

电子科技大学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

学士学位论文

BACHELOR THESIS



论文题目 基于 NB-IOT 的通信模块设计

学科专业 计算机科学与技术

学 号 2016060107001

作者姓名 韦嗣千

指导老师 鲁晓军 教授

摘 要

.....

关键词： NB-IOT， stm32， bc35G， 模块

ABSTRACT

abc

Keywords: time-domain electromagnetic scattering, time-domain integral equation (TDIE), marching-on in-time (MOT) scheme, late-time instability, plane wave time-domain (PWTD) algorithm

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究工作的背景与意义	1
1.2 本论文的结构安排	1
第二章 NB-IOT 通信技术基础	3
2.1 AT 指令	3
2.2 NB-IOT 模块的工作状态	3
2.3 应用层协议	4
2.3.1 CoAP	4
2.3.2 MQTT	4
2.3.3 CoAP 和 MQTT 的异同	5
2.4 工作频段	5
2.5 部署方式	6
2.6 物理层协议	6
2.7 本章小结	6
第三章 NB-IOT 通信模块设计	7
3.1 模块总体介绍	7
3.2 供电	8
3.3 串口	8
3.4 射频模块	9
3.5 USIM 卡座	9
3.6 本章小结	9
第四章 模块验证与实验	10
4.1 华为云平台应用开发	10
4.1.1 定义产品	10
4.1.2 定义 profile 与编解码插件	11
4.1.3 接入设备	11
4.2 stm32 终端开发	12
4.2.1 串口 DMA 通信	12
4.2.2 入网初始化	14
4.2.3 模组通信	14

4.2.4 退网关机.....	15
4.3 验证过程以及结论	15
4.4 本章小结.....	15
第五章 全文总结与展望.....	16
5.1 全文总结.....	16
5.2 后续工作展望	16
致 谢	17
附录 A abc.....	18
A.1 abc.....	18
参考文献	19
攻读本科学位期间取得的成果	20
外文资料原文	21
外文资料译文	22

第一章 绪论

1.1 研究工作的背景与意义

物联网的概念自 1999 年提出以来就备受关注,随着物联网在各行业的需求逐渐被挖掘,物联网技术的研究和应用都得到了极大的发展。

低功耗广域网 (Low-Power Wide-Area Network, LPWNA) 作为无物联网一个重要的应用分支,具有覆盖能力强,能耗低的特点。LoRa、Sigfox、NB-IoT 等技术相继涌现,其中,NB-IOT 由于其使用授权频谱等优势,收获了众多学者的关注和产生了许多行业应用,在 5G 标准中也占有一席之地。

2015 年 9 月,NB-CIoT(Narrow Band Cellular IoT)与爱立信的 NB-LTE 方案融合,形成了 NB-IOT 方案。华为、高通、爱立信的那个在同年 12 月合作提出的 NB-IoTf 方案,在 2016 年 6 月获得 3GPP 批准,并在 2019 年 7 月获得 ITU 确认,成为解决 5G mMTC(massive Machine Type Communication)场景下的技术标准。

在协议演进的过程中,研究人员通过对物理层的研究,对 NB-IOT 的功耗、传输时延、与 LTE 系统之间的干扰进行了分析与建模。比如 Migabo E 等人的论文(TODO: 引用)设计了 NB-IOT 下行链路的数学模型,通过理论分析和模拟了 NB-IOT 的预期能耗,同时讨论了数据传输速率以及网络传输时延的问题;Kim H 等的论文(TODO: 引用)对 NB-IOT 与线性通信系统的干扰进行了分析,提出在 NB-IOT 频带两侧设置保护带宽的建议。同时在网络构建与多技术融合方面也有很多成果。

众多模块和芯片厂商也对 NB-IOT 技术的落地做了充足的准备。华为在收购 Neul 的基础上在 2016 年就展示了承载 NB-IOT 的 Boudica 芯片,上海移远通信技术有限公司也通过搭载该系列芯片开发出了 BC95 系列模组。

运营商也根据工信部 2020 年 NB-IOT 网络实现全国普遍覆盖的要求,积极部署 NB-IOT 基站,目前中国电信拥有 40 余万个基站(TODO: 引用),联通和移动也紧随其后。

1.2 本论文的结构安排

论文总共分五章,结构安排如下:

第一章绪论部分主要阐述 NBIOT 技术的产生与发展,内容包括几大通信技术公司联合提出协议规范,列举一些学者在物理层对 NBIOT 协议能耗、时延的研究,以及 NBIOT 在 5G 标准中扮演的角色。最终结合产业政策推动等产业因素,得出

NBIOT 技术将在未来得到蓬勃发展，导致集成模块的需求也会增加

第二章主要说明 NBIOT 设计的技术及其通信规范，包括控制模块需要的 AT 指令集，NBIOT 获得分配的通信频段，部署方式，工作方式以及对两个用于 NBIOT 的应用层协议（CoAP 和 MQTT）进行对比，从理论知识上理解 NBIOT 技术的能耗、时延等特点。

第三章从模块设计出发，分析了 bc35g 模块的供电管理模块、射频前端模块、串口通信模块、USIM 卡座模块等的设计原则和电路分析。

第四章则是实验与验证部分，通过华为云平台、NBIOT 模块、stm32 开发板，验证 NBIOT 通信过程及探讨不同的 NBIOT 应用设计要求。

第五章总结与展望未来工作。总结 NBIOT 通信规范以及模块设计，展望通过软件无线电技术研究 NBIOT 的工作。

第二章 NB-IOT 通信技术基础

2.1 AT 指令

AT 指令集用于从终端设备或数据终端设备通过终端适配器向控制移动台发送控制指令,3GPP TS 27.007 规定了用于控制 GSM 手机或者 modem 的 AT 命令,比如 AT+CIMI 用于获取设备的 IMEI (International Mobile Subscriber Identity),AT+CSQ 用于获取信号强度;还管理 GSM 和 SMS 短信功能的指令,例如 AT+CNGC 用于发送 SMS 短信;另有模块通用指令比如 AT+NRB 用于重启模块;还有用于特定 IOT 平台的命令,比如 AT+NCDP 用于查询华为 IOT 平台 CDP 服务器的 IP/端口。AT 指令分为测试、读取、写、执行四类指令,形式如表2-1

表 2-1 AT 指令形式

类型	形式	解释
测试指令	AT+<cmd>=?	获取参数可能的值范围
读取指令	AT+<cmd>?	读取参数值
写指令	AT+<cmd>=p1,[p2,[p3[.....]]]	设置参数值
执行指令	AT+<cmd>	执行命令

2.2 NB-IOT 模块的工作状态

NB-IOT 省电的特点,很大程度得益于 3 种工作模式的切换,通过牺牲一定的实时性,停止一部分功能,从而达到省电目的。NB-IOT 三种工作模式的切换如下图所示(补充图片)

当 NB-IOT 模块注册入网后,处于 connected 态,此时模块可以收发数据,当无上行数据后,启动不活动定时器,到期后进入 IDLE 态,开始 TAU 计时,关闭发射,保留接收功能,可对下行数据进行处理,如有下行激活指令,则切换到 connected 态,否则 active timeer 到期后进入 PSM 态,关闭收发功能,仅保留必要的时钟。TAU 到期后切换到 connected 态

对于不同场景下的的 NB-IOT 应用,通过选取合适的定时器时间及工作状态切换流程,能满足不同的实时性以及能耗的要求。比如固定的控制类物联网应用,由于有可靠的电源保障,对舒适性的需求大于低能耗的需求,可以使模块一直保持在 Active 模式。

2.3 应用层协议

物联网设备多为系统资源受限设备，对网络的要求也与普通互联网应用有很大不同。目前流行的为物联网受限设备设计的应用层协议主要是 CoAP、MQTT-SN、XMPP、AMQP 等（TODO: 引用）。接下来对应用较为广泛的 CoAP 和 MQTT 协议进行对比。

2.3.1 CoAP

CoAP 与 http 一样，基于 REST 架构的应用层协议，但传输层使用 UDP 替换，自身则是一个双层结构（消息层和请求响应层），并在消息层实现了多播、拥塞控制、消息可靠性保证等机制。作为一个轻量级协议，CoAP 协议的最小报文仅为 4 字节。

