



基于软件无线电模块的 IEEE 802.11a 接收机 同步单元实验设计

王莹, 宋沛豪

(大连海事大学 信息科学技术学院, 大连 116026)

摘要: 针对“新工科”建设对大学生实践能力培养的要求, 在通信原理实验教学中提出基于软件无线电模块的 IEEE 802.11a 接收机 OFDM 同步算法教学实验, 并给出帧同步、符号同步和频率同步的实验原理。在 MATLAB 开发环境下, 进行 OFDM 同步单元程序设计和软件无线电模块 PLUTO 配置。从而, 利用 PLUTO 完成通带信号收发, 并进行同步单元功能验证。学生通过该实验, 能更好地掌握通信原理有关同步的理论知识, 提升工程实践能力。

关键词: 软件无线电; IEEE 802.11a; OFDM; 同步算法

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240147

Experimental Design of an IEEE 802.11a Receiver Synchronization Unit Based on a Software-Defined Radio Module

WANG Ying, SONG Peihao

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In response to the requirements of the “new engineering” discipline construction for the cultivation of college students’ practical abilities, a teaching experiment on OFDM synchronization algorithm in an IEEE 802.11a receiver based on a software-defined radio module is proposed in the communication principle experimental teaching. The experimental principles of frame synchronization, symbol synchronization, and frequency synchronization are presented. In the MATLAB development environment, the OFDM synchronization unit is designed and the software-defined radio module PLUTO is configured. Thus, the passband signal is transmitted and received using the PLUTO, and the functions of the synchronization unit are verified. Through this experiment, students can better grasp the theoretical knowledge of synchronization related to communication principle and enhance their engineering practical abilities.

Key words: software defined radio; IEEE 802.11a; OFDM; synchronization algorithm

通信原理是电子信息类专业的一门重要的专业课, 理论与实践紧密结合是该课程的一个显著特点。“新工科”建设倡导将教育教学与实际应用相结合, 强调实践应用导向, 通过项目驱动、问题导向等方式培养学生的实践能力和创新能力^[1-3]。当前通信原理课程验证性实验忽视了对学生的工程应用和创新能力的培养, 已无法满足“新工科”建设的要求。因此, 在“新工科”的建设理念下, 探索提升实验教学质量、优化实验教学体系、完善实践教学机制的策略, 对培养具有创新精神和实践能力的“新工科”人才具有重

要的意义。

近年来, 将软件无线电 (software defined radio, SDR) 技术应用于通信原理教学实验领域已获得了人们的关注^[4-7]。SDR 将模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 和数模转换器 (digital-to-analog converter, DAC) 移向射频前端, 从而能够方便地通过软件编程对基带信号进行处理, 实现各类通信系统^[8]。进而, 借助 SDR 平台间的无线通信, 将真实世界的体验融入工程教育。

IEEE 802.11a 是无线局域网的媒体接入控制与物理层通信协议之一, 其采用正交频分复用

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 王莹, 博士, 教授, 主要从事移动通信、无线自组织网络方面的研究。E-mail: wangying@dlnu.edu.cn

(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 调制技术, 工作于 5 GHz 频段, 最大传输速率为 54 Mb/s^[9]。IEEE 802.11a 接收机的同步算法是实现 OFDM 解调的关键环节, 同步偏差将导致子符号间干扰和子载波间干扰, 使接收机误码率性能下降^[10]。文献 [11-13] 对 IEEE 802.11a 的同步算法进行了研究。本文从学生实验的角度出发, 利用 SDR 进行 IEEE 802.11a 接收机同步模块实验的设计, 使学生利用所学通信原理的理论知识, 认识实际通信系统的基本原理, 实现理论与实践相结合。

1 软件无线电平台简介

实验教学平台采用 ADI 公司生产的软件无线电主动学习模块 PLUTO, 其内部结构如图 1 所示, 主要由射频前端芯片 AD9363 和全可编程系统级芯片 Xilinx Zynq 处理器构成。

