

西安电子科技大学

基础训练项目 课程实验报告

实验名称 脉冲星轮廓信号的处理和分析

学院 班

姓名 学号

同作者 无

实验日期 2022 年 5 月 13 日

成绩

指导教师评语：

指导教师：沈利荣

年 月 日

实验报告内容基本要求及参考格式

一、实验目的

二、实验所用仪器（或实验环境）

三、实验基本原理及步骤（或方案设计及理论计算）

四、实验数据记录（或仿真及软件设计）

五、实验结果分析及回答问题（或测试环境及测试结果）

目录

一、实验目的.....	1
二、实验器材与环境.....	1
三、实验背景.....	1
四、实验原理.....	1
4.1 脉冲星导航	1
4.1.1 背景	1
4.1.2 X 射线脉冲星导航简介	2
4.2 MATLAB 涉及操作.....	4
4.2.1 Cftool 工具箱.....	5
4.2.2 MATLAB 数据的加载和保存方法	6
4.3 控制变量法	6
4.4 信噪比.....	6
4.5 高斯白噪声	7
五、实验内容和步骤.....	9
5.1 脉冲星光子到达概率密度函数的获取	9
5.2 脉冲星信号脉冲轮廓的产生及影响因素分析	10
5.2.1 不含噪声脉冲星信号脉冲轮廓的产生及影响因素分析.....	10
5.2.2 含噪声脉冲星信号脉冲轮廓的产生及影响因素分析	12
5.2.3 含高斯白噪声脉冲星信号脉冲轮廓的产生及影响因素分析.....	13
六、课程学习心得	15
七、源代码.....	15
8.1 get_probability_density.m	15
8.2 f_getproden.m	16
8.3 f_getconmod.m	17
8.4 f_getnoicon.m	17
8.5 testfunction4.m.....	17
8.6 SNR.m	19
8.7 GausswhiteNoise.m	20
八、参考文献.....	21

一、实验目的

1. 了解和认识脉冲星及脉冲星导航的基本概念；
2. 学会用 MATLAB 进行脉冲星信号的处理的基本方法；
3. 掌握基于 MATLAB 工具的脉冲星信号的脉冲轮廓分析方法；
4. 探索脉冲星信号的轮廓特性，研究实际探测器接收到的脉冲星信号中脉冲星信号到达速率和宇宙背景噪声到达速率对累积脉冲轮廓的影响，并探索和分析其中的现象和规律。

二、实验器材与环境

1. 电脑，型号为 Magicbook 16 Pro, CPU 的型号为 AMD Ryzen 7 5800H with Radeon Graphics，基本满足本实验的性能使用。
2. DELL 显示屏，HDMI 数据线等。
3. 所有操作均在西安电子科技大学南校区 G220 实验室完成。

三、实验背景

当前空间科学领域导航技术发展迅猛，脉冲星作为一项优良的导航技术成为目前热门科研方向。为了让学生能结合实际科研项目进行实践和提高，本实验旨在让学生了解脉冲星及脉冲星导航的基本科研情况，同时让学生掌握基本 MATLAB 的编程技术和相关工具箱的使用。

四、实验原理

4.1 脉冲星导航

4.1.1 背景

近年来航天发展需求及频繁的深空探索活动等对导航技术提出了更高的要求。惯性导航的误差随时间累计，设备价格昂贵。卫星导航依赖人工信标，易受干扰和破坏。地磁导航的精度受地磁场模型和地磁测量精度影响。天文导航需储存恒星星图和天文观测数据，储存量大。无线电导航也易被发现和干扰，需要导航台支持。

脉冲星优越特性有助于高精度自主守时和定位。因此，近年来，基于 X 射线脉冲星导航成为了国内外学者广泛研究的重点。

1974 年,美国科学家首次提出利用射电脉冲星的辐射信号进行行星际航天器自主导航,并在不存在相位整周模糊度的假设和不考虑广义相对论效应的情况下给出了轨道确定方法。然而,该研究表明,对于选定的 27 颗射电脉冲星,需要直径约 25 米的大天线以及长达 24h 的积分时间才能检测到它们微弱的辐射信号,并最终获得 150km 量级的定位精度。

同时，目前广泛使用的卫星导航和无线电导航等方式也存在严峻挑战。近

地航天器急剧增加,地面测控站负担巨大;深空探测距离遥远,导航时延大,航天器安全性等难保障;战时测控站、卫星等易受干扰破坏而使导航系统瘫痪。

因此,研究自主性强、精度高、导航范围广、导航时间长、智能化、低成本的新型导航方法势在必行。

4.1.2 X 射线脉冲星导航简介

脉冲星是大质量恒星演化、坍缩、超新星爆发的遗迹,是一种真有极端物理条件的天体,脉冲星属于高速自转的中子星,具有极其稳定的周期性,毫秒级脉冲星的自转周期变化率达到 $10^{-19} \sim 10^{-21}$,被誉为自然界最稳定的天文时钟。脉冲星在射电、红外、可见光、紫外、X 射线或 γ 射线等频段具有信号辐射。脉冲星具有独特的脉冲轮廓。X 射线属于高能光子,集中了脉冲星的绝大部分辐射能量,易于小型化设备探测与处理,可以在大气层外飞行的航天器上探测到。

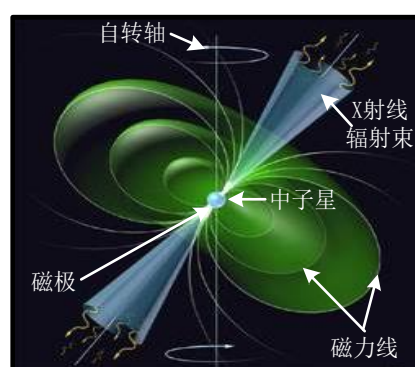


图 1 天然“灯塔”脉冲星特性

脉冲星(Pulsar),是中子星的一种,会周期性向外辐射信号,直径大多为 20 千米左右,自转极快,具有超高稳定性。其可在射电波段、X 射线波段、gama 射线波段辐射信号。因其超高的稳定性和稳定的空间几何分布,近年来,脉冲星导航被广泛研究。

脉冲星导航可用的信号有两种:一种是射电波段辐射的脉冲星信号,该信号是一连串非常窄的脉冲,可穿透大气层,可在地面利用射电望远镜进行探测。一种是 X 射线脉冲星信号,该信号难以穿透大气层,易被大气吸收,必须在航天器上搭载 X 射线探测器进行探测并利用其进行导航。选用空间不同位置处的三颗脉冲星,即可实现航天器的三维位置的确定。

射电脉冲星信号是单脉冲,通过把观测的每个脉冲信号累加到第一个周期,可实现脉冲的累积,形成高信噪比的脉冲轮廓,该脉冲轮廓可反映脉冲星信号在一个周期的概率密度分布。是一个周期性的连续波形。其单脉冲形式如图 2 所示,轮廓累积过程如图 3 所示,累积结果如图 4 所示。



图 2 射电脉冲星信号形式

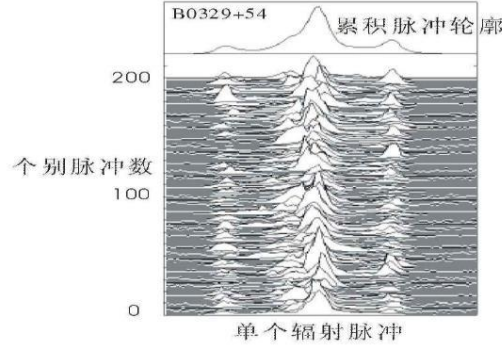


图3 射电脉冲星信号的轮廓累积图

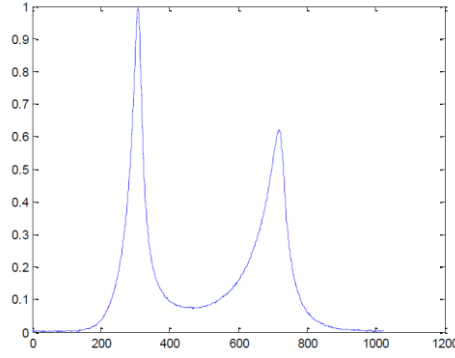


图4 射电脉冲星连续信号波形

此外，因为脉冲星距离地球非常遥远，脉冲星 X 射线辐射的信号从脉冲星辐射出来经传播过程的衰减，探测器处接收到的 X 射线脉冲星信号已是单光子序列。所以我们处理的 X 射线脉冲星光子到达时间序列是随机离散时间序列，具有非等间隔到达的特性。

