

基于低轨卫星互联网的双模通信终端技术

罗袁君, 白吟蕊, 姚永国, 孙 健
(重庆两江卫星移动通信有限公司, 重庆 401135)

摘 要: 提出一种融合创新的解决方案——双模通信终端, 集成了低轨道卫星通信和地面无线自组网的优点, 提供弹性通信解决方案。终端能够实时获取集群路由, 自主切换卫星通道和地面自组网通道, 降低对卫星互联网天地传输信道的压力, 实现多样化通信需求。在自组网内, 终端利用地面无线自组网进行信息传输, 建立用户集群并维护路由。超出自组网边界时, 终端自动切换到卫星通信模式并维系网络。该技术有望满足各种场景的通信需求, 包括应急响应和现场快速部署等。

关键词: 双模终端; 卫星互联网; 无线自组网; 融合通信

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024021

Dual-Mode Communication Terminal Technologies Based on LEO Satellite Internet

LUO Yuanjun, BAI Yinrui, YAO Yongguo, SUN Jian
Chongqing Liangjiang Satellite Mobile Communication Co., Ltd., Chongqing 401135, China

Abstract: This article proposed a fusion and innovative solution - a dual-mode communication terminal, which integrated the advantages of low-orbit satellite communications and terrestrial wireless self-organizing networks to provide flexible communication solutions. The terminal could obtain cluster routing in real time and autonomously switch between satellite channels and ground ad hoc network channels, reduced the pressure on satellite Internet space and ground transmission channels and realized diversified communication needs. Within the self-organizing network, the terminal used the terrestrial wireless self-organizing network to transmit information, established user clusters and maintain routes. When exceeded the boundary of the self-organizing network, the terminal automatically switched to satellite communication mode and maintained the network. This technology is expected to meet the communication needs of various scenarios, including emergency response and rapid on-site deployment.

Keywords: dual-mode communication terminal, satellite Internet, wireless ad hoc network, integrated communication

0 引言

低轨卫星互联网使用低轨卫星作为通信中继来实现全球的互联网服务, 由于低轨卫星轨道高度低、时延较小、传输能量强度低, 且成本相对较低, 服务可覆盖全球, 因此在航空通信、航海通信、海岛通信、偏远地区通信等商业场景具有明显的覆盖与成本优势。但是卫星互联网通信也存在一定的缺陷: 一是地面多节点与卫星进行移动通信时, 容易造成通信断链; 二是卫星资源有限, 资费较高昂; 三是在有遮挡处的通信质量较差^[1]。

地面无线自组网是由一组带有无线收发装置的可移

动节点所组成的一个临时性多跳自治系统。这种无线网络不需要预设的基础设施, 且每个节点都可以完成数据转发和路由功能, 也能作为终端实现各项应用功能, 具有可临时组网、快速展开、无控制中心、抗毁性强等特点, 应用前景广阔。但是这种网络只限于局部区域的通信, 无法实现与远端的通信^[2]。

双模通信终端是一种集成了卫星通信和地面无线自组网通信功能的终端设备。其主要特点是能够实时获取集群路由信息, 在卫星通道和地面自组网通道之间实现自主无缝切换, 以满足多样化通信需求。

目前全球使用较为广泛的卫星双模终端主要有铱星

双模终端和海事卫星双模终端。

其中铱星双模终端主要依托铱星低轨卫星网络,结合其他无线网络,如GSM、4G等,实现双模/多模通信,提供全球通信覆盖。它以其在偏远和充满挑战的环境中的可靠性和弹性著称,主要用于海上、航空和陆基场景,满足地面基础设施有限地区的关键通信需求^[3]。其缺点在于卫星星座体制和频谱制约造成带宽和数据传输速度方面的限制。

海事卫星双模终端依托海事卫星网络,并结合北斗卫星服务,以海事为重点,集成卫星和地面通信通道,确保即使在公海也能实现连接。它主要适配船舶跟踪、通信和安全保障场景,广泛应用于海运业,船对岸通信、导航以及地面网络失效的紧急情况^[4-5]。因为其采用高轨卫星作为载体,在恶劣天气条件下容易受到信号阻塞,在数据传输过程中可能出现高时延,同时其在高纬度地区无法开展通信业务^[6]。

本文所研究的基于低轨卫星互联网的双模通信终端,结合低轨卫星互联网与地面无线自组网的优点,将两者进行融合通信,可以充分发挥两者的优势^[7]。结合低轨卫星具有全球覆盖、更高可靠性、灵活网络拓扑结构等优点,可以实现更多应用场景的需求,提供更加强大、可靠的通信网络^[8-9]。

该双模通信终端具备自组网通信和卫星通信两种功能,两种功能通过自主切换实现通信功能的选择。当双模通信终端处于自组网内时,通过自组网进行信息传递;当双模通信终端处于自组网外时,可以自主切换到卫星通信模式,通过卫星链路实现同网内终端的通信功能,同时将路由状态、态势信息等进行更新。

1 双模通信终端技术概述

1.1 卫星通信终端基本构成

卫星通信终端是用于实现卫星通信的地面设备,按照功能可分为手持终端、物联网终端、数据传输终端等^[10]。由于便携性要求,本文采用手持终端,卫星通信频段为L频段。目前L频段为手持终端最常采用的通信频段。相比于高频段,L频段通信信号覆盖范围大,受天气影响小,研制技术较为成熟,可满足语音通话、短信、数据传输等功能要求^[11]。

