

毫米波安检成像系统高速数据接收设计

陈国平¹, 陈兵¹, 孙博文²

(1. 重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065;

2. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 毫米波安检成像技术是一种新型的安检手段, 主动式毫米波安检成像系统能够快速获得目标人体的高分辨率图像, 针对主动式毫米波安检成像系统中雷达数字接收机和信号处理机之间的数据传输问题进行了研究。为了降低 UDP 数据传输的丢包率, 采用了基于 WinPcap 的数据捕获技术、基于循环队列的动态内存池技术和多线程的设计方法。测试结果显示数据传输丢包率从 9% 降低为 0.1%, 丢包率下降了 90 倍, 验证了本文所采用的技术的有效性。

关键词: 毫米波安检成像; WinPcap; 动态内存池; 多线程

中图分类号: TN919

Design of High Speed Data Receiving in Millimeter Wave Security Imaging System

CHEN Guoping¹, CHEN Bing¹, SUN Bowen²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065;

2. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)

Abstract: Millimeter wave security imaging technology is a new security measure, active millimeter wave security imaging system can quickly obtain high resolution images of target objects, the data transmission between the radar digital receiver and the signal processor in the active millimeter wave security imaging system is studied. In order to reduce the packet loss rate of UDP data transmission, the data capture technology based on WinPcap, the dynamic memory pool technology based on circular queue and the design method of multi thread are adopted. The test results show that the packet loss rate of data transmission is reduced from 9% to 0.1%, and the packet loss rate is reduced by 90 times, which validates the effectiveness of the technology used in this paper.

Keywords: Millimeter Wave Security Imaging; WinPcap; Dynamic Memory Pool; Multithreading

0 引言

近年来, 随着恐怖主义活动日益猖獗, 大规模恐怖袭击事件频繁发生(例如: 2013 年美国波士顿爆炸事件, 2014 年中国昆明暴力恐怖案, 2015 年法国巴黎恐怖袭击事件, 2016 年比利时布鲁塞尔爆炸案, 2017 年英国曼彻斯特体育馆爆炸案), 人们的人身安全和社会财产安全受到了极大的威胁, 公共场所的安全问题已经成为一个亟待解决的社会问题。在车站、机场、体育场等人流量较大的公共场所, 快速高效的对过往人员进行安全检查能够有效防止恐怖袭击事件的发生, 然而公共场所下的人体隐匿物品检测技术一直都是一项技术难题。传统的安检手段均存在明显的缺陷, 例如, 广泛使用的手持金属探测器和金属安检门能检测到人体携带的刀、枪等金属物品, 但它无法对液体炸弹、陶瓷刀具等非金属危险品做出检测; 人工检查虽然能有效检测到各类危险品, 但其效率低下, 且容易对被检人员的隐私造成侵害;

作者简介: 陈国平 (1976-), 男, 教授、硕导, 主要研究方向: 电磁声学主被动源定位与成像, 微波组件开发研究, 高性能计算. E-mail: chenpg@cqupt.edu.cn

40 X 光能穿透目标成像进行危险品识别,但是由于 X 光具有很强的电离性,对人体伤害较大,
不适用于人体安检^[1]。

毫米波安检成像系统是一种新型的安检成像手段^[2,3],与传统的安检技术相比,毫米波
安检成像技术具有安全、快速、检测范围广等优点,一方面,毫米波是工作在 30-300GHz
45 的电磁波,能够穿透人体进行成像,另一方面,与 X 光相比,毫米波不具有电离性,使用
毫米波照射不会对人体造成伤害,此外,毫米波成像不需要直接接触被检人员,能够避免人
工检查带来的不便。

在早期的毫米波成像系统中,天线阵列发射电磁波后,回波数据的接收和处理通常集成
在一个系统中,随着毫米波工艺技术的发展,雷达回波数据量越来越大,所需的数据采集速
度也越来越快,对雷达回波数据的处理要求也越来越高,此时将数据采集系统和处理系统分
50 开是最好的选择。本文所研究的毫米波成像系统也是按照此方案进行设计,雷达数据接收机
对毫米波数据进行高速采集后,将数据快速传输到上位机进行算法处理。本文以实际参与研
发的毫米波安检成像系统为背景,对系统中的雷达回波数据接收问题进行了研究。

