

# 基于 GNURadio 的 MPSK 通信系统的实现及性能分析

李 婷

( 福州理工学院 工学院, 福州 350500 )

**摘要:** 数字通信系统中广泛采用 MPSK (多进制相移键控) 调制, 因此分析 MPSK 通信系统性能是研究不同业务类型的通信系统性能的基础。首先分析了 MPSK 调制、解调原理及通信系统的基本结构, 用软件无线电工具 GNURadio 及其硬件平台 USRP 设计并实现了简单的 MPSK 通信系统。在此系统基础上, 对 MPSK 通信系统的信噪比、误码率、码元传输速率进行分析, 然后对系统中的编解码器、同步等模块对系统性能的影响展开分析。

**关键词:** MPSK; GNURadio; 系统性能; 软件无线电

**中图分类号:** TP39; TN76

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-984X(2018)06-0007-06

数字系统具有很强的抗干扰能力和很高的信号传输质量, 且中继时无噪声积累。同时, 数字系统具有保密性高、可直接与计算机通信、其设备具有更好的集成度和智能处理能力、以及易于差错控制等优势。因此, 绝大多数的现代通信系统采用数字信号对信息进行传输, 这样的通信系统也叫做数字通信系统。为了能够将数字基带信号以特定的频率、满足不同通信系统需求, 就要将其进行调制, 即数字调制。

数字通信系统的调制方式多样, 其中 MPSK (多进制相移键控) 因其频谱利用率高、抗干扰性强而被较多采用的一种调制方式, 同时 MPSK 调制原理简单, 易于用电路实现也是其能够成为某些通信系统的一种主要调制方式的原因。

## 1 MPSK 通信系统原理

### 1.1 MPSK 调制原理与系统组成

MPSK, 多进制相移键控就是用表示实际意义的数字基带符号 (0 和 1 的组合) 来对载波起始 (初始) 相位进行调制的一种数字调制技术。

一个 MPSK 信号码元可以表示为

$$s_k = A \cos(\omega_0 t + \theta_k) \quad k = 1, 2, \dots, M$$

式中,  $A$  为常数;  $\theta_k$  为载波受数字基带调制的一组间隔均匀的相位, 它可以写为

$$\theta_k = \frac{2\pi}{M}(k-1) \quad k = 1, 2, \dots, M$$

通常  $M$  取 2 的某次幂, 即  $M = 2^k$ ,  $k$  为正整数。

可以将 MPSK 信号码元表示式展开写成

$$s_k(t) = \cos(\omega_0 t + \theta_k) = a_k \cos \omega_0 t - b_k \sin \omega_0 t$$

式中,  $a_k = \cos \theta_k$ ,  $b_k = \sin \theta_k$ 。上式表明, MPSK 信号码元  $s_k(t)$  可以看作是载波及其经过  $90^\circ$  相移后的两个正交信号的合成信号。因而其电路实现就是将载波与其  $90^\circ$  相移后的信号进行相加。

MPSK 通信系统是数字调制通信系统的一种, 因而其系统模型可采用数字调制通信系统的一般模型, 如下图 1 所示, 仅在数字调制与解调方法上有所不同。

收稿日期: 2018-07-18

基金项目: 福建省教育厅科技项目 (JA15603) “基于 GNU radio 的认知无线电在移动通信中的应用”

作者简介: 李婷 (1980-), 女, 江苏高邮人, 副教授, 硕士, 主要从事无线通信应用研究, 361766457@qq.com。

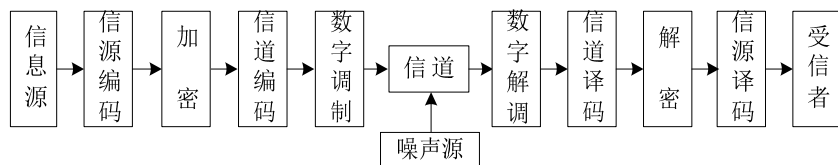


图 1 数字调制通信系统模型

## 1.2 系统性能指标

通信系统的指标可分为有效性和可靠性两大类指标, 数字调制通信系统的可靠性指标以信噪比、误码率最为重要, 有效性指标则主要考虑码元传输速率。

### 1.2.1 信噪比

信噪比 (SNR) 即信号功率与噪声功率的比值, 根据在系统中的不同位置, 用来进行对比的信号和噪声也不同: 在传输调制信号时, 将信噪比定义为信道输出端 (接收机输入端) 的载波信号平均功率与信道中的噪声平均功率的比值; 而在整个数字通信系统中, 信噪比则可定义为终端 (数字解调机或译码器的输出端) 的每个数字波形 (比特) 所携带的平均信号能量  $E$  与单位频带内的噪声功率之比。

