

北京理工大学

本科生毕业设计(论文)

指导手册

基于FPGA的GFSK信号解调算法设计和实现
Design and Implementation of GFSK Demodulation Algorithm
on FPGA

学 院: 信息与电子学院
专 业: 电子信息工程
班 级: 05122010
学生姓名: 王润言
学 号: 1120203101
指导教师: 王华

2024 年 北京理工大学教务部制

北京理工大学

本科生毕业设计（论文）任务书

学生姓名	王润言	学号	1120203101
学院	信息与电子学院	班级	05122010
专业	电子信息工程	题目类型	不是特殊类型毕设
指导教师	王华	指导教师 所在学院	信息与电子学院
题目来源	结合科研	题目性质	工程设计
题目	基于 FPGA 的 GFSK 信号解调算法设计和实现		

一、题目内容

高斯频移键控 (Gaussian frequency shift keying, GFSK) 是一种通信的调制方式。其实现的原理是使用高斯低通滤波器对调制信号进行滤波，对滤波后的信号进行频率调制。相比于 FSK 信号，GFSK 信号有更高的频谱效率和更低的相邻信道干扰。

本毕业设计的任务是设计和实现一个基于 FPGA 的突发 GFSK 信号接收机。该设计将专注于处理单通道的突发 GFSK 信号，该信号可能存在频率偏移和相位偏移。主要的挑战在于精确地感知并解调这种突发性质的信号，同时确保对频率和相位偏移的有效补偿。首先对任务进行 MATLAB 浮点定点仿真，而后再进行 FPGA 实现。

二、任务要求

本课题的核心任务是在 FPGA 平台上实现单路突发 GFSK 信号的接收和解调。要求学生熟悉无线传输中的突发信号的帧同步、频偏同步、相位同步、定时同步和 GFSK 信号的差分解调的基本原理；掌握 MATLAB 编程软件的基本用法以及 FPGA 编程的基础

知识，包括硬件描述语言（如 VHDL 或 Verilog）的使用和 FPGA 开发环境的操作并且学会检索并阅读 IEEE、CNKI 等国内外数据库内的相关技术文献。最终在 MATLAB 软件以及 FPGA 上对单路突发 GFSK 信号解调进行仿真和性能测试及分析。

本次毕业设计任务的具体设计指标要求包括：

（1）输入条件：

- 1) 系统带宽：600KHz；
- 2) 系统多普勒频移：0-30KHz；
- 3) 系统相位偏移：0- 2π ；
- 4) 突发数据帧格式给定。

（2）功能和性能指标要求：

功能要求：

- 1) 突发：实现单路突发 GFSK 信号的检测；
- 2) 同步：帧同步、定时同步、频偏同步、相偏同步；
- 3) 解调：差分解调。

性能指标：

1) 同步算法性能：

- ① 在 SNR 大于等于 4dB 时能够准确完成帧同步
- ② 在 SNR 大于等于 5dB 时能够准确完成定时同步

2) 误码率性能

- ① MATLAB 仿真在 SNR 等于 5dB 时误码率小于 $1e-3$

②FPGA 硬件测试时在 SNR 等于 6dB 时误码率小于 $1e-3$

③MATLAB 仿真在 SNR 等于 8dB 时误码率小于 $1e-6$

④FPGA 硬件测试时在 SNR 等于 9dB 时误码率小于 $1e-6$

3) 解包率性能:

①MATLAB 仿真在 SNR 等于 10dB 时误包率小于 $1e-4$

②FPGA 硬件测试时在 SNR 等于 11dB 时误包率小于 $1e-4$

三、进度安排

1. 2023. 12: 查阅文献, 掌握移动通信相关内容, 学习 GFSK 信号发送端和接收端的基本原理和环节构成, 并且完成国内外技术发展情况的调研, 以及具有代表性的外文文献的翻译工作。期间按照节点撰写周志和开题报告。

2. 2024. 01~2024. 02: 学习使用 MATLAB 软件, 对突发 GFSK 通信系统接收端的功能进行 MATLAB 浮点、定点仿真, 主要环节包括: 突发检测、帧同步、频偏估计与补偿、匹配滤波和差分解调, 设计方案能综合考虑社会、健康、安全、法律、文化以及环境等因素。期间按照节点撰写周志, 并完成文献翻译工作。

3. 2024. 03~2024. 04: 对突发 GFSK 通信系统接收端的功能进行硬件实现, 首先完成 Verilog 代码编写并进行 Modelsim 仿真, 验证实验原理以及代码的可行性, 再进行 FPGA 硬件测试。期间按照节点撰写周志和中期报告。 4. 2024. 05: 对所做研究工作进行总结, 完成毕业设计论文。同时根据毕业论文的内容, 完成答辩 PPT 的制作, 并充分准备陈述和提问环节的发言, 体现自身的表达能力和沟通交流能力。

最终在较好地完成整个课题的任务之后, 学生建立终身学习的意识, 并且能够通过 GFSK 通信系统的研究, 进而对电子信息工程相关领域的理论和技术发展规律

北京理工大学本科生毕业设计（论文）任务书

有明确的认识，能够了解电子信息领域理论和技术的现状、前沿和发展趋势，了解本行业及相关行业的国际热点问题。

四、主要参考文献

[1] Huang Y L, Fan K D, Huang C C. A fully digital noncoherent and coherent GMSK receiver architecture with joint symbol timing error and frequency offset estimation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(3): 863-874.

[2] Byun S. Analysis and verification of DLL-based GFSK demodulator using multiple-if-period delay line[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2016, 64(1): 6-10.

五、指导教师签字:

 指导教师专用

2023 年 11 月 30 日

六、题目审核负责人意见

通过

签字:

 审核人专用

2023 年 11 月 30 日

北京理工大学

本科生毕业设计（论文）

开题报告

基于 FPGA 的 GFSK 信号解调算法设计和实现 Design and Implementation of GFSK Demodulation Algorithm on FPGA

学 院:	信息与电子学院
专 业:	电子信息工程
班 级:	05122010
学生姓名:	王润言
学 号:	1120203101
指导教师:	王华

一、选题依据

（简述该选题的研究意义和背景，国内外研究概况和发展趋势等）

1.1 研究意义和背景

高斯频移键控（Gaussian Frequency Shift Keying, GFSK）是一种先进的频率调制技术，它基于传统的频移键控（Frequency Shift Keying, FSK）技术，并引入了高斯滤波器来改善信号的频谱特性。相比于 FSK 技术直接改变载波频率以表示不同的二进制状态，导致较宽带宽占用和尖锐频谱边缘，GFSK 技术利用高斯滤波器对调制信号进行预处理，有效平滑频率变化的边缘，从而减少带宽占用并降低带外信号的功率谱密度。此外，GFSK 调制通过减轻频谱泄露和邻频干扰，提高了信号传输的效率与可靠性。GFSK 调制技术在 BLE 应用中发挥着重要的作用，其宽松的带内发射要求使可穿戴设备、物联网传感器等设备能够实现高效和可靠的短程通信。

