

# C 波段基站式多目标遥测网络构建技术

霍朝晖, 惠力

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

**摘要:** 随着航空工业的不断发展, 现行航空测试使用的 IRIG-106 标准的 S 波段单向点对点的 PCM 数据传输体制已不能满足新技术、新测试发展的需求, 需要突破现有传输体制, 探索数据传输新模式; 文中结合美国 iNET 标准, 选定 C 波段作为遥测传输频段, 在成熟的网络通信技术的基础上, 开展 C 波段基站式多目标遥测网络构建技术研究, 主要从架构设计、接入体制、系统研制等方面进行了研究; 最后通过构建 C 波段基站式多目标遥测网络飞行试验演示验证系统进行了验证; 验证结果表明文中设计的系统能够实现遥测数据的传输; 通过 C 波段基站式多目标遥测网络构建技术的研究, 突破了传统遥测体制, 实现了基于 C 波段的基站式遥测数据传输, 为实现高速、双向、多目标空地数据传输提供基础。

**关键词:** C 波段; 基站式; 多目标; 空地数据传输

## Construction Technology of C-band Base Station Multi-target Telemetry Network

Huo Zhaohui, Xi Li

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** With the continuous development of the aviation industry, the current IRIG-106 standard S-band of point-to-point PCM data transmission system used in aviation testing can no longer meet the needs of new technologies and new test development tests. It is necessary to break through the existing transmission system and explore new data transmission mode. Combined with the American iNET standard, the C-band is selected as the telemetry transmission frequency band. Based on the mature network communication technology, the research on the construction of the C-band base station multi-target telemetry network is carried out, mainly from the aspects of architecture design, access system, system development, etc. Finally, it was verified by constructing a C-band base station multi-target telemetry network flight test demonstration and verification system. The verification results show that the system designed in this paper can realize the transmission of telemetry data. Through the research on the construction technology of the C-band base station multi-target telemetry network, it has broken through the traditional telemetry system and realized the C-band base station telemetry data transmission, which provides the foundation for high-speed, two-way, multi-target air-ground data transmission.

**Keywords:** C-band; base station; multi-target; air ground data transmission

## 0 引言

随着航空工业技术的不断发展, 新机型的复杂度越来越高, 导致在飞行试验中测试参数的种类与数据量越来越大<sup>[1]</sup>。现行航空飞行试验测试使用的符合 IRIG-106 标准的 S 波段单向点对点的 PCM 数据传输系统受设备与技术限制, 数据速率最大可传输 20 Mbps, 传输距离不足 300 km, 不能满足新技术、新测试发展对数据传输的需求<sup>[2-3]</sup>。针对上述问题, 本文将开展 C 波段基站式多目标遥测网络构建技术研究, 突破 S 波段点对点传输模式, 建立基于移动基站的 C 波段无线双向网络传输链路, 提升数据传输速率, 实现跨区域的试验与测试网络系统。

## 1 架构设计

### 1.1 蜂窝架构及原理

本文将引入蜂窝网络实现 C 波段基站式多目标遥测网

络的架构设计。蜂窝网络被广泛采用源于一个数学结论, 即: 以相同半径的圆覆盖平面, 当圆心处于正六边形的中心, 也就是圆心处于正三角网格的格点时, 圆的数量最少。在通信系统中, 使用圆形来表述工程实践是合理的。出于构建成本的考虑, 正三角网格(也称为简单六角网格)是做好的选择。这样形成的网络重叠在一起, 形状非常像蜂窝, 因此被称作蜂窝网络。

为实现基于 C 波段的多目标遥测网络, 本文采用基于移动基站的 C 波段无线双向网络传输方式, 以支持半径 50 km 的可视空域通信覆盖, 使数据传输速率达到 50 Mbps, 传输延时不大于 200 ms<sup>[4]</sup>。

C 波段基站式多目标遥测网络属于空地遥测遥控, 无线信道环境简单, 采用大区制蜂窝网络布局, 利用地面基站式遥测遥控设备实现飞行空域覆盖。单位无线区群为 7 ( $N=7, j=2, i=1$ ), 通过增加单位无线区群, 实现多个星形

收稿日期: 2020-05-13; 修回日期: 2020-07-06。

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2016205B006)。

作者简介: 霍朝晖(1971-), 男, 河北保定人, 硕士, 研究员, 主要从事飞行试验遥测与监控技术方向的研究。

引用格式: 霍朝晖, 惠力. C 波段基站式多目标遥测网络构建技术[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 6-9.

