



ETWS-1810 雷达信处

软件设计讨论

部 门： 研发部

编 制： 罗敏

版 本： 1.0

使用 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 撰写于 2018 年 12 月 24 日

## 摘 要

本文主要是关于雷达系统自研信号处理分系统软件设计讨论，目的是确定信号处理分系统软件和算法处理部分的详细工作。因对于信号处理部分均是从零起步，一个好的实现方案和计划更显的尤为重要，本文从信号处理分系统输出目标出发，逐步详细阐述各个设计目标的计算和实现过程。

**关键字：** 雷达系统    信号处理    算法    实现

# 目录

- 1 设计目标 ..... 1
  - 1.1 输出指标 ..... 1
  - 1.2 硬件架构 ..... 1
- 2 设计原理 ..... 3
  - 2.1 数据模型 ..... 3
    - 2.1.1 三维数据模型 ..... 3
    - 2.1.2 数据模型理解 ..... 4
  - 2.2 指标算法 ..... 5
    - 2.2.1 反射率强度 ..... 5
    - 2.2.2 径向速度 ..... 8
    - 2.2.3 速度谱宽 ..... 11
- 3 设计实现 ..... 12
  - 3.1 数据获取 ..... 12
    - 3.1.1 数据接收 ..... 12
    - 3.1.2 数据存储 ..... 12
  - 3.2 数据处理 ..... 13
- 4 详细设计 ..... 14
  - 4.1 协议设计 ..... 14
  - 4.2 软件框架 ..... 14
- 5 总结 ..... 15
- 参考文献 ..... 15

# 第一章 设计目标

## 1.1 输出指标

本节主要是对雷达信号处理分系统的设计指标进行确认，确定设计输出的指标之后，才能够更好的针对设计指标进行软件设计和规划。在图 1.1 中根据《X 波段双偏振天气雷达改

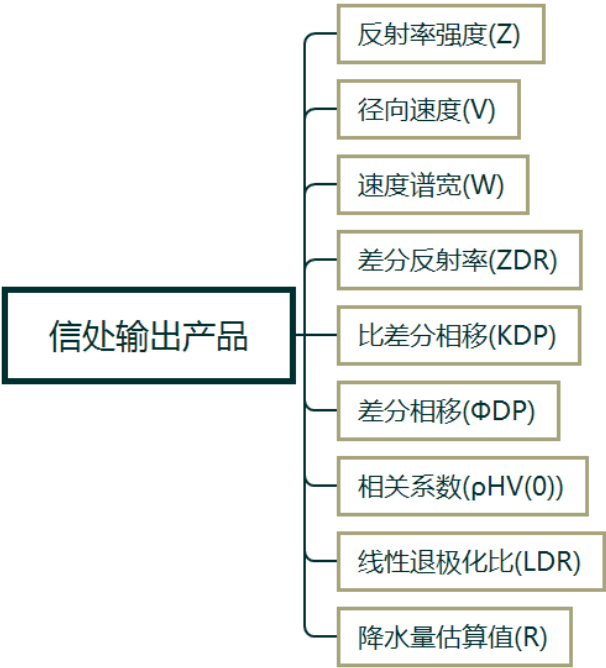


图 1.1 信处输出原始产品

造升级项目立项报告》列了一下信处分系统应该要输出的原始产品。

## 1.2 硬件架构

目前硬件架构已经基本确认，具体如图 1.2 所示主要采用 AD 板 + 接口板 +X86 板的方案。AD 板与接口板之间采用 SIRO 接口连接，接口板与 X86 板之间采用 PCIe3.0 接口连接。如图所示，AD 板主要负责下变频、抽取、滤波等工作，接口板则负责接收 AD 板采集的数据，然后对数据进行 DBF、脉冲压缩等处理，同时需要控制伺服、波控等组件,X86 板则接收接口板处理后的数据做后半段的信号数据处理，最终输出上一节中提到的输出指标。