设 X 射线脉冲星信号观测时间间隔为 $\{t_o, t_f\}$ ，总观测时间为 $T_{obs} = t_f - t_o$ ，

令 t_i 表示探测器处接收到的第 i 个光子到达时间，则任意递增光子到达时间序列

$\{t_1, t_2, \dots, t_M\}$ 满足 $t_o < t_1 < t_2 < \dots < t_M \leq t_f$ 的集合可表示为 $\{t_i\}_{i=1}^M$ 。

实际探测的 X 射线脉冲星信号不仅包含脉冲星辐射的源信号，还包含宇宙背景噪声。宇宙背景光子辐射服从齐次泊松模型， $(0, t)$ 区间内所探测到的 X 射线光子数服从 Ni 非齐次泊松过程(NHPP)，其强度函数为：

$$\lambda(t) = \lambda_b + \lambda_s h(\phi_0 + (t - t_0)(1 + \frac{v}{c})f_s)$$

脉冲星信号具有很好的周期稳定性，周期稳定性可达到 10^{-19} s/s，通过对接收到的光子到达时间序列进行周期折叠，把他们都折叠到第一个周期内，就可以获得累计脉冲轮廓。该轮廓也是一个离散序列。

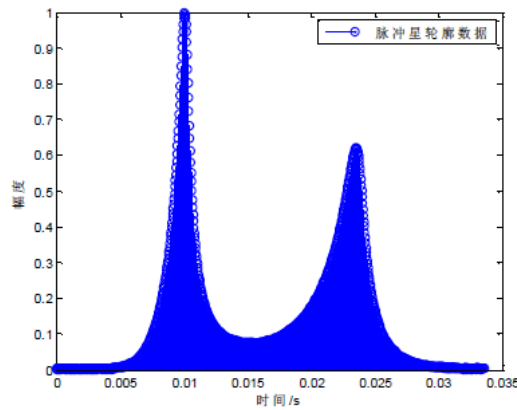


图 5 X 射线脉冲星光子到达时间累积脉冲轮廓

在航天器上搭载 X 射线脉冲星信号的探测器，接收脉冲星信号，比较在航天器处接收到的光子到达时间和在惯性坐标系（一般选取在太阳系质心）参考点处接收到的同一颗星的光子到达时间，可计算光子到达时间差

$$\Delta t = t_{ssb} - t_{sc}$$

该时间差就反应了航天器相对于惯性参考点的距离信息：

$$r = c \times \Delta t$$

同时在航天器上接收空间不同位置处的三颗脉冲星的信号，可确定航天器的三维位置和速度，其脉冲星导航示意图如下图所示。

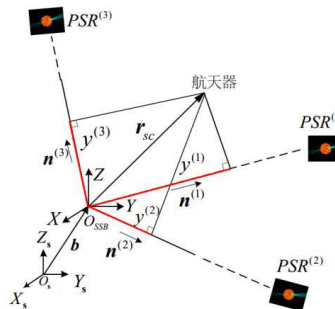


图 6 脉冲星导航示意图

4.2 MATLAB 涉及操作

MATLAB 是矩阵实验室（Matrix Laboratory）的缩写，是一个非常强大的计算工具，主要用于矩阵的存取、通用数值计算、算法设计等，其含有的信号处理工具箱中，具有大量基本信号处理的封装函数，本实验的 cftool 就是这个工具箱。

MATLAB 开发环境是一个友好的界面，如下图所示。主要有工作空间（查阅程序中调入、产生和保存的数据、及类型）、程序编辑区（进行程序的编写）、命令输入区（进行命令的输入）、历史命令区（查阅历史命令）等组成。不同的操作应该在不同的区域进行。

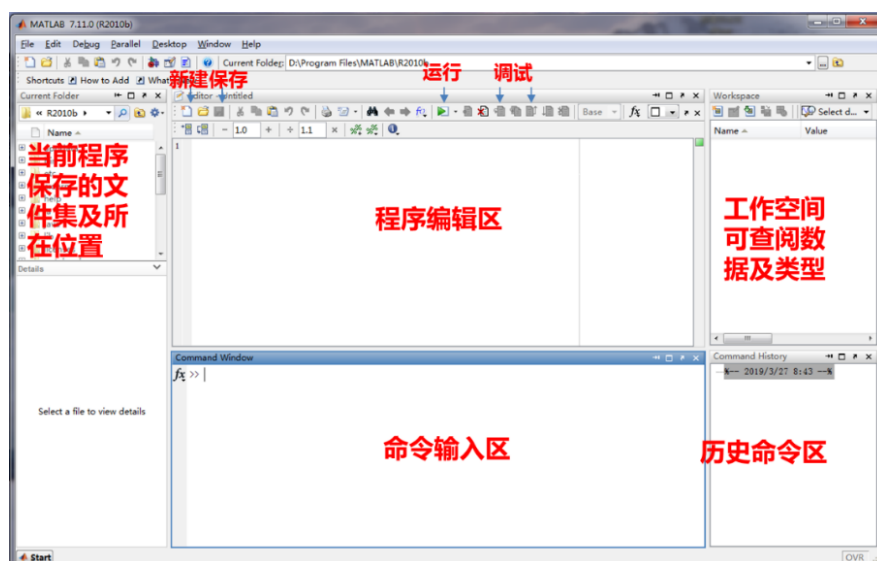


图 7 MATLAB 开发环境

4.2.1 Cftool 工具箱

Cftool 为本次实验的核心工具箱。cftool 描述曲线拟合应用程序提供了一个灵活的界面，该程序可以交互式地拟合曲线和曲面的数据和查看图。该程序可以：

1. 创建，情节，并比较多种匹配。
2. 使用线性或非线性回归、插值、平滑和自定义方程。
3. 查看拟合优度统计，显示置信区间和残差，移除异常值并评估与验证数据的拟合。
4. 自动生成代码来拟合和绘制曲线和曲面，或者将拟合导出到工作区以进行进一步的分析。

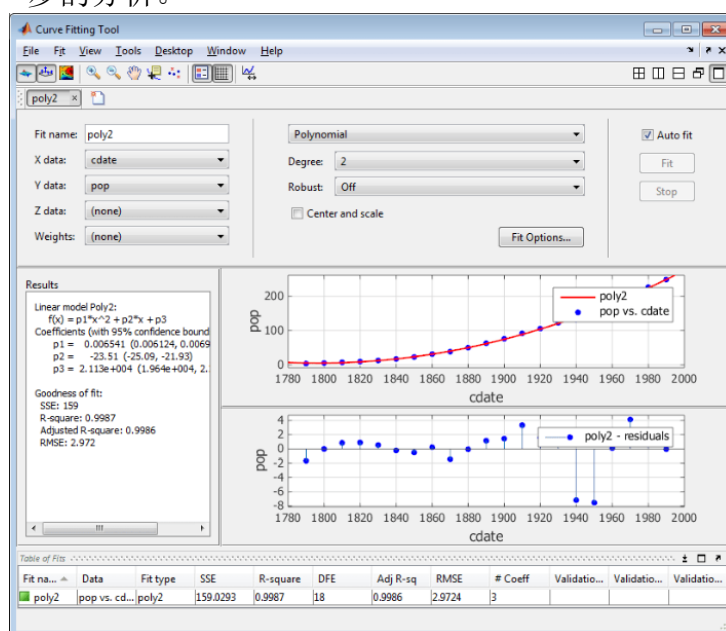


图 8 Curve Fitting App

本实验将导入的数据，通过 cftool 进行拟合，当拟合函数比较符合实际数据曲线时，从而得到最后拟合曲线及其方程。

4.2.2 MATLAB 数据的加载和保存方法

1、保存方法（1）：save, 保存为.txt 文件

命令语句：save *****.txt** -ascii x; %x 为变量；*.txt 为文件名。

该文件存储于当前工作目录下

保存方法（2）：save, 保存为.mat 文件

命令语句：save(filename,variables) %保存 variables 指定的结构体数组的变量或字段。

例：A=[1 2 3 4 5 6 8 8 8 8 9];

save('file1.mat','A'); %将变量 A 保存到当前文件夹中的 file1.mat。

save('E:\room\MATLAB\apt\file1.mat','A');

