



可变时隙隐蔽通信身份识别系统设计

虞 沧¹, 王碧芳²

(武汉职业技术学院 学校办公室, 湖北 武汉 430074;

武汉职业技术学院 电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:针对传统无线通信系统传输信号容易被侦听截获的问题,设计一种可变时隙隐蔽通信身份识别系统。该系统采用软件无线电结构,通过软件编程实现不同的功能,无需更换硬件。系统的硬件设计主要围绕基带信号处理和射频信号处理展开,选用 FPGA 芯片及射频芯片作为核心处理器;软件设计主要利用“数字水印”技术,发送端将水印信息嵌入基带信号,接收端对水印信息进行提取,借助水印信息完成信号的隐蔽传输和身份识别。该系统可以有效提高通信信息安全性,普遍适用于数字通信系统。

关键词:隐蔽通信;软件无线电;数字水印;身份识别

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2021) 06-0092-04

DOI: 10.19899/j.cnki.42-1669/Z.2021.06.018

无线通信是国家战略通信系统的重要组成部分,是确保国家对海基力量和远航执行战略任务的潜艇实施有效指挥和控制的重要手段。在现代信息化战争中,在实现大范围、远距离通信的同时,必然会造成通信电磁波更容易被截获。目前,美国在我国周边的部署了大量通信侦听系统,日本、韩国、澳大利亚、菲律宾、印度等国也在不同程度的采用各种电子对抗手段侦听我国通信台站的电磁波信号。由于距离仅数百公里,电磁波信号必然会被侦听设备截获;截获后,传统的基于信息加密的方式,在面对高强度的软件破译时,显得孤立且脆弱;当对方进行二次通信伪装,辐射类似电磁波信号时,我方通信系统会陷入被欺骗的境地,严重时会导致收到完全错误的命令。因此,有必要设计一种全新的隐蔽通信系统,使得信息的传递不仅依赖于加密信息本身,并

且深入信号物理层设计基于信号特征的复合调制解调方式,将特定的信息嵌入信道噪声,淹没在调制信号、白噪声、传播噪声中,实现无线电信息的隐蔽传递。该系统不仅可用于隐蔽通信,还可应用于主动式识别系统中,在呼叫机与应答机之间采用双重身份认定,提高信号识别的准确度。

一、系统总体设计

(一) 系统方案

本隐蔽通信身份识别系统采用软件无线电结构,实现多模式、多频段、多功能的无线通信,可根据用户需求通过软件编程对设备进行重配置^[1],无需更换硬件模块。

理想的软件无线电结构如图 1 所示,需要直接对射频信号进行采样,其中 A/D 转换器无法满足高

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 2018 年武汉职业技术学院科研项目“变时隙低频频隐蔽通信身份识别技术研究”(项目编号: 2018YK041)。

作者简介: 虞沧(1981-),男,湖北浠水人,武汉职业技术学院学校办公室副教授,研究方向: 电子与通信工程;王碧芳(1979-),女,湖北武汉人,武汉职业技术学院电子信息工程学院副教授,研究方向: 通信技术。

采样频率要求。在实际采样过程中,不能直接采样,需先将高频信号转换为中频信号,再对中频信号进行 A/D 转换,最后得到易于处理的数字信号。

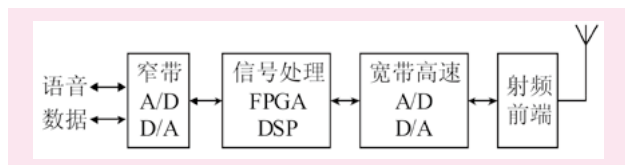


图1 理想软件无线电结构

根据采样频率的不同,软件无线电的结构可分为射频低通采样、射频带通采样和宽带中频采样三种^[2]。其中射频低通采样对 A/D 转换器、信号处理单元的性能有着极高的要求,一般适用于窄带宽的场合;射频带通采样对采样率和信号处理单元的要求不高,但在进行带通采样时存在盲区,需要多个采样频率,实现起来较为复杂;宽带中频采样的射频前端电路简单,接收信号不易失真,在信号处理后对波形有更好的适应性,本系统采用宽带中频采样结构。

(二) 系统结构

基于宽带中频采样软件无线电系统结构如图2所示,包括射频模块和数字基带处理模块。其中射频模块用于完成射频模拟信号、基带数字信号之间的转换,以实现射频信号的接收和发送;数字基带处理模块用于定义物理层的通信协议,以实现信号的编码、解码、调制、解调等功能。