其计算公式如下:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} \quad \text{或} \quad SNR = \frac{E}{N_0}$$

### 1.2.2 码元传输速率

一个 0 或 1 的符号称为 1 比特, 多进制系统中用多个 0 或 1 表示一个多进制符号, 一个多进制符号即称为码元。码元传输速率 ( $R_B$ ) 给出的就是系统每秒能够传送多少个码元, 单位为波特 (Baud), 简记为 B。码元传输速率与一个码元的持续时间  $T$  (单位: s) 为倒数关系, 即:

$$R_B = \frac{1}{T} \quad (\text{B})$$

### 1.2.3 误码率

信宿 (终端) 接收到的信号和与之对应的信源信号不符的情况称为误码。误码率定义为一段时间内经系统传输后产生的错误码元的个数与该系统在此期间传输的总码元个数之比, 即:

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}}$$

MPSK 通信系统的性能指标除了以上 3 个通信系统均有的指标之外, 作为数字通信系统, MPSK 通信系统的性能还受到信源、信道编解码器性能的影响和系统的同步性能的影响。编解码器的影响主要体现在最终信宿接收到的信息中的错误信息, 而系统同步性能包括码元同步、载波同步、群同步性能, 是否严格同步将对接收信息产生一定的影响。

## 2 MPSK 通信系统的实现

### 2.1 GNURadio + USRP 平台简介

软件无线电技术平台中应用较广、发展也较快的是基于 GNURadio + USRP 的软件无线电平台。GNURadio (开源软件无线电) 可以用来学习、构建和部署软件定义无线电系统, 支持包括 HackRF、BladeRF、USRP 等通用软件无线电硬件。GNU Radio 为平台的软件部分, 在计算机完成高速的基带信号处理工作, 它最初在 Linux 上设计和实现, 现在也可以方便地在 Windows、Mac 等系统上运行<sup>[1]</sup>。USRP 是平台的硬件部分, 主要负责射频信号的收发、射频到中频以及中频到基带的信号转换等工作<sup>[2]</sup>。

### 2.2 系统设计框图

图 2 给出了本文 MPSK 通信系统搭建的总体设计框图。上半部分为发射机, 下半部分为接收机, 两者通过天线进行通信, 完成数据收发功能<sup>[3]</sup>。

发射机中, 在计算机通过矢量信源、分组编码器和 MPSK 调制模块来实现从信源产生到成型滤波的基带信号操作过程; 在 USRP 端由 UHD 控制 USRP 来实现后面的信号处理都。其中, DAC 之前为 USRP 的

数字前端,由 USRP 内的 FPGA 来实现;DAC 之后为 USRP 的射频前端,内部包含相应的模拟电路。

接收机中,信号抽取及其之前的模块在 USRP 内由 UHD 控制 USRP 实现。信号抽取之后的操作由计算机的相应软件模块来实现。其中,匹配滤波和码元同步在多相时钟同步模块中实现,载波同步由科斯塔斯环实现,解调、分组解码器和信宿则分别对应 MPSK 解调、分组解码器和信宿模块。

### 2.3 系统运行参数

系统的主要参数有采样速率、每符号采样数和每符号比特数。采样速率规定了电脑与 USRP 通信时的数据速率,因而采样速率会影响系统所有的模块的运行。若指定的采样速率为 100 K,则计算机每秒有 100 K 数据样值送入 USRP,而其他所有的模块都要按照这个速率来调整自身读取数据缓存和写入数据缓存的速率。

每符号比特数和每符号采样数主要涉及到分组编码器/解码器模块和调制/解调模块,每符号比特数直接决定 MPSK 的调制阶数,每符号采样数则决定了用多少个样值代表一个符号或码元。这三者共同决定了发送机和接收机之间的数据传输速率。