1 毫米波安检成像系统及数据接收方案设计

1.1 系统模型

毫米波指的是工作频率在 30-300GHz 之间,波长为 1-10mm 的电磁波,毫米波成像系
统按照信号采集方式可以划分为被动式成像和主动式成像。被动式成像系统中通常采用毫米
波辐射计对目标物体和所处场景自身所辐射能量进行采集,利用不同物体之间信号辐射强度
的差异进行成像,主动式毫米波成像系统中通过天线阵列对目标物体和所处场景发射毫米波
信号,对反射回来的回波信号进行采集,利用不同物体反射系数不同,采用反演技术对
60 图像进行重建。与被动式毫米波成像系统相比,主动式成像系统成像质量更好^[4],非常适
合于安检成像系统中对图像的高分辨率要求。

主动式毫米波成像系统模型如图 1 所示。

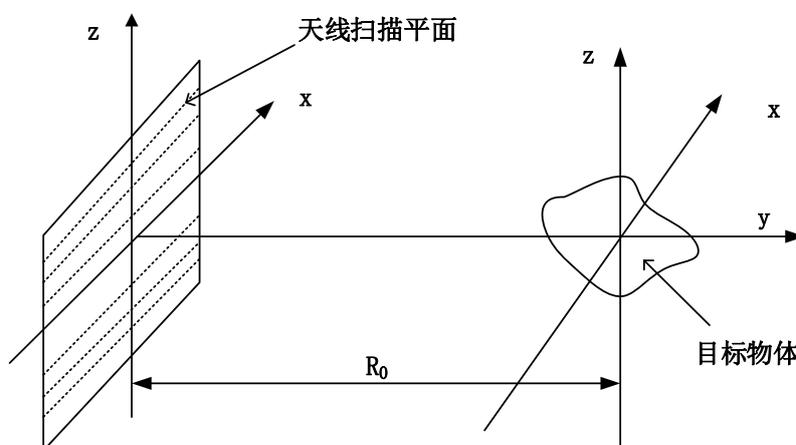
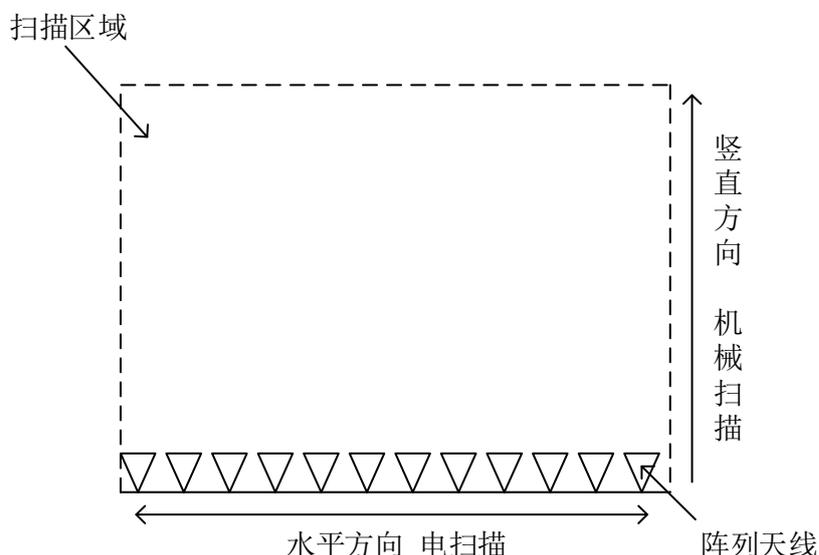


图 1 主动式毫米波成像系统模型

Fig. 1 The Model of Active Millimeter Wave Imaging System

65

图中左侧是合成孔径雷达构成的天线扫描平面，垂直于地面，目标物体与天线扫描平面距离为 R_0 。天线扫描方式如图 2 所示，采用机械扫描和电扫描相结合的方式，在水平方向上采用电扫描，通过切换电子开关控制每个天线阵子的工作状态，在完成一行的电扫描之后，在竖直方向上由步进电机控制进行机械扫描，快速完成整个目标场景的扫描。