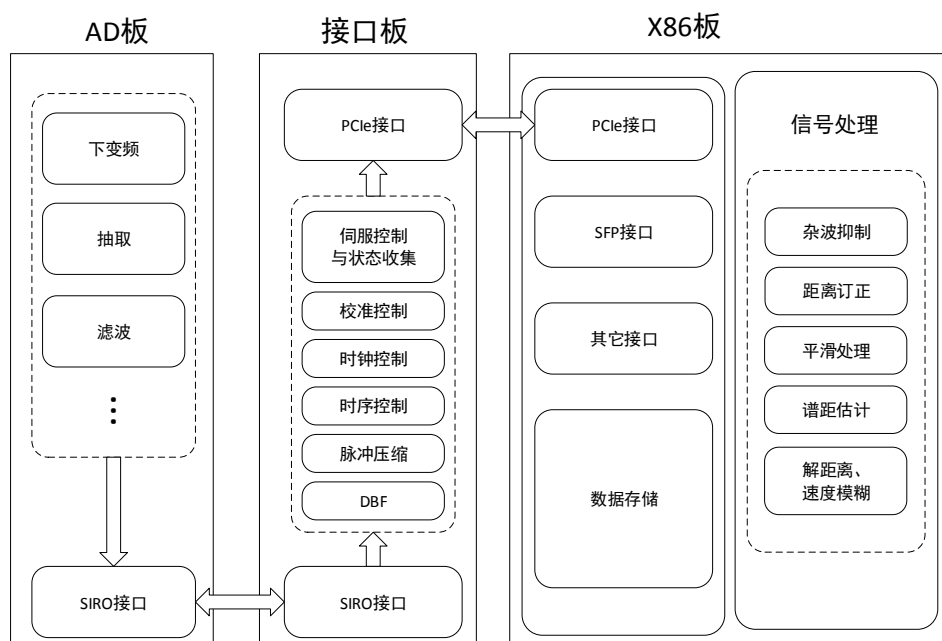


图 1.2 硬件设计

因本文主要讨论软件的设计实现，主要会聚焦于 X86 板的信号处理部分，目前接口板与 X86 板的数据通道已经是对接过，可以从接口板读取相关数据，后续的工作便是两个主要的工作：

- 设计接口板与 X86 板接收数据的协议
- 处理接收到的数据

## 第二章 设计原理

### 2.1 数据模型

#### 2.1.1 三维数据模型

需要对雷达回波进行数据处理，首先要将回波数据抽象成一个数据处理模型，在这里采用了三维数据块作为一个数据处理模型<sup>[1]</sup>，这一处理方法引用自雷达信号处理基础第三章，基本处理模型如图 2.1 所示：