现场可编程门阵列（Field-Programmable Gate Array, FPGA）是一种特殊的数字集成电路，其特殊的逻辑门阵列结构使用户能在硬件级别进行编程并实现特定逻辑功能。这一特性使得 FPGA 在数字电路设计领域中占据了特殊的地位，特别是在需要快速原型开发和测试的场景中。同时，FPGA 能够被多次编程以适应多变的应用需求和功能配置，极大地增强了设计的灵活性和可测试性。针对火箭通信系统这一特定应用场景，其中对数据传输的实时性、可靠性以及精确性要求极为严格。开发一系列性能可靠的基于 FPGA 的 GFSK 解调算法显得尤为关键，不仅能够显著提升火箭无线通信系统的整体性能，更为火箭任务的成功实施提供了坚实的技术支撑。

1.2 国内外研究概述

随着现代通信技术的发展，移动通信技术得到快速发展，许多优秀的调制技术应运而生，其中 GFSK 技术是无线通信中比较突出的一种二进制调制方法，它具有良好的功率谱特性和较好的抗干扰性能，特别适用于无线通信和卫星通信，目前，很多通信标准都采用了 GFSK 技术。在我国数字通信系统中，全数字接收机已经得

到了广泛的应用。利用数字化方法设计通信系统中的调制解调技术是实际应用中的一项重要技术。高斯频移键控 (GFSK) 是一种典型的连续相位调制方式, 具有包络恒定、频谱紧凑、抗干扰能力强等特点, 可有效降低邻道干扰, 提高非线性功率放大器的效率, 已在移动通信 (如 GSM 系统)、航天测控等场合得到广泛应用。

国际上的研究主要集中在 GFSK 解调算法的低延迟架构设计及其在 FPGA 上的实现。如文献[1]主要关注于非相干 GFSK 解调器架构的延迟和误码率 (BER) 性能。这项研究通过对比三种不同的解调技术: 瞬时频率估计、四重相关器和匹配滤波器, 评估了它们在 FPGA 平台上的实现性能, 突出了针对低延迟和高性能通信系统的设计需求。

1.3 发展趋势

随着无线通信技术的不断发展, GFSK 调制技术及其在 FPGA 上的应用将面临新的发展机遇和挑战。一方面, 随着物联网、智能设备以及下一代移动通信技术的迅猛发展, 对于高效、低功耗的无线通信方案的需求日益增长。GFSK 技术因其在带宽利用率、功耗和通信质量方面的优势, 将在未来的通信系统中扮演更加重要的角色。另一方面, FPGA 的灵活性和可编程性为 GFSK 技术的创新应用提供了广阔的空间。随着 FPGA 技术的进步, 其处理能力和效率将进一步提高, 使得基于 FPGA 的 GFSK 调制解调方案能够更好地满足复杂多变的通信需求, 特别是在实时性和可靠性要求极高的应用场景中, 如无人驾驶、远程医疗以及空间通信等领域。GFSK 技术和 FPGA 的结合将持续引领无线通信技术的发展, 为未来的通信系统带来更加高效、可靠的解决方案。

二、研究目标和内容

(研究目标、主要内容及关键问题等)

2.1 研究目标

本课题制定了在不同信噪比下不同算法的性能指标。对于同步算法仿真，在 E_b/N_0 大于等于 14dB 时能够准确完成帧同步，在 E_b/N_0 大于等于 15dB 时能够准确完成定时同步；对于 MATLAB 的仿真，在 E_b/N_0 等于 14dB 时误码率小于 $1e-3$ ，在 E_b/N_0 等于 8dB 时误码率小于 $1e-6$ ，在 E_b/N_0 等于 19dB 时误包率小于 $1e-4$ ；对于 FPGA 硬件测试，在 E_b/N_0 等于 15dB 时误码率小于 $1e-3$ ，FPGA 硬件测试时在 E_b/N_0 等于 18dB 时误码率小于 $1e-6$ ，FPGA 硬件测试时在 E_b/N_0 等于 20dB 时误包率小于 $1e-4$ 。

2.2 研究内容

本课题的核心内容是在 FPGA 平台上实现单路突发 GFSK 信号的接收和解调。本次毕业设计通过熟悉无线传输中的突发信号的帧同步、频偏同步、相位同步、定时同步和 GFSK 信号的差分解调的基本原理，掌握 MATLAB 编程软件的基本用法以及 FPGA 编程的基础知识，包括硬件描述语言（如 VHDL 或 Verilog）的使用和 FPGA 开发环境的操作并且学会检索并阅读 IEEE、CNKI 等国内外数据库内的相关技术文献，最终在 MATLAB 软件以及 FPGA 上对单路突发 GFSK 信号解调进行仿真和性能测试及分析。

2.3 关键问题

（1）算法设计：需要设计并优化 GFSK 信号的同步和解调算法，使其能满足软硬件的误码率和误包率性能指标。

（2）硬件实现：需要设计 FPGA 的硬件模块，以实现一个可行的 FPGA 的 GFSK 信号解调系统。这需要对 Verilog 语言、算法以及时序有充分理解和合理运用。

三、研究方案

（拟采用的研究方法、技术路线、实验方案及可行性分析等）

3.1 研究方法

本课题初步选择对整个 GFSK 调制解调系统进行整体仿真，具体针对 Fitz 频率偏移估计算法、双滑窗突发检测算法、差分解调算法在不同信噪比下进行多组 MATLAB 仿真，并对比误码率等结果。仿真流程图如图 1 所示。