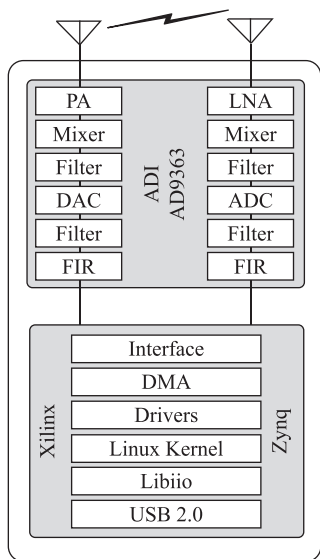


图 1 PLUTO 软件无线电模块内部结构示意图

射频前端 AD9363 为集成式可编程零中频直接转换收发器。如图 1 所示, 其接收子系统包括低噪声放大器(low noise amplifier, LNA)、直接转换混频器(mixer)、可配置模拟滤波器、高速 ADC、数字抽取滤波器和有限冲激响应(finite impulse response, FIR)滤波器。经 AD9363 处理所得到的接收复基带信号被传递到 Xilinx Zynq 处理器。发送端接收来自 Xilinx Zynq 的复基带数据, 通过 FIR、数字插值滤波器、DAC、模拟滤波器、直接转换混频器, 以及功率放大器输出到天线。

Xilinx Zynq 处理器内部包含高级精简指令集处理器(advanced RISC machine, ARM)与现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)两部分。ARM 构成处理器系统(processor system, PS), 而 FPGA 构成可编程逻辑(programmable logic, PL)。PS 的软件可编程性与 PL 的硬件可编程性集成在一起, 既能便捷地实现与处理器外部的数据交换管理, 也能实现信号处理硬件加速。

基于 PLUTO 软件无线电模块进行通信系统程序开发, 通常是在上位机 Windows 操作系统下利用 MATLAB 软件开发环境实现的。首先在 MATLAB 开发环境下编写通信系统的基带信号收、发程序; 之后, 将待发送的基带信号数据通过 ADI 公司提供的 libiio 库函数, 经 USB 2.0 接口发送给 PLUTO 模块, 由 PLUTO 模块完成通带信号发送过程。而接收端 PLUTO 模块接收射频信号, 将其转换为基带信号, 供上位机 MATLAB 软件通过 USB 2.0 接口进行读取、完成基带信号处理。利用 PLUTO 模块进行通信系统设计实验, 可以使学生将注意力完全放在基带信号处理算法上, 从而获得更好的实验效果。

2 实验设计

IEEE 802.11a 无线局域网标准选择 64 个子载波的 OFDM 作为物理层波形方案, 其中活跃子载波数目为 52, 可选符号映射方式分别为 BPSK、QPSK、16-QAM 和 64-QAM, 配合 1/2、2/3 和 3/4 码率的卷积码, 在 20 MHz 的信道带宽下可实现 6、9、12、18、24、36、48、54 Mb/s 的数据传输速率。

为了便于实现接收机同步, IEEE 802.11a 定义了由前导(preamble)、信令(signal)和数据所组成的物理层协议数据单元, 具体帧结构如图 2 所示。

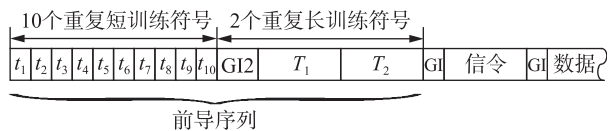


图 2 IEEE 802.11a 物理层协议数据单元帧格式

在 IEEE 802.11a 物理层协议数据单元的前导序列中, $t_1 \sim t_{10}$ 是 10 个相同的短训练符号, 每个符号的采样点数为 16; T_1 和 T_2 为 2 个相同的长训练符号, 每个符号的采样点数为 64。为了消除符号间干扰, 短符号与长符号之间添加了采样点数