70

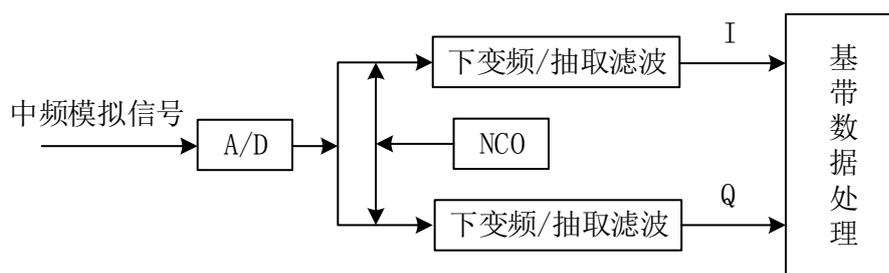
图 2 天线扫描方式

Fig. 2 The Scanning Mode of Antenna

1.2 雷达数据接收机

由于用于安检成像的毫米波频率在 30-300GHz 之间，直接对其进行采样较为困难，一般先用模拟接收机对其进行混频滤波，信号频率降低至中频后，再对其进行 A/D 采样，变为数字信号后对其进行下变频、抽取滤波等数据预处理，之后送往上位机进行算法成像处理，图 3 为数据接收机系统框图。

75



80

图 3 数字接收机

Fig. 3 Digital Receiver

1.3 数据接收方案设计

1.3.1 硬件方案设计

根据上节介绍，数据经过数字接收机处理后，将数据发送给信号处理机进行算法处理，在选择传输介质时有多种方案可供选择，目前基于高速串行的传输技术主要包括千兆以太网、PCI-Express 等，由于本系统中采用电扫描和机械扫描结合的天线扫描方式，数字接收机会

85

随着天线上下运动，PCI-Express 无法解决传输介质的移动造成的信号损耗，因此，本系统采用千兆以太网作为传输介质。系统硬件结构示意图如图 4 所示。

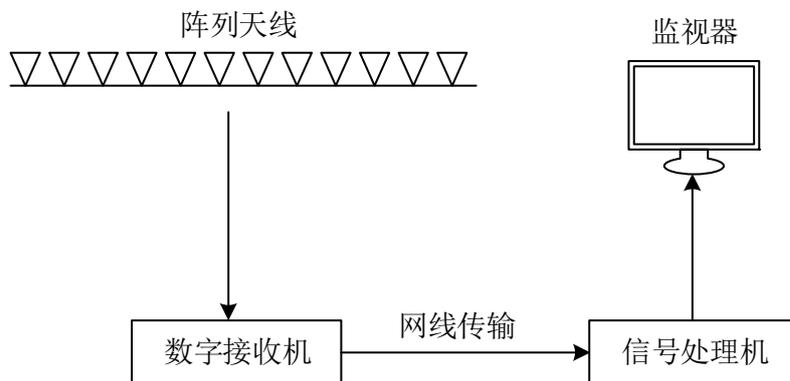


图 4 系统硬件结构示意图

Fig. 4 The Structure Chart of System Hardware Structure

90

1.3.2 软件方案设计

UDP 传输适合于数据量大，传输速度快的情况，但由于 UDP 传输是面向无链接的，传输过程中会出现丢包现象，为了保证成像质量，如何降低 UDP 传输的丢包率是一个非常关键的问题。本文采用基于 WinPcap 技术进行数据捕获，采用基于循环队列的动态内存池技术和多线程设计方法进行软件设计，系统软件流程图如图 5 所示。

95

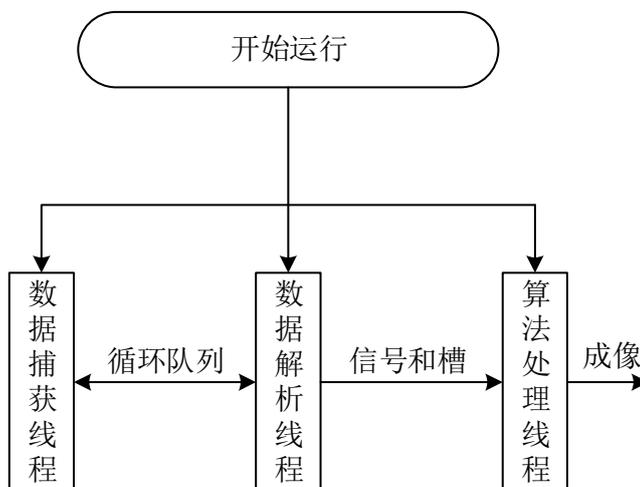


图 5 软件流程图

Fig. 5 Software Flowchart

系统开始上电运行后，分别创建数据捕获线程、数据解析线程和算法处理线程，数据捕获线程完成基于 WinPcap 的 UDP 数据接收，数据解析线程负责对接受到的数据包的解析，算法处理线程负责进行算法处理和成像。为了降低丢包率，采用基于循环队列的动态内存池技术对数据捕获线程和数据解析线程进行同步，多线程技术并行处理也提高了成像系统的成像效率。