%将变量 A 保存到指定文件夹中的 file1.mat。

2、加载方法（1）：load

命令语句：bbb=load('***.txt');

加载方法（2）：load

命令语句：load -mat 'tssb.mat'

4.3 控制变量法

在最原始的定义中，**控制变量法**（英语：control variates）是在[蒙特卡洛方法](#)中用于减少[方差](#)的一种技术方法。该方法通过对已知量的了解来减少对未知量估计的误差。

然而，物理学中对于多因素（多变量）的问题，常常采用控制因素（变量）的方法，把多因素的问题变成多个单因素的问题。每一次只改变其中的某一个因素，而控制其余几个因素不变，从而研究被改变的这个因素对事物的影响，分别加以研究，最后再综合解决，这种方法叫控制变量法。它是科学探究中的重要思想方法，广泛地运用在各种科学探索和科学实验研究之中。

1. 独立变量，即一个量改变不会引起除[因变量](#)以外的其他量的改变。只有将某物理量由独立变量来表达，由它给出的[函数关系](#)才是正确的。

2. 非独立变量，一个量改变会引起除因变量以外的其他量改变。把非独立变量看做是独立变量，是确定物理量间关系的一大忌。

正确确定物理表达式中的物理量是常量还是变量，是独立变量还是非独立变量，不但是正确解答有关问题的前提和保障，而且还可以简化解答过程。

方法点播：当一个问题与多个因素有关时，探究该问题与其中某个因素的关系时，通常采用控制变量法。

在物理相关的研究中经常使用控制变量法。在本实验中，脉冲星信号的脉冲轮廓受到探测器面积、脉冲星辐射流率等因素影响，在探究不同因素对脉冲星信号的脉冲星轮廓时需要使用控制变量法。

4.4 信噪比

信噪比（英语：Signal-to-noise ratio，缩写为 SNR 或 S/N），又称訊噪比，

是科学和工程中所用的一种度量，用于比较所需信号的强度与背景噪声的强度。其定义为信号功率与噪声功率的比率，以分贝（dB）为单位表示。大于比率 1:1（高于 0 分贝）表示信号多于噪声。信噪比通常用于描述电子信号，也可以应用在各种形式的信号，比如冰芯内的同位素量，或细胞间的生物化学信号。

信噪比具体所指为有用信号功率（Power of Signal）与噪声功率（Power of Noise）的比。因此为幅度（Amplitude）平方的比：

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} = \frac{A_{\text{signal}}^2}{A_{\text{noise}}^2}$$

它的单位一般使用分贝，其值为十倍对数信号与噪声功率比：

$$\text{SNR(dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \right)$$

其中

P_{signal} 为信号功率（Power of Signal）。

P_{noise} 为噪声功率（Power of Noise）。

A_{signal} 为信号幅度（Amplitude of Signal）。

A_{noise} 为噪声幅度（Amplitude of Noise）。

4.5 高斯白噪声

所谓高斯白噪声(White Gaussian Noise)中的高斯是指概率分布是正态函数，而白噪声是指它的二阶矩不相关，一阶矩为常数，是指先后信号在时间上的相关性。高斯白噪声是分析信道加性噪声的理想模型，通信中的主要噪声源——热噪声就属于这类噪声。

具体高斯白噪声可以从以下两个方面进行了解：

（1）如果一个噪声，它的瞬时值服从高斯分布，而它的功率谱密度又是均匀分布的，则称它为高斯白噪声。

（2）在一般的通信系统的工作频率范围内热噪声的频谱是均匀分布的，好像白光的频谱在可见光的频谱范围内均匀分布那样，所以热噪声又常称为白噪声。由于热噪声是由大量自由电子的运动产生的，其统计特性服从高斯分布，故常将热噪声称为高斯白噪声。

高斯白噪声的功率谱密度服从均匀分布，幅度分布服从高斯分布。高斯白噪声在任意两个不同时刻上的随机变量之间，不仅是互不相关的，而且还是统计独立的。

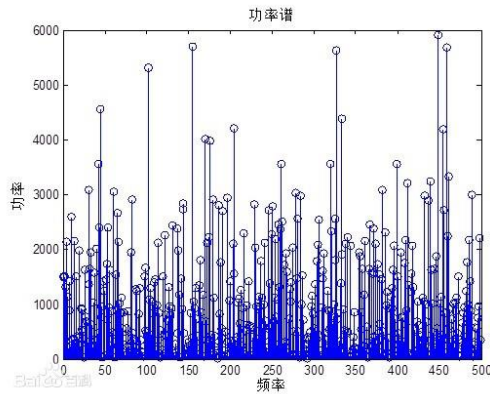


图 9 功率谱密度频谱图

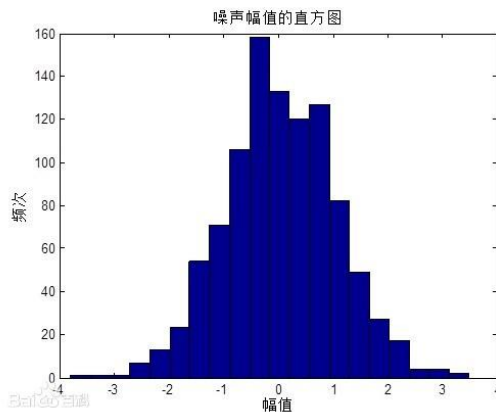


图 10 噪声幅值的直方图

在 MATLAB 中使用 WGN() 或 AWGN()函数来生成白噪声。

WGN: 产生高斯白噪声

$y = \text{wgn}(m, n, p)$ 产生一个 m 行 n 列的高斯白噪声的矩阵, p 以 dBW 为单位指定输出噪声的强度。

$y = \text{wgn}(m, n, p, \text{imp})$ 以欧姆(Ohm)为单位指定负载阻抗。

$y = **\text{wgn}(\dots, \text{outputtype})**$ 指定输出类型, OUTPUTTYPE 可以是 'real' 或 'complex' 来获得复噪声信号。

$y = **\text{wgn}(\dots, \text{powertype})**$ 指定 p 的单位。POWERTYPE 可以是 'dBW', 'dBm' 或 'linear'。线性强度(linear power)以瓦特(Watt)为单位。

linear 表示线性强度 (linear power), 单位为 Watt。如果输入其他: 'dBw' 或缺省则表示用 dBw 作为功率单位

AWGN: 在某一信号中加入高斯白噪声

$y = \text{awgn}(x, \text{SNR})$ 在信号 x 中加入高斯白噪声。信噪比 SNR 以 dB 为单位。 x 的强度假定为 0dBW。如果 x 是复数, 就加入复噪声。

$y = \text{awgn}(x, \text{SNR}, \text{SIGPOWER})$ 如果 SIGPOWER 是数值, 则其代表以 dBW 为单位的信号强度; 如果 SIGPOWER 为 'measured', 则函数将在加入噪声之前测定信号强度。

$y = \text{awgn}(x, \text{SNR}, \text{SIGPOWER}, \text{STATE})$ 重置 RANDN 的状态。

$y = \text{awgn}(\dots, \text{POWERTYPE})$ 指定 SNR 和 SIGPOWER 的单位。POWERTYPE 可以是 'dB' 或 'linear'。如果 POWERTYPE 是 'dB', 那么 SNR 以 dB 为单位, 而 SIGPOWER 以 dBW 为单位。如果

POWERTYPE 是'linear', 那么 SNR 作为比值来度量, 而 SIGPOWER 以瓦特为单位。

五、实验内容和步骤

5.1 脉冲星光子到达概率密度函数的获取

已知 Crab 脉冲星一个周期内光子到达的概率密度, 如附件 1 (“data.txt”):