为32的保护间隔(guard interval, GI)GI2。利用前导序列中短符号和长符号的周期重复特性可实现OFDM符号的同步。

2.1 IEEE 802.11a 定时同步原理

接收端定时同步包括帧同步与符号同步两部分。首先进行粗同步,实现帧的同步估计;然后,进行细同步,实现符号的同步估计^[14]。这两部同步估计都是基于接收到的前导序列来完成的。

2.1.1 帧同步

帧同步是指判断出IEEE 802.11a物理层协议数据单元到达的准确时刻,这是一种粗同步,同时也是后续进行符号同步和频率同步的基础。粗同步基于短训练序列信号 $t_1 \sim t_{10}$ 的周期特性,采用双滑窗检测技术。设 $r[n]$ 为第 n 个采样时刻的复基带接收信号, n 取非负整数。滑动窗口的长度 L_1 设定为短训练符号的长度,即 $L_1=16$ 。若首个待处理的接收数据为 $r[n]$,则前滑窗内的采样数据包括 $r[n] \sim r[n+L_1-1]$,而后滑窗内的采样数据包括 $r[n+L_1] \sim r[n+2L_1-1]$ 。此时,分别计算后滑窗内接收信号的自相关函数 P_n ,以及前后两滑窗内接收信号的互相关函数 C_n ,由下式可得:

$$P_n = \sum_{k=0}^{L_1-1} r[n+k+D]r^*[n+k+D] = \sum_{k=0}^{L_1-1} |r[n+k+D]|^2 \quad (1)$$

$$C_n = \sum_{k=0}^{L_1-1} r[n+k]r^*[n+k+D] \quad (2)$$

式中: $r^*[n]$ 表示对 $r[n]$ 取共轭; D 为时间偏移量,对于IEEE 802.11a标准 $D=16$,即短训练符号的周期长度。

由于短训练符号是周期重复的,所以一旦前窗口移动到物理层协议数据单元帧的前导序列起始位置时, C_n 和 P_n 的模取值将相近,故定义粗同步判决变量 M_n 由下式可得:

$$M_n = \frac{|C_n|^2}{P_n^2} \quad (3)$$

在粗同步过程中,假设 H_1 为真时,表示接收到了协议数据单元帧;假设 H_0 为真时,表示没有检测协议数据单元帧。判决依据是判决变量 M_n 是否超出阈值 T_h ,即:

$$\begin{cases} \text{假设 } H_1 \text{ 成立,} & \text{若 } M_n \geq T_h \\ \text{假设 } H_0 \text{ 成立,} & \text{若 } M_n < T_h \end{cases} \quad (4)$$

IEEE 802.11a 无线局域网标准建议 T_h 取值

0.75,并将判决变量 $M_n \geq 0.75$ 时的第一个采样点索引 n 作为帧同步估计的起始点。实际应用中,为了避免噪声对判决变量的影响,需要进行多次判断,如连续多次出现判决变量大于等于0.75时,才认为帧检测成功。

帧同步算法实现的原理框图如图3所示。首先对起始时刻为 n 的接收信号 $r[n]$ 进行延时、取共轭处理,延时长为 L_1 个采样间隔。接下来,经过延时、取共轭的接收信号分别在上半个支路与接收信号进行逐采样点相乘,并求和及取模的平方,得到变量 $|C_n|^2$ 。而在下半支路,经过延时、取共轭的接收信号与仅经过延时的接收信号进行逐采样点相乘、求和,进而求和的平方,得到变量 P_n 。随后,计算 $|C_n|^2$ 与 P_n^2 的比值,确定判决变量 M_n ,并根据 M_n 与阈值的比较结果判断帧起始位置,实现帧同步。

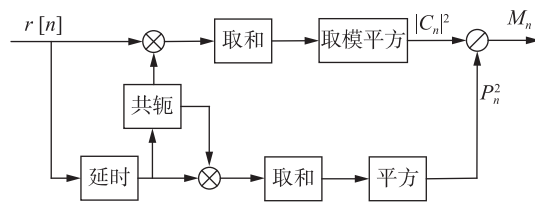


图3 帧同步算法实现的原理框图

2.1.2 符号同步

通过帧同步得到了帧的起始位置,接下来需要精确定位每个OFDM符号的起始时刻,即进行符号同步,也被称为精同步。利用符号同步确定接收OFDM符号离散傅里叶变换的窗口,从而将时域信号变换至频域,以便进行频域均衡和解调。