网络拓扑结构, 不增加频率范围就可以增加网络覆盖面积<sup>[5]</sup>。每个星形中心节点为基站式遥测遥控设备, 移动节点为机载端遥测遥控设备, C 波段基站式多目标遥测网络架构如图 1 所示。

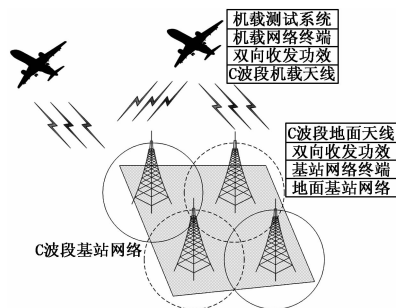


图 1 C 波段基站式多目标遥测网络架构

## 1.2 蜂窝架构说明

C 波段基站式多目标遥测网络系统由机载端遥测遥控设备、基站式遥测遥控设备、网络服务器、空地接口、IU 接口等组成<sup>[6]</sup>, 如图 2 所示。

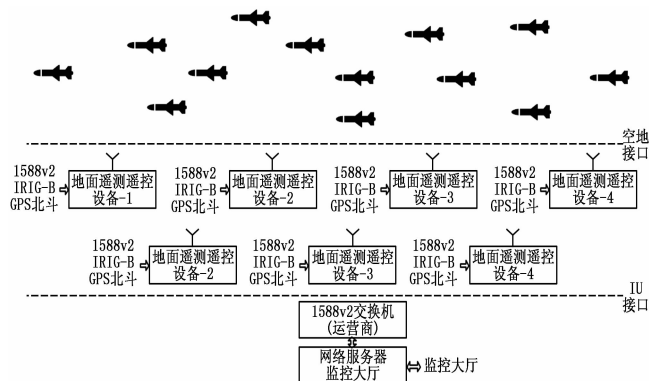


图 2 C 波段基站式多目标遥测网络系统结构

机载端遥测遥控设备由机载端 C 波段网络收发器、双向功率放大器、机载天线组成, 实现机载端入网、退网、TDD 双工数据传输、状态检测、参数设置等功能。

基站式遥测遥控设备由地面端 C 波段网络收发器、双向功率放大器、基站天线组成, 实现 TDD 双工数据传输、状态检测、参数设置等功能。

网络服务器具有通过 SNMP 协议管理各个机载端遥测遥控设备和基站式遥测遥控设备、对机载端遥测遥控设备归属区域的移动性管理、双向数据交换等功能。

空地接口是机载端遥测遥控设备与基站式遥测遥控设备间的无线接口协议。

IU 接口是基站式遥测遥控设备与网络服务器间的以太网接口协议。

在网络构建过程中, 将机载网络收发器、功率放大器、C 波段机载天线改装至试验机, 地面将 C 波段基站天线、双向功放、网络收发器加装至 C 波段网络基站, 交换机与基站交换网络相连, 所有的基站通过地面光纤网络汇聚到本地数据处理中心。

## 2 C 波段基站式多目标遥测网络系统接入体制

C 波段基站式多目标遥测网络系统采用 TDMA 接入体制, 相比较随机接入类型 MAC 体制具有更高的资源利用率, 更加容易实现时延控制和 QoS 控制, 是更加适合飞行试验空地遥测网络应用特点的一种媒体访问控制架构。

### 2.1 TDMA 协议设计

对 TDMA 协议设计而言, 本文针对以下三个关键环节进行了分析。

#### 1) TDMA 时槽 (Slot) 的分配:

本文设计网络内每个用户占用 1 个或多个 Slot 用于通信, Slot 数量根据网络内接入节点数量、接入顺序和每个用户 QoS 配置确定。全体网络节点 (试验对象和地面基站) Slot 形成一个周期重复的时间环。对于 Slot 长度设计, 首先 Slot 长度应满足信道相干时间要求, 其次 TDMA Slot 长度固定, 以便于实现和分配, 再次 TDMA Slot 长度设计应考虑数字电路设计时序同步的便捷。

