

# An Compatible Analog and Digital AM Broadcasting System

Xusen Li, Lenan Wu, Chaoyue Zhu

School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu  
Email: [seu\\_lxs@126.com](mailto:seu_lxs@126.com), [wuln@seu.edu.cn](mailto:wuln@seu.edu.cn), [zhucy1990@gmail.com](mailto:zhucy1990@gmail.com)

Received: Jan. 16<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2015; published: Jan. 30<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

This paper presents a composite modulation system to realize the digitalized transmission which is compatible with the analogue amplitude modulation (AM) broadcast. At the transmitter of this system, the M-ary phase position keying (MPPSK) modulated signal with low sidelobe of power spectrum, is adopted to replace the sine carrier to bear the amplitude modulation by analogue audio. While at the receiver the composite modulated signal received is divided into two parts: one part directly follows the envelope detector used in current radio sets to reproduce the analogue audio and to achieve the backward compatibility; and the other part passes the signal through an impact filter and then multiplies its coherent carrier, where the spectral difference is utilized to separate the analog audio and the digital signal and the transmitted data are demodulated by the matched correlation. The system can transmit analogue audio and data signal simultaneously within the existing AM broadcasting transmission scheme, except for a slight modification to current analogue AM broadcasting transmitters.

## Keywords

Digital Broadcasting, Compatible AM, Impact Filter, Coherent Demodulation

---

# 一种模数兼容的调幅广播系统

李旭森, 吴乐南, 朱超越

东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京

Email: [seu\\_lxs@126.com](mailto:seu_lxs@126.com), [wuln@seu.edu.cn](mailto:wuln@seu.edu.cn), [zhucy1990@gmail.com](mailto:zhucy1990@gmail.com)

收稿日期：2015年1月16日；录用日期：2015年1月24日；发布日期：2015年1月30日

## 摘要

给出一种复合调制系统，实现兼容模拟调幅(AM)广播的数字化传输。该系统发送端采用具有低旁瓣功率谱的MPPSK调制信号取代正弦载波对模拟音频广播信号进行幅度调制；接收端将所接收的复合调制信号分为两路：一路直接沿用现用收音机中的包络检波即可复现模拟音频信号，实现了向下兼容；另一路则经过冲击滤波后先乘以相干载波，利用频谱差异分离出数字信号，再进行相关匹配解调出发送数据。该系统对于现有模拟AM广播发送设备稍加改动，即可在现行的AM广播系统传输体制内，同时传输模拟音频与数据信号。

## 关键词

数字广播，兼容调幅，冲击滤波，相干解调

## 1. 引言

广播作为古老的通信方式已有百年历史，在通信技术迅猛发展的今天，广播也正朝着数字化方向发展。传统的模拟调幅(AM)广播占用带宽窄，能远距传送，但音质差。因而近年来，主要发达国家纷纷对现有AM广播进行数字化改造[1]，使用数字处理技术，显著提高了AM波段信号传送的音质，在传送广播节目的同时，利用数字信号携带的附加信息，扩展了服务内容。

国际上，AM广播信道数字化传输主要有两种标准：一是欧洲所用的世界数字广播(Digital Radio Modiale, DRM)组织制定的规范[2]，利用编码正交频分复用(COFDM)体制，在全部LW/MW/SW频段实现数字化传输；二是美国iBiquity Digital公司发明的采用带内同频道(in band on channel, IBOC)技术[3]的HD Radio系统[4]，利用频率分隔和调制方式的不同，同播模拟和数字两种节目。这两种方案各有优点，但都不能兼容我国现有的AM广播系统和频谱。符合我国国情的中波频段AM数字广播方案依在探索中。本文正是在这样的背景下，实现了利用多元位置相移键控(M-ary Phase Position Keying, MPPSK)调制信号[5]“类正弦”的特性，代替传统AM广播中的正弦载波被音频信号复合调制，解调时再借助冲击滤波器[6][7]相干解调，并利用频谱分布的差异分离出模拟音频和数据[8]。