100

2 WinPcap

2.1 WinPcap 架构

WinPcap 是一套 Windows 系统平台下用于网络数据捕获的 API 接口，它可以使用户获得访问网络底层数据包的能力^[5]，WinPcap 的结构如图 6 所示。

从图中可以看出，WinPcap 由三个模块组成：

(1) NPF（内核层的网络组包过滤器）。NPF 提供对网络数据包的捕获、过滤和发送功能，NPF 是工作在操作系统内核中的网络驱动程序。

(2) Packet.dll 模块。Packet.dll 动态链接库可以直接对操作系统的内核函数进行调用，使用 Packet.dll 编写的应用程序可以在不同的 Windows 平台上运行而不用重新编译。

(3) Wpcap.dll 模块。Wpcap.dll 是比 Packet.dll 更高层次的动态链接库，它提供了定义缓冲区、过滤器等高级任务，使用 Wpcap.dll 中的高级函数会自动调用 Packet.dll 中的底层函数。

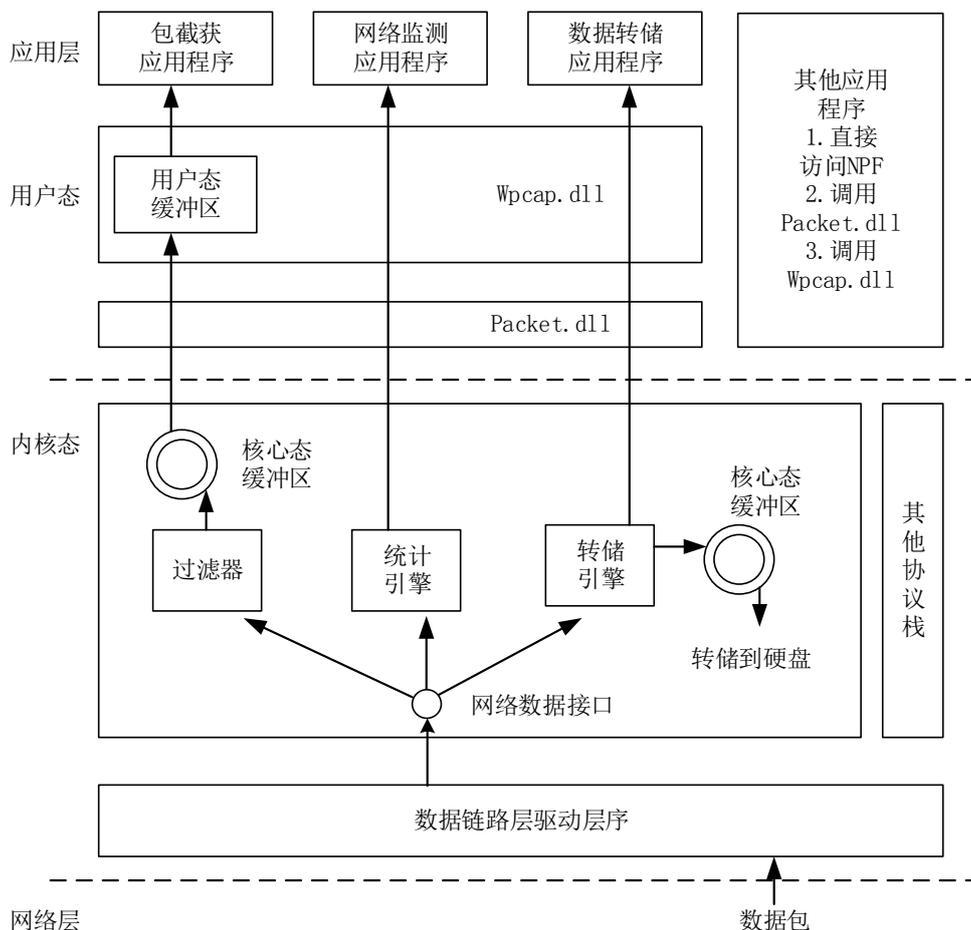


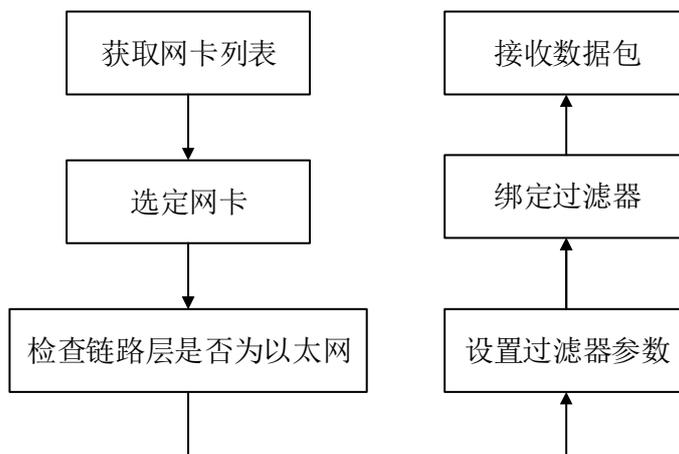
图 6 WinPcap 结构图

Fig. 6 The Structure Chart of WinPcap

2.2 基于 WinPcap 的数据捕获流程

使用 WinPcap 进行网络数据捕获的流程如图 7 所示，程序开始运行后，首先获取网卡

列表并选择网卡号，之后可以根据需要设置过滤器参数对网络数据包进行过滤，例如在本系统中，需要通过设置过滤器参数保证系统只对 UDP 数据包进行接收，然后绑定过滤器后就可以对数据进行接收。



125

图 7 数据捕获流程

Fig. 7 Data Capture Process

3 基于循环队列的动态内存池技术

3.1 动态内存池技术

130