#### 2) MAC 接入控制机制:

采用以地面基站为本小区中心节点的接入控制机制, 每次飞行前通过设备管理软件, 在地面 C 波段网络终端预先设置本次飞行的机载 C 波段网络收发器的 ID 号 (即地址码)、信道访问顺序、QoS 等工作参数, 从而确定本次工作 TDMA 时间环的结构, 同时每次地面基站 Slot (用于传输上行数据帧) 中广播占用随后 Slot 的机载 C 波段网络终端的 ID 号, ID 号按照已设置的顺序依次广播, 周期重复, 从而实现全体 TA 的信道访问控制。同时, 各地面基站的总体时隙分配由地面基站控制器 (AC) 统一分配和管理。

#### 3) 空地 TDMA 同步控制:

本文设计了一种由地面 C 波段网络终端发起的同步周期修正机制, 即地面基站 Slot 内的上行数据帧, 在完成向机载 C 波段网络终端传输控制数据的同时, 兼做周期同步修正时标, 空地收发器仅需在两次修正期间内保持短期相对稳定即可。因为这一周期仅为若干毫秒, 因此即使采用较低稳定度时钟, 短时间内也完全可以认为时钟是充分稳定的, 从而可靠地满足了 TDMA Slot 的精度要求 ( $\mu\text{s}$  级)。同时, TDMA 协议设计还预留了保护间隔, 即空中无线信号传播时延补偿 (对应 50 km 最大 167  $\mu\text{s}$ ) 和各种处理时延 (收发切换、硬件处理时延和软件处理时延, 总量小于 50  $\mu\text{s}$ ) 的补偿量。

### 2.2 QoS 设计分析

本文采用的 TDMA 体制为实现灵活 QoS 处理提供了基础。QoS 设计主要涉及上下行带宽分配与数据速率自适应两个方面。

由于 TDMA 体制采用固定长度 Slot 模式, 因此在 MAC 层设计了基本传输帧+复帧+超帧的架构, 基本传输帧长度为 Slot 长度, 是最小传输单元, 复帧由 1 个或多个同方向基本传输帧组成, 分为上行复帧和下行复帧, 而超帧又由上行复帧和下行复帧及保护间隔组成。通过灵活分配上下行复帧中的基本传输帧数量, 可以按比例灵活分配

上下行用户带宽。

此外，为实现遥测全程链路稳定接通，本文除设计足够的射频链路余量和信道补偿机制外，设计了数据速率动态自适应机制，即每数据帧的发射数据速率依据当前本设备接收性能动态变化，为保证判断可靠性，采用接收信号强度+误码性能联合作为判决依据，可以快速准确真实反映当前信道实际能力，从而选择适合当前信道的数据速率。

### 2.3 C 波段基站式多目标遥测网络系统安全认证方案

C 波段基站式多目标遥测网络系统具有高度的开放性，空域广、功率大，传输的信息易于窃取、篡改和插入。因此，遥测网络系统安全和认证尤为重要。遥测网络系统的安全需求主要体现在以下两个方面：

1) 遥测网络安全认证方案。本文参照 iNET 中的 RF 网络单元标准，采用无线局域网媒体访问控制和物理层规范。安全认证系统由认证服务器、基站认证端、试验机认证端三部分组成，如图 3 所示。其中试验机认证端提出认证请求，通过驻留于试验机认证端的请求端口接入实体发送接入请求，基站认证端是控制试验机认证端接入网络的实体，利用驻留于基站认证端的认证 PAE 对接入请求进行认证；认证服务器是为认证系统提供认证服务的实体，对请求方进行鉴权。

2) 端到端加密方案。对于飞行试验较高密级信息的数据加密要求，采用端到端加密方式，即在试验机和基站的网络终端输入、输出端增加一台具备保密资质认证的数据加密机，以实现高等级数据的加解密。在工程样机研制中保留端到端加密设备连接接口，需要增加端到端的加解密机，只需采购具有资质的标准设备即可。