本文首先介绍兼容调幅广播的数字广播系统的总体设计框架，再重点介绍其中的关键技术和系统的硬件实现。

## 2. 系统设计

发射机框图如图1所示，发送数据经过编码、交织和MPPSK调制[5]成为“类正弦”信号，同时，为了防止过调幅对音频信号添加直流分量，然后将音频信号与MPPSK调制信号相乘即得到复合调制信号。为了让发射功率谱满足频谱管理要求，经天线发射之前先通过发射机天线调谐回路进行滤波。与传统AM广播发射机相比，本系统只是将MPPSK调制信号代替正弦原有的正弦载波信号，为此现有发射机的AM调制器和功率放大级均不改变，仅需添加一个MPPSK信号调制模块，大大降低了设备改造成本。

接收机即新型模数兼容收音机的框图如图2所示。接收到的复合调制信号前置放大和上变频后分为模拟和数字两路，即音频解调和数据解调。其中模拟支路直接沿用包络检波从符合调制信号中得到音频

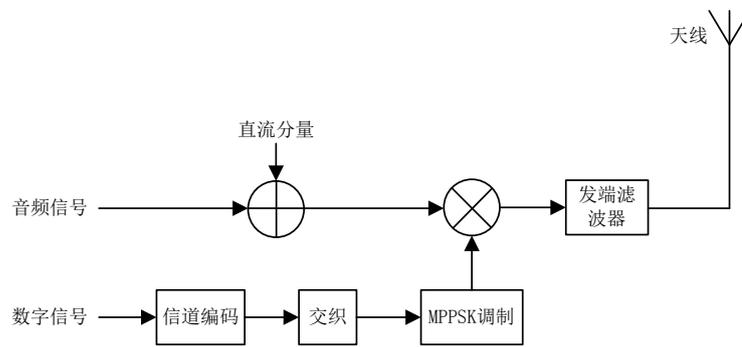


Figure 1. System transmitter block diagram

图 1. 系统发射机图

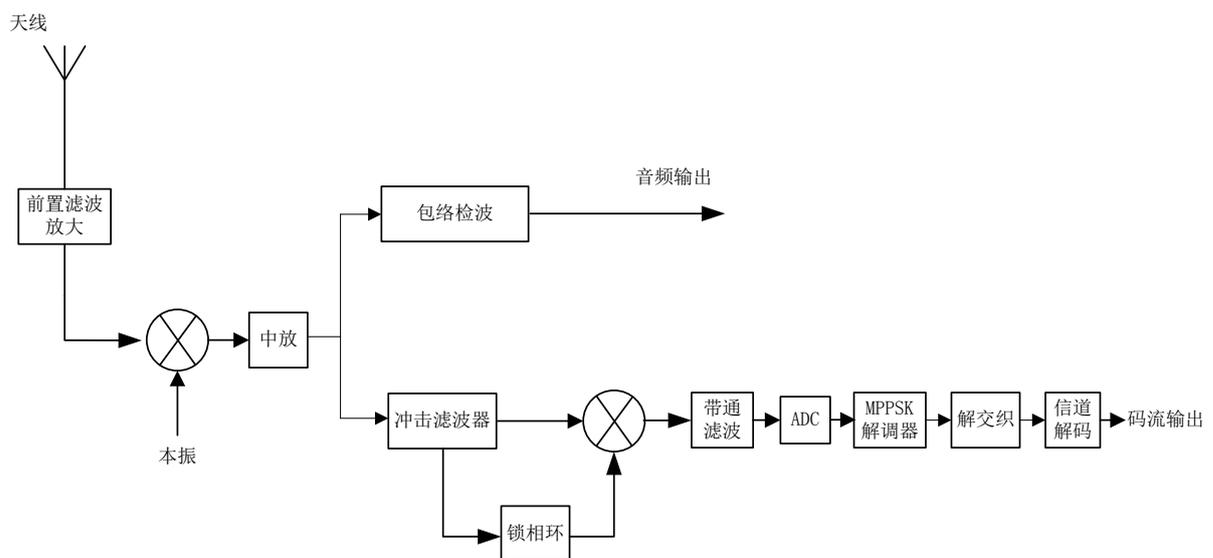


Figure 2. System receiver block diagram

图 2. 系统接收机图

信号, 其所有环节均与中波(MW)频段的 AM 收音机一致, 保证了接收机的向下兼容性, 充分保护了现有的收音机资源(只是我国现有的 MW/SW 收音机是下变频到 465 kHz 中频, 而本文系统则是统一上变频到 10.7 MHz 中频, 以便与 FM 收音机和电视接收机相统一, 便于利用廉价的 10.7 MHz 中频滤波器和实现数字化的 AM/FM 全频段收音机); 数据支路首先对上变频后的复合调制中频信号进行冲击滤波[6] [7], 再乘以相干载波并通过 6 kHz~800 kHz 的带通滤波, 提取出冲击包络中的有效 MPPSK 调制信号的基带分量, 这里带通滤波器低端截止频率取为 6 kHz, 是为了滤除频率在 4.5 kHz 以下的模拟音频信号。带通滤波出的数字调制基带信号经模数转换器(ADC)数字化后, 根据冲击位置进行相关判决即可解调出数字码流。最后经过解交织和信道译码, 得到发送的数据流。