当程序进行高速数据接收时，需要对堆上内存进行频繁的分配和释放，使用系统自带的内存管理器进行内存的管理存在以下缺点^[6]：

- (1) 频繁的分配和释放内存会产生大量的内存碎片，导致系统运行速度变慢。
- (2) 内存分配需要耗费一定时间，如果在数据包到来时系统未来得及分配内存，会导致数据包的丢失。
- (3) 由于各种客观因素，内存申请和分配可能会失败，此时也会造成数据包的丢失。

135

为了防止 UDP 数据传输过程中出现的丢包现象，本文采用动态内存池技术对数据进行接收，动态内存池技术是指程序在开始运行的时候一次性分配适当大小的内存空间，之后每次内存的申请和分配均在内存池中进行。采用动态内存池技术可以避免由于内存分配耗时过长、内存分配失败等因素导致的数据丢包。

3.2 基于循环队列的动态内存池技术实现

140

本文采用循环队列对动态内存池进行实现，同时循环队列用来数据捕获线程和数据解析线程之间的线程同步。循环队列的实现代码如下：

145

```

class LoopQueue {
public:
    uchar * queueBase;
    int usedNum;
    int front;
    int tail;
    QMutex mutex;
    
```

```

150     QWaitCondition bufferNFull;
        QWaitCondition bufferNEmpty;
    public:
        LoopQueue ();
        bool init();
};

```

155 循环队列元素中，基地址 `queueBase`、循环队列已使用个数 `usedNum`、头指针 `front`、尾指针 `tail` 用来指示循环队列当前状态，互斥锁 `mutex`、等待条件 `bufferNFull` 和 `bufferNEmpty` 用来进行多线程的同步控制。