卫星通信终端一般由收发一体化天线、射频前端、射频收发器、基带处理器等部分组成^[12]。各部分的主要功能如下。

(1)收发一体化天线:主要实现卫星信号的接收、发

射功能^[13]。

(2)射频前端:主要实现收发信号的分离、接收信号的低噪声放大和滤波、发射信号的滤波和功率放大等功能^[13-14]。

(3)射频收发器:完成基带数字信号与射频模拟信号的转换,包括调制解调、本振控制、基带滤波、数模/模数转换等,主要实现将接收信号进行下变频以及AD变换后送基带进行处理、将基带数据进行DA变换以及上变频处理^[15-16]。

(4)基带处理器:主要运行移动通信协议,实现物理层与协议层数据处理,同时进行基带信号收发操作,对协议层业务数据进行打包处理。

1.2 自组网通信终端

地面无线自组网是由一组带有无线收发装置的可移动节点所组成的一个临时性多跳自治系统,不同于传统的基站-终端结构形式,在这个无线网络中,每个节点都可以完成基站的数据转发和路由功能,也能作为终端实现各项应用功能^[17-18]。

自组网通信终端一般由天线、射频前端、射频收发器、基带处理器等部分组成^[19]。各部分的主要功能如下。

(1)天线:主要实现自组网信号的接收、发射功能。

(2)射频前端:主要实现收发信号的分离、接收信号的低噪声放大和滤波、发射信号的滤波和功率放大等功能。

(3)射频收发器:完成基带数字信号与射频模拟信号的转换,包括调制解调、本振控制、基带滤波、数模/模数转换等,主要实现将接收信号进行下变频以及A/D变换后送基带进行处理、将基带数据进行D/A变换以及上变频处理等功能。

(4)基带处理器:主要运行自组网通信协议,实现物理层与协议层数据处理,同时进行基带信号收发操作,对协议层业务数据进行打包处理。

1.3 双模通信终端融合技术

双模通信终端能够融合卫星通信与地面自组网通信的优点,但是在一个终端上实现两种不同的通信方式面临许多问题^[20],因此在设计中主要需要解决的难点问题如下。

(1)自适应路由机制

双模终端的自适应路由机制是需要深入探索的关键方面。与某些设计中的集中式路由不同,这里的自适应路由采用智能路由算法和决策机制。决策因素包括:资源利用效率和增强容错率^[21]。其中,智能路由算法在优化资源

利用效率方面发挥着关键作用, 它能动态适应网络状态, 实现路由策略的实时调整。自适应路由的一个重点是增强容错。通过不断评估网络环境, 终端能够在发生故障时及时识别并重新路由, 确保通信网络的弹性和容错性^[22]。

自适应路由涉及本地路由信息交互, 即允许在路由交换中进行本地决策以极大地增强路由灵活性, 使系统能够适应即时通信环境的变化, 确保网络灵活且响应迅速^[23-25]。

(2) 电磁兼容设计

多模通信终端具有自组网通信、卫星通信以及导航定位等功能, GNSS 卫星信号频率主要集中在 1 176~1 841 MHz, 其信号强度一般较弱而且容易受到遮挡和干扰。双模终端中的低轨卫星通信中心频率为 1 500~1 700 MHz, 与 GNSS 卫星信号 G1/L1/E1/B1C 及北斗卫星 BDSS 上行信号比较接近。由于低轨卫星通信上行通道一般需要大于 33 dBm 的发射功率才能保证通信的稳定性、连续性和可靠性, 当在频率接近且功率又大的情况下, 低轨卫星较容易干扰 GNSS 信号的接收。自组网模块工作频段为 1 400~1 500 MHz, 与卫星接收频段和 GNSS 频段接近。在多模通信终端设计时要考虑使用 S 频段和 C 频段通信存在与 L 频段无法集成的问题, 故在设计多模通信终端时, L 频段是首选的工作频段。这就导致了多模通信终端的工作环境的电磁频谱相对复杂, 在设计中需要充分考虑多模通信终端的电磁兼容问题。

实现电磁兼容设计的方法主要包括: 提升发射频谱纯度, 尽量减少杂散信号对其他通信系统的干扰, 这涉及改进终端发出的信号, 以实现更清洁、更高效的通信; 信噪比增强, 确保在具有潜在信号衰减的环境中实现稳定的通信; 优化 GNSS 接收通道, 通过频率规划、通道滤波和陷波等手段减少带外干扰对接收通道的干扰; 天线部署和内部隔离, 采用策略性天线部署方法并增强设备内部信号隔离; 优化天线设计, 最小化不同模块之间的干扰以及改善拥挤频谱中的信号接收; 内部隔离优化, 隔离终端内的不同组件, 防止卫星通信、自组网通信和其他功能之间的干扰。

(3) 小型化、低成本设计

由于卫星通信终端与自组网终端的通信频段与协议体制不一致, 每个模组都需要设计单独的天线、射频通道、基带处理系统等, 因此实现两者通信功能的双模通信终端必然面临体积增大、重量增加、成本增多等一系列挑战, 在设计中需要着重考虑到多模终端的小型化、低成本等问题^[26]。

2 双模通信终端的设计与实现

2.1 系统组成

双模通信终端由卫星通信模组、自组网通信模组、应用模组、外部结构组成, 设备组成如图 1 所示。

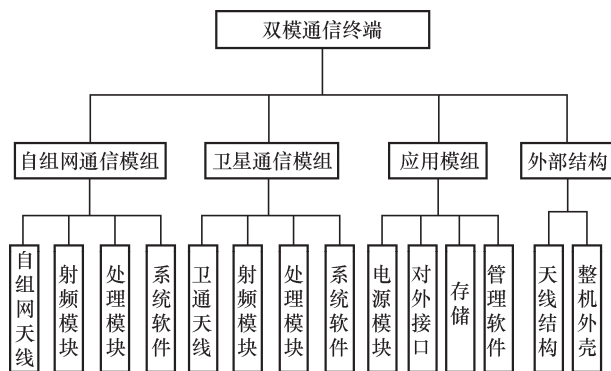


图 1 双模通信终端组成框图

其中自组网通信模组包含自组网天线、射频模块、处理模块以及系统软件等, 实现自组网通信功能。

卫星通信模组包含卫通天线、射频模块、处理模块以及系统软件等, 主要实现低轨卫星通信功能, 支持低轨卫星互联网通信应用, 包括支持语音业务、数据传输业务、短信收发业务, 满足低轨窄带标准体制要求和安全保密功能要求。