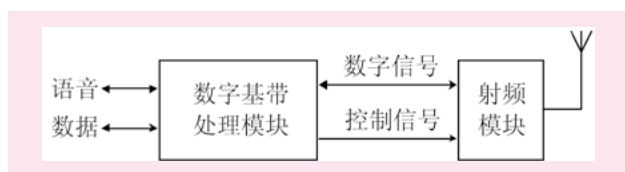


图2 系统结构

二、系统的硬件设计

(一) 设计思路

目前软件无线电硬件平台的实现主要有两种组合:方案一射频集成套片与可编程逻辑器件组合,以及方案二离散器件与可编程逻辑器件组合。其中离散器件主要包括射频放大器、混频器、模数/数模转换器、滤波器、解调器等分立元器件^[3]。

方案一的优势在于硬件平台集成度高、软件化程度高、总体功耗低,符合软件无线电的设计思想,其功能可以借助软件编程实现,平台维护和优化的成本较低。这种解决方案存在一定问题,模数/数模转换器高采样频率的要求与低功耗相互矛盾,平台的性能受射频集成套片的发展水平限制。

方案二的优势在于离散器件功能专一,其性能和频段的选择范围较广,可以维持的通信频段更多,整体性能更强。其缺点较明显,平台整体功耗偏大,

调试工作难度大,对设计者的工程能力和经验要求较高,针对不同的频段需要设计相应的外置滤波器,软件化程度低,平台维护和优化成本较高。

考虑到系统隐蔽通信和呼叫、应答机之间的身份识别功能的应用需求,需要系统软件化程度比较高,综合设计难度和维护成本,本系统选用射频集成套片与可编程逻辑器件结合的方案。

(二) 主要器件选取

基于射频集成套片与可编程逻辑器件结合的设计方案,硬件平台的主要器件为射频芯片和基带信号处理芯片,分别完成射频信号的收发和信号处理控制,能够满足较高的功能集成度要求。

射频芯片的选取,要求其能够在较宽的频带范围内对一定频宽的信号进行处理,由文献^[4]可知,我国用于无线通信的主要频段在 800MHz 到 3GHz 之间,综合常用的几种射频芯片,考虑到软件无线电硬件平台的通用性,选取 Analog Devices 公司的 AD9361 芯片^[5]作为本系统射频模块的功能芯片。该芯片采用的是零中频采样,可以处理在 70MHz 到 6GHz 频段范围内的信号,内部集成了模拟滤波器、混频器、模数/数模转换器、收发通道的频率合成器和可编程增益、直流偏置校准等数字域的其他功能,支持频分双工(FDD)和时分双工(TDD)工作模式。

基带处理芯片采用 FPGA 作为核心处理芯片, FPGA 为可编程门阵列,具有可重构结构,摆脱了硬件功能固化的缺陷,拥有丰富的可编程资源,可以满足多功能需求。本系统选用 XC7K160T 型号 FPGA 芯片,该芯片集成了 600 个 DSP 模块,每一个可最多实现 25×18 的补码乘法运算,并能实现乘法累加和多级级联累加等功能,可通过上位机编写软件,也可通过 FPGA 门阵列设计相应算法实现,便于对基带信号进行特殊处理,实现本系统的隐蔽通信和身份识别功能。

(三) 系统硬件架构

目前硬件架构已经确定的两部分是数字基带处理模块和射频模块,分别用于实现信号的调制/解调、电路控制功能和射频调制、射频收发、射频解调、射频控制等功能。为避免信号间串扰,通过接口连接两个模块。本系统选取 FMC 接口,降低数字基带信号对模拟信号的干扰,同时该接口将 I/O 接口与 FPGA 分离,可以最大化数字基带模块的重用率,并具有 10Gb/s 的高数据吞吐量。

通信过程中的射频模块需要处理高频信号,使用高达百兆及以上频率的时钟信号,这要求系统时钟精准稳定。本系统将射频模块时钟作为系统的基准时钟,数字基带模块引入射频模块的时钟信号作为同步时钟源。系统时钟源选用时钟发生器芯片 HMC1033,其差分时钟输出范围为 25MHz 到 550MHz。

系统的硬件架构如图 3 所示, 包括射频模块、数字基带处理模块、数据接口模块、时钟模块和电源模块。其中数据接口用于完成信号的收发工作; AD9361 射频模块用于完成信号的放大、A/D 转换、D/A 转换、混频、滤波、射频信号处理、基带信号处理等功能; 电源模块为各芯片安全供电、维持系统正常运行; 数字基带处理模块用于完成信号的调制/解调, 并且对信号进行隐蔽化处理, 实现隐蔽通信和身份识别功能; 时钟源为各芯片提供精准的工作时钟, 确保通信的实时性; 通过高速网口可以实现上位机与 FPGA 的连接, 便于调试。