利用 MATLAB 设计一个拟合程序或者采用某种工具, 获取 Crab 脉冲星辐射的光子到达的概率密度函数 $h(t)$; 其中, Crab 脉冲星周期为 0.0335s; 拟合 RMSE ≤ 0.01 。

将 Crab 脉冲星一个周期内光子到达的概率密度导入到 MATLAB 中, 以 1024×2 的矩阵存储, 并从中提取出时间数据和概率密度数据, 分别导入两个 1×1024 的矩阵中, 使用 plot 函数绘制出时间与概率密度图像。为了用时间和概率密度数据拟合出 Crab 脉冲星概率密度轮廓, 通过 8.1 get_probability_density.m 可以调用 cftool, 选择 Gaussian, 同时选择 number of terms 为 6 的拟合, 最后在如下图 11 中左边的拟合函数, 最后封装函数在 8.2 f_getproden.m。其周期和拟合 RMSE 均符合要求。

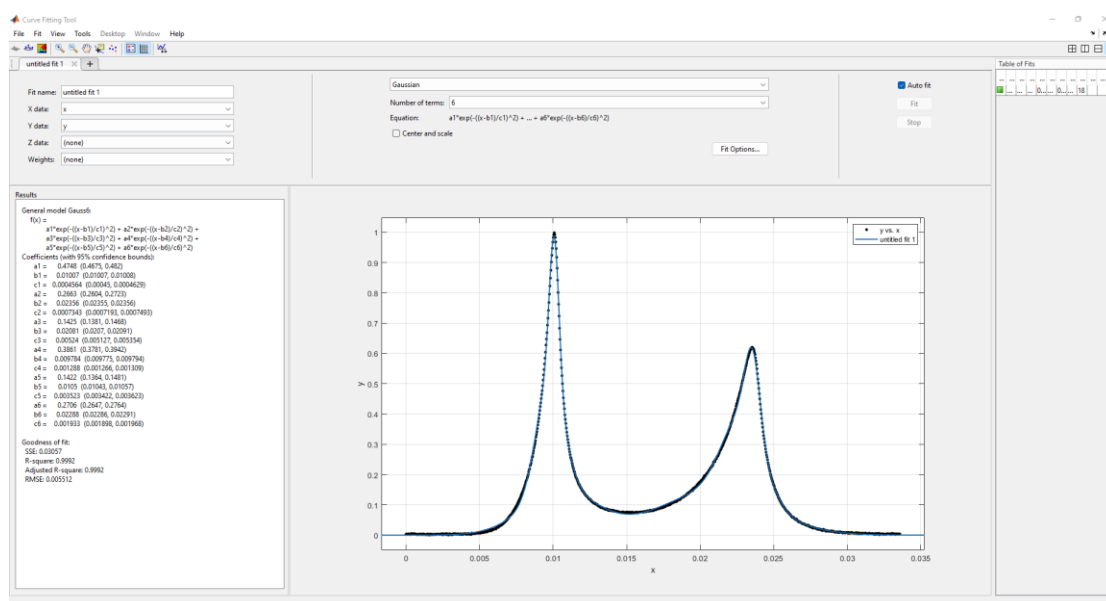


图 11 Cftool 工具箱的使用

分别将原始数据和拟合得到的图像放在一张图中进行比较。经过观察, 两者似乎差异并不是很大。为了进一步对比拟合得到的图像和原始数据得到的图像是否误差过大, 我将两个做差, 进行作图。如图 12 所示, 黄色线为误差波动曲线, 其他两条为原始数据和拟合函数做出的图。

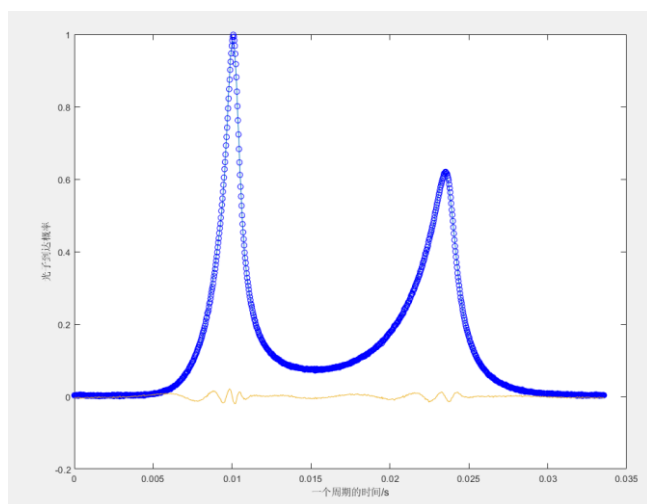


图 12 原始和拟合函数的图像 两者误差分析
题中要求单独贴出概率密度函数的图形如图 13:

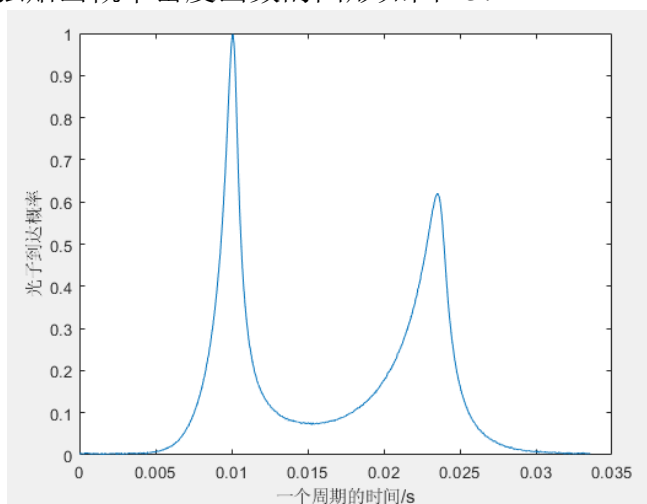


图 13 概率密度函数的图形

5.2 脉冲星信号脉冲轮廓的产生及影响因素分析

5.2.1 不含噪声脉冲星信号脉冲轮廓的产生及影响因素分析

脉冲星信号轮廓的影响因素有很多，本小节在不含噪声的脉冲星信号的基础上，仅先研究探测器面积和脉冲星辐射射流率对其的影响。

首先，依据设计 MATLAB 程序，产生不同探测器面积 A (Aera)、不同脉冲星辐射流率 (rate_pulsar) 下的脉冲星信号轮廓波形。其中：一定面积下的脉冲星信号的辐射速率 $\lambda a = A \times \text{rate_pulsar}$ ；不带噪声，仅考虑脉冲星辐射的信号累积脉冲星轮廓波形为： $f(t) = \lambda a \times h(t)$ ；

依据如上要求，将不含噪声脉冲星脉冲轮廓的产生封装成一个函数 8.3 f_getconmod.m。

随后，将对应参数代入得到对应的脉冲轮廓。即，产生探测器面积分别为 100cm²、150cm²、200cm² 下、脉冲星辐射流率分别为 rate_pulsar=15ph/s/cm²、rate_pulsar=30ph/s/cm² 的脉冲轮廓；如图 14 所示。