基于前导序列中的长训练符号进行符号同步,即计算接收信号 $r[n]$ 与本地已知的长训练序列 T_1 的互相关函数。相应的互相关函数 E_n 由下式可得:

$$E_n = \sum_{k=0}^{L_2-1} r[n+k]T_1^*[k] \quad (5)$$

式中: $L_2=64$,是长训练序列 T_1 的采样点数。

此时,将 E_n 模的平方作为符号定时的判决变量,则符号定时估计值 \hat{t}_s 由下式可得:

$$\hat{t}_s = \arg \max_n |E_n|^2 \quad (6)$$

通过式(6),搜索能够获得最大相关函数的采样时刻索引 n ,便可确定符号定时估计值。

符号同步算法实现的原理框图如图4所示。对于起始时刻为 n 的接收信号 $r[n]$,将其与本地长

训练序列 $T_1[k]$ 的共轭进行 L_2 个采样点的逐点相乘、求和并对和取模平方，得到变量 $|E_m|^2$ 。在帧同步的基础上，搜索使 $|E_m|^2$ 取最大值的采样点 n ，从而实现符号同步。

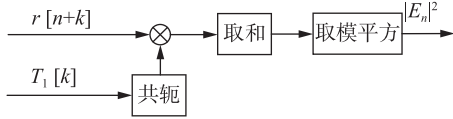


图4 符号同步算法实现的原理框图

2.2 IEEE 802.11a 频率同步原理

载波频偏会破坏 OFDM 子载波间的正交性，导致子载波间干扰。本实验利用 IEEE 802.11a 网络层协议数据单元前导序列中训练符号的周期重复特点，在时域实现频率同步。

发送端的通带发射信号可以表示为：

$$x[n] = s[n]e^{j2\pi f_{tx}nT_s} \quad (7)$$

式中： $s[n]$ 为第 n 个采样时刻的基带信号， f_{tx} 为发射机载波频率， T_s 为采样间隔。

接收机对接收信号进行下变频，在加性高斯白噪声信道条件下，复基带接收信号可以表示为：

$$r[n] = (s[n]e^{j2\pi f_{rx}nT_s} + w[n])e^{-j2\pi f_{rx}nT_s} = s[n]e^{j2\pi(f_{tx}-f_{rx})nT_s} + w[n]e^{-j2\pi f_{rx}nT_s} \quad (8)$$

式中： $w[n]$ 为第 n 个采样时刻的高斯白噪声， f_{rx} 为接收机载波频率。记 $f_{\Delta} = f_{tx} - f_{rx}$ ，为发射机与接收机之间的载波频偏，且为了表述清晰忽略噪声项，式(8)可以改写为：