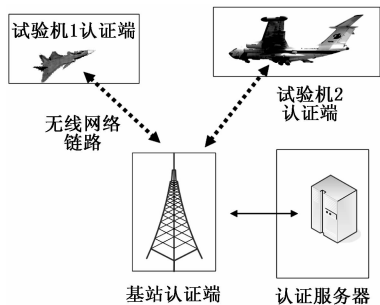


图 3 安全认证方案

## 3 C 波段遥测网络终端系统研制

在面向飞行试验的场景下，C 波段基站式多目标遥测网络系统应具备功能：1) C 波段（4.4~4.94 GHz）工作频点与多信道能力；2) C 波段网络收发器必须支持通信处理体制灵活可变，即设备一体化、功能软件化，决定了收发器设计实现应采用软件无线电技术架构；3) 高达 50 Mbps 的数据速率要求 C 波段网络终端设计考虑高阶调制模式和多种带宽增强方案，具备足够强大的数字信号和软件处理资源与处理速度；4) 空地快变通信信道和高频点高速移动

通信环境决定了 C 波段网络终端数字信号处理部分应具备载波同步、符号同步、数据帧同步算法以及数字电路实现设计应预留足够的处理余量<sup>[7]</sup>。

### 3.1 机载/基站式网络收发器结构与组成

机载和地面 C 波段网络收发器的原理图如图 4 所示。

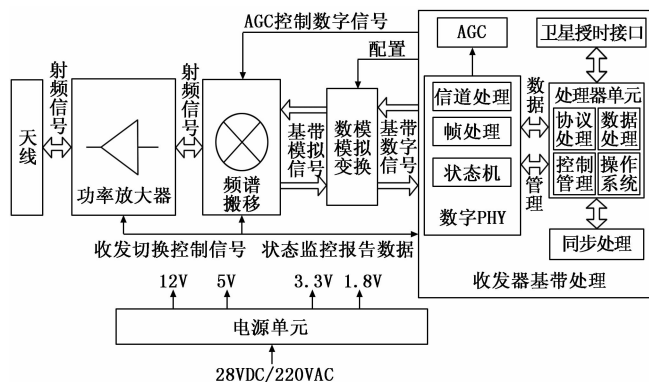


图 4 收发器原理图

收发器整体设计基于大规模高速 FPGA+高速嵌入式处理器的 SDR（软件无线电）架构实现，由 AD/DA（模数-数模转换）实现模拟与数字分割界面。大规模 FPGA 实现的数字 PHY 和高速嵌入式 ARM 主控处理器实现数字信号处理与 MAC 协议处理，完成核心的数据处理过程，包括调制解调、符号同步、载波恢复、时频域转换（FFT/DFFT）、数据帧同步、数据帧装帧拆帧、信道补偿处理（含信道估计与补偿、FEC 编解码）、数字削峰处理、高速数字接口、TDMA 协议状态机等全部功能，在单一设备内完成一个完整的网络化无线收发处理流程。收发器通过 2 个符合标准 IEEE802.3u 10/100/1000M 自适应网络与机载网络系统或地面网络接口，整机基于 TCP/IP 的全透明化网络数据传输体制，设备工作于对等传输模式（即通信两端基本收发模式和通信体制相同）。

### 3.2 C 波段双向宽带线性功率放大器设计

本文在 C 波段双向宽带线性功率放大器设计中采用 TDD（time division duplex）快速微波检测技术和固态器件线性功放技术，在大幅扩展无线射频通讯距离的同时保证无线传输速率稳定。该功放适用于多种不同的应用场合，能有效地增加无线设备的覆盖范围和桥接距离，同时提高覆盖边缘区域接入设备连接的传输速率，满足空地宽带无线通信技术要求。

其中，C 波段宽带线性功率放大器外部接口按功能划分包括独立的 2 路 SMA 收发器射频接口（分别连接天线和 C 波段网络终端）、功放控制管理接口（RS232）和电源接口。此外，地面功放支持状态 LED 指示和电源开关，便于部署使用。