4 代码实现和性能测试

4.1 数据捕获线程实现

160 数据捕获线程示意图如图 8 所示。

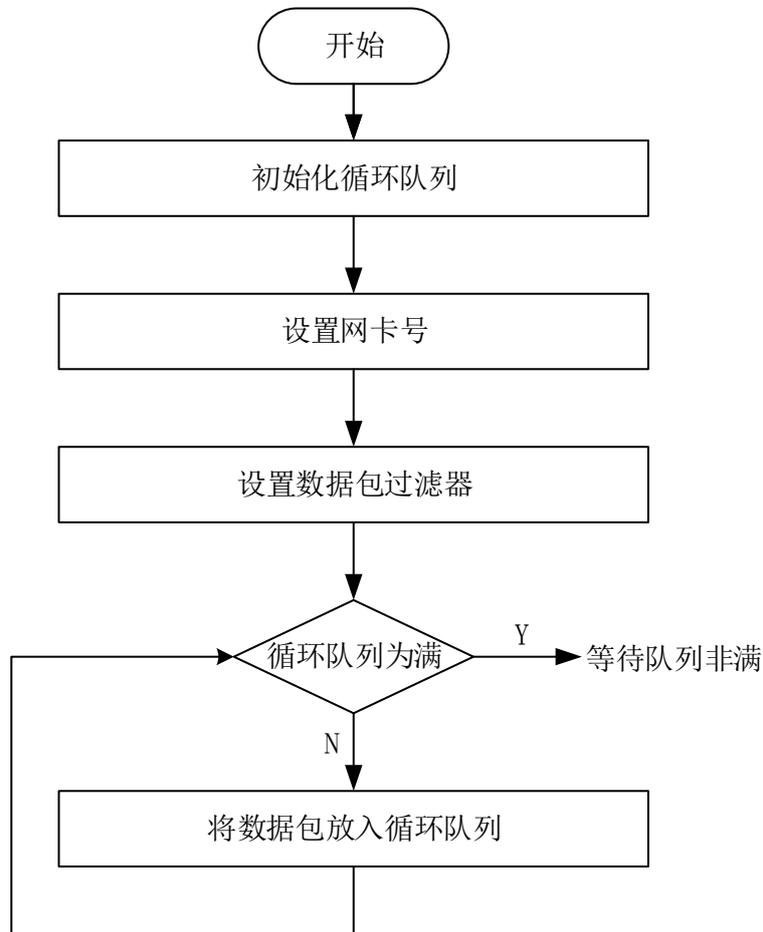


图 8 数据捕获线程示意图

Fig. 8 TheFlow Chart of Data Capture Thread

165 系统开始运行后，首先初始化循环队列，本系统中每个 UDP 数据包的大小为 948 字节，设置循环队列为 94800 字节，在数据接收之前，需要判断循环队列是否为满，如果循环队列为满，需要等待数据解析线程将 `bufferNFull` 条件变量激活，此时才可以继续向循环队列填充数据。关键代码如下：

```

this->queue->mutex.lock();
while (this->queue->usedNum== BUFFNUM)//BUFFNUM 为 100
170 {
    this->queue->bufferNFull.wait(&(this->queue->mutex));//等待队列非满条件触发
}
this->queue->mutex.unlock();