### 3. 关键环节及仿真

本节将对本系统发射机和接收中运用到的关键技术进行介绍, 并利用 Matlab 对全系统进行仿真。

#### 3.1. 复合调制

复合调制发射机系统的复合调制信号可表达为:

$$Y(t) = A(1 + k_a a(t))s_k(t) \tag{1}$$

其中， $A$  是复合调制信号的幅度， $a(t)$  是作为复合调制边带的模拟音频信号， $k_a$  为模拟音频调幅系数， $s_k(t)$  是复合调制载波的数字调制信号，即 MPPSK 调制信号， $Y(t)$  为复合调制信号，称之为 AM-MPPSK 信号。

MPPSK 调制[5] [9]是在二元相移键控(EBPSK: Extended Binary Phase Shift Keying)调制[10]基础上与脉冲位置调制相结合扩展而来，它利用多元信息符号对正弦载波的不同相位跳变位置进行相移键控。本文中恒取相位调制角度，则对  $k = 0, 1, \dots, M - 1$ ，MPPSK 的调制波形可具体表示为：

$$s_k(t) = \begin{cases} \sin\omega_c t, & 0 \leq t < NT_c, & k = 0; \\ \sin\omega_c t, & 0 \leq t \leq (k-1)KT_c, \\ -\sin\omega_c t, & (k-1)KT_c < t < (k-r_g)KT_c, & 1 \leq k \leq M-1. \\ \sin\omega_c t, & (k-r_g)KT_c \leq t < NT_c, \end{cases}$$

其中， $\omega_c$  为调制载波的角频率， $T_c = 2\pi/\omega_c$  为载波周期， $0 \leq r_g < 1$  为符号保护间隔控制因子，由  $r_g$  和整数  $M$ 、 $N$ 、 $K$  构成了改变信号带宽、传输效率和解调性能的“调制参数”。为了使得信号频谱更加紧缩，选取的 MPPSK 参数为  $M = 64$ ， $N = 63$ ， $K = 1$ 。AM-MPPSK 信号的波形如图 3 所示，起伏包络实际上反应了音频的变化。从图 4，AM-MPPSK 信号的功率谱中可以发现，信号的主瓣均被“压”在 -60 dB 以下，符合工程带宽要求。