系统的主要硬件参数为 USRP 运行的参数,其中发送/接收增益用来调整射频前端的功率;主时钟速率即 USRP 内部工作的时钟,同时也决定了模数转换(ADC)的工作速率;中心频率即射频发送和接收的中心频率,从 70 MHz 到 6 GHz;天线可以在 TX/RX(一根发射天线、一根接收天线)和 RX2(两根接收天线)之间选择,其中 RX2 只能接收。

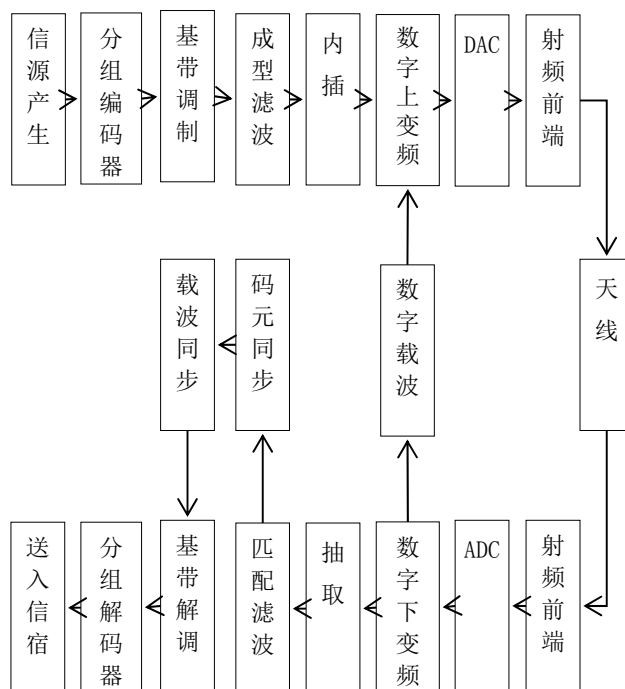


图2 MPSK 通信系统的总体设计框图

### 2.4 系统收发功能验证

MPSK 通信系统的主要运行参数有软件参数和硬件参数。软件参数中比较重要的有:采样速率 1 M,每符号采样数 2,星座数 2。硬件参数主要有发送增益和接收增益和通信频率等。表 1 给出了发送机和接收机的硬件参数设置。

参数设定好后,将采样得到的多组数据送入发送机,若接收机的输出结果与输入发送机的数据一致,则系统的正确性得到验证。系统在高信噪比下(距离=1m),图 3 给出了 BPSK 调制时矢量为(0,255)时发送波形和对应的接收波形。由图可见,发送的每一位数据,在接收端都能得到与发送端一致的接收数据。且在 0.25 ms 的时间内,共有约 125 位的数据被发送和接收,数据速率为 500 kbps。当调制矢量为更具一般性的(15,34)时,发送和接收波形如图 4 所示,很明显发送波形与接收波形一致,系统的正确性得到了进一步验证。

表 1 发送机和接收机的硬件参数设置

参数	发送机	接收机
Clock Rate (Hz)	Default	Default
Num Mboards	1	1
Mb0: Clock Source	External	Default
Mb0: Time Source	Default	External
Num Channel	1	1
Samp Rate (Sps)	samp_rate	Samp_rate
Ch0: Center Freq (GHz)	2.48	2.48
Ch0: Gain Value	45	50
Ch0: Gain Type	Absolute (dB)	Absolute (dB)
Ch0: Antenna	TX/RX	TX/RX
Ch0: Bandwidth (Hz)	0	0