```

4.2 数据解析线程实现

175 数据解析线程的流程图如图 9 所示。

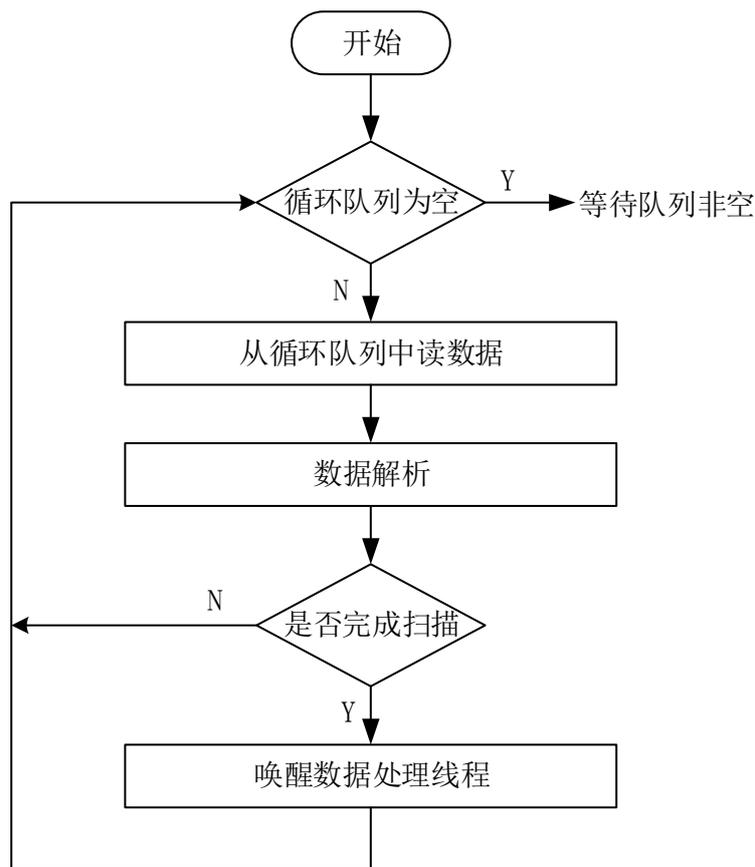


图 9 数据解析线程示意图
Fig. 9 TheFlow Chart of Data Parsing Thread

180 数据解析线程开始工作后，首先判断循环队列是否为空，如果队列为空，则等待数据捕获线程将 `bufferNEmpty` 条件变量触发，此时才可继续从循环队列中取出数据包，每取出一个数据包，需要对数据包中的数据进行解析，并判断数据包的行信息是否在给定范围内，如果解析到行信息大于天线扫描高度维 350，则判定一次天线扫描已经完成，通过信号和槽机制通知算法处理线程进行成像处理。关键代码如下：

```

185 if (row >= ROW_COUNT)//ROW_COUNT 为 350
{
    if (this->scannerFlag == 1)
    {

```

```

this->scannerFlag = 0;
double finishCaptureTime = (double)clock();
190   emit sendMatMessage(QString::number(finishCaptureTime));
    }
    return;
}

```

4.3 性能测试

195 本文用来作性能测试的硬件平台为：笔记本电脑(内存：8GB；处理器：Intel(R) Core(TM)i5-4210M CPU @2.60 GHz；核心数量：四核心；硬盘：5400 转；网卡：千兆网卡)。每次天线扫描时间为 1s，完成一次天线扫描共发送数据包 45085 个，每个数据包 948 字节。

第一次测试未采用动态内存池技术，测试结果如表 1 所示，采用循环 10 次取平均值的方式对丢包率进行统计，经测试，平均丢包率在 9% 左右。

200 表 1 未采用动态内存池技术

Tab. 1 No Dynamic Memory Pool Technology

接收方式	平均接收数据包	平均丢包率
未采用动态内存池	41007.1	9%

第二次为采用动态内存池技术的丢包率统计，测试结果如表 2 所示，同样循环 10 次取得丢包率的平均值，经测试，平均丢包率降低了 90 倍，仅为 0.1%，证明采用本文的方法有效的降低了 UDP 传输的丢包率。

205 表 2 采用动态内存池技术

Tab. 2 Dynamic Memory Pool Technology

接收方式	平均接收数据包	平均丢包率
未采用动态内存池	45035.8	0.1%

5 结论

210 本文对主动式毫米波安检成像系统的数据接收问题进行了研究，根据成像系统中天线扫描方式为机械扫描和电扫描相结合的方式，给出了基于网络的硬件设计方案和基于 WinPcap 的软件设计方案，针对 UDP 数据传输中产生的丢包现象，提出了基于循环队列的动态内存池技术进行数据接收，最后使用多线程的设计方法对软件进行了编写，经测试，采用本文方法可以将数据传输丢包率从 9% 降低至 0.1%，达到了毫米波安检成像系统的数据传输要求。

[参考文献] (References)

- 215 [1] 徐枫,朱莉,刘敏.近程毫米波全息成像技术发展综述[J].微波学报,2017,33(S1):289-294.
- [2] Lee D S, Son J Y, Jung M K, et al. Real-time outdoor concealed-object detection with passive millimeter wave imaging[J]. Optics Express, 2011, 19(3):2530-6.
- [3] Sheen D M, Bernacki B, McMakin D. Advanced millimeter-wave imaging enhances security screening[J]. SPIE Newsroom, 2012, 12.
- [4] 任百玲.主动毫米波安检成像算法及系统研究[D]. 北京:北京理工大学, 2014.
- 220 [5] 张玉琴,王亮,李盘文.高性能网络数据捕获方案的分析和优化[J].电子测量技术,2015,38(06):135-138.

- [6] 甘彪,凌小峰,宫新保.基于动态内存池和 Wincap 的高速数据捕获技术[J].信息技术,2012,36(01):70-74.