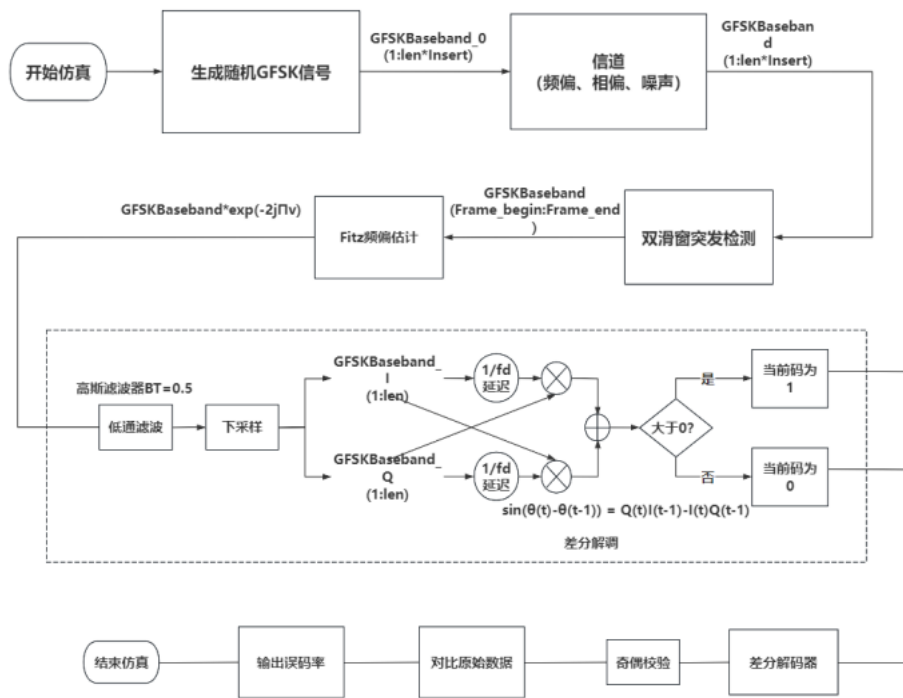


图 1 GFSK 同步解调算法 MATLAB 仿真流程图

3.2 技术路线

(1) GFSK 信号的产生

GFSK 信号是 FSK 信号的一种，其基带信号在调制之前会经过一个高斯滤波器进行平滑处理。连续时间 GFSK 信号的一般表达式如下

$$S(t) = A \cos(2\pi f t + \varphi(t))$$

其中 f 为载波频率，上式中连续时间相位函数如下

$$\varphi(t) = 2\pi \cdot \frac{hR_b}{2} \int_0^t m(\tau) d\tau$$

离散时间相位函数如下

$$\varphi(n) = 2\pi \cdot \frac{hR_b}{2f_s} \sum_0^n m(i)$$

其中 h 是调制系数，在本课题中取 h=0.7，Rs 是符号速率，fs 是采样率，m(t) 是经过高斯滤波器平滑后的连续时间基带信号，m(n) 是经过高斯滤波器平滑后的离散时间基带信号。其中高斯滤波器表达式为

$$g(t) = \frac{1}{2T} [Q(2\pi BT \frac{t - \frac{T}{2}}{\sqrt{\ln 2}}) + Q(2\pi BT \frac{t + \frac{T}{2}}{\sqrt{\ln 2}})]$$

上式中 B 是高斯滤波器的 3dB 带宽，T 是码元周期，本课题中 BT=0.5，g(t) 是非负偶函数且积分值为 1。Q 函数定义为

实际应用中 g(t) 在区间 (-LT/2, LT/2) 外区间取 0，L 为码元约束长度，通常取整数，在实际调制过程中取 L=3。根据上式可构建高斯滤波器，再将编码后的原始数据与高斯滤波器卷积得到 m(n)，进而得到相位。

S(t) 则可以拆分为 I、Q 分量，组成如下 GFSK 基带信号

$$S(t) = A \cos(2\pi f t) \cos[\varphi(t)] - A \sin(2\pi f t) \sin[\varphi(t)]$$

故 GFSK 基带信号形式如下

$$s(t) = \cos[\varphi(t)] + i \cdot \sin[\varphi(t)]$$

故可以通过图 2、图 3 的流程产生 GFSK 基带信号与中频信号。

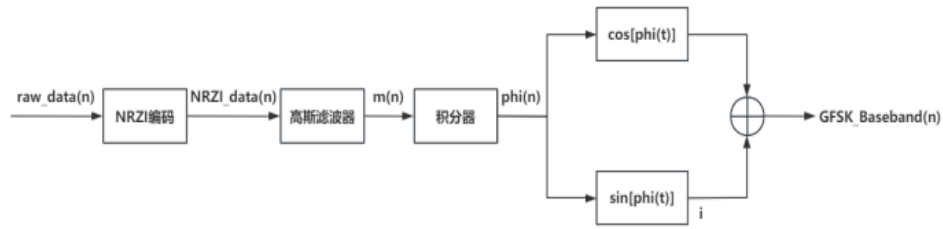


图 2 GFSK 基带信号产生流程图

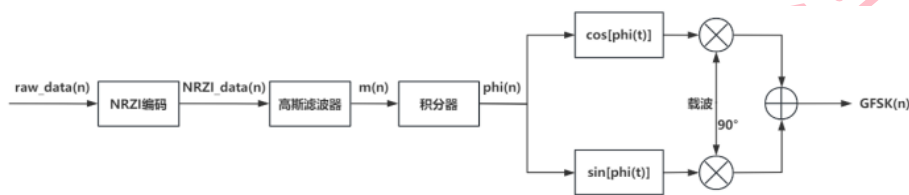


图 3 GFSK 中频信号产生流程图

(2) 双滑窗突发检测算法

在理想状态下通常使用差分法对一个恒定功率的信号进行突发检测，即将信号延迟一定数量的符号周期并与原信号进行差分，再对此差分序列进行二阶差分，如图 4 所示（延迟 4 个符号周期），可以根据二阶差分序列是否高于阈值判断是否接收到突发信号。在一定信噪比下，这种方法同样使用于叠加了加性高斯白噪声（AWGN）的信号。进行差分的延迟周期越长，差分序列的峰值越明显，误判率更低，但会导致峰值到来时刻延后，需要根据实际情况进行调整。