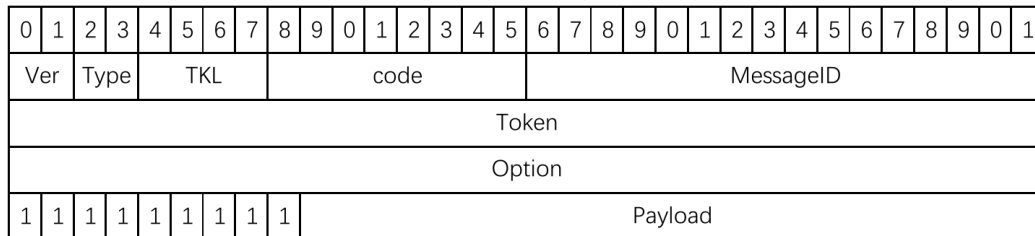


图 2-1 CoAP 的消息格式

表 2-2 CoAP 字段

字段名	比特数	解释
Ver	2	代表协议版本，目前为 0x01
Type	2	消息类型，CON 为可靠传输，需要响应，响应消息类型为 ACK 和 RSTNON 为不可靠传输，不需要响应
TKL	4	Token 的长度，目前为 0 8B
Code	8	
MessageID	16	消息 ID，用于标记重发消息
Token		可选，长度为 TKL，用于消息安全性或对应一个请求和响应

2.3.2 MQTT

MQTT 是一种发布/订阅传输协议，基于 TCP/IP 协议栈构建，具有低开销，低带宽占用的优点，协议中有三种身份：publisher、broker 和 subscriber，broker 起到解耦的作用。MQTT 提供三种消息传递的服务质量水平：

Qos 0 代表消息至多会传输一次，因为 NBIOT 底层依赖于不可靠的 UDP 传输，所以会发生消息的丢失。

Qos 1 代表消息至少会传输一次，但因为重发机制可能会导致消息重复。

Qos 2 代表 q 确保消息会到达一次，保证不会出现消息丢或重复的现象，适用于非幂等的请求传输。

7	6	5	4	3	2	1	0
报文类型				标志位			
剩余长度							

图 2-2 MQTT 报文结构

表 2-3 MQTT 报文字段

字段名	比特数	解释
Control Packet type	4	控制报文类型,4 位无符号数
Flags	4	
Remaining Length		剩余长度表示当前报文余下的负载数据长度 (不包含自身), 使用 Base 128 Varints 编码

2.3.3 CoAP 和 MQTT 的异同

MQTT 协议使用发布/订阅模型，CoAP 协议使用请求/响应模型；

MQTT 会通过网关在客户机之间创建连接，CoAP 协议则是无连接协议；

MQTT 通过中间代理传递消息的多对多协议，CoAP 协议是 Server 和 Client 之间消息传递的单对单协议；

MQTT 不支持带有类型或者其它帮助 Clients 理解的标签消息，CoAP 内置内容协商和发现支持，允许设备彼此窥测以找到交换数据的方式。

2.4 工作频段

无线电频谱作为一种资源，由国家统一分配。相比于其它的 LPWAN 技术，NBIOT 的一大优势就是它运行于授权频段，拥有较少的频段干扰，可以提供更好的服务质量。NB-IOT 沿用 LTEd 定义的标准，能与现有的蜂窝网络基站融合快速部署，全球主流的部署频段是 800MHz 和 900MHz，在中国，中国电信将 NB-IOT 部署在 800MHz 的频段上，而中国移动和中国联通则把 NB-IOT 部署在 900MHz 的频段上。

表 2-4 运营商 band 分配

频段	中心频率 (MHZ)	上行频率 (MHZ)	下行频率 (MHZ)	运营商
Band 5	850	824-849	869-894	中国电信
Band 8	900	880-915	925-960	中国移动 中国联通

2.5 部署方式

NB-IOT 支持独立、带内、保护频段三种部署方式。独立部署是指在 LTE 的频段外选择独立的空闲频段部署，比如部署在 GSM 频段，并加上保护频段，能避免与 LTE 信号相互干扰，但这种方式对紧张的无线电频段资源不友好；带内部署是指选择现有 LTE 系统内的一个 PRB(Physical Resource Block) 部署，但需要考虑到与 LTE 系统的干扰问题（TODO: 引用）；保护带部署是指利用 LTE 系统内尚未被利用的位于保护带的 PRB，该种方式提高了无线电资源的利用率，但需要选取大于 NB-IOT 系统需要的 200Khz 带宽。三种部署方式如图 (TODO: 图)

