



摘要

遥测、跟踪和控制 (TT&C) 是卫星网络控制的关键生命线。TT&C 负责从卫星到地面站传输遥测数据、跟踪位置和运动以及向卫星发送操作命令。TT&C 的目标是保证卫星正常运行，其短暂故障可能导致任务失败。对 TT&C 的需求正在迅速增加，人们需要新的解决方案以处理不断增加的在轨流量和空间基础设施的数据吞吐量。本文将详细介绍一些发展的趋势，以及推动 TT&C 设计发展的新技术。

TT&C 的目标

卫星的正常运行包括三个主要方面，由专用星载硬件 TT&C 单元执行。它们是：

- 遥测: 通过收集和处理多个航天器子系统的参数来监测一般的健康和运行状态
- 跟踪: 通过监测关键距离数据进行精确的空间定位检测
- 控制: 按从地面站网络接收的命令执行操作控制

一些先进的系统已经在发展自主操作——如今许多控制功能需要更少的地面干预。对软件定义无线电技术的越来越多的依赖，结合半自主操作的需求，正推动未来的 TT&C 设计，以增强星载处理性能，并实现动态（在轨）系统重编程的能力。

TT&C 实现的挑战

TT&C 的成功实现需要大量的端到端的工程专业知识。这些系统设计的复杂度超出了本文的范围。但是，微波工程师会熟悉 TT&C 设计师面临的诸多难题，包括信号编码、调制、多路复用、链路和干扰分析，以及具有代表性的 TT&C 软件模拟器的设计。越来越高的端到端链路安全的要求是一个关键问题，需要数据加密和身份验证方面的专业知识。

TT&C 系统的位置

对于 TT&C 系统，遥测传递卫星的工作和健康状态，遥控传递地面任务操作控制（MOC）要执行的操作。因此，在轨传递的信息包含卫星的空间环境、位置和速度信息，影响卫星的任务执行。除了高吞吐量 (HTS) 通信卫星，在许多空间任务中 TT&C 系统是主要的应用数据通信路径（卫星到 MOC）。因此，应用需考虑 TT&C 性能相关的延迟和数据吞吐量。

随着时间的推移，TT&C 系统变得越来越复杂。最初，TT&C 系统由相对简单的地面 MOC 和分布在地球上的地面站组成。为了增强与 MOC 连接的连续性，地面站逐渐扩展到海洋站，然后向上扩展到各种天基跟踪和数据中继卫星 (TDRS)。此外，TT&C 的运行还需借助全球卫星导航服务 (GPS 和伽利略) 以及相应的通讯基础设施。

TT&C 背后的技术

TT&C 技术的发展主要包括 3 个方面：基带设备、天线单元和 TT&C 平台。



基带设备: 早期的 TT&C 模拟设计技术严重依赖于精心设计的信号滤波器。最初, TT&C 的功能由分立的功能单元实现。显然, 基于模拟器件的 TT&C 设备体积较大, 难以升级。随着数字电路和可编程器件技术的快速发展 (特别是最近的 10 年), 现在主要的 TT&C 功能可在统一设计的现场可编程门阵列(FPGA)或数字信号处理器(DSP)芯片中实现。此外, 用户可在适当的时候通过空中下载技术(OTA)对功能和算法升级。

随着数字设备性能的日益提高, 一些公司认为下一代的 SDR 设计将很快升级到直接转换, 即直接从微波射频信号中提取微波信号内容, 无需依赖下变频转换 (外差)。这种发展将许多设计的挑战转移到数字领域, 受到广泛的欢迎, 因为它为 TT&C 系统的设计师提供了更多的健壮的设计方法。同样, 它对 SwaP 要素 (尺寸、重量和功耗) 的相互作用也产生了有利的影响。

天线单元: 典型的 TT&C 天线是抛物面天线。它具有方便、高增益等优点, 制造成本和维护成本也较低。但是, 随着跟踪卫星的数量逐渐增加, 越来越不适合使用机械扫描天线 (使用伺服电机)。电子扫描平面相控阵天线(PAA)的开发是天线设计中最重要的创新之一。PAA 在卫星应用中受到越来越多的关注, 因为它可以产生多个射频载波波束, 从而同时跟踪多颗卫星。与机械扫描天线相比, PAA 实现了快速波束扫描, 无需物理旋转, 可同时跟踪多个目标。如同半导体技术的进步推动了基带电子设备的发展, 天线的发展实现了电子波束转向, 提高了 TT&C 系统的射频链路的灵活性。