应用模组的主要功能为用户数据的采集处理、对外的接口信号处理、与通信模组进行信息数据的交互、整板稳定的电源供给以及直流-直流 (DCDC) 电源转换、电源低功耗控制等。

2.2 整机数据流

2.2.1 控制流

卫星通信模组通过 USB/网口把采集的控制信令由应用处理器发送给自组网通信模组数字接口, 周期性采集自组网通信模组从基带处理器送来的自组网状态标志位; 应用模组通过通用异步收发传输器 (UART) 接口把配置信息传输给卫通基带处理芯片, 并对卫通基带处理芯片和射频前端进行参数配置。

控制流程如图 2 所示。

在脱离自组网范围后, 即进入随遇接入模式, 自组网状态标志位翻转, 应用处理器把相应控制字段置位, 发送给卫星通信模组基带处理芯片, 卫星通信功能使能后自动搜寻并连接低轨卫星, 申请信道占用, 相关信令通过低轨卫星接入信关站并由核心网进行鉴权和资源分配, 信关站将分配信道资源信息发给低轨卫星为终端分配信道资源, 建立连接。

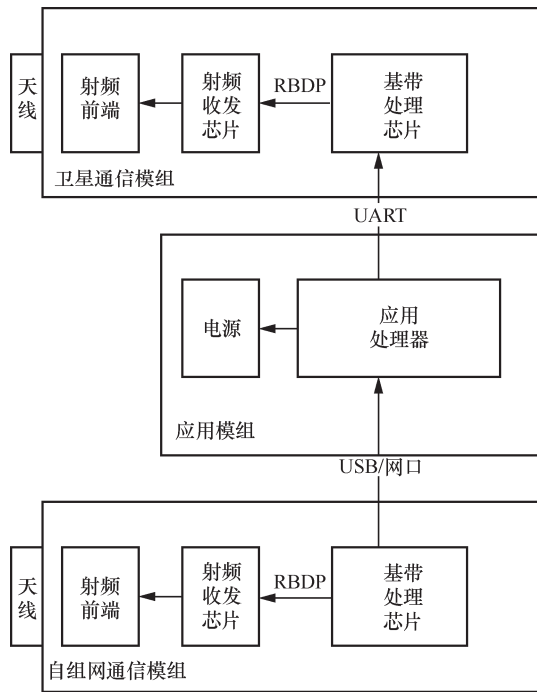


图2 控制流程

2.2.2 信号流

2.2.2.1 跨域通信数据流

当双模通信终端设备处于自组网内时，利用自组网模组进行自组网内通信，实现信息的传递与交互共享。

当两个跨网终端均处在各自自组网覆盖范围内时，为了实现跨域通信模式，有通信需求的节点利用自组网模组向网内对外中心节点发起跨域请求，并附加被寻呼节点地址标志。中心节点应答后，卫星通信模组基带处理芯片卫星通信功能使能，自动搜寻并连接低轨卫星，信道分配后与对方自组网中心节点建立连接。对方中心节点识别到协议标志位后，应用处理器控制自组网模组通信功能打开，并路由到被寻呼节点，被寻呼节点应用模组收到指令后使能数据通信功能；与数据通信源节点握手成功后，通话双方应用模组通过数字接口采集业务数据，并对数据进行拆/组包处理后，通过 AT（Attention）命令发送给协议处理器；由高层协议处理单元对数据进行拆分或重组，再由通信模块进行信道编码、调制后由无线前段-基带数字关联（RBDP）接口送到射频收发芯片转换为 L 频段射频信号，并经射频前端功率放大器放大后由天线发送至本网络中心节点，由中心节点通过卫星互联网透明转发至对方目的节点。

2.2.2.2 随遇接入数据流

当双模通信终端设备处于自组网通信距离外时，应用模组自动读取状态字对双模通信终端进行网内外判断，确

认已脱网时，将状态位发送给卫星通信模组，终端整机自动切换为卫星通信模组工作完备态。应用模组通过数字接口采集业务数据，并对数据进行拆/组包处理后，通过 AT 命令发送给协议处理器；由高层协议处理单元对数据进行拆分或重组，再由通信模块进行信道编码、调制后由 RBDP 接口送到射频收发芯片转换为 L 频段射频信号；经射频前端功率放大器放大后由天线发送至卫星。通过卫星互联网将业务数据路由到自组网内部携带双模通信终端的节点。