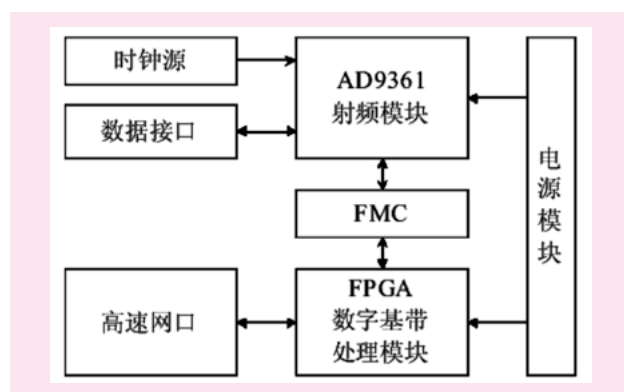


图 3 系统硬件架构

三、软件算法设计

(一) 设计思路

面对如今计算机强大的计算破解能力, 要想实现真正意义上的隐蔽通信, 仅依靠增加密钥长度的传统加密技术是难以实现的^[6]。近年来, 随着信息隐藏技术^[7]的发展, 其代表性的“数字水印”技术被逐渐运用到各个领域完成隐蔽通信^[8]。受美国 ATSC 数字电视标准^[9]的启发, 类似于扩频序列性质的 ATSC 信号作为数字水印嵌入传输信号, 本设计的软件算法是将射频水印嵌入基带信号, 从而实现隐蔽通信和身份识别。

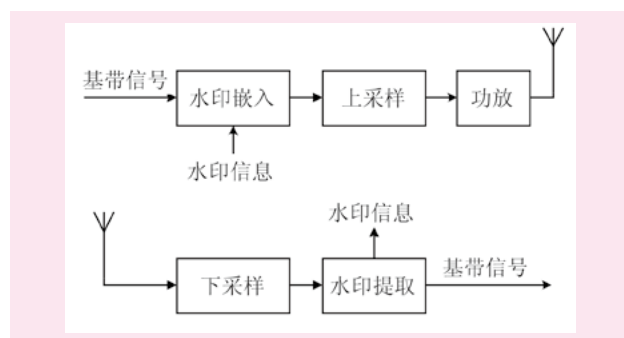


图 4 典型的射频水印系统

典型的射频水印系统^[10]如图 4 所示, 与软件无线电系统结构相似, 包括射频信号与基带信号的转换, 并添加水印的嵌入和提取, 此为软件算法的核

心。该算法在发射端将水印信息嵌入基带信号, 经过射频模块处理后发射出去, 在接收端先通过射频模块转换为基带信号, 再将水印信息从中提取, 以实现隐蔽通信和身份识别。

(二) 水印嵌入算法

本系统研究对象为物理层隐蔽通信, 水印信息在物理层嵌入, 需根据 QPSK 信号的相移特性设计水印嵌入算法。

水印嵌入算法如式 (1) 所示, 等式左边的 S 代表嵌入水印后的信号向量, W 表示水印向量, X 为载体信号向量, λ 为嵌入强度, $sign(X)$ 用于表示水印是依据载体信号向量的极性嵌入的。

$$S = X + \lambda \cdot sign(X) \cdot W \quad (1)$$

图 5 为水印嵌入算法的星座图, 其中圆形代表载体信号码元的星座点, 方形代表嵌入水印码元点, 由于水印嵌入是根据载体信号向量进行的, 所以分布是沿着一个方向的, 在星座图中表现为收缩和外扩。这种水印嵌入方法易于区分嵌入同一码元的水印, 能够有效降低误码率。