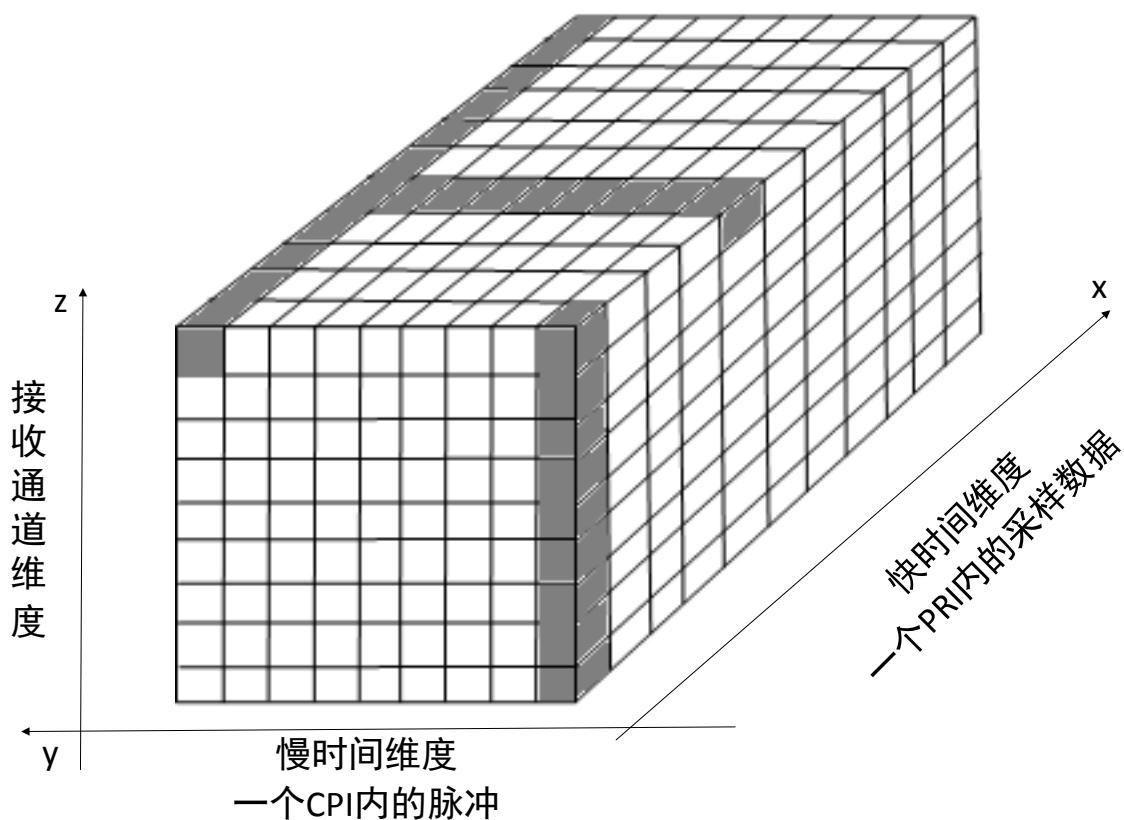


图 2.1 信号处理数据块

可以看到，在上图中的  $x$  轴方向标注为快时间维度，本质就是一个 PRI(脉冲重复间隔) 内的回波采样数据。 $y$  轴标注为慢时间维度，本质是一个 CPI(相干处理间隔) 内的多组回波数