2.6 物理层协议

NB-IOT 上行采用 SC-FDMA 多址方式，使用多载波和单载波两种传输方式。多载波适用于 LTE 相同的 15khz 子载波间隔，对应不同的速率场景，0.5ms 时隙，1ms 子帧长度，每个时隙包含 7 个符号

下行则是采取的 OFDMA 多址方式

2.7 本章小结

本章主要阐述了以下内容：

用于控制通信模块的 AT 指令集的四种类型指令的格式，分别为测试、读取、写以及执行指令。第四章实验部分将通过 AT 指令控制模块完成入网以及通信过程。

还有 NB-IOT 的工作状态切换以及用于物联网应用的应用层协议，了解对物联网应用开发需要注意的实时性与能耗取舍的问题。

然后通过 NB-IOT 系统的部署方式及物理层协议对 NB-IOT 通信技术有更深入的理解。

第三章 NB-IOT 通信模块设计

3.1 模块总体介绍

上海移远通信技术有限公司开发的 bc35G 通信模组支持 band8、band5、band20、band28 频段，采用 LCC 贴片封装，尺寸为 19.9mm*23.6mm*2.2mm，完全符合欧盟 RoHs 标准（TODO：引用），外部参数如下：

表 3-1 模块参数

参数	说明
供电	3.1V 4.2V，典型电压 3.6V
省电	PSM 模式下最大耗流 5uA
发射功率	23dBm +- 2dB
温度范围	正常工作温度: -35 ‘c +75’C