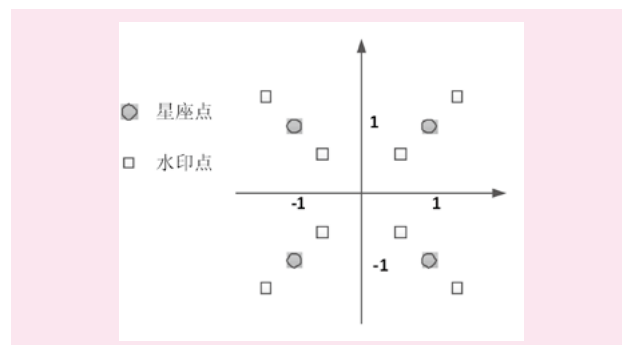


图 5 水印嵌入算法示意图

(三) 水印提取算法

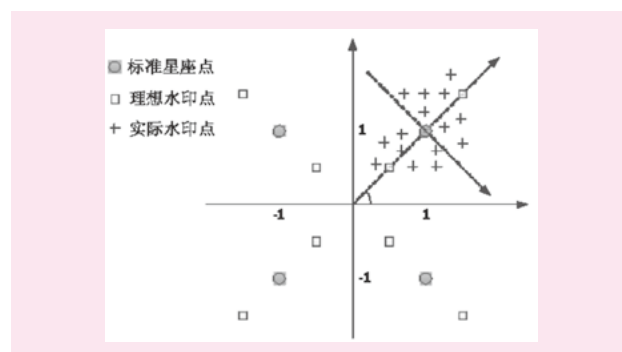


图 6 水印提取算法示意图

水印提取算法亦根据 QPSK 信号相移特性设计, 其原理如图 6 所示。圆形代表标准码元的星座点, 十字形代表实际水印嵌入点, 虚线表示的是标准直角坐标系 O 经过旋转、平移变换得到的新坐标系 O' , θ 为坐标系旋转角。从图 6 中看到, x' 轴将两种嵌入水印分离开来, 可以借此对码元进行判决。

由图 6 可得码元判决公式 (2), 式中 $N_{y'}$ 表示分

布在 x' 轴上方的水印点数量, $N_{y'-}$ 表示分布在 x' 轴下方的水印点数量。

$$w_i = \begin{cases} 1, & N_{y'+} > N_{y'-} \\ -1, & N_{y'+} < N_{y'-} \end{cases} \quad (2)$$

在判决同时对提取水印数据解调,解调过程中可以得到码元校正 $s(k)$, 码元输出 $data(k)$, 通过同步抽样算法提取水印数据, 即公式 (3), 计算结果 $w(k)$ 即为水印数据信号。

$$w(k) = s(k) - data(k) \quad (3)$$

图 6 给出第一象限的水印分布, 其余象限的分布也与之类似, 可以采用相似计算方式, 其坐标系的旋转角度 θ 取值为:

$$\theta = \frac{\pi}{4} \text{sign}(x) [\text{sign}(y) - 2] \quad (4)$$

由向量空间变换旋转矩阵, 得

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

经过 (4)、(5) 式处理得到的水印数据, 通过叠加依据 (2) 式进行判别得到解调后的水印信息, 完成信号的提取。

四、结语

本文根据无线隐蔽通信发展受阻的背景, 开展了一种隐蔽通信系统的设计, 在系统结构上选用软件无线电结构以提高系统的通用性和可拓展性; 在硬件设计上, 以射频集成芯片和 FPGA 芯片为核心, 分别完成射频信号和基带信号的处理, 同时设计了相

应的功能模块将两者组合起来, 形成系统的硬件架构; 在软件算法上, 以信息隐藏技术中的“数字水印”为切入点, 设计实现系统的隐蔽通信, 其中水印的嵌入和提取算法是核心部分, 依靠水印信息完成信号的隐蔽传输和呼叫机、应答机之间的身份识别。本系统的集成度、软件化程度高, 实现功能多样, 应用场景广泛, 可以为后续隐蔽通信系统的研究提供参考。

参考文献:

- [1] 张伟. 基于 SCA 的软件无线电应用可视化编辑器的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [2] 李学军. 一种软件无线电接收机的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [3] 郜泽. 基于 AD9361 的软件无线电硬件平台设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [4] 苏新. 基于 AD9361 的软件无线电硬件平台的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [5] Jiang H, Zhang Z. Study on Software Defined Radio System Based on AD9361[J]. Video Engineering, 2015.
- [6] 罗守山, 刘璐, 钮心忻, 杨义先. 信息安全技术讲座第 1 讲信息隐藏技术[J]. 中国数据通信, 2002, (10): 83-88.
- [7] Katzenbeisser S, Petitcolas F. Information hiding techniques for steganography and digital watermarking[M]. Artech house, 2000.
- [8] 薄光明. 音频水印技术在隐秘通信中的应用研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2014.
- [9] Standard A. Synchronization Standard for Distributed Transmission (A/110)[J]. Advanced Television Systems Committee, 2004.
- [10] 李良杰. 射频水印系统设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

[责任编辑: 刘 骋]

Design of Covert Communication Identity Recognition System with Variable Time Slots

Yu Cang, Wang Bifang
(Wuhan Polytechnic, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the problem that the transmission signal of the traditional wireless communication system is easy to be intercepted by interception, a variable time slot covert communication identification system is designed. The system adopts a software radio structure and realizes different functions through software programming without changing the hardware. The hardware design of the system mainly revolves around baseband signal processing and radio frequency signal processing. FPGA chips and radio frequency chips are selected as the core processing devices. The software design mainly uses the "digital watermark" technology. The sender embeds the watermark information into the baseband signal, and the receiver extracts the watermark information, and completes the covert transmission of the signal and identity recognition with the help of the watermark information. The system can effectively improve the security of communication information and is generally applicable to digital communication systems.

Key words: covert communication; software radio; digital watermarking; identity recognition