据。 $z$  轴标注的是接收通道维度，本质就是对应天线的接收通道数目。

### 2.1.2 数据模型理解

上一节是介绍了基本的数据模型，在本节中还需要深入的理解一下设计的数据模型，在图 2.2 中，针对数据模型的三个维度进行了进一步的标注。

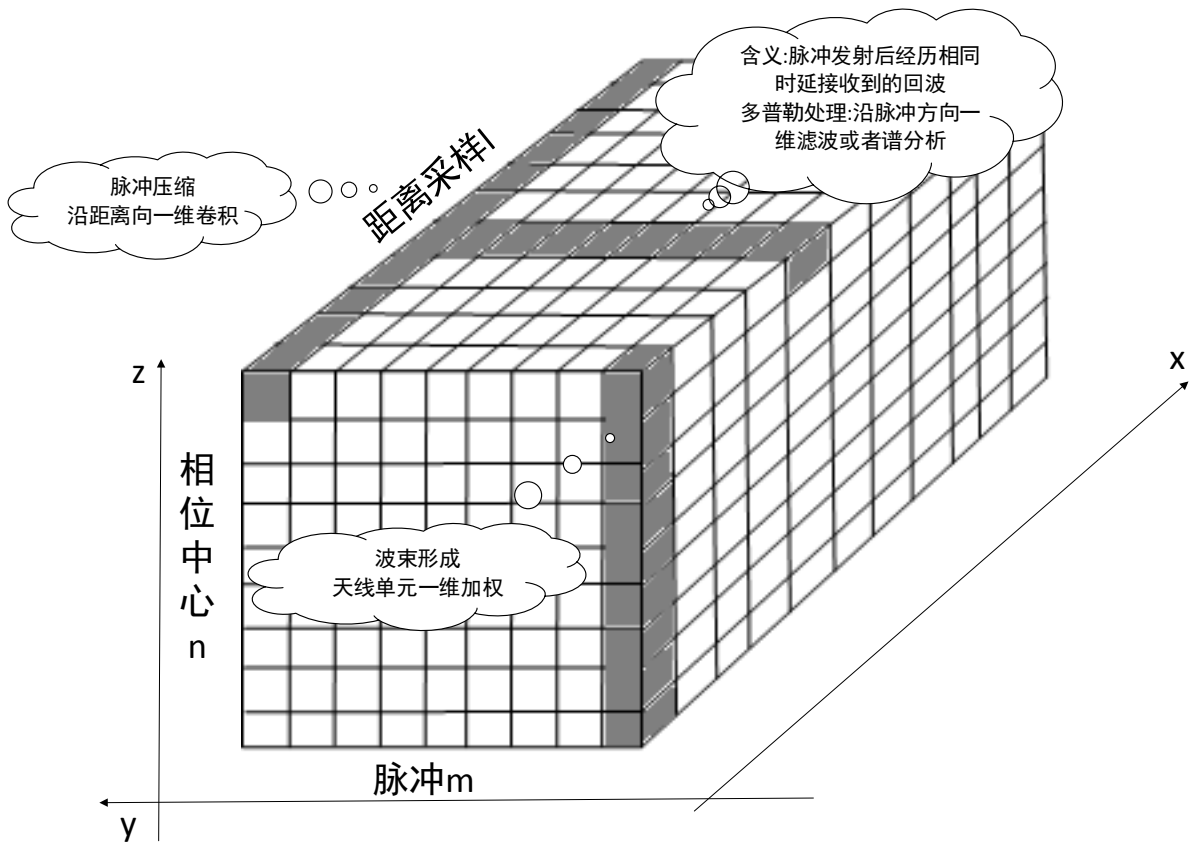


图 2.2 信号处理数据块

$x$  轴方向标注为距离采样 1，脉冲压缩处理便是在这一维度做处理，而多普勒处理则是沿  $y$  轴方向， $y$  轴方向还有一个很重要的含义，便是脉冲发射后经历相同时延接收到的回波， $z$  轴代表不同的接收通道，不同的接收通道具有不同的相位，波束赋形便是在  $z$  轴方向来处理的。

在这里我们将一个接收通道的采样数据拿出来详细研究一下，如图 2.3 所示，将  $x$  轴和  $y$  轴方向的数据转换到时间轴，一个距离库对应一个小方块，同时对应的就是一个采样周期内的采样数据，一系列数据便是一个 PRT 内采集到的数据，而一个 CPI 内的数据，则是多个 PRT 内的数据采集到一起进行数据处理。