TT&C 平台: 最初的第一代卫星 TT&C 站是建造成本相对较低的地面基础设施 (见图 1)。因其接触时间 (飞越窗口) 很短, 必须将 TT&C 站分散部署在世界各地, 以满足对接触时间要求较高的任务的需求。然而, 对于许多希望独立运行空间系统的国家和组织来说, 这并不是可行的方案。为了解决这一问题, TT&C 向如下两个方向发展:

1. 首先向海洋 TT&C 资源发展
2. 随后利用跟踪和数据中继卫星向空基 TT&C 发展

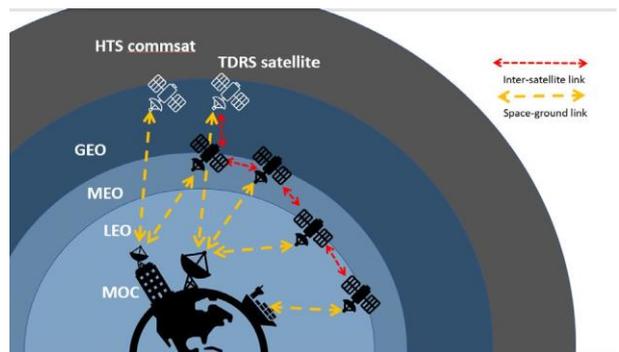


图 1: TT&C 连接路径

显然, 这两项发展会增加空间设备的成本和复杂度。另外, 这一状况在未来十年会进一步恶化, 尤其是私营企业的迅速崛起重新塑造了太空竞赛。一些组织已经在努力实现巨大的低轨 (LEO) 卫星星座, 以提供普遍的互联网覆盖 (例如 SpaceX)。在这种情况下, TT&C 成为了一个更加关键的挑战。

未来的 TT&C 挑战

未来通过 TT&C 管理大型卫星星座将进一步加大现有资源的压力。出现的问题包括:

1. 为了确保在较短的飞越窗口中实现最大的数据传输能力, 需要使用高级认知多模式无线电链路。此外, 为了延长接触时间, 越来越多的 TT&C 可能会迁移到地基基础设施, 如 TDRS。
2. 减少冗余遥测数据的传输, 以最大化任务关键数据的传输。这意味着使用人工智能 (AI) 部署星载自主数据解析。
3. 可用无线电频谱的压力推动了对更加智能和灵活的无线电系统的需求, 而微波直接转换技术的诞生可帮助解决此类问题。
4. 无论任务情况如何, 操作的安全性日益成为基础设施提供商的核心问题。为了防止对昂贵的在轨资源的未经授权的访问, 需要实现坚固的安全机制和数据加密。



考虑到上述因素，TT&C 可能会变成一个网络系统，其遥测和跟踪管理的部分将从 MOC 转移到卫星星座本身的半自主飞行规划。卫星系统能够保持轨道和相对位置，并访问星间测距传感器和星载惯性测量单元，这可能是一个合理的目标。

现代无线电设计的影响

自适应编码和调制(ACM)带来的不同的数字调制方案为提高卫星飞越数据吞吐量提供了一条途径。信道传输数据的能力由信噪比性能决定。当应用数字调制时，可以大幅增加单位传输时间内编码符号的数量（见图 2）。

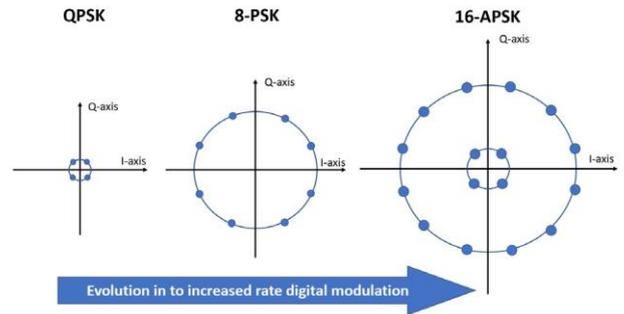


图2: 数字调制的发展提高频谱效率和数据吞吐量

APSK——一种卫星链路的解决方案

APSK (幅相移键控) 为卫星传输提供了一种理想的调制方案。它具有比正交相移键控 (QPSK) 更高的频谱效率 (bit/symbol)，比正交幅度调制 (QAM) 更抗失真。APSK 可提供两全其美的服务。对于 APSK，符号点被配置为降落在恒定振幅的同心圆上（见图 3）。

QAM 和 APSK 都比 QPSK 为每个符号提供更多的位，允许在相同的信号带宽中发送更多的数据。与 QAM 不同的是，APSK 的状态发生在同心圆环上，这样每个圆环上的符号点对压缩的反应行为相同。这带来了两个优点。首先，压缩对状态之间的间距影响较小，因此在解调的过程中更容易区分。