信号流程如图3所示。

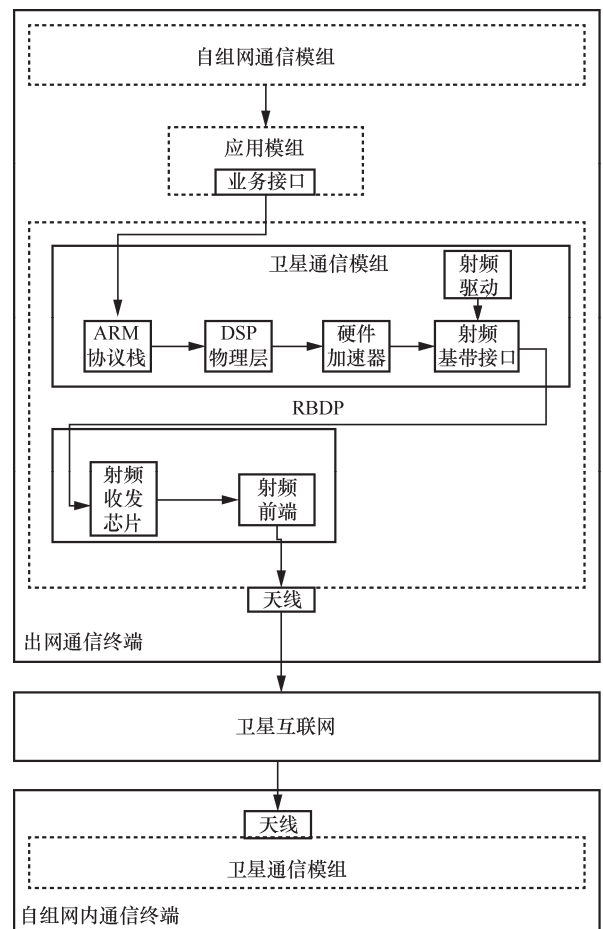


图3 信号流程

自组网内部携带双模通信终端的节点同理可以通过卫星互联网将业务数据路由到脱网节点，反向信号流程与正向通路一致，信号流向相反。

2.3 硬件设计方案

2.3.1 自组网通信模组设计

自组网模块为点对多点宽带自组网通信模块，该模块采用正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）和多输入多输出（Multi-Input & Mul-

ti-Output, MIMO) 等关键技术, 支持 20 MHz 带宽, 支持最大 16 个接入节点, 支持 5 Mbit/s 的通信速率。该模块采用扁平化系统架构设计, 有效减少系统时延, 提高系统传输能力, 具备传输距离远、数据吞吐量大、抗干扰性强的特点。该模块采用 SOC 芯片, 提高集成度, 大大降低系统功耗, 减小模块尺寸, 满足用户自组网的建设需求。自组网通信模组的硬件框图如图 4 所示。