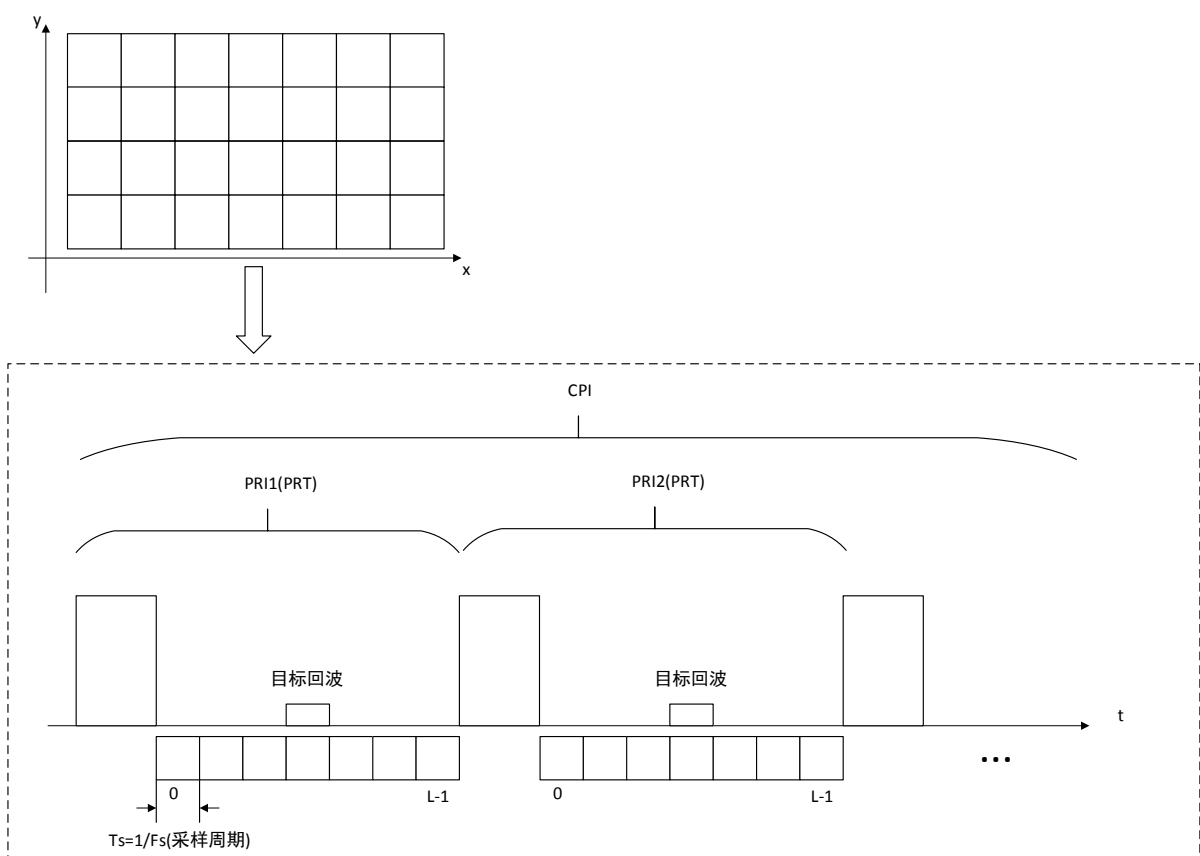


图 2.3 CPI 数据

根据上面两节的叙述基本建立了一个数据处理的模型，后面的计算和处理均会在这个三维模型来进行展开。

## 2.2 指标算法

有了数据处理模型，还需要知道如何处理这个数据模型，现在就像做菜，菜的原材料已经有了，但是还需要食谱，然后根据食谱做出想吃的菜，本节就是描述如何进行处理这些原材料。首先需要面对的就是 3 个最基本的指标，反射率强度 (Z)，径向速度 (V)，速度谱宽 (W)，下面就逐个指标来进行计算。

### 2.2.1 反射率强度

反射率强度 (Z) 是雷达回波的最基本指标，在这里主要引用《雷达信号处理基础 (第二版)》<sup>[1]</sup> 中 2.2.4 节中的计算模型，雷达气象学通常采用称为反射率的归一化因子来表示气象



目标的散射特性，通常用  $Z$  表示，体反射率 (RCS) 公式如下：

公式 1 (体反射率)

$$\eta = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda} Z \quad (2.1)$$

$|K|^2$ : 对于由水构成的散射体其值近似为 0.93，由冰构成的散射体近似为 0.197

$\lambda$ : 雷达波长

当给出一个回波功率测量值，就可以用雷达方程估计出  $\eta$ ，然后利用公式 2.1 换算成  $Z$ ，再对取  $10\lg Z$  即得到 dBZ。

《雷达信号处理基础 (第二版)》<sup>[1]</sup> 中 2.2.2 节给出的体散射目标的雷达方程如下：

公式 2 (体散射雷达方程)

$$p_r(t_0) = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \eta \Delta R \theta_3 \phi_3}{(4\pi)^3 R_0^2 L_s L_a(R_0)} \quad (2.2)$$

$p_r(t_0)$ :  $t_0$  时刻回波接收功率

$P_t$ : 雷达辐射功率

$G$ : 天线增益

$\lambda$ : 雷达波长

$\Delta R$ : 一个距离分辨单元的长度

$\theta_3$ : 方位 3dB 波束宽度

$\phi_3$ : 俯仰 3dB 波束宽度

$R_0$ : 分辨单元中心距离

$L_s$ : 系统损耗因子

$L_a(R_0)$ :  $R_0$  处的大气衰减

根据公式 2.1 和 2.2 便可以解出  $Z$ ，综合后的公式如下：

公式 3 (体散射雷达方程)

$$Z = \frac{64}{\pi^2} * \frac{L_s L_a(R_0)}{P_t G^2 \lambda |K|^2 \Delta R \theta_3 \phi_3} * R_0^2 P_r(t_0) \quad (2.3)$$

根据公式 2.3 可以看出只要从上一节中的距离库获取  $R_0$  和  $P_r(t_0)$  便可以解出  $Z$  的值，公式中的其它部分则可以根据相关的系统属性计算为一个常数。

$R_0$  的值是比较好计算的，直接使用下面的公式：

公式 4 (目标距离计算)

$$R_0 = \frac{c * t_0}{2} \quad (2.4)$$

$c$ : 光速

$t_0$ : 接收机接收回波的时间

下面重点介绍一下  $P_r(t_0)$  的计算，为了得到更好的信噪比，回波功率需要在一个 CPI 上来计算信号功率，相干积累可以增加信噪比主要源于下面三个公式。