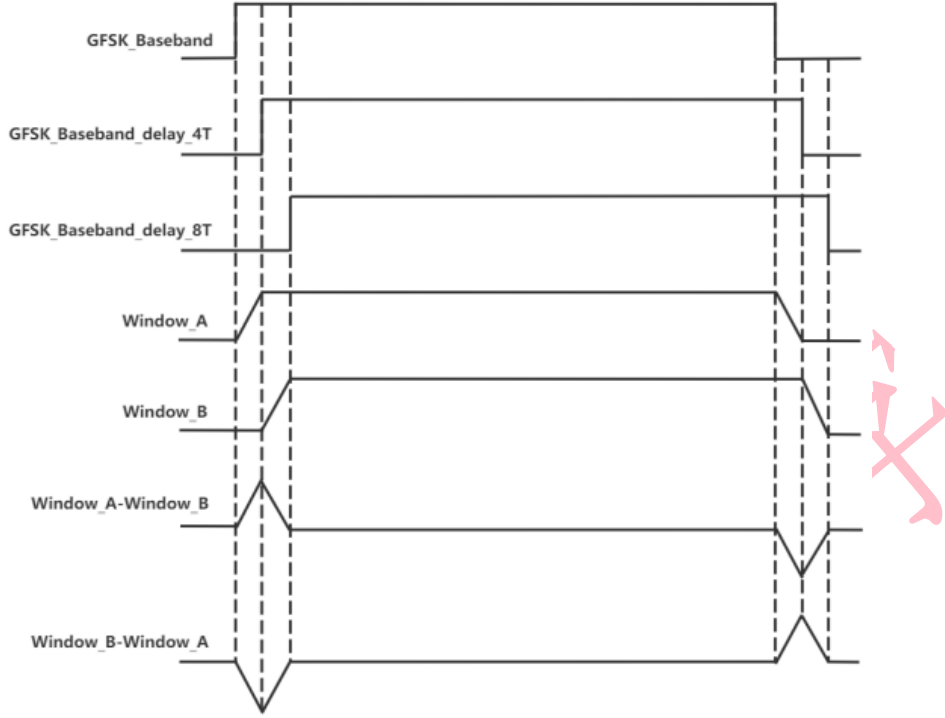


图 4 双滑窗突发检测法

(3) Fitz 频率偏移估计算法

Fitz 提出的频率估计算法是根据对信号的自相关函数进行计算，得到一个近似的频率估计值[2][3]。由于前导码的存在，信号的频率偏移估值可以通过将信号的前导码部分与标准前导码进行混频并滤除高频分量，再对其使用 Fitz 频率估计得到。由于存在噪声，在进行混频前也需要对信号进行滤波处理。

GFSK 基带信号的前导码与标准前导码混频并滤除高频分量后可以表示为

$$z(k) = e^{j[2\pi vk(t+\tau)+\theta]} + n(k)$$

其中 v 是频率偏移量， $n(k)$ 是噪声。定义自相关函数为

$$R(m) \triangleq \frac{1}{L_0 - m} \sum_{k=m}^{L_0} z(k)z^*(k-m)$$

将 $z(k)$ 代入 $R(m)$ 可得

$$R(m) = e^{j2\pi vmT} + n'(k)$$

对上式求复角得

$$e(m) \triangleq \arg\{R(m)\} - 2\pi vmT$$

当 $N < \frac{1}{2|v_{max}|T}$ 且 $m \in [1, N]$ 时, 有

$$\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N e(m) \triangleq \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \arg\{R(m)\} - \pi(N+1)vT$$

故频率偏移量可以表示为

$$\hat{v} = \frac{1}{\pi N(N+1)T} \sum_{m=1}^N \arg\{R(m)\}$$

(4) 差分解调

在得到确定的帧头与数据段后, 则可以对 GFSK 基带信号进行解调。离散 GFSK 基带信号表达式为

$$s(n) = \cos[\varphi(n)] + i \cdot \sin[\varphi(n)]$$

GFSK 基带信号的符号间的相位差代表了码元信息, 故可以使用差分法进行抽样判决, 得到解调后的编码信息, 即

$$NRZI_data = \begin{cases} 1, & \arg\{s(n)\} - \arg\{s(n-T)\} > 0 \\ 0, & \arg\{s(n)\} - \arg\{s(n-T)\} < 0 \end{cases}$$

相位信息可以由前后 I、Q 分量计算得出

$$\arg\{s(n)\} - \arg\{s(n-T)\} = \sin[\varphi(n)]\cos[\varphi(n-1)] - \cos[\varphi(n)]\sin[\varphi(n-1)]$$

即

$$\arg\{s(n)\} - \arg\{s(n-T)\} = I(n)Q(n-1) - Q(n)I(n-1)$$

为了保证采样点 n 在每个符号相位函数的积分最完全点，即避免对正在进行相位积分的点进行采样，在解调开始前需求得前导码的相位曲线的极值点，并将此点作为初始采样点，再以符号频率进行采样[4]。考虑到低信噪比下仅考虑一组采样点的差分信息可能会带来误判，以及加性高斯白噪声的统计性质[5]，可以改进上式

$$NRZI_data = \begin{cases} 1, & \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{0.35fs}{R_b} \rfloor - 1} \arg\{s(n-i)\} - \arg\{s(n-T+i)\} > 0 \\ 0, & \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{0.35fs}{R_b} \rfloor - 1} \arg\{s(n-i)\} - \arg\{s(n-T+i)\} < 0 \end{cases}$$

得到编码信息 NRZI_data 后可以解码得到解调后的原码信息，与最初生成的原码信息进行对比可得误码率。

3.3 研究方案

本课题的研究方案分为三个阶段。第一阶段：本课题初期将对 GFSK 同步和解调算法的相关文献进行深入研究，并对对应算法进行 MATLAB 仿真。第二阶段：在 Modelsim 软件构建整个解调系统的时序逻辑以及测试样例，并对不同信噪比下进行多组仿真，对比误码率与误包率，调整参数与算法以达到最佳性能。第三阶段：使用 vivado 等 FPGA 编程软件，将整个系统烧录入 FPGA 中，并以制作 GFSK 接收机进行多组测试，对比误码率与误包率，调整参数与算法以达到最佳性能。

3.4 可行性分析

(1) 研究目标明确：本课题需要在 FPGA 上实现 GFSK 信号的解调系统，具有

明确的软件仿真与硬件测试的性能指标。

（2）理论分析可行：本课题的研究方案结合软件仿真与硬件测试，能够保证研究有条理地进行，并且算法与实际硬件能够满足既定的性能要求。GFSK 信号的解调算法在 FPGA 上实现，契合 FPGA 的灵活性和可重编程性。GFSK 调制解调算法应用广泛，实际应用在 FPGA 上也验证了其可靠性以及可行性[6]。

四、研究计划及进度安排

2023.12：查阅文献，掌握移动通信相关内容，学习 GFSK 信号发送端和接收端的基本原理和环节构成，并且完成国内外技术发展情况的调研，以及具有代表性的外文文献的翻译工作。期间按照节点撰写周志和开题报告。

2024.01~2024.02：学习使用 MATLAB 软件，对突发 GFSK 通信系统接收端的功能进行 MATLAB 浮点、定点仿真，主要环节包括：突发检测、帧同步、频偏估计与补偿、匹配滤波和差分解调，设计方案能综合考虑社会、健康、安全、法律、文化以及环境等因素。期间按照节点撰写周志，并完成文献翻译工作。

2024.03~2024.04：对突发 GFSK 通信系统接收端的功能进行硬件实现，首先完成 Verilog 代码编写并进行 Modelsim 仿真，验证实验原理以及代码的可行性，再进行 FPGA 硬件测试。期间按照节点撰写周志和中期报告。

2024.05：对所做研究工作进行总结，完成毕业设计论文。同时根据毕业论文的内容，完成答辩 PPT 的制作，并充分准备陈述和提问环节的发言，体现自身的表达能力和沟通交流能力。最终在较好地完成整个课题的任务之后，开发人员能够通过对 GFSK 通信系统的研究，进而对电子信息工程相关领域的理论和技术发展规律有明确的认识，能够了解电子信息领域理论和技术的现状、前沿和发展趋势，了解本行业及相关行业的国际热点问题。