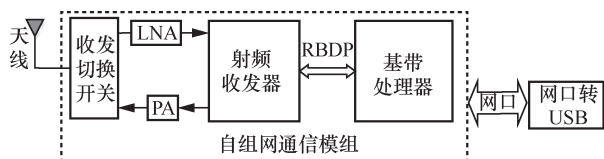


图 4 自组网通信模组的硬件框图

2.3.2 卫星通信模组设计

双模通信终端中的卫星通信模组的硬件框图如图 5 所示。

2.3.3 应用模组

应用模组的主要功能为用户数据的采集处理、对外的接口信号处理、与通信模组进行信息数据的交互、整板稳定的电源供给以及 DCDC 电源转换、电源低功耗控制等,

因此采用 ARM 嵌入式应用处理器架构, 通过处理器的各种对外接口以及选用对应的外设模块, 实现需要的各种功能。应用模组的硬件框图如图 6 所示。

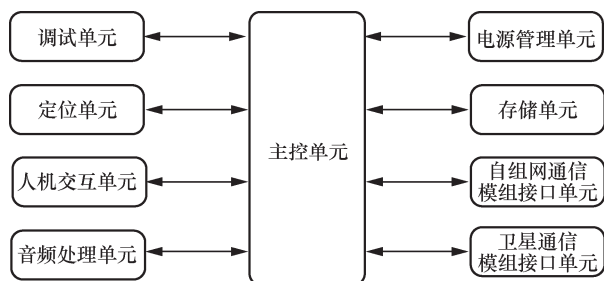


图 6 应用模组的硬件框图

主控单元: CPU 主控, 为软件提供运行环境并提供各类数据接口; 作为整个系统的主控单元, 负责管理各种外设和接口, 同时也是应用操作系统和代码的运行平台。

存储单元: 实现 RAM+ROM 功能; 用于存储非易失的用户数据以及代码, 以及作为系统内存使用。

人机交互单元: 包含显示、按键和指示灯等, 实现人机交互。

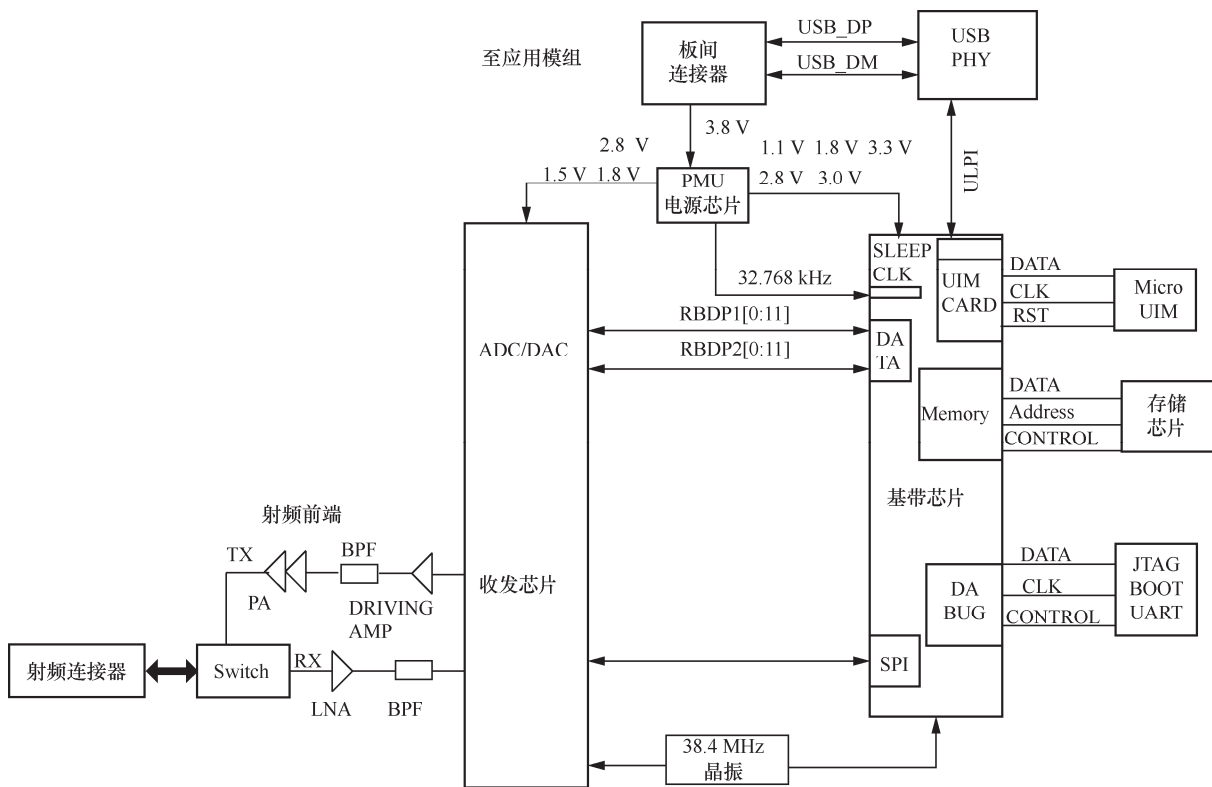


图 5 卫星通信模组的硬件框图

音频处理单元：实现音频通路和音频处理。

定位单元：实现定位功能并对通信模组提供秒脉冲输入信号。

自组网通信模组接口单元：实现与自组网通信模组的板对板连接接口，实现自组网通信模组所需的数据、控制和供电。

卫星通信模组接口单元：实现与卫星通信模组的板对板连接接口，实现卫星通信模组所需的数据、控制和供电。

电源管理单元：实现系统充电和供电管理。

2.4 软件设计方案

2.4.1 终端软件组成

软件设计包含针对通信模组的基带软件设计和针对应用模组的应用软件设计。基带软件主要完成射频信号的编解码及解析等功能，应用软件主要完成用户数据获取、整机控制以及与通信模组进行交互等功能。

2.4.2 自组网通信模组软件方案

自组网通信模组软件基于定制化基带平台进行开发，主要包括数字信号处理器（DSP）处理部分和数据控制接口部分。该部分采用模组全集成方案，通过整机联合测试。

2.4.3 卫星通信模组软件设计

卫星通信模组软件为基础软件，分为物理层和协议栈，其中平台软件负责底层软件初始化、基带信号控制收发等操作，属于物理层子系统。物理层主要负责底层基带信号的数字化收发处理，包括调制解调、编解码、数据校验和加解扰等操作。协议栈负责用户接入控制、数据收发控制、数据同步控制等操作。

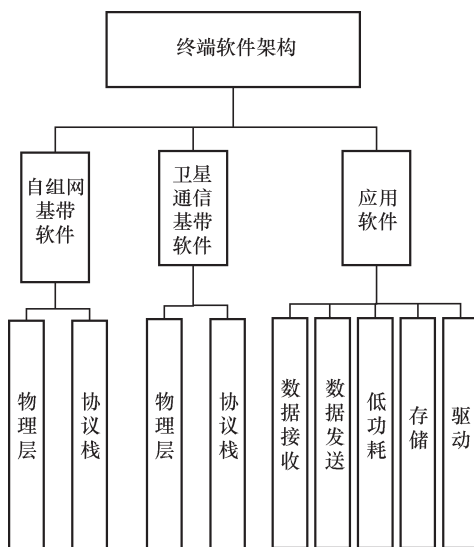


图7 软件设计方案框图

2.4.4 应用模组软件设计

此部分的软件设计包括运行于客户端与服务端端的即时通信软件以及移动报文转换与探测软件。

2.4.4.1 软件组成

（1）即时通信软件

应用模组中的软件基于当前的安卓系统平台和通信程序代码基础进行设计，通过客户端 bind 服务器端的方式建立连接，其中网络的终端设备失活由移动设备移动报文转换与探测软件主动通知。

考虑到系统的后续可扩展性，在即时消息服务器中采用一切都是消息的设计理念，从而轻松地扩展自定义消息，无须修改服务器代码。通过使用微服务架构，可以使用集群进行部署。通过在服务器上的部署，开发人员可以快速地将即时消息和实时网络功能集成到自己的应用程序中，并确保业务数据的安全性和隐私性。服务端由接入层、逻辑层和存储层组成，如图8所示，各个层次能够依据业务特点专注于本层次的事情，提高系统复用性，降低业务间的耦合。

接入层：消息通过 websocket 协议接入，其他通过 http/https 协议接入，消息是高频及核心功能，通过双协议路由，体现了轻重分离的设计思想。

逻辑层：通过 rpc 实现无状态逻辑服务，易于平行扩展，消息通过 MQ 解耦。

存储层：Redis 存储 token 和 seq；MongoDB 存储离线消息，并定时删除 14 天（可自行配置）前数据；MySQL 存储全量历史消息以及用户相关资料。数据分层存储，充分利用不同存储组件的特性。

ETCD：服务发现和注册，以及分布式配置中心。

服务器配置分为基础组件配置和业务内部服务配置。开发人员在使用产品时需要填写每个组件的地址作为其服务器组件的地址，并确保业务的内部服务端口未被占用，主要的服务组件如下。