### 3.2. 音频包络检波

使用取绝对值的模块与低通滤波器结合进行包络检波取出信号包络，然后滤除直流分量从而得到音频信号，这种方式结构简单成本低廉，与现有的 AM 广播收音机解调方式一致，实现了对现有收音机的兼容[11]。图 5 为包络检波解调的波形和原始音频波形的对比，解调得到的音频与原始音频的波形基本一致(如图 5(b))，音频得到较好的解调，保证现有的收音机仍可正常使用。

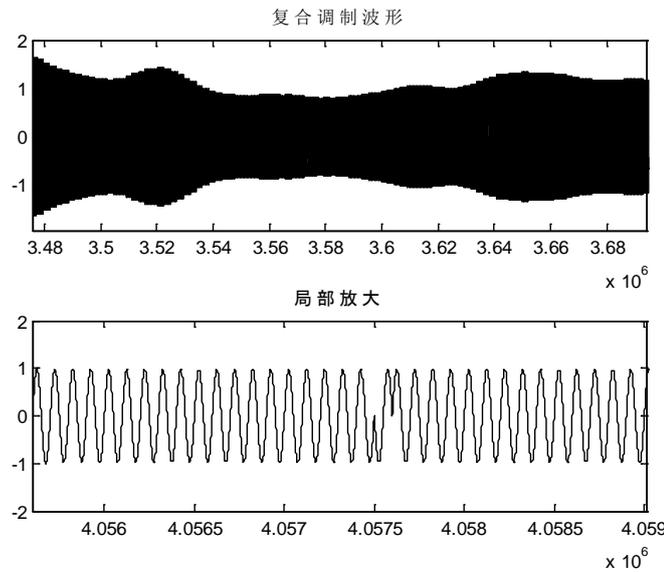


Figure 3. System receiver block diagram  
图 3. 复合调制信号波形

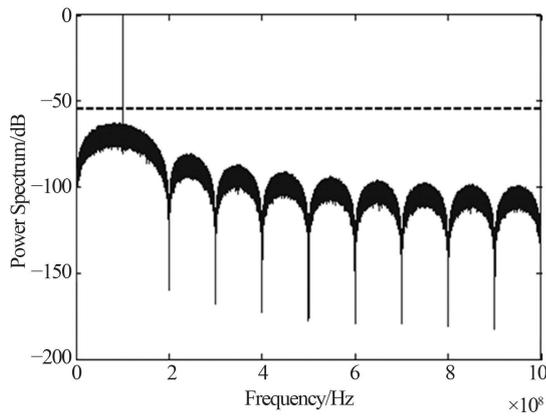


Figure 4. Complex modulation signal power spectrum  
图 4. 复合调制信号功率谱

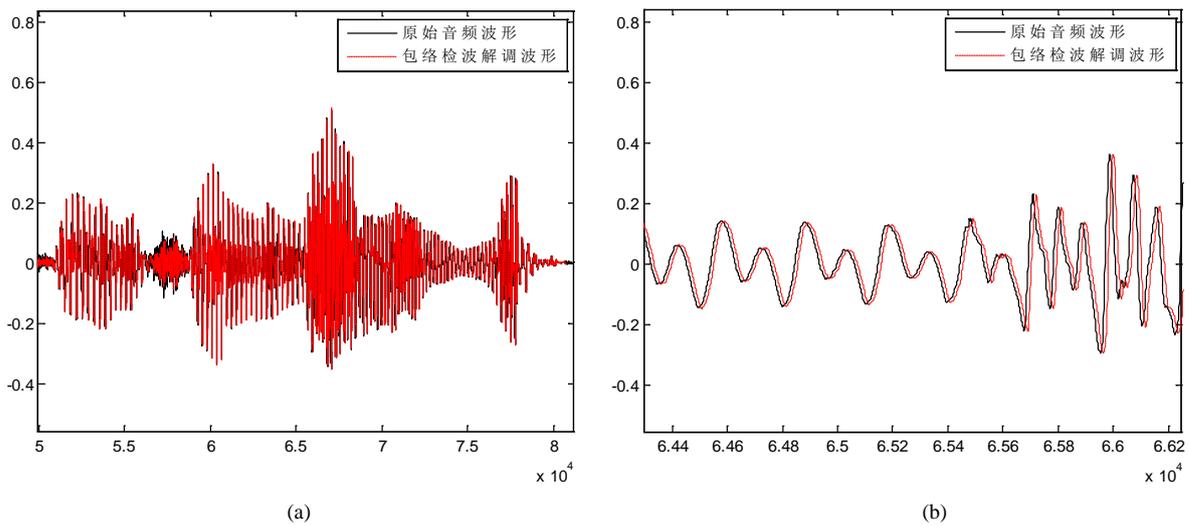


Figure 5. Comparison between the original audio and the audio detected by envelope  
图 5. 包络检波得到的音频与原始音频对比