公式 5 (相干积累)

$$\chi_1 = \frac{A^2}{\sigma_w^2} \quad (2.5)$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} \{Ae^{j\phi} + w[n]\} = NAe^{j\phi} + \sum_{n=0}^{N-1} w[n] \quad (2.6)$$

$$\chi_N = \frac{(NA)^2}{N\sigma_w^2} = N\chi_1 \quad (2.7)$$

$\chi_1$ : 单脉冲的 SNR

$A$ : 复回波  $Ae^{j\phi}$  的幅度值

$\Sigma_w^2$ : 高斯白噪声的信号功率

$w[n]$ : 噪声信号

$\chi_N$ :  $N$  个相干信号累计的 SNR

根据相干积累公式中的原理，采样得到的总功率等于有效回波信号的功率加上噪声功率，而每个距离库采样信号的值表示为  $I+jQ$  两路的数据，总功率可以通过  $\sqrt{I^2 + Q^2}$  来计算。又根据相干积累中信噪比可以提升  $N$  倍，这样有利于判断是否接收到的信号为有效的回波，当然为了计算接收回波的功率，还需要计算噪声的功率。

噪声功率的计算方法: 取最大俯仰角的接收通道, 最远距离的 256 个距离库计算平均功率。

有了总功率和噪声功率, 很自然便可以得到回波信号的功率  $P_r(t_0)$ 。

### 2.2.2 径向速度

径向速度的计算主要在慢时间维度 (即数据块的 y 轴方向) 进行处理, 处理的原理主要是基于多普勒定律, 针对我司的气象雷达信号处理中多普勒处理主要有以下两个方法:

#### 1) MTI(运动目标指示)

MTI 处理的目的主要是设计一个高通滤波器滤除杂波, 如图 2.4 所示,

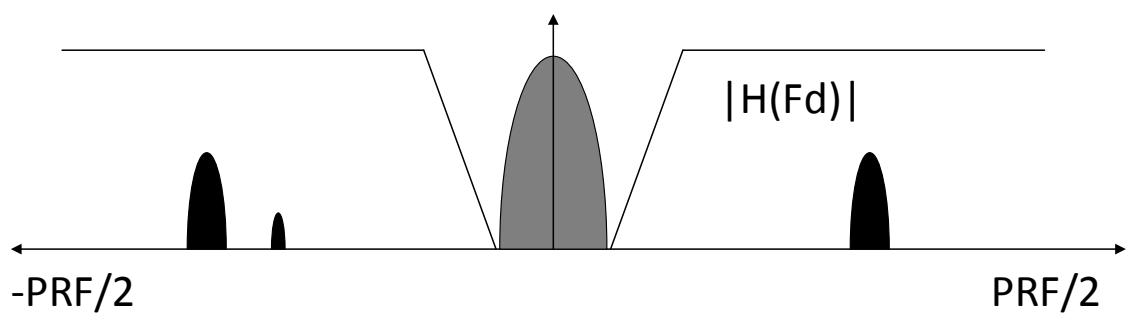
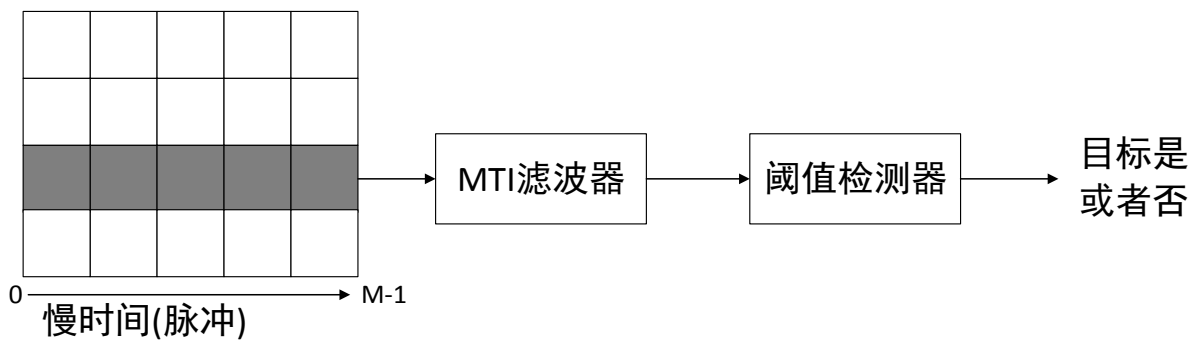