模块的主要部分包括射频前端、电源管理、基带芯片。

射频前端主要包括功率放大器、滤波器，用于无线电信号和二进制信号的互相转换。

基带芯片则是用于信号处理，bc35G 模块使用的是华为（xxxbionic?）芯片。

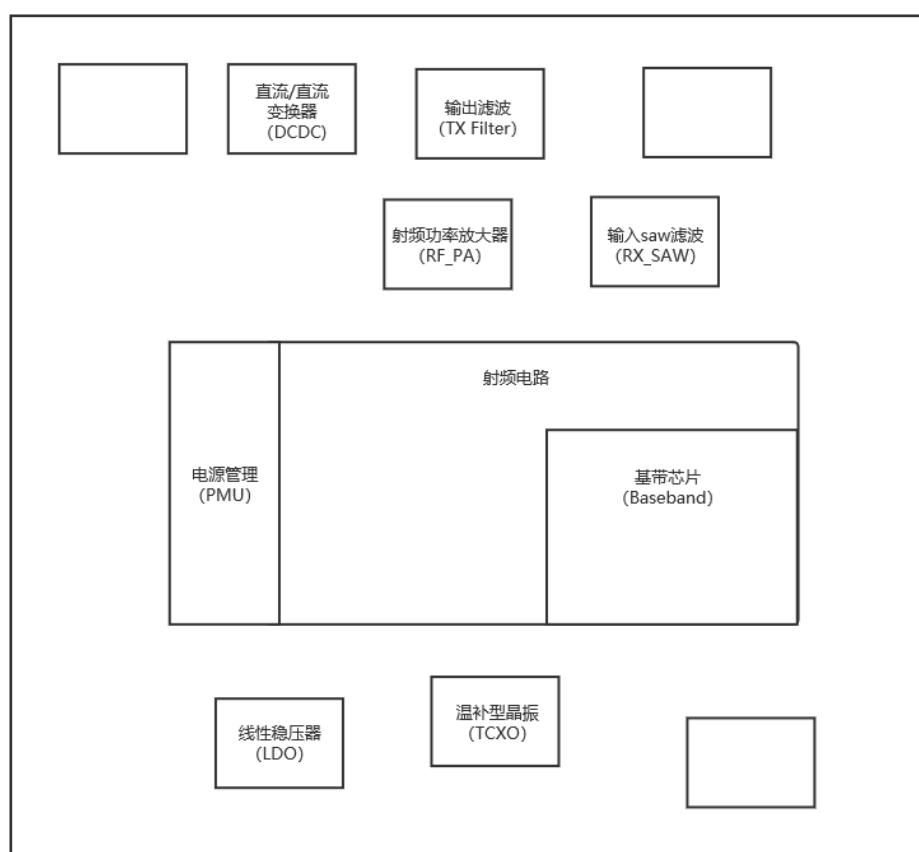


图 3-1 总体框图

3.2 供电

为了将锂离子电池电压转化为模块供电电压 3.1v 4.2v，选用低压降线性稳压器 (LDO)，具有成本低，噪音低的优点。同时由于对电池能量损耗低，保证更长的工作时间。在靠近模块的 VBAT 输入端，并联一个 100uF 的钽电容，以及 100nF、100pF 和 22pF 的滤波电容。同时为了提高模块承受浪涌电压的能力，在 VBAT 输入端增加一个 TVS 管。输入端参考电路如下：(TODO: 图片)

3.3 串口

bc35g 模块提供两对串口，分别为主串口和调试串口。主串口用于 AT 命令的通信、数据传输，在 Active、Idle 和 PSM 模式下均可工作。模块作为 DCE，连接方式为：(TODO: 图片: DCT-DTE 连接) 通过 RS323 电平转化芯片与 MCU 连接，为了降低串口功耗，在模块和主机之间加上 1k 欧姆电阻用于降低串口电流 (TODO:RS232 连接图)

3.4 射频模块

BC35G 天线部分预留了 pi 型匹配电路 (TODO: 图片), 以便对天线性能调节。C1 和 C2 两个电容将大多数交流成分滤除, R1 为 0 欧电阻, 充当 pi 型 RC 滤波电路的电感。为了确保射频信号的性能以及可靠性, 需要遵循 pi 型匹配电路的 layout。既要保证电容电感布局靠近, 也要防止出现 stub (TODO: 引用)

3.5 USIM 卡座

支持 3GPP 规范功能的 USIM 卡能接入运营商网络, USIM 功能包括模块和卡座, 为了确保 USIM 卡的性能以及避免与射频、电源模块的干扰, 须遵循以下设计原则:

1. 卡座和模块尽量靠近, 信号线不超过 200mm 保证信号品质
 2. 信号线远离 RF 走线及 VBAT
 3. 防止 USIM_DATA 和 USIM_CLK 信号干扰, 两线之间加入地屏蔽
 4. USIM_DATA, USIM_VDD, USIM_CLK, 和 USIM_RST 并联 33pF 电容滤除 RF 干扰
 5. 为了防止静电, 在卡座和模块之间增加 TVS 管
- USIM 卡使用内部电源 3v 供电, 引脚定义如下
USIM 卡座电路图: (TODO: 图片)

3.6 本章小结

第四章 模块验证与实验

基于 NB-IOT 的中断应用大致分为 4 类，分别是固定上报类，固定控制类，移动上报类和移动控制类。不同类别的应用因为数据的实时性、数据量、部署环境等的不同，对网络以及电源的需求也不同。例如对于固定控制类，由于设备部署位置固定，常有外部电源支持，需要较强的实时性，所以对功耗需求不高，需要模块时刻保持在线状态。接下来将以一个固定上报类终端对 bc35g 模块进行验证。

4.1 华为云平台应用开发

华为 OceanConnect 物联网平台作为一个连接业务应用和物联网设备的中间层，提供了海量设备接入管理，屏蔽复杂的设备接口，可以快速构筑物联网应用。

4.1.1 定义产品

产品是指一类具备相同能力和特征的设备，一个产品包含产品模型、编解码插件等资源。选用 CoAp 协议，由于使用 JSON 的数据格式对能耗消耗太大，不适用于物联网设备，所以选用二进制码流的数据格式，通过开发编解码插件解析。

设置产品信息 ⓘ

×

• 产品名称：bs

• 产品型号：v1

• 厂商ID：3bc97dd3229b4bacaeba0de0913b73ad

• 所属行业：模组与开发板

• 设备类型：Bulb

• 接入应用层协议类型 ⓘ CoAP

注意：CoAP协议的设备需要完善数据解析，将设备上报的二进制数据转换为平台上的JSON数据格式

• 数据格式：二进制码流

图 4-1 oc 产品定义

4.1.2 定义 profile 与编解码插件

profile 是描述产品设备信息的文件，定义了设备与应用服务器交互的字段及格式。其主要包含产品信息、服务能力以及维护能力。以控制开发板 LED 灯相关的 profile 信息为例，定义 profile 如下：