### 3.3. 基于冲击滤波器的相干解调

FIR 型冲击滤波器的幅相曲线如图 6(a)所示。利用冲击滤波器的“斜率鉴相”特性，将 AM-MPPSK 信号中“非零码元”的相位变化转变为强烈的寄生幅度[7]冲击(如图 6(b))，用于数字信号的解调。

### 3.4. 数字信号解调

将乘法器输出的信号通过通带为 6 kHz~800 kHz 的带通滤波器，之后利用 ADC 进行数字化，此时为了降低系统的复杂度可使用较低的采样率。经过 MPPSK 解调器后解交织和信道解码模块，接收端预先训练得到经过带通滤波后的冲击波形模板  $m(t)$ ，将  $m(t)$  与带通滤波后的某个信号  $S_k(t)$  中码元  $0, 1, 2, \dots, M-1$  的冲击位置分别相乘后进行积分判决，将其中积分值最大者判决为解调输出的码元。图 7 为本系统在信道编码 RS(63,51)和 LDPC(510,382)下的误比特率性能，可以看出 LDPC 编码相较于 RS 编码误比特率为  $10^{-5}$  时约有 4 dB 的信噪比优势，但是 LDPC 码的复杂度较高。实际产品中，可以根据成本等条件选取不同的编码方式。

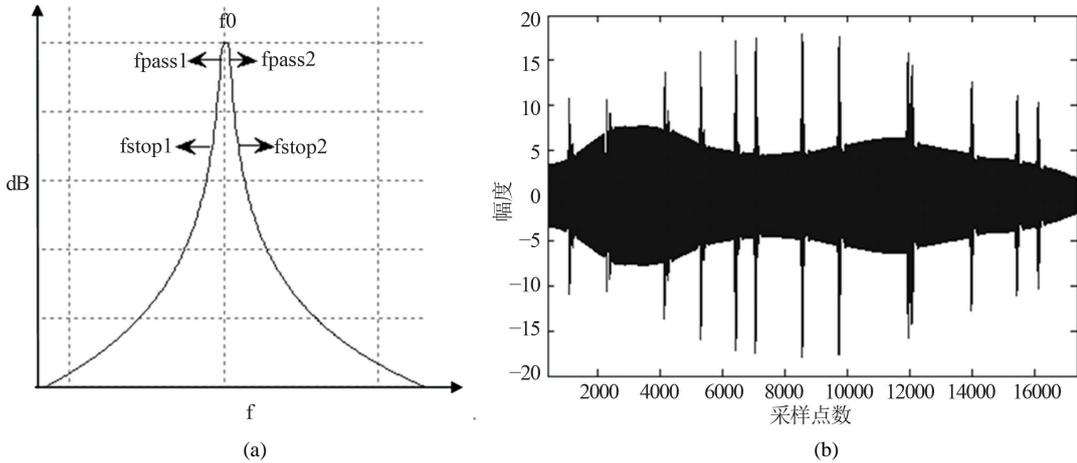


Figure 6. The amplitude-frequency response of impact FIR filter and the impact of the MPPSK signal filter response