五、创新点及预期研究成果

5.1 创新点

本次毕业设计的核心创新是 GFSK 解调算法的优化以及创新。具体而言，GFSK 同步算法为常用的 GFSK 解调算法为维特比解调算法，该算法通过计算每个状态的累积度量值，并在每一步中选择度量值最低（或最高，取决于具体定义）的路径，最终找到整个序列中最可能的路径，是一种最大似然解码算法。这种算法虽然能在低信噪比的环境下有效减少误码率，然而实现复杂且硬件内存需求量大。而本课题设计的差分解调法能够显著提升解码速度并减少内存需求，并且对同步的要求更低，更加鲁棒，同时在低信噪比下也有较好的误码率表现，从而实现有效高

速传输。

5.2 预期结果

本次毕业设计预期呈现完整的 MATLAB 和 Modelsim 仿真代码，以及详细的同步、解调等算法的性能分析与对比，进而在 FPGA 上实现一个优秀的解调硬件系统。

六、参考文献

[1] Lopez A. Low-Latency GFSK Demodulation Architecture Comparison and Design for FPGA[D]. University of Twente, 2023.

[2] Mengali U. Synchronization techniques for digital receivers[M]. Springer Science & Business Media, 2013.

[3] Dongming B, Xinying Y. An improved Fitz carrier frequency offset estimation algorithm[C]//International Conference on Communication Technology Proceedings, 2003. ICCT 2003. IEEE, 2003, 2: 778-781.

[4] Wang G, Chen J, Bao Z, et al. The implement of synchronization and differential demodulation algorithm of GMSK signal[C]//2023 4th International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (ICECAI). IEEE, 2023: 22-26.

[5] Yu B, Yang L, Chong C C. Optimized differential GFSK demodulator[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(6): 1497-1501.

[6] Long X, Zheng Z, Jiang X, et al. Design of novel digital GFSK modulation and demodulation system for short-range wireless communication application[C]//2016 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). IEEE, 2016: 299-302.

七、指导教师意见

开题报告对任务书的理解正确，研究方案合理可行，符合任务书的要求，并有一定创新性。后面按照研究方案继续执行可使本毕业设计满足本专业毕业要求指标点达成要求，同意通过开题。

签字：



2024 年 3 月 19 日

成绩：优(A+)，占比：10.00%

八、开题审核负责人意见

开题报告对任务书的理解正确，按照所制定的研究方案可满足本专业毕业要求指标点达成要求，同意通过开题。

签字：

陈学海 专用章

2024年3月19日

北京理工大学

本科生毕业设计（论文）

中期报告

基于FPGA的GFSK信号解调算法设计和实现 Design and Implementation of GFSK Demodulation Algorithm on FPGA

学 院:	信息与电子学院
专 业:	电子信息工程
班 级:	05122010
学生姓名:	王润言
学 号:	1120203101
指导教师:	王华

一、毕业设计（论文）主要研究内容、进展情况及取得成果

1.1 主要研究内容

本课题的核心内容是在 FPGA 平台上实现单路突发 GFSK 信号的接收和解调。本次毕业设计通过熟悉无线传输中的突发信号的帧同步、频偏同步、相位同步、定时同步和 GFSK 信号的差分解调的基本原理，掌握 MATLAB 编程软件的基本用法以及 FPGA 编程的基础知识，包括硬件描述语言（如 VHDL 或 Verilog）的使用和 FPGA 开发环境的操作并且学会检索并阅读 IEEE、CNKI 等国内外数据库内的相关技术文献，最终在 MATLAB 软件以及 FPGA 上对单路突发 GFSK 信号解调进行仿真和性能测试及分析。

本课题初步选择对整个 GFSK 调制解调系统进行整体仿真，具体针对 Fitz 频率偏移估计算法、双滑窗突发检测算法、差分解调算法在不同信噪比下进行多组 MATLAB 仿真，并对比误码率等结果。本课题预期呈现完整的 MATLAB 和 Modelsim 仿真代码，以及详细的同步、解调等算法的性能分析与对比，进而在 FPGA 上实现一个优秀的解调硬件系统。

1.2 进展情况及取得结果

1.2.1 不同频率偏移算法的仿真及对比

(1) Fitz 频率估计算法

Fitz 提出的频率估计算法是根据对信号的自相关函数进行计算，得到一个近似的频率估计值。由于前导码的存在，信号的频率偏移估值可以通过将信号的前导码部分与标准前导码进行混频并滤除高频分量，再对其使用 Fitz 频率估计得到。频率偏移 Fitz 定义自相关函数为

$$R(m) \triangleq \frac{1}{L_0 - m} \sum_{k=m}^{L_0} z(k)z^*(k-m) \quad (2)$$

Fitz 频率偏移算法估计的频率偏移可以表示为

$$\hat{\nu} = \frac{1}{\pi N(N+1)T} \sum_{m=1}^N \arg\{R(m)\} \quad (6)$$

(2) Kay 频率估计算法

Kay 提出的频率估计算法将频率偏移量表示为

$$\hat{v} = \frac{1}{2\pi T} \sum_{k=1}^{L_0-1} \gamma(k) \arg\{z(k)z^*(k-1)\} \quad (7)$$

其中 $z(k)$ 、 T 、 L_0 的定义与 Fitz 频率估计算法相同， $\gamma(k)$ 可以表示为

$$\gamma(k) = \frac{3}{2} \frac{L_0}{L_0^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{2k - L_0}{L_0} \right)^2 \right], \quad k = 1, 2, 3, \dots, L_0 - 1 \quad (8)$$

(3) Luise and Reggiannini (L&R) 频率估计算法

Luise and Reggiannini 提出的频率估计算法将频率偏移量表示为

$$\hat{v} = \frac{1}{\pi(N+1)T} \arg\left\{ \sum_{m=1}^N R(m) \right\} \quad (9)$$

其中 $R(m)$ 、 T 、 N 的定义与 Fitz 频率估计算法相同

(4) 不同频率估计算法的仿真结果

根据图 1、2 的仿真结果，Kay 频率估计算法的相对频率偏移量最小。误码率方面 fitz 频率偏移算法总体表现最佳。考虑到噪声的随机性，实际可以选择 Fitz 或者 Kay 频率偏移估计算法。