$$r[n] = s[n]e^{j2\pi f_{\Delta}nT_s} \quad (9)$$

接下来，对接收信号进行延迟相关运算，有：

$$z = \sum_{k=0}^{L-1} r[k]r^*[k+L] \quad (10)$$

式中： L 表示参与相关运算的采样点数。将式(9)代入式(10)，可得：

$$z = \sum_{k=0}^{L-1} s[k]s^*[k+L]e^{-j2\pi f_{\Delta}LT_s} \quad (11)$$

当 L 的取值分别为短训练符号长度 16、长训练符号长度 64 时，式(11)可以改写为：

$$z = \sum_{k=0}^{L-1} |s[k]|^2 e^{-j2\pi f_{\Delta}LT_s} \quad (12)$$

此时，频偏的估计值为：

$$\hat{f}_{\Delta} = -\frac{1}{2\pi LT_s} \angle z \quad (13)$$

式中： $\angle z$ 表示取变量 z 的相角。

频偏估计与补偿实现原理框图如图 5 所示。基于定时同步结果，读取相邻的两个长度为 L 的训练符号，分别表示为 $r(1:L)$ 和 $r(L+1:2L)$ 。对二者进行相关运算，并计算相关系数的相角。为了后续的频偏补偿，首先对相角取反，除以 $2\pi LT_s$ ，得到频偏补偿量。由于频偏将导致时域信号产生相移，故将频偏补偿量与接收复基带信号的采样时刻相乘，并取自然指数，转为时域信号的相移。如图 5 所示， K 表示需要处理的接收信号的采样点数。接下来，用于频偏补偿的时域相移信号与待补偿的时域接收信号进行逐采样点相乘，完成信号频偏校正。

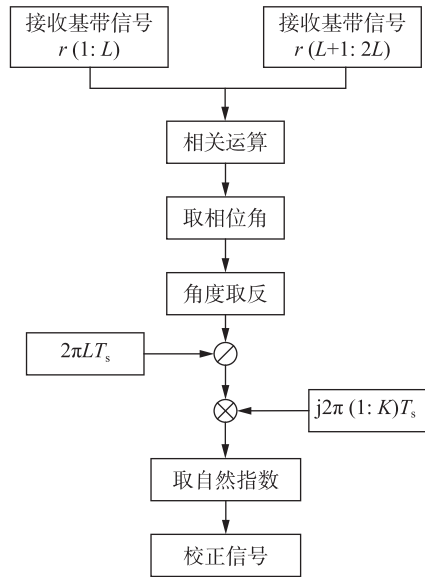


图5 频偏估计与补偿实现原理框图

IEEE 802.11a 标准中，在 20 MHz 系统带宽情况下，采样间隔 T_s 为 50 ns。如使用短训练符号进行频偏估计，则 $L=16$ ，可以估计的最大频偏为 625 KHz；而使用长训练符号时， $L=64$ ，可以估计的最大频偏为 156.25 kHz。因此，通常使用短训练符号进行粗频偏估计补偿，而使用长训练符号进行细频偏估计补偿。

3 实验过程

基于上述定时同步与频率同步的原理，在实验中采用 MATLAB 软件进行编程。具体的实验软件包括发射机程序和接收机程序，其中发射机程序控制 PLUTO 实现 IEEE 802.11a 物理层协议数据单元的发送，而接收机程序控制 PLUTO 接收射频

信号完成下变频, 并对接收到的基带信号进行处理, 完成 OFDM 信号解调。

基于 PLUTO 的软件无线电实验平台实物图如图 6 所示。通过在上位机安装 PLUTO 的 USB 驱动、IIO oscilloscope、libiio 驱动, 以及 TDM-GCC 编译器, 便可在 MATLAB 环境下使用 PLUTO 进行无线通信系统实验。

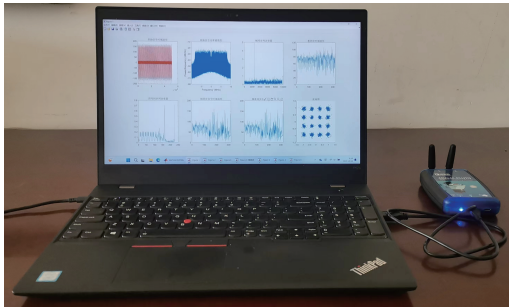


图 6 基于 PLUTO 的软件无线电实验平台实物图

发射机程序流程图如图 7 所示。首先设定 IEEE 802.11a 的工作参数, 包括系统带宽、载波频率、采样频率等。接下来对 PLUTO 进行初始化, 使其射频前端工作在 IEEE 802.11a 的工作参数之下。生成复基带发射信号是发射机程序的主要任务, 这里需要按照协议标准产生如图 2 所示的物理层协议数据单元所对应的基带信号。最后, 将基带信号传递到 PLUTO 的射频前端进行发射。