图 6. FIR 冲击滤波器的幅频响应与 MPPSK 信号的冲击滤波响应

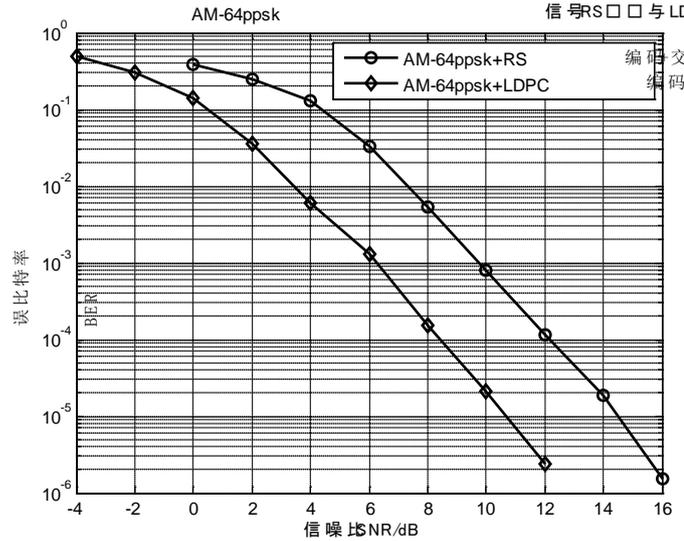


Figure 7. AM-64PPSK signal by RS code and LDPC code

图 7. AM-64ppsk 信号 RS 编码与 LDPC 编码对比

#### 4. 硬件实现

本文的硬件实现是基于 Lyrtech 公司的小型软件定义无线电开发平台(SFF SDR DP), 如图 8 所示。其主要由数字信号处理模块、数模(模数)转换模块和射频收发模块组成。

系统实物如图 9, 采用两块无线电开发平台, 一块作为系统发射机, 另一块作为系统的接收机。硬件方案中数字载波采用 MPPSK 调制方式, 载波频率 1 MHz, 具体参数为  $M = 64, N = 63, K = 1, Rg = 0, R = 93.75 \text{ kbps}$ 。

图 10 为 Simulink 收发机系统结构图。其中 VPSS 模块主要负责 DSP 板与 FPGA 板的通信, 例如音频信号、数字数据流。Up\_sample 模块主要负责对 44.1 kHz 的音频信号进行插值, 为了与数字信号的采样率一致, 将其提高为 100 MHz; Hybrid\_modulation 模块即复合调制模块, 将 MPPSK 信号与音频信号进行复合; DAC-A 为发射接收机的 DAC, 用于将复合信号转换为模拟信号发射。