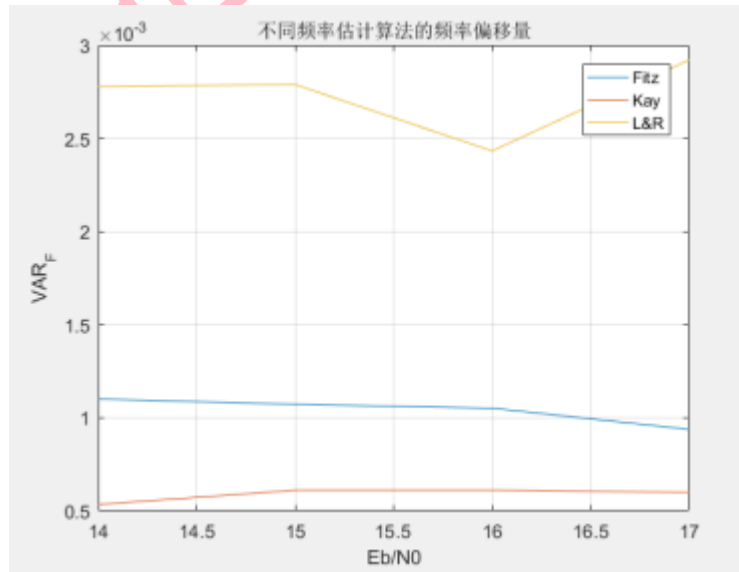


图 1 不同频率估计算法的仿真性能对比

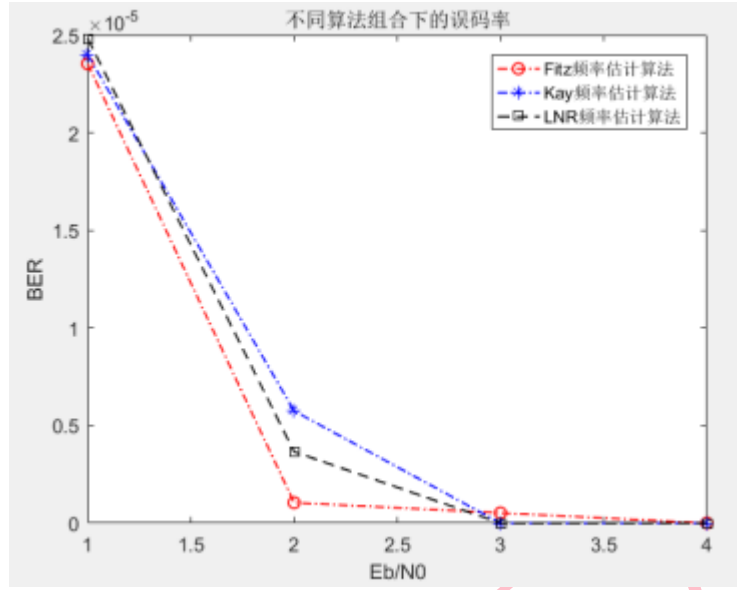


图 2 不同频率估计算法的仿真性能对比

1.2.2 帧头检测算法的设计与仿真

帧头检测算法采用差分相关的思路实现。该算法首先对序列进行共轭差分相干，之后将差分相关后的序列与标准同步序列进行相关计算，得到的峰值点即为同步字的起始点，根据该点可以进行进一步的同步与解调操作。对接收到的 GFSK 采样信号进行共轭得到差分序列 $d(k)$ 。进行共轭差分相干的信号的相位差带来的干扰将会被消除，而频率偏移 ν 将会转化为一个固定的系数，故频率偏移带来的干扰也被消除。由于实际 GFSK 序列进行了差分相干，标准同步序列 $\text{sync}(n)$ 也要进行对应的差分相干，保证峰值点准确对应同步字的起始点。共轭差分相干之后，该算法将在每个采样点计算当前点起始且与标准序列长度相同的 GFSK 信号与标准序列进行相关计算，类似于一个窗口沿时间进行滑动计算相关值 $c(k)$ 如下

$$c(k) = \sum_{i=1}^{L_{\text{sync}}} d(i) \text{sync}(i) \quad (12)$$

其中 sync 为标准同步字序列， L_{sync} 为标准同步字序列长度。之后对得到 $c(k)$ 进行峰值判决即可得到同步字起始点。此时访问 RAM 中 32 个符号周期前的采样点即可得到该帧的起始点，即前导码的起点。

1.2.3 差分解调算法的设计与仿真

在得到确定的帧头与数据段后，则可以对 GFSK 基带信号进行解调。离散 GFSK 基带信号表达式为

$$s(n) = \cos[\varphi(n)] + i \cdot \sin[\varphi(n)] \quad (13)$$

GFSK 基带信号的符号间的相位差代表了码元信息，故可以使用差分法进行抽样判决，得到解调后的编码信息，即

$$NRZI_data = \begin{cases} 1, & \arg\{s(n)\} - \arg\{s(n-T)\} > 0 \\ 0, & \arg\{s(n)\} - \arg\{s(n-T)\} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

相位信息可以由前后 I、Q 分量计算得出

$$\theta\{s(n)\} - \theta\{s(n-T)\} = \sin[\varphi(n)]\cos[\varphi(n-1)] - \cos[\varphi(n)]\sin[\varphi(n-1)] \quad (15)$$

即

$$\arg\{s(n)\} - \arg\{s(n-T)\} = I(n)Q(n-1) - Q(n)I(n-1) \quad (16)$$

为了保证采样点 n 在每个符号相位函数的积分最完全点，即避免对正在进行相位积分的点进行采样，在解调开始前需求得前导码的相位曲线的极值点，并将此点作为初始采样点，再以符号频率进行采样。考虑到低信噪比下仅考虑一组采样点的差分信息可能会带来误判，以及加性高斯白噪声的统计性质，可以改进上式

$$NRZI_data = \begin{cases} 1, & \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{0.35fs}{R_b} \rfloor - 1} \arg\{s(n-i)\} - \arg\{s(n-T+i)\} > 0 \\ 0, & \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{0.35fs}{R_b} \rfloor - 1} \arg\{s(n-i)\} - \arg\{s(n-T+i)\} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

得到编码信息 $NRZI_data$ 后可以解码得到解调后的原码信息，与最初生成的原码信息进行对比可得误码率。

1.2.4 整体 GFSK 解调算法的仿真

在不同信噪比下，将 GFSK 信号产生，经过信道之后，分步使用帧头检测算法、频率估计算法、以及差分解调算法得到 GFSK 解调结果，对比原始数据得到误码率，结果如图 3 所示：

通过结果可以看到，不使用位同步算法并使用 IQ 解调算法的性能最优。整体仿真在 $E_b/N_0=14$ ($SNR=5$) 时误码率约为 $2e-5$ ，在 $E_b/N_0=17$ ($SNR=8$) 时误码率为 0