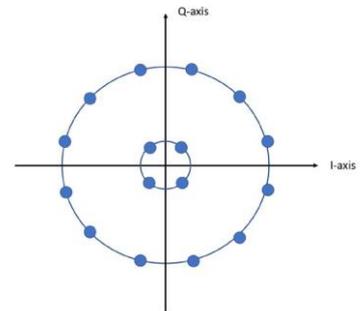


图3: 16-APSK 星座

第二个优点是 APSK 可以产生预失真，在传输之前改变星座环之间的偏移量，以抵消失真的影响，进而增强接收的信号强度。通过动态预失真，可监控接收到的信号，其结果被反馈到预失真电路进行连续调整。峰值平均功率比(PAPR)是另一个设计考虑因素。此参数定义了应答机放大器提供的最高发射功率相对于平均功率的比率。这个约束决定了可以发送的数据量，因为平均功率设置了系统边界条件（如功率和热限制）。但是，对于特定的调制，输出功率取决于调制信号的瞬态特性。事实证明，APSK 与 QAM 相比具有一定的优势，特别适合用于空间应用。

灵活编码 (ACM) 提供的高性能可增强 TT&C 和 MOC 之间的长期联系，并在整个卫星飞越窗口中动态优化上行/下行链路（见图 4）。理论上，通过光学链路可实现更高的数据率。但是光学技术对转向和视线条件锁定来说是一个挑战。光学飞越跟踪依然是一个棘手的设计问题。

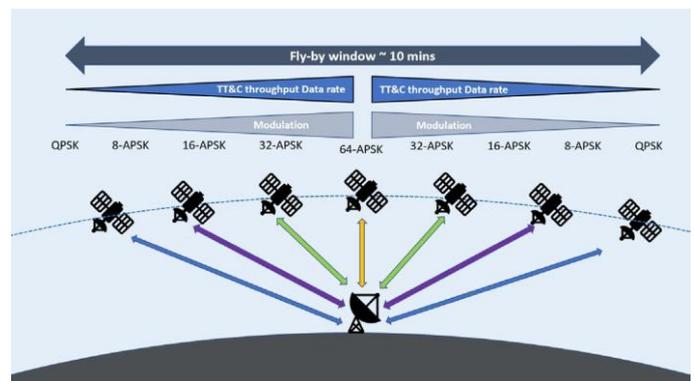


图4: 使用动态 ACM 优化的飞越数据吞吐量



未来的 TT&C 系统的性能取决于如何使用先进的 SDR 开发新型 ACM 技术，其本身严重依赖于新一代前沿半导体的发展。

TT&C 硬件的考虑

最先进的 TT&C 微波无线电设计通常集中在 L、S 和 C 波段——在 1 到 8GHz 之间。由于射频带宽很大，到目前为止，大多数的 TT&C 依赖于传统的外差设计（下混频），并需在最终的中频(IF)的数字基带采样上投入很多资源。可以说，考虑到现有数据转换器的带宽限制，无法实现高达 Ku 波段的直接转换技术。然而今天，解决方案近在眼前。

宽带数据转换:越来越快的处理速度已可支持宽带操作，现在已达到接近两位数的 GHz 带宽，例如 [EV12AQ600](#) 实现了高达 6.5GHz 的带宽，可以高达 6.4Gsp/s 的采样率采样信号（在 4 通道时间交织模式下）。Teledyne e2v 的这款新型 12 位 ADC EV12AQ600 包含一个有用的前端交叉点开关，支持多通道时间交织操作，可实现极其灵活的 SDR 前端。

Teledyne e2v 一直致力于将其技术推向可能的极限，并将高端操作扩展到更接近于全微波直接转换的范围——达到或超过 Ku 波段的限制。Teledyne e2v 的最新的产品包括即将发布的 [EV10AS940](#)，可实现 12.8Gsp/s 的采样率和 33GHz 的 -3dB 模拟输入带宽。Teledyne e2v 一直密切关注现代无线电架构的需求，开发了一个免许可证的低开销串行互联系统，称为 ESStream。ESStream 能够实现超过 12Gsp/s 的数据吞吐速率，支持广泛的数字处理器，包括不同供应商提供的 FPGA。该协议可实现很短的确定性数据延迟，最小化硬件开销，并帮助实现跨系统同步。

电子波束转向技术使得相控阵天线的实现称为可能。因此，Teledyne e2v 开发了一种新的方案，确保复杂多通道设计中的同步操作。多个 ESStream 数据链路可实现确定性同步。更重要的是，在前端，用户可跨数据转换器将简单的系统同步信号级联，避免出现亚稳态¹并实现同步采样。这样可确保关键的信号相位信息及空间精度在整个系统中保持不变。