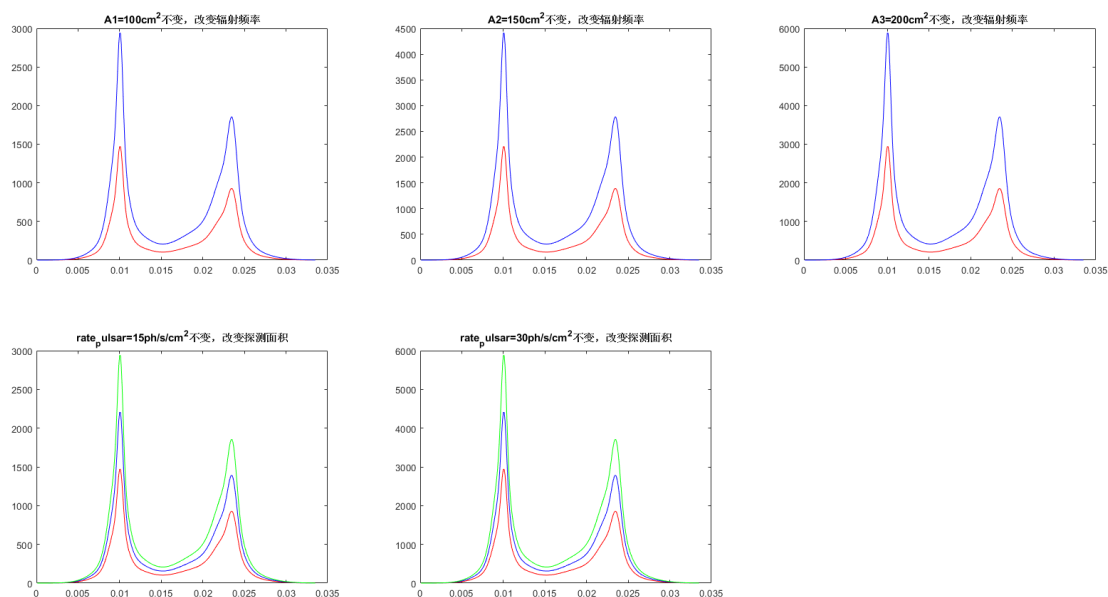


图 14 不同探测器面积和脉冲星辐射流率的脉冲轮廓

由图示可以得到如下规律，在脉冲星辐射流率一定时，越大的探测器面积，获得的脉冲星轮廓图形就越大。在探测器面积相同时，越大的脉冲星辐射流率，获得的脉冲星轮廓图形就越大。

实际脉冲星导航中，脉冲星信号探测器接收到的脉冲星信号受哪些因素影响？最后的脉冲轮廓受哪些因素影响？

经过分析，在实际探测脉冲星信号时，脉冲星在一段时间内的辐射流率不会有太大变化，因而决定探测器获取脉冲星信号的直接因素应该是探测器的探测面积。增大探测器的探测面积获取更多的脉冲星信号，以获得更大的脉冲星轮廓信号。但增加探测器的探测面积同样会收集更多的噪声信号，需要对收集的信号进行降噪处理。

依据题目要求，做如下表格所示。

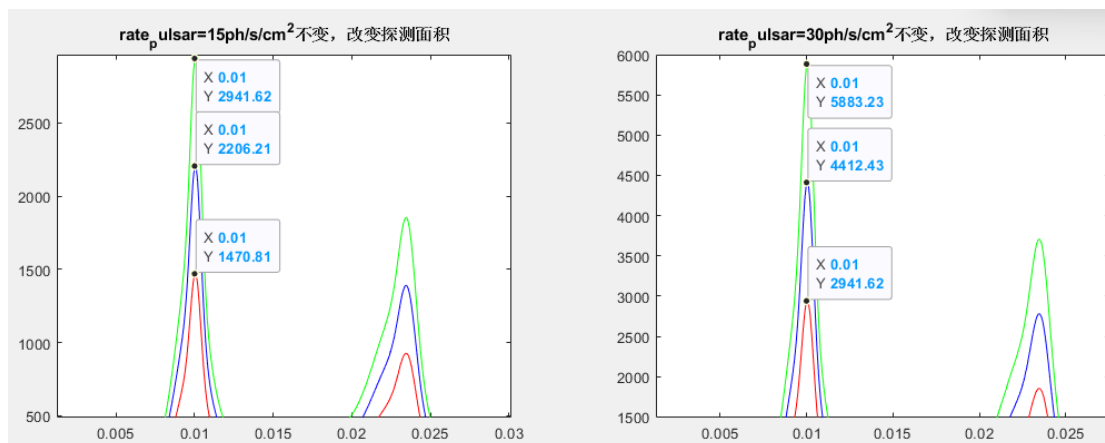


图 15 不同变量下的脉冲轮廓峰值

表 1 不同变量下的脉冲轮廓峰值

探测器面积/ cm ² 轮廓峰值 rate_pulsar / ph/s/cm ²	100	150	200
15	1470.81	2206.21	2941.62
30	2941.62	4412.43	5883.23

题中要求其他所有相关的数据均按要求存在附件。

5.2.2 含噪声脉冲星信号脉冲轮廓的产生及影响因素分析

本小节在脉冲星信号的基础上，加入噪声的分析。

首先，设计 MATLAB 程序，产生不同探测器面积 A (Aera)、不同脉冲星辐射流率(rate_pulsa)和不同噪声辐射流率(rate_noise)下的带噪声脉冲星信号轮廓波形。其中，一定面积下的宇宙背景噪声信号的辐射速率 $\lambda b = A \times \text{rate_noise}$ ；带噪声脉冲星轮廓波为： $f(t) = \lambda a \times h(t) + \lambda b$ ；

依如上要求，将带噪声的脉冲星信号的产生封装成一个函数，见 8.4 f_getnoicon.m。

随后，ATLAB 程序，分析和绘制至少六组探测器面积属于(100~600)cm²、脉冲星信号辐射流率属于(rate_pulsar:15~150)ph/s/cm²、宇宙背景噪声信号辐射流率属于(rate_noise:30~300)ph/s/cm² 下的带噪声脉冲星信号轮廓图形。我选择了九组数据，具体数据选择可见 8.5 testfunction4.m。具体得到图像如下：