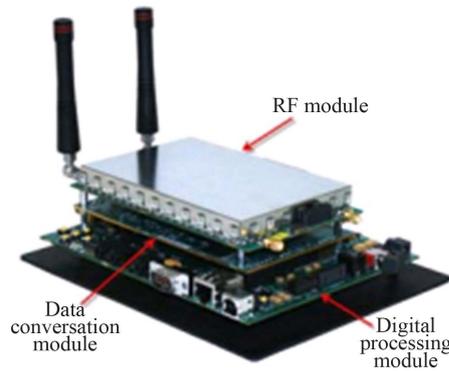


Figure 8. SFF SDR DP radio development platform

图 8. SFF SDR DP 无线电开发平台

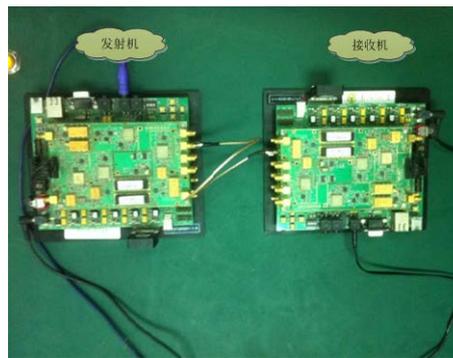


Figure 9. Real figure of system

图 9. 系统实物图

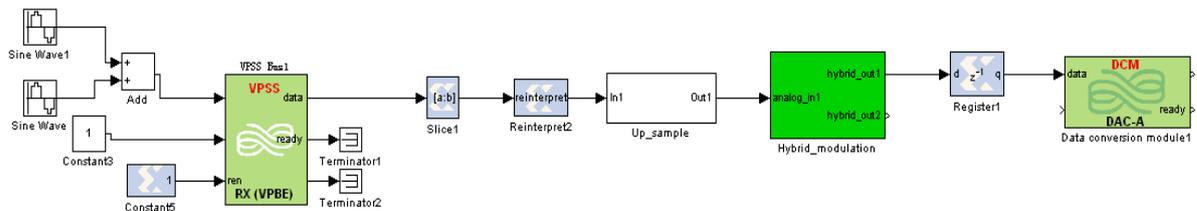


Figure 10. System transmitter block diagram in Simulink

图 10. Simulink 中发射系统结构图

接收机的 Simulink 结构如图 11，接收机收到复合调制信号后分为两路。一路用于音频解调，其核心是为包络检波器，可利用利用取绝对值和低通滤波两个模块的级联来实现该功能，接收到的复合调制信号采样率为 100 MHz，而 DSP 音频芯片的采样率为 44.1 kHz，故需要进行降采样处理，之后送入 VPSS。另一路复合调制信号，经过冲击滤波器后与锁相环提取的载波进行相干，解调模块由限幅、位同步、积分判决等部分组成。通过添加特定的帧头都来进行同步的，添加全 1 的码元，当接收端接收到一定数量的 1 码元后，便可根据相应的冲击所在位置确定码元起始点的位置。分段积分判决，是将同步后的每一个码元分为 63 段，并对每一段进行积分，并比较积分结果，积分最大的部分即为跳变的部分，也就是对应的码元。