表 4-1 profile 格式

属性列表			
属性名称	类型	取值	描述
led0	int	0 ~ 1	0:led0 关闭 1:led0 开启
led1	int	0 ~ 1	0:led1 关闭 1:led1 开启
beep	int	0 ~ 1	0: 蜂鸣器关闭 1: 蜂鸣器开启

命令列表				
命令名称	字段属性	字段名	取值	描述
set_resource	请求	num	1-3	资源编号
	请求	state	0-1	资源状态
query_resource	请求	num	1-3	资源编号

二进制数据格式需要编解码插件才能解析，在 oc 平台上设置好 profile 文件后，将相应属性值与消息模板中的字段相连接，oc 平台将会自动生成编解码器，在 stm32 中也根据消息模板对消息进行编解码。

表 4-2 消息模板

消息类型	字段名称	数据类型	偏移量	字段解释	消息解释
resource_info	messageId	uint8	0-1	消息类型编号：2	模块上报消息
	led0	uint8	1-2	led0 状态	
	led1	uint8	2-3	led1 状态	
	beep	uint8	3-4	beep 状态	
set_resource	messageId	uint8	0-1	消息类型编号：0	模块控制消息
	num	uint8	1-2	需要控制的资源编号	
	state	uint8	2-3	资源状态	
query_resource	messageId	uint8	0-1	消息类型编号：1	触发模块上报
	num	uint8	1-2	需要上报的资源编号	

4.1.3 接入设备

通过串口连接设备，使用 AT+CSGB=1 命令查询设备 IMEI 号，在 oc 平台上增加设备，并从 oc 平台获取 CoAP 接入地址4-2，以作为 NCDP 参数，华为云平台

上的设置就完成了。

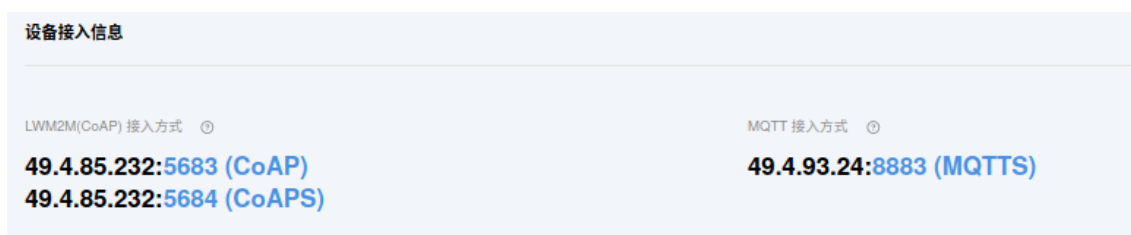


图 4-2 oc 接入方式

4.2 stm32 终端开发

stm32 终端选择一块搭载 stm32f103zet 的开发板，板载 4 组串口，第一组可用于 USB 通信。本次验证使用到其中第二组串口，对应引脚为 PA2 和 PA3。使用无源蜂鸣器及一组 LED 灯，作为控制量，对应引脚为 PB8，PB5，PE5。使用 key0-3，对应引脚为 PE2，PE3，PE4。

key0-3 用作外部中断输入，分别对应模块的初始化、重连和退网，led 和无源蜂鸣器用作被操控的系统资源，串口用于控制通信模块。

4.2.1 串口 DMA 通信

stm32 开发板控制 bc35g 模块是通过串口的方式，bc35g 串口比特率为 9600。为了接收变长的串口数据，可以有以下几种方式：

BC35G 模块串口传输数据以 'lr cr' 为分隔符，以软件的方式，设置超时接收固定长度并以 'lr cr' 分割，放入缓冲区中。由于模块涉及网络操作等原因，不同 AT 指令的响应时间有很大差距，所以超时时间不好确定，同时由于 MCU 等待模块输入，对效率影响较大。

利用定时器中断方式可以解决超时时间设置的问题。一个字节的的数据有起始位 + 数据 + 结束位共 10 位，在模块串口比特率为 9600 的情况下，传输一个字节需要 104us。同时由于两组数据之间需要间隔 3.5 字符，可以设置定时器中断为 5ms。在串口接收中断服务函数中开启定时器中断，每接收一个字符则重置定时器，当定时器超时时可以认为一组数据接收完毕，在定时器中断函数中将接收到的数据放入缓存中。但是由于是一字节一字节接收，而且 MCU 仍然参与接收过程，所以效率仍有提升必要。