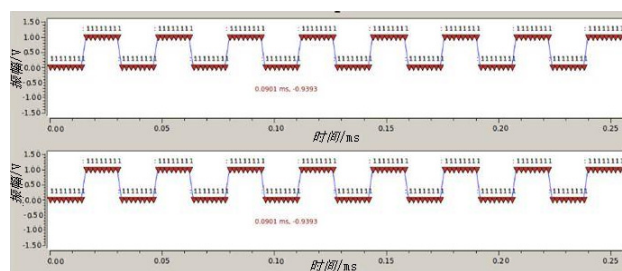


图 3 矢量为 (0.255) 时的发送和接收波形

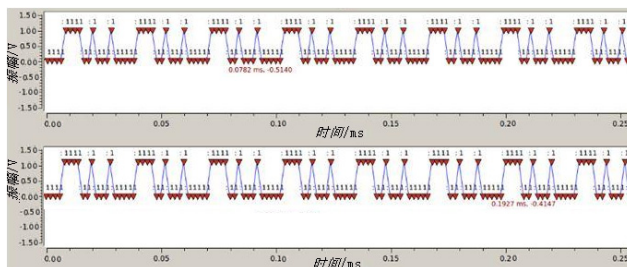


图 4 矢量为 (15, 34) 时的发送和接收波形

### 3 MPSK 通信系统的性能分析

#### 3.1 信噪比特性

信噪比是影响通信系统信号接收质量主要因素之一。信噪比对系统的误码率、系统的载波同步和码元同步所依赖的数字锁相环锁定有直接影响。

经测试发现,使 MPSK 系统的同步载波和位同步信息能够锁定的临界信噪比在 2.79 dB 左右,若信噪比小于 2.8dB,系统接收和发送端失步的概率将大大增加,从而导致系统无法正常工作。因此,为保证系统运行,信噪比应在 2.85 dB 以上。图 5 和图 6 所示波形图是在发送增益为 50,收发双方相距 1.5 m 的条件下接收到的信号时域频域波形。

对比上述两图,可见发射增益相同情况下,接收增益较大时,接收信号时域和频域特性能够满足系统需求。若接收增益变小,系统虽然可以工作,但会发生错判。如图 5, 6 所示,接收增益是 10,在 0 和 1 交界处就发生了错判,而接收增益是 20 时,不会出现此错误。因为信噪比越低,相应的采样点值越小,而采样点若为 0,1 分界处,较大的噪声很容易影响采样值的符号产出错误。

#### 3.2 最大传输速率

最大传输速率,即波特率,为每秒传送的符号数,数值上可以等于系统的采样速率除以每个符号的样值点数。实际系统中影响的数据速率的主要因素有 USB 接口性能、计算机性能和信噪比等。USB2.0 在理论上能支持 3 Mbps 的数据速率,但考虑到运行该系统的计算机性能,采样速率不可能达到此上限。因此,为使计算机的处理数据速度能够与 USRP 收发数据速度相当,设定 MPSK 系统对应的最大软件采样速率为 1.5 M/s。同时为保证系统时钟同步,一个码元要求至少取两个样值,因此码元速率每秒最大可达到 750 K 波特。

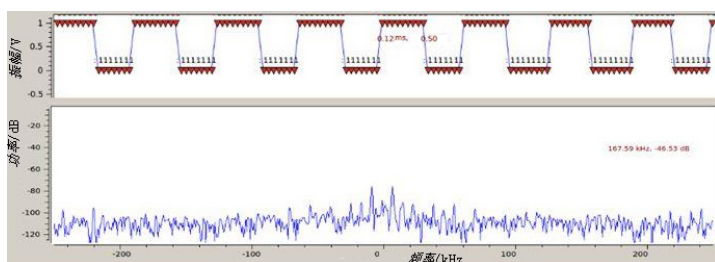


图 5 接收增益为 10 时接收信号波形图

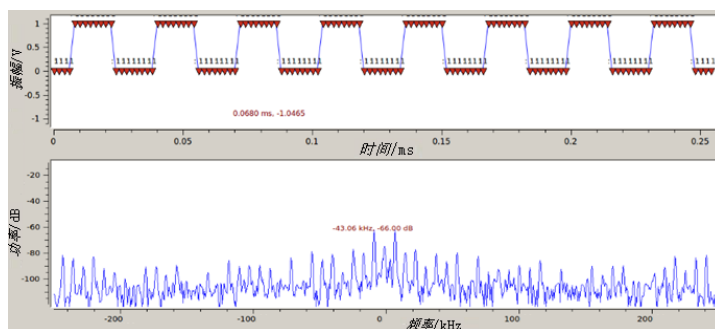


图 6 接收增益为 20 时接收信号波形图

### 3.3 最远传输距离

路径损耗是信号能量减少的主要原因,发射信号功率越大、受到干扰越小,即信噪比大信号的最远传输距离也相应变大。信号在室外与室内传递因其经历的信道衰落特性不同,其所能达到的最远距离也不同。换个角度来说,无论传输环境如何,发射机和接收机之间相距越远,路径损耗就越大,接收信号的功率就越小,而噪声始终不变,可见信噪比随着传输距离的增加而变差。为检测系统所能传输的最远距离,在测试时将发射增益和接收增益都调到最大,分别设置为 90 dB 和 80 dB。此时测得在室内环境下系统传输距离最远约为 4.2 m。