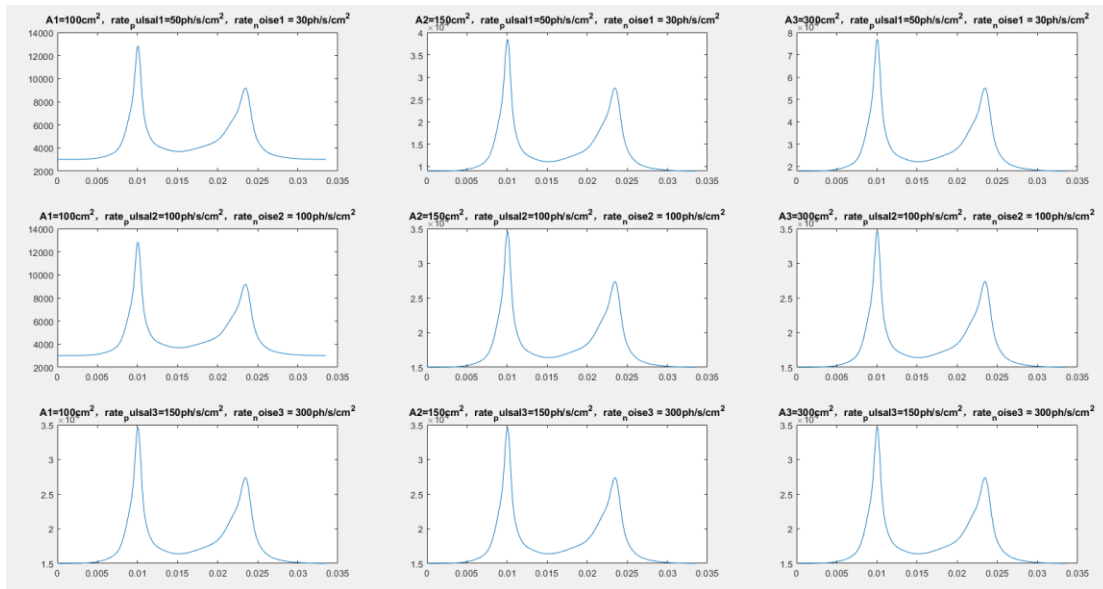


图 16 九组含噪声的脉冲星信号图

为了进一步探究信号和噪声随脉冲星辐射流率和噪声辐射流率的关系，接下来通过探究和计算噪声比，并绘制三维趋势图。见 8.6 SNR.m。

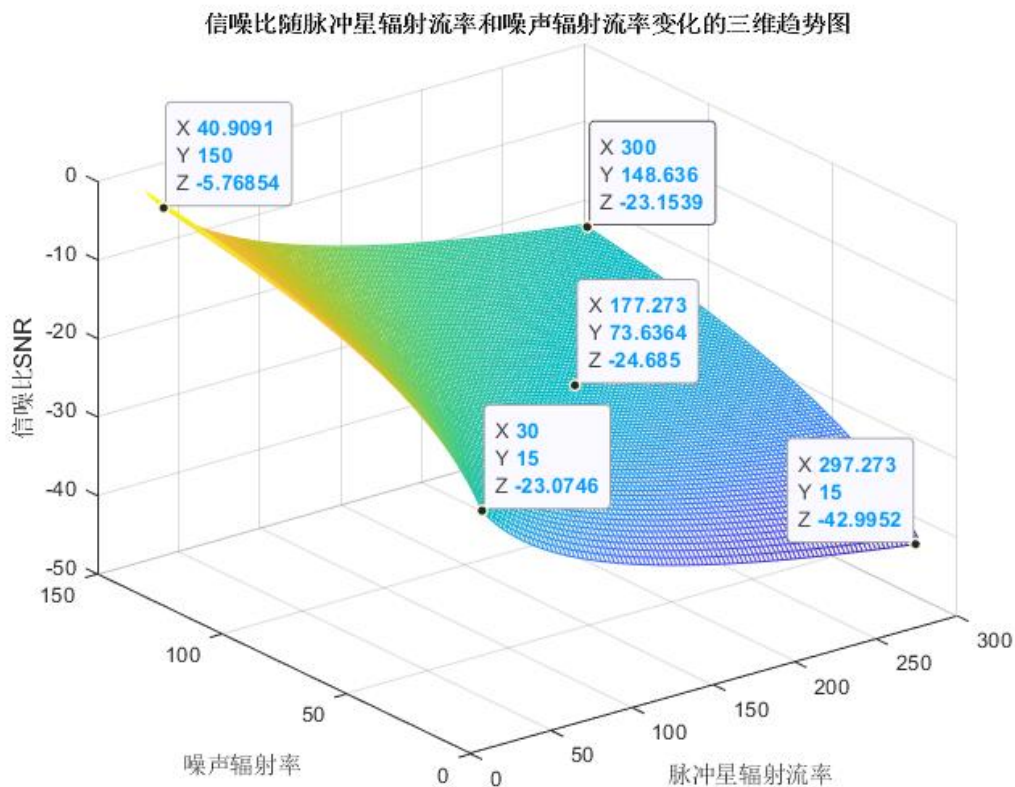


图 17 信噪比随脉冲星辐射流率和噪声辐射流率变化的三维趋势图

根据由 Matlab 绘制信噪比 SNR 随脉冲星辐射流率和噪声辐射流率变化的三维趋势图可以得到，在脉冲星辐射流率相同时，噪声辐射流率越大，信噪比 SNR 越小；同样，当噪声辐射流率相同时，脉冲星辐射流率越小，信噪比 SNR 越小。由三维趋势图可以很好的反应出信噪比与脉冲星辐射流率和噪声辐射流率之间的关联性。

5.2.3 含高斯白噪声脉冲星信号脉冲轮廓的产生及影响因素分析

在上一小节的基础上，本小节增加为高斯白噪声进行分析。

5.2.3.1 含高斯白噪声脉冲星信号脉冲轮廓的产生

设计 MATLAB 程序，给上一步中带噪脉冲轮廓加不同信噪比的高斯白噪声，观测脉冲轮廓的变化，探究高斯白噪声对轮廓的影响。

在进行高斯白噪声对信号轮廓的影响时，需要用到产生高斯噪声的函数 `wgn()` 和 `awgn()`。具体函数用法见 4.5 高斯白噪声。详细代码见 8.7 `GausswhiteNoise.m`。本实验使用 `awgn()` 将不同信噪比的高斯白噪声加到之前带噪声的脉冲轮廓中，得到如图 18 所示。

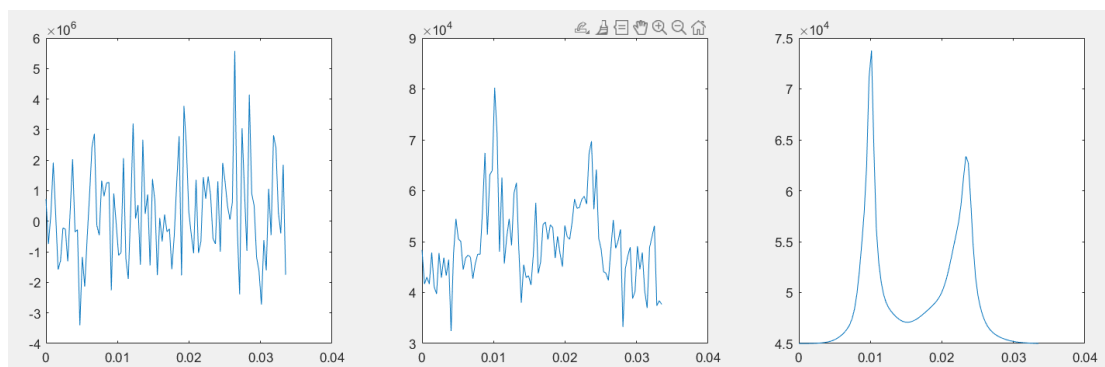


图 18 从左到右分别是带信噪比为-30,20,110 的高斯白噪声的信号轮廓

由图分析可得，对于一组信号来说，信噪比越大，其对应图像越清晰。因此，在一定的范围内，信噪比越大，说明信号强度大于噪声强度。

5.2.3.2 含高斯白噪声脉冲星信号脉冲的去噪方案讨论

随后，探讨实际探测器接收到的脉冲星信号的构成成分，实际导中，该如何处理带噪声的脉冲星信号，提高脉冲星轮廓质量，进而提高导航精度？

实际探测器接收到的脉冲星信号的构成成分中，除了来自脉冲星的辐射信号，还带着来自宇宙背景辐射的背景白噪，以及来自其他天体的高能射线噪声。这些噪声会影响到探测器接收脉冲星信号，会在绘制出的脉冲星信号轮廓波形中产生诸多干扰冲击信号，因而需要算法去除这些噪声。

去除噪声有许多种算法。常见的算法有均值滤波、中值滤波、自适应维纳滤波、小波变换等算法。去噪算法本身是一个比较热门的研究领域，涉及方法众多，本文就以均值滤波为例做分析。

滑动平均法（moving average）也叫做移动平均法、平均法、移动平均值滤波法等等，是一种时间域思想上的信号光滑方法。算法思路为，将该点附近的采样点做算数平均，作为这个点光滑后的值。

