 信号产生的短脉冲标识,其时序如图 5 所示。其中,CLK 信号频率不超过 1 MHz,最小时钟脉宽为 0.2 μs ,DATA 信号最小建立时间为 0.1 μs ,最小保持时间为 0.2 μs ,STB 标识信号的最小脉宽为 0.2 μs 。

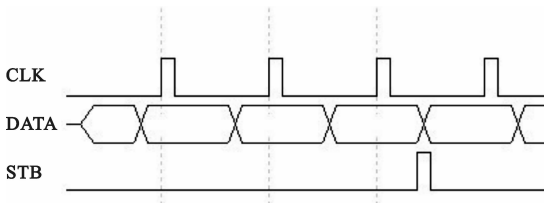


图 5 SRT3500 的三线控制时序
Fig.5 The sequence chart of 3 - wire in SRT3500

MCU 对 SRT3500 用三线控制的方式配置 SRT3500 的寄存器。在 SRT3500 中,寄存器一共有 4 个,其命名为 RB[0:3],这些寄存器用以设置芯片的工作模式、本振频率、参考频率和分频系数等。

在该系统中,以 21.25 MHz 参考晶振、467.7 MHz 本振频率的接收机为例,写入寄存器的数值如下:

RBO = 0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,0,0
RBI = 0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,1
RB2 = 0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,1,0
RB3 = 0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,1,0,1,1,0,1,1

对于基带系统,其控制的核心是 MCU,信号处理的核心是 SCT3252 中的 DSP 内核,整个软件系统

分为待机、侦听和发射 3 种模式,其软件设计的总体流程如图 6 所示。

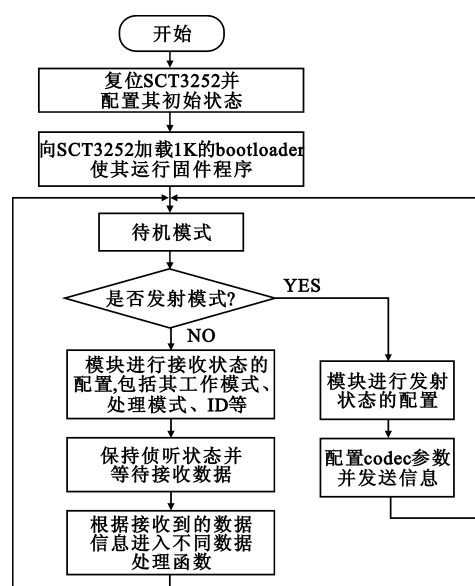


图 6 系统软件流程框架

Fig.6 The process framework of software in the system

5 测试与应用

本文介绍的无线数字窄带通信系统已制成实物,并已经通过测试。

(1)性能参数测试

测试仪器:安捷伦 HP8920B 综合测试仪;

TX mode:工作频率 446 MHz,输出功率 0.4 W;

RX mode:接收灵敏度为 -110 dBm ($SINAD \geq 12\text{ dB}$)。

选配合适的 400 ~ 470 MHz 的 50 Ω SMA 全向天线,天线增益为 2.15 dB,采用 REDOT 1050A 数字驻波表测得最小电压驻波比为 1.3。

(2)通信距离测试

测试环境:复旦大学邯郸校区(市区环境);

通信方式:点对点通信;

实测有效数字语音通信距离小于等于 612 m。

测试结果表明,本文设计的系统通信效果良好,具有一定的实用性和参考价值,可应用于数字对讲机、无线数字广播和无线传感器网络等常见的无线通信应用场合。

6 结束语

本文介绍了一种新型无线数字窄带通信系统的

实现方法,通过理论推导和实际测试,证明了锁相环两点调制技术应用于数字无线通信系统的可行性。同时,本文运用的二次调制的方法也是一种能有效提高射频系统有效带内功率的措施。与现有的单次调制单次变频的窄带数字通信方案相比,该方案具有更高的可靠性和频带利用率,在语音通信中效果更明显。