为了进一步提升效率，可以使用 DMA 方式接收数据。为了区分两组数据，开启总线空闲中断，当 DMA 传输完毕时触发总线空闲中断，在总线空闲中断中标记数据就绪。DMA 方式能获得更好的效率。

```
1
2  /* main.c
3  * 使能串口2的总线空闲中断
4  */
5  __HAL_UART_ENABLE_IT(&huart2 , UART_IT_IDLE);
6
7  /* uart.c
8  * 检测空闲中断，标记数据可用，并重新开启中断用于下次接收
9  */
10
11  uint8_t UART2DATAREADY = 0;
12  uint8_t UART2RXBUFFER[UART_BUFFER_SIZE];
13
14  void USER_UART_IRQHandler(UART_HandleTypeDef *huart) {
15      if (huart == &huart2) {
16          if (RESET != __HAL_UART_GET_FLAG(&huart2 ,
17              UART_FLAG_IDLE)) {
18              __HAL_UART_CLEAR_IDLEFLAG(&huart2);
19              HAL_UART_DMAStop(&huart2);
20              UART2DATAREADY = UART_BUFFER_SIZE -
21                  __HAL_DMA_GET_COUNTER(&hdma_usart2_rx);
22          }
23      }
24  }
25
26  /* nbiot.c
27  * 封装AT指令执行模块，接收串口回传数据
28  */
29  void NBCommand(uint8_t *com, uint8_t com_size,
30      char *res, uint8_t *res_size) {
31      HAL_UART_Transmit(&huart2 , com, com_size - 1, 0xffff);
32      HAL_UART_Receive_DMA(&huart2 ,
33          UART2RXBUFFER,
```

```
34         UART_BUFFER_SIZE );
35     while (!UART2DATAREADY) {
36         HAL_Delay(50);
37     }
38     memcpy(res , UART2RXBUFFER, UART2DATAREADY);
39     *res_size = UART2DATAREADY;
40     UART2DATAREADY = 0;
41 }
```

4.2.2 入网初始化

bc35g 模块入网操作流程如图4-3

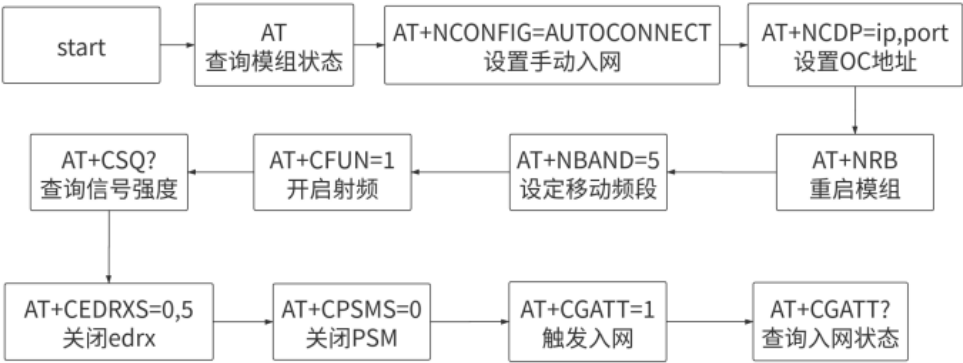


图 4-3 入网流程

根据模块入网操作流程，模块初始化执行序列如下：

如果入网失败，可以尝试重连

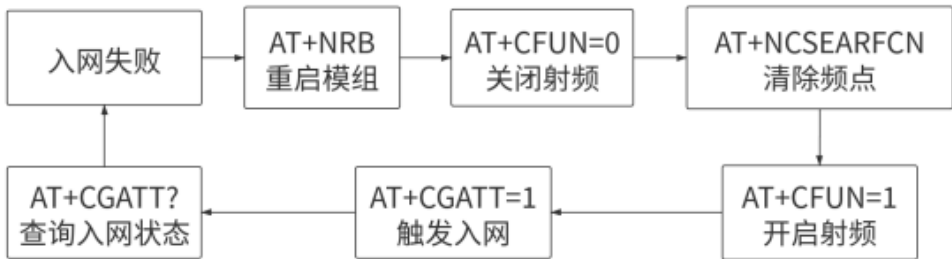


图 4-4 入网重试

4.2.3 模组通信

NBIOT 模块使用 AT+NMGS 命令发送数据

4.2.4 退网关机



图 4-5 模块关机

4.3 验证过程以及结论

4.4 本章小结

第五章 全文总结与展望

5.1 全文总结

(temp-TODO: 代码地址 https://github.com/chilogen/stm32_test/tree/feature/nbiot-bs)