### 3.4 同步模块对系统功能的影响

数字通信系统要求各部件都严格同步。同步分为载波同步、码元同步(位同步)和帧同步(群同步)3种<sup>[1]</sup>。MPSK 通信系统中分组编码/解码器需要进行帧同步,多相时钟即码元同步,另外调制解调部分要保证载波同步。系统能够正确接收数据就必须保证每个同步模块的正常运行和合理设置。下面通过图 7 至图 12 的运行结果来分别讨论这 3 个模块对系统性能的影响。

#### 3.4.1 帧同步模块对系统性能的影响

图 7 是直接对基带信号进行调制后获得的已调波时域和频域波形。将基带信号进行分组编码后再调制得到的编码已调信号时域和频域波形则如图 8 所示。从图 8 可见,信号在经过编码后,避免了时域波形的长连 0 或长连 1,信号极性变化频率增加有利于码元同步信号的取,同时能够消除基带信号中的直流分量,而信号的频谱由原来的离散谱变为连续谱,同时信号带宽有所降低,在相同条件下,系统的频带利用率得以提升。

#### 3.4.2 时钟同步模块对系统的影响

时钟同步是数字系统必须达到的技术要求之一,是指系统中的各部分都必须采用相同的时间标准以保住系统接收时进行正确抽样。本文系统的时钟同步是通过让系统保证码元同步(位同步)而获得的。码元同步的原理是对接收信号进行上采样,然后利用多相滤波器对匹配滤波器进行分解,此时系统的反馈环路就会从各支路中“眼睛”最大,即信号最清晰的支路来选择样值。由于信号最清晰对应的信号信噪比也相应较大,所以时钟在进行时钟同步时,系统的信噪比也会有一定的改善。图 9 所示为未进行时钟同步的系统收发信号,由于收发两端时钟不同步,信号的时域波形不断前移。而经过时钟同步后的信号可见图 10,该信号在收发两端一致,且由于同步有助于提高信噪比,系统对信号采样要求降低,因此采样点数比未进行时钟同步时更少。