本文仅对系统进行了点对点的测试,该系统亦可通过频分或时分的方式组网以扩大应用范围,组网宜采用的路由策略和网络最大系统容量有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 郭金鹏,崔生保.窄带通信业务的传输实现[J].无线电工程,2007,37(1):1-4.
GUO Jin-peng, CUI Sheng-bao. Transmission and Reality of Integrated Services in Narrowband Communication[J]. Radio Engineering, 2007,37(1):1-4. (in Chinese)
- [2] Xu Yong-sheng, Shi chun-qi, Jin Wei, et al. A silicon BiCMOS single-chip UHF receiver design [C]//Proceedings of 2005 International Conference on Communications, Circuits and Systems. Hong Kong, China: IEEE, 2005:1295-1299.
- [3] 周旻,王红星,吴龙刚.超窄带通信调制技术研究[J].中国电子科学研究院学报,2007,2(5):518-526.
ZHOU Min, WANG Hong-xing, WU Long-gang. The Study of Technology about UNB Communication[J]. Journal of China Academy of Electronic and Information Technology, 2007, 2(5):518-526. (in Chinese)
- [4] 李东杰,杨家玮.数字专用无线通信系统的新进展[J].电子科技,2011,24(9):87-90.
LI Dong-jie, YANG Jia-wei. The New Evolution of Digital Private Mobile Radio System [J]. Electronic Science and Technology, 2011, 24(9):87-90. (in Chinese)
- [5] ETSI TS 102 490, Peer-to-Peer Digital Private Mobile Radio using FDMA with a channel spacing of 6,25kHz with e. r. p of up to 500mW[S].
- [6] ETSI TS 102658, Digital Private Mobile Radio using FDMA with a channel spacing of 6,25kHz[S].
- [7] 樊昌信,曹丽娜.通信原理[M].6版.北京:国防工业出版社,2006.
FAN Chang-xin, CAO Li-na. Principles of Communication [M]. 6th ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [8] Gardner F M. Phaselock Techniques[M]. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [9] 张波权,汤云杰. PLL 两点调制在 GMSK 调制器中的应用[J]. 航空电子技术, 2008,39(1):9-13.
ZHANG Bo-quan, TANG Yun-jie. Application of Two-Point

Modulation Based on PLL in GMSK Modulator[J]. Avionics Technology, 2008, 39(1): 9 – 13. (in Chinese)

[10] 李学锋, 王丽丽, 李保春. 基于二次调制技术的无线语音数据通信系统[J]. 声电技术, 2008, 32(4): 32 – 34.

LI Xue-feng, WANG Li-li, LI Bao-chun. Wireless Communication Systems of Sound and Data Based on Second Modulation Technique[J]. Audio Engineering, 2008, 32(4): 32 – 34. (in Chinese)

作者简介:

高翔(1989—),男,上海人,2011 年于华东师范大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为数字通信技术、物联网;

GAO Xiang was born in Shanghai, in 1989. He received the B. S. degree from East China Normal University in 2011. He is now a graduate student. His research concerns digital communication and Internet of Things.

Email: wzshdx@163.com

贾思强(1987—),男,黑龙江哈尔滨人,2010 年于浙江大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统软件开发、物联网;

JIA Si-qiang was born in Harbin, Heilongjiang Province, in

1987. He received the B. S. degree from Zhejiang University in 2010. He is now a graduate student. His research concerns development of embedded system and Internet of Things.

杨絮(1987—),女,辽宁锦州人,2010 年于电子科技大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为智能控制和软件设计、物联网;

YANG Xu was born in Jinzhou, Liaoning Province, in 1987. She received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2010. She is now a graduate student. Her research concerns intelligence control, software development and Internet of Things.

陆起涌(1966—),男,江苏太仓人,1993 年于复旦大学获硕士学位,现为复旦大学电子工程系副教授,主要研究方向为嵌入式软硬件设计、工业控制与自动化、智能仪器仪表、物联网。

LU Qi-yong was born in Taicang, Jiangsu Province, in 1966. He received the M. S. degree from Fudan University in 1993. He is now an associate professor in the Electronic Engineering Department of Fudan University. His research concerns design of embedded system, industry control and automation, smart instrument and Internet of Things.

Email: lqyong@fudan.edu.cn