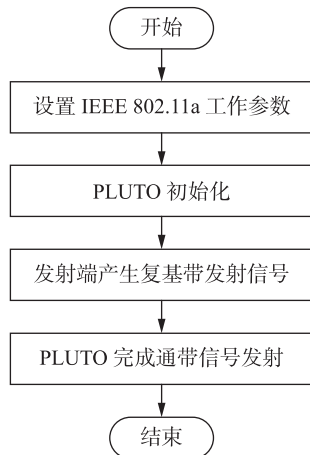


图 7 发射机程序流程图

接收机程序流程图如图 8 所示。首先设定工作参数, 对 PLUTO 进行初始化, 并控制 PLUTO 通过射频前端接收射频信号。随后, 读取复基带接收信号, 利用上述符号同步及频率同步的原理, 编程实现 IEEE 802.11a 接收机同步模块。最后, 对完成同步的接收信号进行均衡、解映射、信道解码等处理, 恢复发射机发送的原始信息。

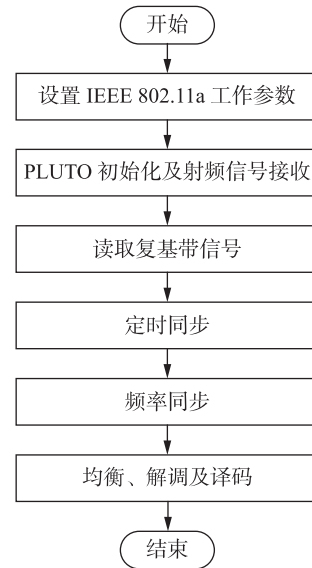


图 8 接收机程序流程图

如图 7 和图 8 所示, IEEE 802.11a 接收机与发射机的软件分别包含许多功能模块, 因此, 可以采用分组协作的方式, 设计同步模块的同学在与其他小组进行配合的基础上, 进行所设计同步程序的功能验证。

为进一步说明 IEEE 802.11a 接收机同步模块的编程实现方法, 表 1~表 3 分别给出了帧同步、符号同步和频率同步算法的实现伪代码。

表 1 帧同步算法实现伪代码

输入: 复基带接收信号 $r(1:N)$
1. 令 L 等于短训练序列长度 16
2. for $n=1 : N-2L$
3. 令 C_n 为矢量 $r[n:n+L-1]$ 与矢量 $r(n+L:n+2L-1)$ 内积的模
4. 令 P_n 等于矢量 $r(n+L:n+2L-1)$ 模的平方
5. 由式(3)计算帧同步判决变量 M_n
6. 统计 M_n 取值连续大于阈值 T_n 的次数 N_T
7. 若 N_T 满足要求, 则确定帧同步采样点序号, 并退出循环
8. end for
输出: 帧同步采样点序号

表 2 符号同步算法实现伪代码

输入: 帧同步后的复基带接收信号 $r(1:N)$
1. 令 L 等于长训练序列长度 64
2. for $n=1 : 400$
3. 令 T_n 为矢量 $r[n:n+L-1]$ 与本地长训练序列内积的模
4. end for
5. 查找首个大于设定阈值的 T_n 所对应的采样点
输出: 符号同步采样点序号

表 3 频率同步算法实现伪代码

输入：符号同步后的复基带接收信号 $r(1:N)$
1. $L=16$ 或 64
2. 提取接收的训练序列 $r(1:2L)$
3. 计算序列 $r(1:L)$ 与序列 $r(L+1:2L)$ 的互相关系数 z
4. 取 z 的相角 P
5. 频偏等于 $P/(2\pi LT_s)$
6. 逐采样点计算频偏补偿量
7. 对复基带接收信号进行频偏补偿
输出：频偏补偿后的接收信号

4 实验结果

本节将利用 PLUTO 对符号同步与频率同步软件的功能进行验证。IEEE 802.11a 系统的载波频率设定为 5.8 GHz，带宽 20 MHz。采用 16-QAM 符号映射，1/2 码率卷积码，实现 24 Mb/s 的数据传输速率。