ETCD 用于发现和注册 rpc 服务，ETCD Schema 是注册名称的前缀，建议修改为用户公司名称，ETCD 地址（ip+port）支持集群部署，可以填写多个以逗号分隔的 ETCD 地址，也可以只填写一个 ETCD 地址。

MySQL 用于消息和用户关系的完整存储，暂时不支持集群部署，修改地址、用户、密码、数据库名称。

MongoDB 用于消息的离线存储，默认存储为 7 天，暂时不支持集群部署，只需修改地址和数据库名称。

Redis 目前主要用于消息序列号存储和用户令牌信息存储，暂时不支持集群部署，只需修改相应的 Redis 地址

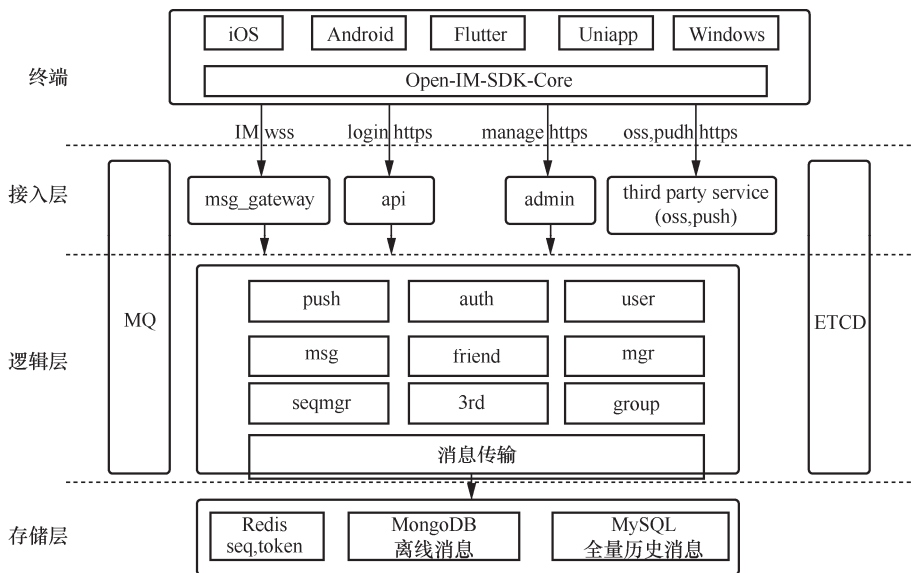


图 8 服务端框架示意

和密码即可。

Kafka 是使用 Kafka 作为消息传输的存储队列，支持集群部署，只需修改相应的地址即可。

服务器端消息模型采用经典的收件箱模型，并通过全局 seq 做消息对齐，简化架构，体现了简单美的架构设计理念。

即时消息客户端 SDK 负责和 IM 服务端交互，本地数据存储和同步，消息、事件回调。开发者通过集成 SDK，自行开发聊天用户界面（UI），设置事件监听回调实现数据和 UI 对接。

（2）移动报文转换与探测软件

在本次设计中，考虑到移动设备丢失需通过 TCP/IP 接口的方式通知到其他终端设备，本方案设计通过转换表实现双向通信，并采用 ARP 免费报文的方式来实现设备保活探测，如图 9 所示。转变表项见表 1。

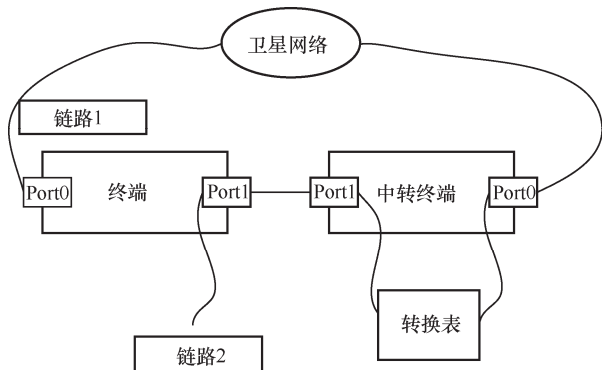


图 9 报文转换示意

表 1 转变表项

BD_ENTRY	
数据成员	意义
Uuid	唯一标识符
VnId	虚拟网络编号
Bd_hash_entry	哈希查询关键字
Arp_head	Arp 表的地址
Port_head	Port 表的地址
...	...

ARP 表项的主要数据结构见表 2。

表 2 ARP 表项的主要数据结构

ARP_ENTRY	
数据成员	意义
Uuid	群唯一标识符
TimeStamp	时间戳
Ip	IP 地址
Eth_mac	IP 对应的以太网 MAC 地址
Sync_flag	是否进行同步的标志
...	...

终端提供 ARP 代答和报文转发功能，因此需要在服务器端内部维护一个 ARP 表（MAC 表），用于映射 IP 与 MAC 之间的关系。ARP 表中 TimeStamp 表示 ARP 表项的时间戳，记录 ARP 表项更新的时间点，当一定时间内没有更新 ARP 表项时，则 ARP 表项老化，即无法再使用。

为了防止无用的 ARP 表项长期存储在内存中, 导致存储数量达到上限, 无法进行新的 MAC 学习, 老化时间不能设置过长。由于老化的 ARP 表项可能存在重新学习的可能, 因此系统并不对老化的 ARP 表项进行立刻清理, 而是提供一个计时器, 根据实际情况对老化的 ARP 表项定时清理。