，基本满足 MATLAB 仿真性能要求。

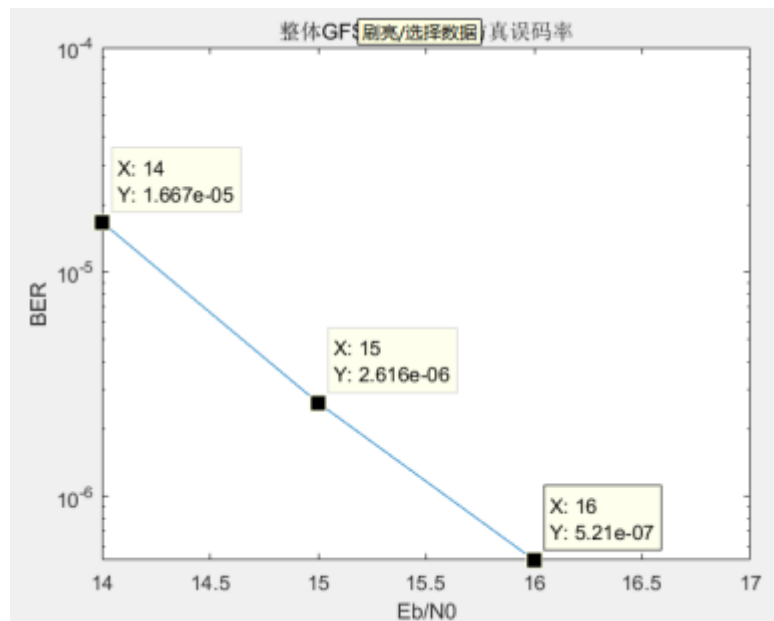


图 3 整体 GFSK 信号解调的仿真结果

二、存在的问题和拟解决方案

2.1 存在的问题

2.1.1 算法时间复杂度问题

由于帧头检测需要做差分相干，每个采样点都需要做一次相关计算，这样的计算一次需要计算 128 个复数乘法，时间复杂度高。差分解调为了提升解调的鲁棒性，需要在解调采样周期的头部与尾部选取一段进行差分计算，也需要考虑其时间复杂度问题。

2.1.2 位同步问题

位同步算法是初期确立的一种时钟同步算法，旨在确定解调的差分点。然而整体仿真算法进行位同步之后的误码率反而比直接解调的误码率要高，如图 4 所示。

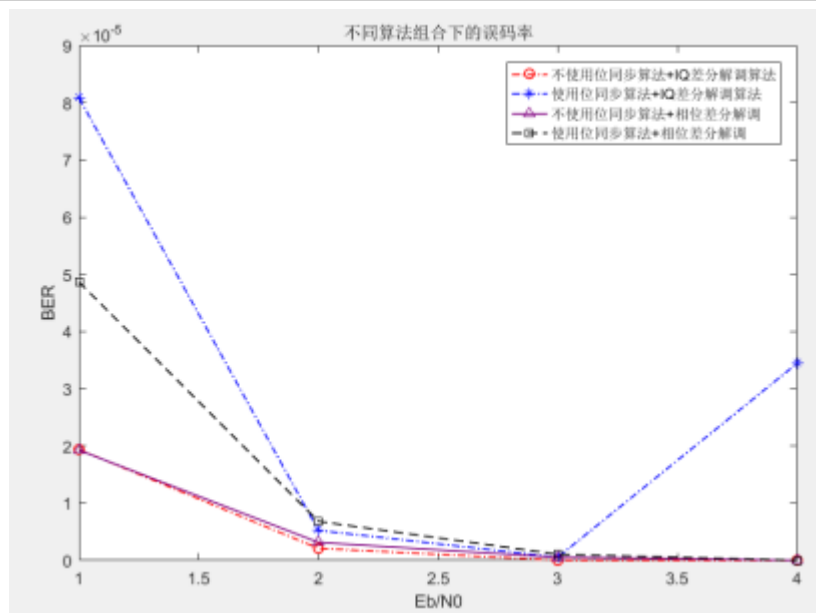


图 4 整体 GFSK 信号解调的位同步性能仿真结果对比

2.1.3 频率偏移问题

由于频率偏移只能以帧头的具有周期性的前导码进行补偿，而该补偿具有误差，在当前帧的频率补偿之后的一段时间内可能误差会被放大。同时帧中也可能出现频率偏移的浮动。

2.2 拟解决的方案

2.2.1 算法时间复杂度问题拟解决方案

目前拟考虑采用 RAM 和累加器结合的方式实现需要取一段数据进行计算的操作即两个不同延时的累加器的累加结果进行差分可以等价于延时段数据的累加，可以节省一定的时间复杂度。

2.2.2 位同步问题拟解决方案

拟采用牺牲时间空间复杂度的方式提高位同步算法的准确度，若无法达到比直接进行解调更优的性能，则参考其他文献进行仿真与对比。

2.2.3 频率偏移问题拟解决方案

拟在每一帧的开始都重新进行频率偏移估计。帧中可能出现的频率偏移浮动需要继续仿真验证这样的浮动不会影响解调的性能。

三、下一步研究任务与进度安排

2024.04: 对突发 GFSK 通信系统接收端的功能进行硬件实现, 首先完成 Verilog 代码编写并进行 Vivado 的行为仿真, 验证实验原理以及代码的可行性, 再进行 FPGA 硬件测试。

2024.05: 对所做研究工作进行总结, 完成毕业设计论文。同时根据毕业论文的内容, 完成答辩 PPT 的制作, 并充分准备陈述和提问环节的发言, 体现自身的表达能力和沟通交流能力。最终在较好地完成整个课题的任务之后, 开发人员能够通过对 GFSK 通信系统的研究, 进而对电子信息工程相关领域的理论和技术发展规律有明确的认识, 能够了解电子信息领域理论和技术的现状、前沿和发展趋势, 了解本行业及相关行业的国际热点问题。

四、指导教师意见

该生在前期工作中正确理解了毕业设计任务书要求, 掌握了 GFSK 信号的解调原理, 设计了调制解调方案, 出色完成了部分算法的仿真等工作。期间该生工作安排合理, 学习态度认真, 课题进展符合预期计划, 后续按照研究方案继续执行可使本毕业设计满足本专业毕业要求指标点达成要求, 同意通过中期审查。

签字:

指导教师专用章

2024年4月23日

成绩: 优(A+), 占比: 10.00%

五、中期审核负责人意见

该生按照任务书要求完成了相应内容的研究与分析工作, 毕业要求指标点达成进度符合预期, 同意通过本环节考核。

签字:

审核人专用章

2024年4月23日

毕业设计（论文）指导教师评语表

指导教师对毕业设计（论文）的评语：

王润言同学的毕业设计论文研究了GFSK信号的解调算法设计和FPGA实现，完成的主要工作包括GFSK解调算法设计和MATLAB仿真分析，在此基础上，基于Verilog对算法进行了设计和实现，并对性能进行了测试，完全满足毕业设计任务要求；论文方案合理、论证充分、结论正确，表明作者具备强的综合运用所学理论和专业知识能力；论文内容完整、结构合理、表述清楚，符合毕业设计论文的撰写规范要求。

是否有校外指导教师：○是 ☒ 否；若选择“是”，校外指导教师对毕业设计（论文）的评语：

成绩：优(A+)，占比 10.00%

指导教师

指导教师专用章

2024年5月26日

毕业设计（论文）匿名评阅评语表 1

学生姓名	王润言	学号	1120203101
学院	信息与电子学院	班级	05122010
专业	电子信息工程		
指导教师	王华	指导教师 所在学院	信息与电子学院
题目	基于 FPGA 的 GFSK 信号解调算法设计和实现		
评阅结果	良 (A)，占比 0.00%		
<p>评语：</p> <p>论文研究基于 FPGA 的 GFSK 信号调制解调算法，具有实际应用价值。论文的主要工作包括设计了面向突发 GFSK 的同步与解调方案，并在 FPGA 设计平台 完成了硬件实现，完成了任务书要求。论文立论正确，技术方案可行，结论合理。 论文结构逻辑清晰，论述充分，文字通顺，符合科技论文写作规范。 论文工作表明作者能综合运用所学理论和专业知识开展研究工作，具备较强的/一定的解决复杂工程问题的能力，较好地实现了毕业设计环节对毕业能力达成的相关要求。同意进行论文答辩。</p>			
<p>评阅人：</p> <p>2024 年 5 月 24 日</p>			

毕业设计（论文）匿名评阅评语表 2

学生姓名	王润言	学号	1120203101
学院	信息与电子学院	班级	05122010
专业	电子信息工程		
指导教师	王华	指导教师 所在学院	信息与电子学院
题目	基于 FPGA 的 GFSK 信号解调算法设计和实现		
评阅结果	良 (A)，占比 0.00%		
<p>评语：</p> <p>论文面向 GFSK 信号的调制解调问题开展研究，选题具有一定的实际应用意义。论文的主要工作包括：通过设计帧同步算法、频率偏移估计与补偿算法、位同步算法以及优化差分检验解调法，在低信噪比下实现了对突发信号的检测，频率偏移与定时误差的补偿以及高鲁棒性的解调，基本完成了任务书要求。论文立论基本正确，技术方案可行，结论合理，结构清晰，论述充分，文字通顺，符合科技论文写作规范。论文工作表明作者基本实现了毕业设计环节对毕业能力达成的相关要求。同意进行论文答辩。</p> <p>1.建议摘要部分对本文所做工作或者创新点进行分点描述，突出研究工作。</p> <p>2.注意格式规范性，例如：</p>			

北京理工大学本科生毕业设计（论文）评语表

检查摘要与全文，英文缩写首次出现时，应给出中英文全称；合理布局图片尺寸，避免出现大幅度空白页；图与图注应保持在同一页；

3.建议细化第一章研究内容部分，介绍论文创新/研究点间的联系。

4.应用拓展：建议进一步拓展研究范围，探索算法在其他信号领域的应用可能性。

评阅人：

2024 年 5 月 23 日

毕业设计（论文）答辩评语表

答辩委员会（小组）组长			
姓名		职称	签字
王华		教授	
答辩委员会（小组）组员	姓名	职称	签字
	曾鸣	预聘助理教授	
	李彬	预聘助理教授	
	何东轩	预聘助理教授	
	李孟喜	教授级高工	

答辩中提出的主要问题及回答的简要情况：

问题 1: 4-2 帧同步算法的仿真图结果为什么都是 0？多少信噪比下会出现错误？

回答 1: 帧同步算法是根据性能指标中的指定信噪比下仿真的，以说明帧同步能够正确完成。此后会在其余信噪比下仿真错误率。

问题 2: 第三节解调算法的优化的 Nd 的意义是什么，选择 Nd 的依据是什么？

回答 2: Nd 是额外设置的抽样判决点的数量，以优化解调性能。选择依据是一篇期刊，论文提到额外设置判决点可以提升解调性能，且数量应为 0.35 倍上采样率最佳。

北京理工大学本科生毕业设计（论文）评语表

问题 3: 图 4-1 是不是应该是信道过程, 而不是信道处理。

回答 3: 是的老师, 不好意思, 我下来之后修改一下。谢谢老师指正!

问题 4: 第二节解调算法推导中 \arg 是什么意思? 应该详细推导一下, 如符号 1 对应的相交应该是多少, 符号 0 对应的相角应该是多少。

回答 4: \arg 是求相角的意思, 因为基带 GFSK 信号是复信号, 故对其求相角可以得到其相位信息, 从而用此信息解调。下去以后我会详细推导一下, 感谢老师指正!

问题 5: 你的结论有点像期刊论文, 建议下去阅读一下学位论文的结论, 需要提出结论和创新点, 且有展望。

回答 5: 好的, 感谢老师的指正, 下来我会认真修改。

答辩委员会（小组）代表（签字）：

印学专用

2024 年 6 月 4 日

北京理工大学本科生毕业设计（论文）评语表

答辩委员会（小组）的评语：

王润言同学论文面向 GFSK 信号解调算法设计和 FPGA 实现展开研究，选题具有一定的实际应用价值。设计完成了针对 GFSK 信号的位同步算法和解调算法，测试结果表明该算法的误码率和解调速率达到任务书要求。论文较好地完成了任务书要求。有一定的独立工作能力，了解本专业技术领域的现状、前沿和发展趋势；具备解决复杂工程问题的能力。

论文条理清楚，论述正确，答辩时思路较清晰，回答问题正确。

答辩委员会一致同意通过论文答辩。

答辩委员会（小组）代表（签字）：

2024 年 6 月 4 日

答辩委员会（小组）给定的成绩：良(A)，占比 60.00%

答辩委员会（小组）主任（签字）：

2024 年 6 月 4 日

北京理工大学本科生毕业设计（论文）评语表

最终成绩：良(A)

成绩构成及占比：

开题成绩：优(A+), 占比：10.00%

中期成绩：优(A+), 占比：10.00%

外文翻译成绩：优(A+), 占比：10.00%

指导教师评阅成绩：优(A+), 占比：10.00%

匿名评阅成绩：良(A), 占比：0.00%

答辩成绩：良(A), 占比：60.00%

指导教师签字：

2024年6月4日

责任教授签字：

2024年6月4日

毕业设计（论文）开始日期 2023年12月15日

截止日期 2024年6月4日

毕业设计（论文）答辩日期 2024年6月4日