利用短训练符号进行帧同步所得到的判决变量 M_n 随采样时刻索引号的变化曲线如图 9 所示。在第 1319 号采样点之后， M_n 持续获得了大于 0.75 的取值，因此可以断定 1319 号采样点为 IEEE 802.11a 物理层协议数据单元的起始点，从而实现帧同步。

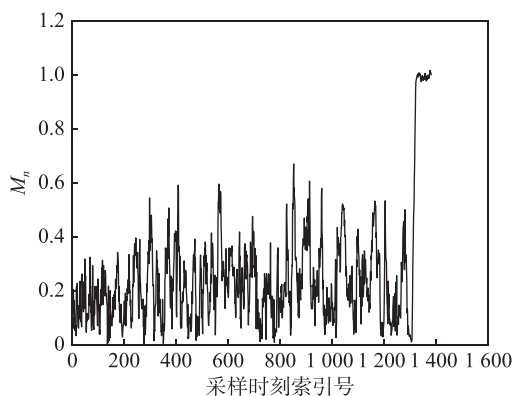


图 9 M_n 随采样时刻索引号变化曲线图

基于长训练符号相关函数的符号同步判决变量 $|E_n|^2$ 随采样时刻索引号的变化曲线如图 10 所示。判决变量存在 2 个尖峰，分别对应前导序列中两个长训练符号的起始采样时刻。根据式(6)，按照采样时间顺序，找到第一个峰值，便可以实现符号同步。

本实验利用经过定时同步、粗频偏估计补偿、细频偏估计补偿，以及信道均衡处理后，接

收信号的 16-QAM 星座图来验证频率同步模块的功能。信噪比为 23 dB 时经过频偏补偿后的接收信号星座图如图 11 所示。作为对比，在未进行细频偏补偿的情况下接收信号的星座图如图 12 所示。