接收机的音频解调波形如图 12 所示，第一路为原始的声音波形，第二路为接收机解调得到的波形，

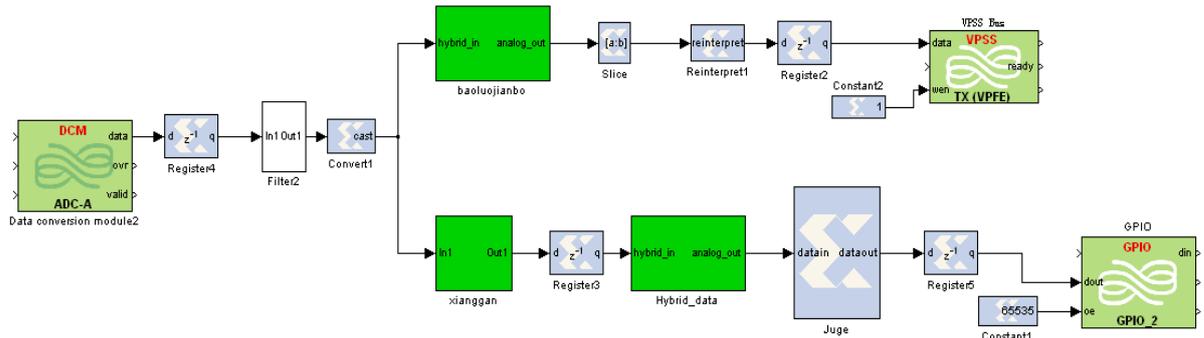


Figure 11. System receiver block diagram in Simulink

图 11. Simulink 中接收机系统结构图

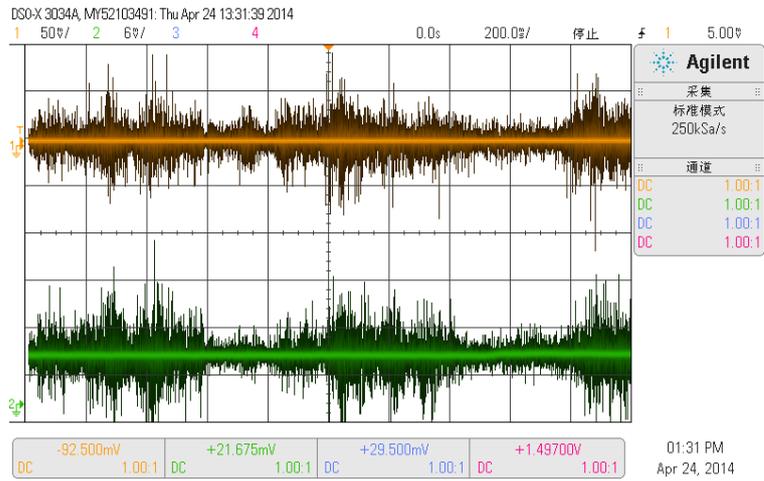


Figure 12. Comparison between the original waveform and audio demodulation waveform

图 12. 音频解调波形与原始波形对比



Figure 13. Radio digital demodulation

图 13. 收音机数字解调

可以发现两者的包络基本一致,试听时人耳的直观感受音质也较好。MPPSK 数字信号码元判决正确与否很大程度取决于信号经过冲击滤波器后的冲击幅度。发射机发送一串数字信号“6,7, ..., 63”,换算成16进制即为“06,07, ..., 3F”。序列循环发射,使用连续的5个01作为同步头。而图13中的判决结果也为“06,07, ..., 3F”,说明收发系统可以良好运行。

## 5. 总结

本文提出了一种兼容中波模拟调幅广播的复合调制系统。其具有良好的兼容性,从而可以充分利用我国闲置的大量广播发射机和接收机,节约了现有的资源;同时,设计的接收机完成了一路模拟音频信号和一路高码率数字信号的带内同频道传输,且对两者均具有较好的解调性能,有望成为我国数字调幅广播的框架;此外,提出的数字信号和音频信号进行复合,不仅能够在频谱资源日益紧缺的当下提高频谱利用率,而且能提高能量利用率,节约能源。

## 参考文献 (References)

- [1] 吴乐南 (2009) 数字调幅广播信道传输进展. *自然科学进展*, **2**, 158-165.
- [2] ETSI ES 201 980 V2 2.1 (2001) Digital radio mondiale (DRM): System specification.
- [3] iBiquity Digital Corporation (2001) IBOC AM transmission specification.
- [4] iBiquity Digital Corporation (2005) HD Radio AM transmission specification. Rev. D.
- [5] 吴乐南, 戚晨皓 (2010) 多元位置相移键控调制和解调方法. 发明专利号: ZL200710025202.1.
- [6] 高鹏 (2012) 超窄带接收机冲击滤波器研究. 硕士学位论文, 东南大学信息科学与工程学院, 南京.
- [7] 吴乐南, 冯熳, 高鹏 (2009) 用于增强不对称二元调制信号的冲击滤波方法. 发明专利号: ZL200910029875.3.
- [8] 吴乐南, 逢军 (2013) 一种兼容模拟调幅广播的复合调制体制. 发明专利号: 201310464224.3.
- [9] 靳一, 吴乐南, 余静, 等 (2012) MPPSK 调制解调器研究. *信号处理*, **7**, 917-925.
- [10] Feng, M., Wu, L.N., Ding, J.J., et al. (2011) BER analysis and verification of EBPSK system in AWGN channel. *IEICE Transactions on Communications*, **E94-B**, 806-809.
- [11] 程继兴, 吴乐南, 张仕元 (2006) 数字调幅广播系统中包络检波方法的研究. *电子工程师*, **6**, 33-34.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源 (Open Access) 电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