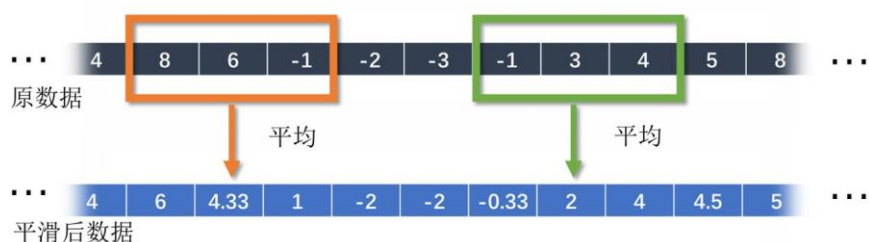


图 19 滑动平均法图示

一般窗口为对称窗口，防止出现相位偏差。窗口一般为奇数。因此样例代码中选取窗口数为 5，详细见 8.7 GausswhiteNoise.m。

以 3 点平均（窗口长度为 3）公式为例，原数据为 x ，平滑后的数据为 y ：

$$y(n) = 1/3 * (x(n-1) + x(n) + x(n+1))$$

对 $y(n)$ 和 $y(n+1)$ 相减，可以得到另一种计算形式：

$$y(n+1) = y(n) - 3/2x(n-1) + 3/2x(n+2)$$

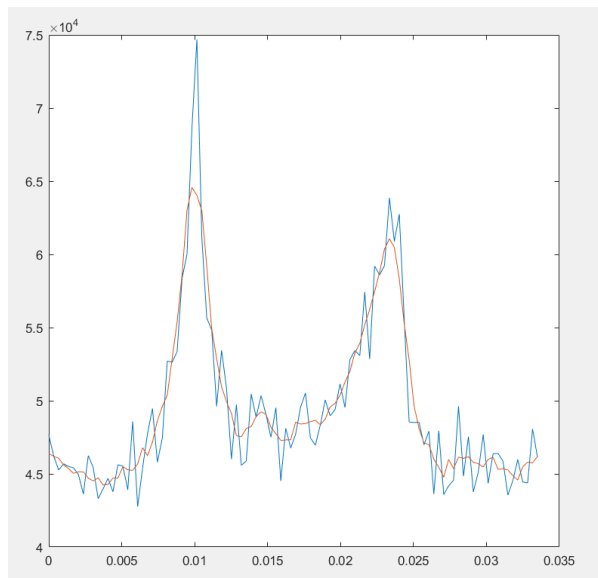


图 20 滤波前后对比图

六、课程学习心得

1. 了解和认识脉冲星及脉冲星导航的基本概念，对当前天文学领域中的一些科学研究方法有了初步的认识；
2. 学会用 MATLAB 进行脉冲星信号的处理的基本方法和脉冲轮廓分析方法，对其中的一些数据读入和生成、基本函数及相关的工具箱的使用有了进一步熟悉；
3. 通过研究脉冲星信号的轮廓特性，以及实际探测器接收到的脉冲星信号中脉冲星信号到达速率和宇宙背景噪声到达速率对累积脉冲轮廓的影响，了解到噪声的不同因素对信号轮廓有着各自不同的影响，同时也了解到去除噪声领域也有着很多不同的算法，空间导航远没有想的那么简单。

七、源代码

8.1 get_probability_density.m

```

1. %%该程序的功能：通过数据，获取脉冲星光子到达概率密度函数。
2. %%输入输出数 一个数据原文件
3. %%输出参数 原数据图 和 cftool 拟合函数
4. %%编写人：王梦祥
5. %%编写日期：2022 年 5 月 13 日 19:03:22
6. %%注意：只要获得概率密度函数，那么这个程序便完成了任务，一般可以不看这个程序。
7. %%
8. clc
9. clear all
10. close all
11.

```

```

12. data = load("data.txt");
13.
14. plot(data(:,1), data(:,2), '- ')
15. xlabel("一个周期的时间/s");
16. ylabel("光子到达概率");
17.
18. cftool(data(:,1), data(:,2))

```

8.2 f_getproden.m

```

1. %%该程序的功能：获取脉冲星光子到达 概率密度函数 具体值
2. %%输出参数 x 脉冲星的时间
3. %%输出参数 脉冲星光子到达 概率密度函数值
4. %%编写人：王梦祥
5. %%编写日期：2022 年 5 月 13 日 20:24:05
6. %%
7. function s = f_getproden(x)
8.
9. x = mod (x , 0.0335) %正常
10.
11. %Coefficients (with 95% confidence bounds):
12. a1 = 0.4748;% (0.4675, 0.482)
13. b1 = 0.01007;% (0.01007, 0.01008)
14. c1 = 0.0004564;% (0.00045, 0.0004629)
15. a2 = 0.2663;% (0.2604, 0.2723)
16. b2 = 0.02356;% (0.02355, 0.02356)
17. c2 = 0.0007343;% (0.0007193, 0.0007493)
18. a3 = 0.1425;% (0.1381, 0.1468)
19. b3 = 0.02081;% (0.0207, 0.02091)
20. c3 = 0.00524;% (0.005127, 0.005354)
21. a4 = 0.3861;% (0.3781, 0.3942)
22. b4 = 0.009784;% (0.009775, 0.009794)
23. c4 = 0.001288;% (0.001266, 0.001309)
24. a5 = 0.1422;% (0.1364, 0.1481)
25. b5 = 0.0105;% (0.01043, 0.01057)
26. c5 = 0.003523;% (0.003422, 0.003623)
27. a6 = 0.2706;% (0.2647, 0.2764)
28. b6 = 0.02288;% (0.02286, 0.02291)
29. c6 = 0.001933;% (0.001898, 0.001968)
30.
31. s = a1*exp(-((x-b1)/c1).^2) + a2*exp(-((x-b2)/c2).^2) + a3*exp(-((x-
    b3)/c3).^2) + a4*exp(-((x-b4)/c4).^2) + a5*exp(-((x-b5)/c5).^2) + a6*exp(-((x-
    b6)/c6).^2);

```

```

32.
33. % Goodness of fit:
34. %   SSE: 0.03057
35. %   R-square: 0.9992
36. %   Adjusted R-square: 0.9992
37. %   RMSE: 0.005512

```

8.3 f_getconmod.m

```

1. %%该程序的功能：产生不同探测面积 A，不同脉冲星辐射流率下的脉冲星轮廓模型
2. %%输入参数 探测面积 A    脉冲星辐射流率 rate_pulsar 对应的时间 x
3. %%输出参数 脉冲星轮廓
4. %%编写人：王梦祥
5. %%编写日期：2022 年 5 月 20 日 14:19:31
6. %%
7. function ft = f_getconmod(A, rate_pulsar, x)
8.
9. Va = A* rate_pulsar;
10. ft = Va * f_getproden(x);

```

8.4 f_getnoicon.m

```

1. %%该程序的功能：产生不同探测面积 A，不同脉冲星辐射流率下的带噪声的信号轮廓
2. %%输入参数 探测面积 A    脉冲星辐射流率 rate_pulsar 噪声的辐射流率 rate_nosie 对应的时
   间 x
3. %%输出参数 带噪声的信号轮廓
4. %%编写人：王梦祥
5. %%编写日期：2022 年 5 月 20 日 15:50:22
6. %%
7.
8. function ft = f_getnoicon(A, rate_pulsar, rate_nosie, t)
9.
10. Va = A* rate_pulsar;
11. Vb = A * rate_nosie;
12. ft = Va* f_getproden(t) + Vb;

```

8.5 testfunction4.m

```

1. %%该程序的功能：分析和绘制带噪声的脉冲星信号轮廓图形
2. %%输入参数 无
3. %%输出参数 数据分析图及相关文件
4. %%编写人：王梦祥
5. %%编写日期：2022 年 5 月 20 日 17:00:22

```

```

6.
7. clc
8. clear all
9. close all
10.
11. t = 0.0001:0.0001:0.0335;
12. A1 = 100;
13. A2 = 300;
14. A3 = 600;
15. rate_pulsal1 = 50;
16. rate_pulsal2 = 100;
17. rate_pulsal3 = 150;
18.
19. Pulse_profile_1 = f_getconmod(A1,rate_pulsal1,t);
20. Pulse_profile_2 = f_getconmod(A2,rate_pulsal1,t);
21. Pulse_profile_3 = f_getconmod(A3,rate_pulsal1,t);
22. Pulse_profile_4 = f_getconmod(A1,rate_pulsal2,t);
23. Pulse_profile_5 = f_getconmod(A2,rate_pulsal2,t);
24. Pulse_profile_6 = f_getconmod(A3,rate_pulsal2,t);
25. Pulse_profile_7 = f_getconmod(A1,rate_pulsal3,t);
26. Pulse_profile_8 = f_getconmod(A2,rate_pulsal3,t);
27. Pulse_profile_9 = f_getconmod(A3,rate_pulsal3,t);
28.
29. %噪声生成
30. rate_noise1 = 30;
31. rate_noise2 = 150;
32. rate_noise3 = 300;
33.
34. Noise_profile_1 = f_getnoicon(A1,rate_pulsal1,rate_noise1,t);
35. Noise_profile_2 = f_getnoicon(A2,rate_pulsal1,rate_noise1,t);
36. Noise_profile_3 = f_getnoicon(A3,rate_pulsal1,rate_noise1,t);
37. Noise_profile_4 = f_getnoicon(A1,rate_pulsal2,rate_noise2,t);
38. Noise_profile_5 = f_getnoicon(A2,rate_pulsal2,rate_noise2,t);
39. Noise_profile_6 = f_getnoicon(A3,rate_pulsal2,rate_noise2,t);
40. Noise_profile_7 = f_getnoicon(A1,rate_pulsal3,rate_noise3,t);
41. Noise_profile_8 = f_getnoicon(A2,rate_pulsal3,rate_noise3,t);
42. Noise_profile_9 = f_getnoicon(A3,rate_pulsal3,rate_noise3,t);
43.
44. %信号和噪声叠加
45. Pulse_Noise_1 = Pulse_profile_1 + Noise_profile_1;PN1 = [t; Pulse_Noise_1].';sav
    e Pulse_Noise_1.txt -ascii PN1;save ('Pulse_Noise_1.mat','PN1');
46. Pulse_Noise_2 = Pulse_profile_2 + Noise_profile_2;PN2 = [t; Pulse_Noise_2].';sav
    e Pulse_Noise_2.txt -ascii PN2;save ('Pulse_Noise_2.mat','PN2');