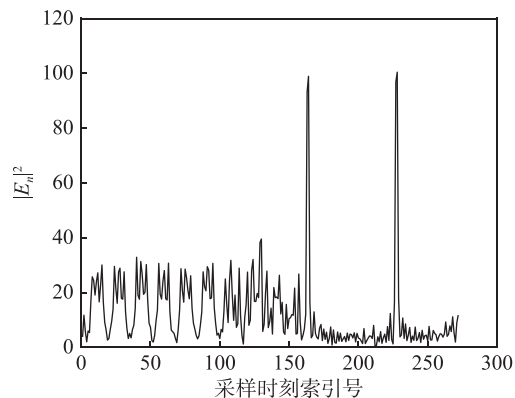


图 10 $|E_n|^2$ 随采样时刻索引号变化曲线图

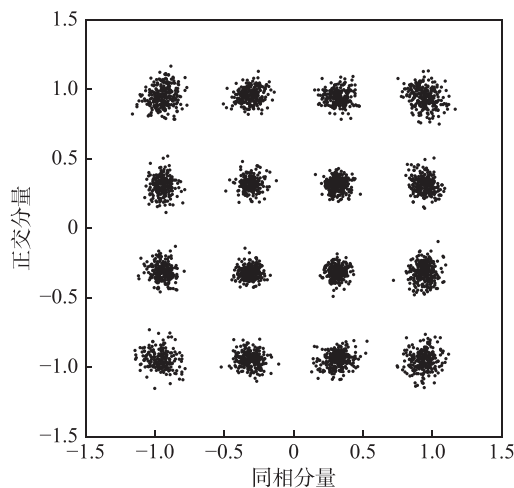


图 11 经频偏补偿后的接收信号星座图

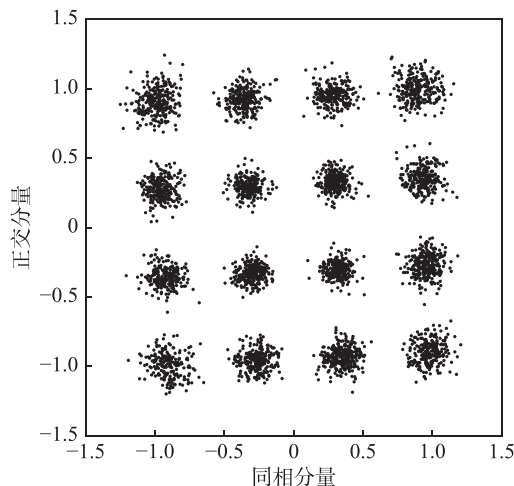


图 12 未经细频偏补偿的接收信号星座图

如图 11 所示,星座图上的坐标点受接收噪声影响,产生了一定的扩散,但相邻坐标点之间未产生干扰,能够正确地进行 16-QAM 解调处理。忽略细频偏补偿过程,则接收信号将存在频率偏差,会使时域信号产生相移,并导致 OFDM 子载波间产生干扰。上述影响反映在图 12 所示星座图中,便是坐标点产生了旋转,且扩散程度较图 11 有所增加。

5 结束语

在通信原理课程实验中引入软件无线电模块,结合无线局域网协议 IEEE 802.11a 物理层规范,进行接收机同步模块的软件设计,并给出实验原理、实验步骤及实验结果。通过实验的准备、编程实现及实验结果分析验证等环节,帮助学生更好地掌握帧同步、符号同步及频率同步的基本原理,直观感受同步模块在接收机系统中发挥的作用,培养学生的工程实践及创新能力。

参考文献

- [1] 甘露. 新工科背景下环境设计专业实践教学体系改革升级研究[J]. 化纤与纺织技术, 2023, 52(6): 228-230.
- [2] 侯婷, 沈玉红, 董亦凡, 等. “新工科”背景下“通信原理”课程混合式教学研究[J]. 物联网技术, 2023, 13(5): 150-153.
- [3] 李红岩, 杨静. 面向新工科的通信原理研究型实验探索[J]. 中国现代教育装备, 2021(17): 96-98.
- [4] 刘奕彤, 尹良, 郑平, 等. 基于口袋化的软件无线电通信实践教学创新[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(9): 204-207.
- [5] 杨轶, 李苑青, 张霆廷, 等. 软件定义无线电 (SDR) 在通信类实验教学中的实践与应用[J]. 中国多媒体与网络教学学报 (上旬刊), 2022(4): 85-88.
- [6] 陈翔, 陈志浩, 农珊珊. 基于 USRP 教学平台的 ADS-B 接收实验设计与验证[J]. 教育教学论坛, 2021(48): 65-68.
- [7] 武畅, 焦曙阳, 钱程东. 基于 GNURadio 与 USRP 的 OFDM 无线通信系统实验[J]. 实验科学与技术, 2024, 22(1): 1-8.
- [8] AKEELA R, DEZFOULI B. Software-defined radios: Architecture, state-of-the-art, and challenges [J]. Computer Communications, 2018, 128: 106-125.
- [9] IEEE. Draft supplement to standard for telecommunications and information exchange between systems-lan/man specific requirements-part 11: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) SPEC: Highspeed physical layer in the 5 Ghz band: IEEE Std 802.11a-1999[S]. New York: IEEE, 1999.
- [10] GEETHA PRIYA C, ANANTHI P. Joint timing and carrier frequency offset estimation for OFDM WLAN systems[C]//2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology. Nagercoil: IEEE, 2011: 1141-1145.
- [11] 袁长青, 于江, 张进波, 等. OFDM 系统同步技术研究[J]. 中国无线电, 2016(8): 44-45.
- [12] 李冰立, 邢春燕, 刘媛. 基于 802.11a 的网络局域网同步技术研究[J]. 煤炭技术, 2021, 30(4): 170-171.
- [13] CHAUDHARI M S, MAJHI S, JAIN S. CNN-attention-DNN design for CFO estimation of non-pilot-assisted OFDM system[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(2): 551-555.
- [14] HEISKALA J, TERRY J. OFDM wireless LANs: A theoretical and practical guide[M]. Indianapolis: Sams, 2002.

编辑 葛晋