2.4.4.2 软件功能

终端侧软件功能如下。

(1) 支持自组网和卫星网络双模双待通信, 具备简单便捷的触控操作界面, 适应当前手持机屏幕分辨率。

(2) 实现对低轨通信模组的调用, 获取卫星通道状态, 并建立数据通道完成数据传输。实现对自组网通信模组的调用、配置和网内节点通信。

(3) 终端能够准确识别当前自身所处的网络状态, 自主确认身份并开启相应配置: 若处于跨域通信模式中的自组网内, 节点间自主推选所在自组网中心节点(如 B 节点与 A 节点可通过协商, 选择其中一个节点作为中心节点开启双模模式, 另一节点开启单模模式); 若处于随遇接入通信模式, 自主/手动切换到双模。

(4) 终端依据当前自身身份, 启动对应的配置。

一是, 作为中心节点, 启动路由配置表并实时维护; 与网络服务器进行信息交互, 获取其他网络的路由数据。

二是, 作为非中心节点, 通过自组网链路从出口节点获取路由表。

(5) 支持的用户通信业务: 实时点对点语音双向通话、低速点对点文件传输、实时群组/点对点文字消息收发。

(6) 业务基于全 IP 传输, 包括语音、文字和数据。

(7) 具备终端工作日志查看和导出功能。

服务器侧软件功能如下:

(1) 所有数据业务均在服务器软件上进行处理和输入/输出;

(2) 服务器侧软件运行于核心网 Windows 操作系统上, 具有网络状态监控、网络主动配置调整、业务数据存储等功能;

(3) 能够回溯过往网络状态并显示;

(4) 能够与在网终端进行点对点/群组文字消息通信和文件传输。

3 应用展望

低轨卫星与地面自组网融合通信技术属于创新形态的通信应用技术, 本文介绍的双模通信终端能够实现低轨卫星通信与地面自组网通信, 并根据实际情况进行两种通

信方式之间的选择与切换。双模通信终端能够将低轨卫星通信与地面自组网通信各自的优势相结合, 使得通信网络边界拓展到无人区、海洋等, 可实现通信网络在任意时间、任意空间的全覆盖, 真正实现全球用户无缝连接。

卫星通信网络与地面通信网络融合是一个渐进式的过程, 未来的发展必然朝着智能化、小型化、低成本化、高服务质量方向发展。此技术亦可应用于其他卫星终端与无线自组网终端的融合设计中, 为双模终端的使用赋予更多可能。

4 结束语

由于双模通信终端需要支持不同的通信技术和协议, 在未来的设计中, 一方面可通过算法优化改进智能路由算法和决策机制, 提高资源利用效率和用户体验; 另一方面在硬件设计上, 通过研究更小型化、集成度更高的通信模组以及更优的天线设计等, 提升设备的便携性和舒适性。

参考文献

- [1] 禹华钢, 方子希. 低轨卫星互联网: 发展、应用及新技术展望[J]. 无线电工程, 2023, 53(11): 2699-2707.
YU H G, FANG Z X. LEO satellite Internet: development, application and prospect of new technologies[J]. Radio Engineering, 2023, 53(11): 2699-2707.
- [2] 马振洋, 史超翰, 丁桥, 等. 不同干扰对铱星机载导航设备接收信号的影响[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(5): 51-56.
MA Z Y, SHI C H, DING Q, et al. The influence of different interferences on received signals of iridium airborne navigation equipment[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(5): 51-56.
- [3] 黄琴. 海事/北斗双模通信终端设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
HUANG Q. The design and realization of imarsat&compass communication terminal[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [4] 谢永锋, 佟力, 吴亿, 等. 综合化船载卫星通信终端的设计及其在航海领域的应用[C]//第十三届卫星通信学术年会论文集. 北京: 中国通信学会, 2017: 426-430.
XIE Y F, TONG L, WU Y, et al. Design of integrated ship-borne satellite communication terminal and its application in navigation[C]//Proceedings of the 13th Annual Conference on Satellite Communication. Beijing: China Institute of Communications, 2017: 426-430.
- [5] 潘智坚. 构建灾难事件新闻报道系统 提高媒体应变能力[J]. 现