```

```

47. Pulse_Noise_3 = Pulse_profile_3 + Noise_profile_3;PN3 = [t; Pulse_Noise_3].';sav
    e Pulse_Noise_3.txt -ascii PN3;save ('Pulse_Noise_3.mat','PN3');
48. Pulse_Noise_4 = Pulse_profile_4 + Noise_profile_4;PN4 = [t; Pulse_Noise_4].';sav
    e Pulse_Noise_4.txt -ascii PN4;save ('Pulse_Noise_4.mat','PN4');
49. Pulse_Noise_5 = Pulse_profile_5 + Noise_profile_5;PN5 = [t; Pulse_Noise_5].';sav
    e Pulse_Noise_5.txt -ascii PN5;save ('Pulse_Noise_5.mat','PN5');
50. Pulse_Noise_6 = Pulse_profile_6 + Noise_profile_6;PN6 = [t; Pulse_Noise_6].';sav
    e Pulse_Noise_6.txt -ascii PN6;save ('Pulse_Noise_6.mat','PN6');
51. Pulse_Noise_7 = Pulse_profile_7 + Noise_profile_7;PN7 = [t; Pulse_Noise_7].';sav
    e Pulse_Noise_7.txt -ascii PN7;save ('Pulse_Noise_7.mat','PN7');
52. Pulse_Noise_8 = Pulse_profile_8 + Noise_profile_8;PN8 = [t; Pulse_Noise_8].';sav
    e Pulse_Noise_8.txt -ascii PN8;save ('Pulse_Noise_8.mat','PN8');
53. Pulse_Noise_9 = Pulse_profile_9 + Noise_profile_9;PN9 = [t; Pulse_Noise_9].';sav
    e Pulse_Noise_9.txt -ascii PN9;save ('Pulse_Noise_9.mat','PN9');
54.
55. %%画出带噪声的信号图像
56. figure(1)
57. subplot(3,3,1);plot(t,Pulse_Noise_1,'-');title('A1=100cm^2,
    rate_pulsal1=50ph/s/cm^2, rate_noise1 = 30ph/s/cm^2');
58. subplot(3,3,2);plot(t,Pulse_Noise_2,'-');title('A2=150cm^2,
    rate_pulsal1=50ph/s/cm^2, rate_noise1 = 30ph/s/cm^2');
59. subplot(3,3,3);plot(t,Pulse_Noise_3,'-');title('A3=300cm^2,
    rate_pulsal1=50ph/s/cm^2, rate_noise1 = 30ph/s/cm^2');
60. subplot(3,3,4);plot(t,Pulse_Noise_1,'-');title('A1=100cm^2,
    rate_pulsal2=100ph/s/cm^2, rate_noise2 = 100ph/s/cm^2');
61. subplot(3,3,5);plot(t,Pulse_Noise_4,'-');title('A2=150cm^2,
    rate_pulsal2=100ph/s/cm^2, rate_noise2 = 100ph/s/cm^2');
62. subplot(3,3,6);plot(t,Pulse_Noise_4,'-');title('A3=300cm^2,
    rate_pulsal2=100ph/s/cm^2, rate_noise2 = 100ph/s/cm^2');
63. subplot(3,3,7);plot(t,Pulse_Noise_4,'-');title('A1=100cm^2,
    rate_pulsal3=150ph/s/cm^2, rate_noise3 = 300ph/s/cm^2');
64. subplot(3,3,8);plot(t,Pulse_Noise_4,'-');title('A2=150cm^2,
    rate_pulsal3=150ph/s/cm^2, rate_noise3 = 300ph/s/cm^2');
65. subplot(3,3,9);plot(t,Pulse_Noise_4,'-');title('A3=300cm^2,
    rate_pulsal3=150ph/s/cm^2, rate_noise3 = 300ph/s/cm^2');

```

8.6 SNR.m

1. %%该程序的功能：计算 SNR 并绘制 SNR 随信号和噪声射流率的关系
2. %%输入参数 无
3. %%输出参数 三维数据图
4. %%编写人：王梦祥
5. %%编写日期：2022 年 5 月 20 日 19:19:31
- 6.

```

7. clc
8. clear all
9. close all
10.
11. t = 0:0.0335/99:0.0335;
12. A = 200; %only one
13. rate_pulsar = 15:135/99:150;
14. rate_nosie = 30:270/99:300;
15.
16. for i = 1:100
17.     for j = 1:100
18.         U_signal = sum(f_getconmod(A,rate_pulsar(i),t));
19.         U_noise = sum(f_getnoicon(A,rate_pulsar(i),rate_nosie(j),t));
20.         SNR1(i,j) = 20*log10(U_signal/(U_noise-U_signal));
21.     end
22. end
23.
24. mesh (rate_nosie, rate_pulsar,SNR1);
25. xlabel("噪声辐射率");
26. ylabel("脉冲星辐射流率");
27. zlabel("信噪比 SNR");
28. title("信噪比随脉冲星辐射流率和噪声辐射流率变化的三维趋势图");

```

8.7 GausswhiteNoise.m

```

1. %%该程序的功能：将高斯白噪声加入到带有噪声的脉冲星信号轮廓中，同时加入了均值法去噪算法
2. %%输入参数 无（直接在程序中赋值了）
3. %%输出参数 不同信噪比的信号图像及去噪后的图像
4. %%编写人：王梦祥
5. %%编写日期：2022 年 5 月 20 日 19:19:31
6.
7. t = 0:0.0335/99:0.0335;
8. A=300;
9. rate_pulsar=100;
10. rate_nosie=150;
11.
12. X = f_getnoicon(A,rate_pulsar,rate_nosie,t); %产生含信号噪声
13.
14. Y1 = awgn(X,-30,'measured'); %加入信噪比为 10db 的噪声，加入前
    预估信号的功率（强度）
15.
16. %Y_Gauss = [t; Y].';save Y_Gayss.txt -
    ascii Y_Gauss;save ('Y_Gayss.mat','Y_Gauss');
17. Y2 = awgn(X,20,'measured');

```

```

18. Y3 = awgn(X,110,'measured');
19.
20.
21. %%验证
22. % sigPower = sum(abs(X).^2)/length(X)           %求出信号功率
23. % noisePower=sum(abs(Y-X).^2)/length(Y-X)       %求出噪声功率
24. % SNR=10*log10(sigPower/noisePower)             %由信噪比定义求出信噪比，单位为
    db
25.
26. %%接下来进行去噪
27. Y4 = movmean(Y2,5);
28.
29. subplot(1,3,1);plot(t,Y1,'-');
30. subplot(1,3,2);plot(t,Y2,t,Y4);
31. subplot(1,3,3);plot(t,Y3,'-');

```

八、参考文献

- [1] 沈利荣.实验一:脉冲星轮廓信号的处理和分析[EB].(2022.5.13).[2022.6.4] ./ 实验一 脉冲星轮廓信号的处理和分析
- [2] 帅平,陈绍龙,吴一帆,张春青,李明.X 射线脉冲星导航技术及应用前景分析[J]. 中国航天,2006(10):27-32.
- [3] 方莉,张萍.经典图像去噪算法研究综述[J].工业控制计算机,2010,23(11):73-74.
- [4] CSDN. 几种常用信号平滑去噪的方法（附 Matlab 代码）.(2020.7.31).[2022.6.4].<http://t.csdn.cn/OPuok>