### 3.3 C 波段机载天线与 C 波段基站天线设计

在商用通信系统中，移动通信的基站天线类型由于造

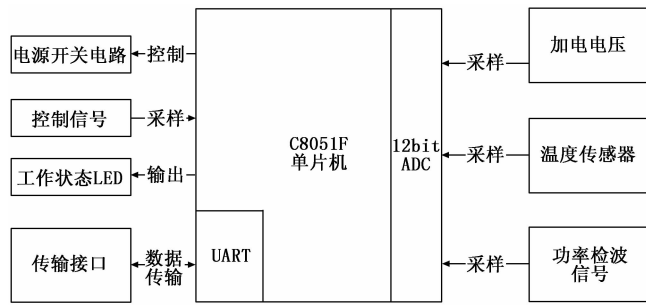


图 5 功率放大器框架图



图 8 C 波段数据传输显示界面

型、耐温范围、收发增益等原因均不适合用在飞行试验中。因此需要针对飞行试验的特点，研制专用的机载 C 波段天线和地面 C 波段天线。

机载 C 波段天线采用模块化设计，便于机载安装，实现频率范围 4.4~4.94 GHz 的双向信号发射<sup>[8]</sup>，如图 6 所示。



图 6 机载 C 波段天线示意图

为保证系统的网络通信效果，地面基站天线采用高增益阵列天线，通过耦合形成具有高增益的通信天线。天线组合由 16 个增益为 15 dBi 单元组成。单元天线水平方向波束宽度约 45°，垂直方向波束宽度为 25°<sup>[9]</sup>。天线组合分两层，底层 8 个单元天线和上层 8 个天线。当仰角较高时，目标与天线的距离较近，要求接收天线增益较低。因此，底层天线单元布设时，向上倾斜 20°，上层天线布设时向上倾斜 50°，就可以覆盖整个空域<sup>[10]</sup>，如图 7 所示。

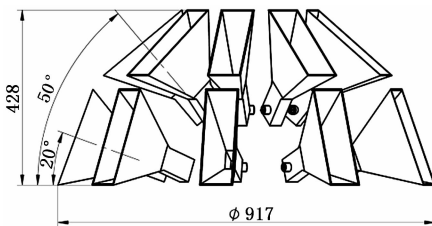


图 7 C 波段基站式多目标天线结构示意图

#### 4 试验结果与分析

在演示验证系统构建中，采用 4 套地面基站实现空域覆盖，试验对象安装在一架运输机上，组成 C 波段基站式遥测网络演示验证系统。地面基站接收到信号后，通过电信运营商地面光纤网络将信号回传。在试验过程中，由于运营商网络设备限制，不能验证 50 Mbps 的最大传输速率。飞行试验结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出，传输速率为 1606 kB/s，约 13 Mbps，实现了 C 波段基站式遥测网络数据的传输，突破了传统遥测体制，为未来实现高速、双向、多目标空地数据传输提供了基础。

#### 5 结束语

针对新技术、新测试的需求，本文开展了 C 波段基站式多目标遥测网络构建技术研究，主要包括架构设计，C 波段基站式多目标遥测网络系统接入体制，C 波段遥测网络终端系统研制三大部分。遥测网络采用蜂窝网络架构，利用地面基站式遥测遥控设备实现飞行空域覆盖。采用适用于飞行试验空地遥测网络的 TDMA 接入体制实现数据传输，并完成了机载端/地面端网络收发器、双向功率放大器、天线的设计与实现。C 波段基站式多目标遥测网络构建技术的研究为实现高速、双向、多目标空地数据传输提供了支撑，并为跨域遥测数据的传输奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] 袁炳南, 霍朝晖, 白效贤. 航空飞行试验遥测标准概况 [J]. 测控技术, 2010 (29): 17-19.
- [2] 周自全, 邵 箭, 王 楠. 飞行试验工程 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
- [3] 梁相文, 李金梅, 姚丽瑞. 未来试飞新技术挑战 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- [4] 白效贤, 杨廷梧, 袁炳南. 航空飞行试验遥测技术发展趋势与对策 [J]. 测控技术, 2010, 29 (11): 6-9.
- [5] 白效贤. 新一代遥测网络系统 iNET 及标准 [J]. 计算机测量与控制, 2010 (6).
- [6] 袁炳南, 霍朝晖, 白效贤. 新一代遥测网络系统—TmNS [J]. 测控技术, 2010 (29): 20-22.
- [7] 杨廷梧. 新型遥测系统中机载网络化测试技术展望 [A]. 航空试验测试技术峰会 [C]. 2010.
- [8] 龚文斌. 星载 DBF 多波束发射有源阵列天线 [J]. 电子学报, 2010, 38 (12): 2904-2909.
- [9] 杨莘元. 现代天线技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [10] 吴春柏. C 波段圆锥波纹喇叭天线 [A]. 2009 年全国天线年会 [C]. 2009.