图 2.4 MIT 处理

2) 脉冲对处理 (PPP)<sup>[1][2][4]</sup> 在气象雷达中脉冲对处理主要是为了计算目标谱峰的参数, 速度计算如公式 6 所示, 处理原理主要是依据目标速度比较慢, 频谱偏移比较小, 采用计算相位的办法更为合适, 具体的阐述可以看引用网页<sup>[3]</sup>, 在上面做了比较清晰的解释。

具体的推导原理就是根据图 2.5。

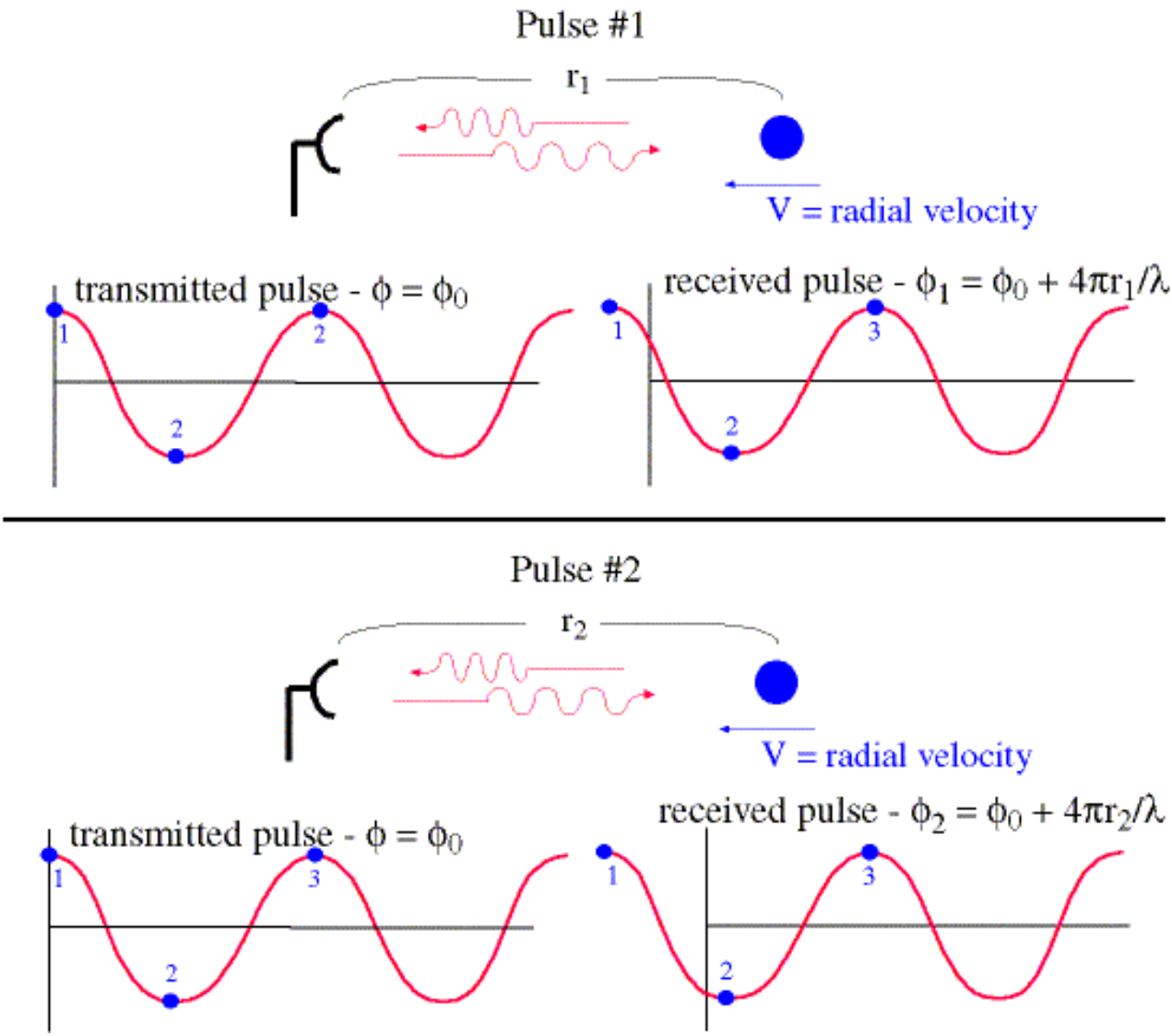


图 2.5 相位计算

根据图中所示，做如下推导：

## 公式 6 (相位计算推导公式)

$$\phi = \phi_0 + \frac{4\pi r}{\lambda} \quad (2.8)$$

$\phi_0$ : 发射信号的相位

$\phi$ : 接收信号的相位

等式两边做微分可得:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dr}{dt} \quad (2.9)$$