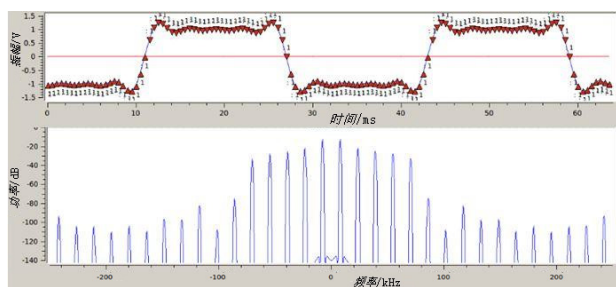


图 7 直接调制后信号的时域和频域波形

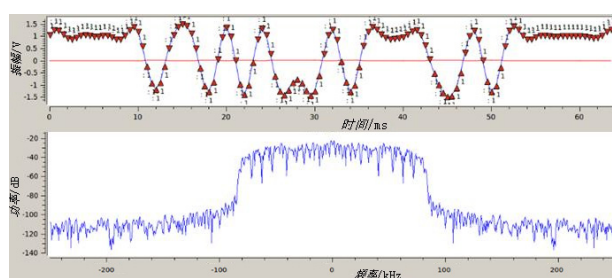


图 8 经过分组编码器后再调制的信号时域和频域波形

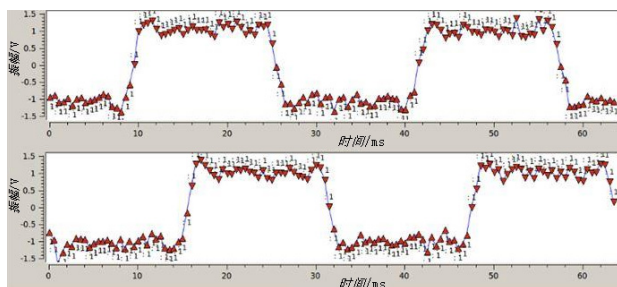


图 9 时钟同步前的信号

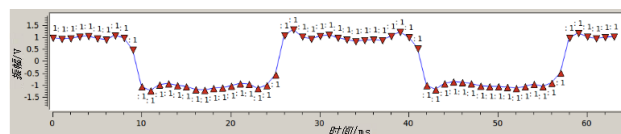


图 10 时钟同步后的信号

#### 3.4.3 载波同步模块对系统的影响

通信系统要进行相干解调,就要求载波与已调信号相位相同,即载波同步。本系统利用数字信号处理



在数字基带部分进行载波同步。为更突出载波同步对系统性能的影响,在测试时不接入提供位同步功能的编解码器,而时钟同步是系统正常运行的保证故而不能去除。在系统只接时钟同步情况下获得的时域波形如图 11 所示,由图中给出的两个波形可见,载波的不同步造成信号时域波形跳跃、不稳定。图 12 所示是进行了载波同步后的信号时域波形,此波形稳定、不再跳跃。同时进行载波同步前后的采样点个数没有变化,说明载波同步不能提升系统的信噪比。

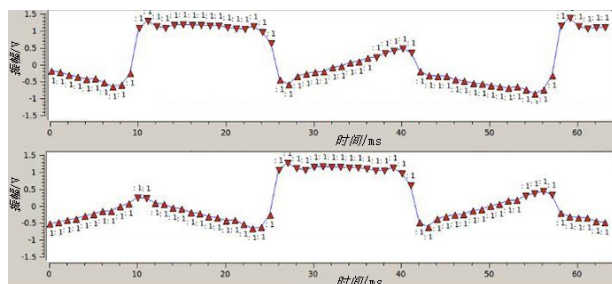


图 11 载波同步前的信号

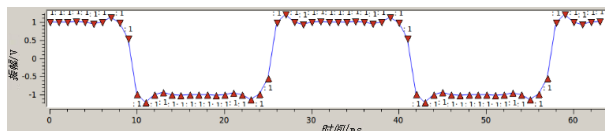


图 12 载波同步后的信号

## 4 结束语

利用软件无线电平台 GNURadio 对 MPSK 通信系统进行了模拟并对系统主要性能指标和同步模块对系统性能影响进行测试并得出以下结论:(1) MPSK 通信系统的信噪比过低是系统产生错判的主要原因,可以通过增加接收增益改善信噪比,另外时钟同步模块也对信噪比的提升有所帮助;(2) MPSK 通信系统的码元速率和最远传输距离除都受到信噪比的影响外,码元速率还受到计算机(即通信终端)性能影响、传输距离还受到传输环境影响;(3)对基带信号进行信源的编码有利于码元同步;(4)系统的时钟同步和载波同步对信号在时域的波形稳定起到重要作用。

## 参考文献:

- [1] 樊昌信,曹丽娜.通信原理[M].7版.北京:国防工业出版社,2012:209-213
- [2] 韩保坤.基于 GNU Radio 的 MPSK 通信系统设计和实现[D].西安:西安电子科技大学通信工程学院,2016:23-35
- [3] 姚小莉,秦会斌.基于 Matlab 的 MPSK 通信系统的仿真研究[J].物联网技术,2017(6):25-26
- [4] Wenqin Wang. Carrier Frequency Synchronization in Distributed Wireless Sensor Networks[J]. IEEE System Journal, 2014,9(3): 703-713
- [5] 杨宏,孔耀晖,茹晨光,等.基于 GNU Radio 和 USRP 的无线通信系统建模仿真[J].现代电子技术,2013,36(18):73-77

## Implementation and performance of MPSK communication system based on GNU Radio

LI Ting

(Engineering College, Fuzhou Institute of Technology, Fuzhou 350500, China)

**Abstract:** MPSK modulation is an important modulation method widely used in modern communication systems, and the analysis of MPSK communication system performance is representative. Firstly, the principle of MPSK modulation and demodulation and the basic structure of communication system are analyzed, and a simple MPSK communication system is designed and implemented by using software radio tool GNURadio and its hardware platform USRP. On the basis of this system, firstly, the signal-to-noise ratio, error rate, symbol transmission rate of MPSK communication system are analyzed, and then the influence of codec, synchronization modules on system performance is analyzed.

**Key words:** MPSK; GNURadio; system performance; software radio