(temp-TODO: 论文地址 <https://github.com/chilogen/ThesisUESTC>)

5.2 后续工作展望

模块的实际设计与开发需要投入不少资源用于生产试错的过程，就如 FPGA 的出现为芯片设计提供了极大地便利一样，SDR(Software Defined Radio) 通过软件来模拟传统的硬连线方式实现无线电通信，只需使用不同的软件就能在通用 PC 上实现一个通信模块具有的功能，不仅方便了无线电爱好者低成本的探索无线电世界，对于通信协议的研究也提供了快捷的方式。预期通过对通信原理的深入学习，可以实现用于 gnuradio 的 NB-IOT 插件，更加方便对 NB-IOT 技术的学习。

致 谢

非常感谢鲁晓军老师在毕设期间提供的悉心指导和检查老师认真负责提出的修改意见。

附录 A abc

A.1 abc

参考文献

- [1] 王浩刚, 聂在平. 三维矢量散射积分方程中奇异性分析 [J]. 电子学报, 1999, 27(12): 68-71
- [2] X. F. Liu, B. Z. Wang, W. Shao, et al. A marching-on-in-order scheme for exact attenuation constant extraction of lossy transmission lines[C]. China-Japan Joint Microwave Conference Proceedings, Chengdu, 2006, 527-529
- [3] 竺可桢. 物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1973, 56-60
- [4] 陈念永. 毫米波细胞生物效应及抗肿瘤研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2001, 50-60
- [5] 顾春. 牢牢把握稳中求进的总基调 [N]. 人民日报, 2012 年 3 月 31 日
- [6] 冯西桥. 核反应堆压力容器的 LBB 分析 [R]. 北京: 清华大学核能技术设计研究院, 1997 年 6 月 25 日
- [7] 肖珍新. 一种新型排渣阀调节降温装置 [P]. 中国, 实用新型专利, ZL201120085830.0, 2012 年 4 月 25 日
- [8] 中华人民共和国国家技术监督局. GB3100-3102. 中华人民共和国国家标准—量与单位 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994 年 11 月 1 日
- [9] M. Clerc. Discrete particle swarm optimization: a fuzzy combinatorial box[EB/OL]. http://clere.maurice.free.fr/ps0/Fuzzy_Discrere_PSO/Fuzzy_DPSO.htm, July 16, 2010

攻读本科学位期间取得的成果

- [1] J. Y. Li, Y. W. Zhao, Z. P. Nie. New memory method of impedance elements for marching-on-in-time solution of time-domain integral equation[J]. Electromagnetics, 2010, 30(5): 448-462
- [2] 张三, 李四. 时间步进算法中阻抗矩阵的高效存储新方法 [J]. 电波科学学报, 2010, 25(4): 624-631
- [3] 张三, 李四. 时域磁场积分方程时间步进算法稳定性研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(9): 090206-1-090206-6
- [4] 张三, 李四. 时域磁场积分方程时间步进算法后时稳定性研究. 电子科技大学学报 [J] (已录用, 待刊)
- [5] S. Zhang. Parameters discussion in two-level plane wave time-domain algorithm[C]. 2012 IEEE International Workshop on Electromagnetics, Chengdu, 2012, 38-39
- [6] 张三, 李四. 时域积分方程时间步进算法研究 [C]. 电子科技大学电子科学技术研究院第四届学术交流会, 成都, 2008, 164-168
- [7] 张三 (4). 人工介质雷达罩技术研究. 国防科技进步二等奖, 2008 年
- [8] XXX, XXX, XXX, XXX, 王升. XXX 的陶瓷研究. 四川省科技进步三等奖, 2003 年 12 月

外文资料原文

1 The OFDM Model of Multiple Carrier Waves

外文资料译文

1 基于多载波索引键控的正交频分多路复用系统模型