$dt$ : 就是两个采样之间的时间间隔  $T$

$\frac{dr}{dt}$ : 就是速度  $V$

$$V = \frac{\lambda}{4\pi T} d\phi \quad (2.10)$$

在这里主要希望计算的是相位的变化。

公式 7 (速度计算公式<sup>[4]</sup>)

$$R[T] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s[k+1]s^*[k] \quad (2.11)$$

$$V_0 = \frac{\lambda}{4\pi T} \arg \{R(T)\} \quad (2.12)$$

$R(T)$ : 相邻两个脉冲的自相关函数

$s_k$ : 复通向 (I) 和正交 (Q) 信号样本

$V_0$ : 径向速度

$P_n$ : 噪声功率

$T$ : 连续两次取样的时间间隔

$\lambda$ : 波长

### 2.2.3 速度谱宽

计算出径向速度之后，也可以使用自相关函数计算出谱宽，谱宽计算在这里直接采用雷达手册中给出的公式，如公式 7 所示。

公式 8 (谱宽计算公式<sup>[4]</sup>)

$$\sigma^2 \approx \frac{\lambda}{8\pi^2 T^2} \arg \left\{ 1 - \frac{R(T)}{R(0) - P_n} \right\} \quad (2.13)$$

$R(T)$ : 相邻两个脉冲的自相关函数

$R(0)$ : 相当于将自己与自己的复共轭相乘之后除以  $N$

$s_k$ : 复通向 (I) 和正交 (Q) 信号样本

$V_0$ : 径向速度

$T$ : 连续两次取样的时间间隔

$\lambda$ : 波长

## 第三章 设计实现

上一章主要讨论了雷达回波几个关键参数的处理原理，这一章主要讲的是结合硬件设备的软件实现。首先需要考虑的问题便是数据的获取，其次便是如何处理数据。

### 3.1 数据获取

#### 3.1.1 数据接收

在第一章的硬件框图中可以看到，x86 板主要通过 PCIe 接口从 FPGA 接收数据，接收数据的过程中，主要需要考虑的就是接受的数据的数据量大小，而接收数据量大小又和发射脉冲、接收通道等有关，下面列出了一个单通道一个 CPI 数据量评估公式：

公式 9 (数据量算公式)

$$Data = 4L_{dist} * C_{prt} + C_{prt} * H \quad (3.1)$$

4: 表示需要 4 个字节用来存放 IQ 两路采样数据

$L_{dist}$ : 距离库数目，根据探测距离决定

$C_{prt}$ : PRT 个数，在我司研发的系统中采用的是 64 个 PRT

$H$ : 每个距离库的头部信息字节数

这里可以大概根据公式评估数据量，假设  $L_{dist}$  值为 1500， $H$  为 64 字节，则大致可以计算出一个 CPI 内单通道数据为 379KByte。

目前 PCIe 驱动已经完成了调试，接收数据通道目前基本已经打通。

#### 3.1.2 数据存储

完成数据的接收之后，主要考虑的是数据要按照计算要求进行存储，以便于进行数据处理。讨论到计算处理，需要先来看一下结构。

## 3.2 数据处理



## 第四章 详细设计

### 4.1 协议设计

### 4.2 软件框架

## 第五章 总结

整个网关网络管理还是比较纷繁复杂的，主要是因为设备分散，且网关后面又连接了一定数量的子设备，且网关一般是位于内网，需要穿透公网对网络设备进行网络管理和配置，本文基于功能设计。

## 参 考 文 献

- [1] Mark A.Richards . 雷达信号处理基础 (第二版) [M]. 2008.
- [2] 张培昌. 雷达气象学 [M]. 气象出版社, 1988.
- [3] [http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/remote/lecture\\_notes/radar/doppler/two\\_pulses.html](http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/remote/lecture_notes/radar/doppler/two_pulses.html)
- [4] 斯科尼克 (Skolnik,M.I.) 雷达手册: 第 3 版/(美) 南京电子研究所, 2010.