- 代电视技术, 2009(2): 110-113.
- PAN Z J. Constructing a disaster news reporting system to improve the media's ability to cope with emergencies[J]. *Advanced Television Engineering*, 2009(2): 110-113.
- [6] 张鹏飞, 李亮, 潘一航, 等. 基于双模高精度定位的智能环卫终端设备研究[J]. *交通科技与管理*, 2023, 4(20): 5-8.
- ZHANG P F, LI L, PAN Y H, et al. Research on intelligent sanitation terminal equipment based on dual-mode high-precision positioning[J]. *Traffic Technology and Management*, 2023, 4(20): 5-8.
- [7] 杨昕, 孙智立, 刘华峰, 等. 新一代低轨卫星网络和地面无线自组织网络融合技术的探讨[J]. *中兴通讯技术*, 2016, 22(4): 58-63.
- YANG X, SUN Z L, LIU H F, et al. Technology of new generation LEO satellite network and terrestrial MANET integration[J]. *ZTE Technology Journal*, 2016, 22(4): 58-63.
- [8] 岳洋, 倪少杰, 吕志成, 等. 低轨卫星互联网建模与仿真系统设计[C]//第三十四届中国仿真大会暨第二十一屆亚洲仿真会议论文集. 长沙: 中国仿真学会. 2022: 376-384.
- YUE Y, NI S J, LYU Z C, et al. Design of Internet modeling and simulation system for LEO satellite[C]//*Proceedings of the 34th China Simulation Conference and the 21st Asian Simulation Conference*. Changsha: China Simulation Society. 2022: 376-384.
- [9] 舒然. 基于北斗和卫星移动通信的多模终端设计[J]. *信息系统工程*, 2023(12): 86-89.
- SHU R. Design of multimode terminal based on Beidou and satellite mobile communication[J]. *China CIO News*, 2023(12): 86-89.
- [10] 黄越. 铱星、欧星及海事卫星手持式通信终端的企业应急通信选配建议[J]. *信息通信*, 2015, 28(9): 263-264.
- HUANG Y. Suggestions on enterprise emergency communication selection of handheld communication terminals of iridium satellite, European satellite and maritime satellite[J]. *Information & Communications*, 2015, 28(9): 263-264.
- [11] 王文哲, 安岗, 李忻, 等. 面向空天地一体化场景的 5G 卫星双模终端需求及应用探讨[J]. *电信科学*, 2022, 38(S1): 221-230.
- WANG W Z, AN G, LI X, et al. Discussion of 5G satellite dual-mode terminal requirement and application in the integration communication scenario of satellite and UTRAN[J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(S1): 221-230.
- [12] 贾蕾, 李运志. 北斗双模手持天线的研究与设计[J]. *电子世界*, 2020(17): 130-131.
- JIA L, LI Y Z. Research and design of Beidou dual-mode handheld antenna[J]. *Electronics World*, 2020(17): 130-131.
- [13] 李听听, 刘铭, 陈刘伟. 基于天通、北斗双模卫星通信的应急车载终端设计与实现[J]. *中国新通信*, 2021, 23(19): 22-25.
- LI T T, LIU M, CHEN L W. Design and implementation of emergency vehicle terminal based on Tiantong and Beidou dual-mode satellite communication[J]. *China New Telecommunications*, 2021, 23(19): 22-25.
- [14] 刘越, 黄印, 林玉洁, 等. 星地融合网络相控阵天线应用研究进展[J]. *空间电子技术*, 2023, 20(6): 52-63.
- LIU Y, HUANG Y, LIN Y J, et al. Research progress on application of phased array antenna in satellite-ground fusion network[J]. *Space Electronics Technology*, 2023, 20(6): 52-63.
- [15] 唐迪, 邵玆涓, 施文嘉, 等. 基于双模终端实现电力计量装置本地拓扑识别及通信功能[C]//第三届智能电网会议论文集. 2018: 244-248.
- TANG D, SHAO H M, SHI W J, et al. Realizing local topology identification and communication function of power metering device based on dual-mode terminal[C]//*Proceedings of the 3rd Smart Grid Conference*. [S.l.:s.n.], 2018: 244-248.
- [16] 王立国, 叶亮. 基于北斗双模终端的散射天线对准系统[J]. *无线电工程*, 2018, 48(5): 428-432.
- WANG L G, YE L. Alignment system of troposcatter communication antennas based on BD dual-mode terminals[J]. *Radio Engineering*, 2018, 48(5): 428-432.
- [17] 王晓鸣, 王雅, 白旭旭, 等. S 波段/北斗双模终端及传输系统设计与实现[C]//第十四届卫星通信学术年会论文集. 2018: 187-193.
- WANG X M, WANG Y, BAI X X, et al. Design and implementation of S-band/Beidou dual-mode terminal and transmission system[C]//*Proceedings of the 14th Annual Conference on Satellite Communication*. [S.l.:s.n.], 2018: 187-193.
- [18] 史洋. 宽窄带融合通信系统在消防应急救援中运用分析[J]. *中国新通信*, 2022, 24(9): 1-3.
- SHI Y. Analysis on the application of wide and narrow band unified communication system in fire emergency rescue[J]. *China New Telecommunications*, 2022, 24(9): 1-3.
- [19] 肖子玉. 多模共存的 5G 网络部署关键问题探讨[J]. *电信工程技术与标准化*, 2019, 32(11): 37-41.
- XIAO Z Y. Discussion on key issues of 5G network deployment with multi-mode[J]. *Telecom Engineering Technics and Standardization*, 2019, 32(11): 37-41.
- [20] 王龙河, 周一青, 曹欢, 等. 卫星互联网资源管控技术研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(6): 27-38.
- WANG L H, ZHOU Y Q, CAO H, et al. Resource management and scheduling for satellite Internet[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(6): 27-38.

- [21] 李靖. 中高轨通信卫星实现低轨卫星数据中继的应用研究[C]//第十一届中国指挥控制大会论文集. 2023: 484-487.

LI J. Research on the application of medium-high orbit communication satellites for data relay of low orbit satellites[C]//Proceedings of the 11th China Command and Control Conference. [S.l.:s.n.], 2023: 484-487.

- [22] 纪若愚, 张恒升, 刘美慧, 等. 卫星确定性网络关键技术和挑战[J]. 天地一体化信息网络, 2023(3): 99-106.

JI R Y, ZHANG H S, LIU M H, et al. Key technologies and challenges of satellite deterministic network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023(3): 99-106.

- [23] 李锐. 多层空间混合网络架构与路由设计[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院微小卫星创新研究院), 2023.

LI R. Multi-layer Hybrid Space Network Architecture and Routing Designs[D]. Shanghai: Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, 2023.

- [24] 何健辉, 王梓斌, 熊刚, 等. 卫星互联网无线接入技术研究[J]. 信息安全与通信保密, 2023(1): 97-105.

HE J H, WANG Z B, XIONG G, et al. Research on wireless access technology of satellite Internet[J]. Information Security and Communications Privacy, 2023(1): 97-105.

- [25] 王达, 童建飞, 穆飞宇. 手机直连卫星通信: 发展现状、应用场景和标准演进[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 795-802.

WANG D, TONG J F, MU F Y. Satellite communication supporting direct connection with mobile phones: development trend, application scenario, and standards evolution[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 795-802.

[作者简介]



罗袁君(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信及无线通信终端应用。



白吟蕊(1992-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星通信。



姚永国(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为数据通信系统。



孙健(1979-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为通信产品整机设计和应用。