另外，通过其集成的采样交织电路，EV12AQ600 支持可变的采样率。每个 ADC 核心都支持高达 1.6Gsp/s 的时钟，使得一对核心可以相反的相位采样，实现 3.2Gsp/s 的采样率。若使用 4 种相位的时钟交织所有 4 个核心，可实现 6.4Gsp/s 的单通道采样。

PolarFire FPGA: Microchip 公司生产的 [PolarFire®](#) 系列 FPGA 是用于空间操作的最先进和最通用的数字处理系统之一。这些产品具有高安全性和低功耗的特点，可与 EV12AQ600 一起使用。因为 ESStream 是免许可证的，其驱动已经发布（请参考：[ESStream 官网 - ESStream 14B/16B 案例包](#)）。

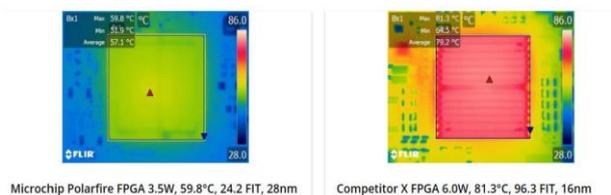


图 5: PolarFire®和竞争对手的热量对比

PolarFire 器件有一些独特的特点，适合用于高级空基软件定义无线电系统。

¹ 亚稳态描述系统在不稳定平衡中持续无界时间的能力



这些特点包括:

- 和类似复杂度的传统 SRAM FPGA 相比,降低了一半的 **功耗**,并降低了散热设计的开销(图 5)
- 军级的防网络攻击和防篡改功能,包括授权的 Rambus **DPA 对抗**²
- 通过容错设计避免配置翻转
- 耐受 100 k 总电离剂量(TID)
- 24 x 10.3125 (或 12.7 高速选项) Gbps serdes 通道,支持多通道数据传输

耐辐射(RT)的 PolarFire® FPGA 是采用 United Microelectronics(UMC)公司的 28 nm 工艺制造的非易失性现场可编程门阵列。这些 FPGA 提供 481K 个逻辑元素(LE), 480 个数学块(DSP)和 33Mbit 的嵌入式静态随机访问存储器(SRAM)。顺便说一句,SRAM 支持使用纠错码(ECC)保护,这在空间应用中非常重要,可避免数据损坏。

安全性是 PolarFire FPGA 的重要特点。该系列提供集成的双重物理防克隆功能(PUF),并带有用于加密密钥存储的 56KB 的安全非易失性存储器(sNVM)。此外,内置的篡改检测器和主动 DPA 对抗措施可提供军级的安全性。同样,对实现可重构 SDR 至关重要的在轨编程能力也经过了广泛的测试和验证³。

EV12AQ600 和 POLARFIRE ——增强型宇航级 TT&C 的理想搭配

我们最新发布的**教程**详细介绍了 EV12AQ600 FMC 板卡和 MPF300T-1FCG115E2 PolarFire 处理器板的配对使用(图 6)。这个开发环境有助于加快开发流程,帮助用户快速熟悉系统,并为研发初始原型样机做好准备。这个教程介绍如何配置 FPGA 板卡,如何建立 Libero SoC IDE 工程,以及如何使用 EV12AQ600 内置的嵌入式斜坡波形发生器。此外,您也将学习如何从相互连接的板卡里提取采样数据。



图 6: PolarFire FPGA 板和 EV12AQ600 FMC 的组合

PolarFire FPGA 和 EV12AQ600 高级前端数字化仪的组合为下一代 TT&C SDR 设计提供了强大的实验平台。我们现在可提供开发资源,支持几种未来的 SDR 配置,并可评估多种 ACM 配置。此外,这个平台还可加快产品的上市速度。

² 使用 Rambus DPA 对抗技术防止通道攻击

³ RADECS 2021: Microchip RT PolarFire® FPGA 的编程和 SEE 特性, N. Rezzak, Member, IEEE, R. Chipana, C. Lao, G. Bakker, Member, IEEE, J. Mccollum, Member, IEEE, F. Hawley, Member, IEEE, K. O'Neill and E. Hamdy, Senior Member, IEEE

相关链接

EV12AQ600 产品页面: <https://www.teledyne-e2v.cn/products/semiconductors/data-converters/ev12aq600/>

ESIstream 官网 - ESIstream 14B/16B 案例包: <https://www.esistream.com/package/esistream-14b16b-package>

PolarFire FPGA 系列: <https://www.microchip.com/en-us/products/fpgas-and-plds/fpgas/polarfire-fpgas>

PolarFire 最低总功耗: <https://www.microchip.com/en-us/products/fpgas-and-plds/low-power>

Rambus DPA 对抗: <https://www.rambus.com/security/dpa-countermeasures/licensed-countermeasures/>

EV12AQ600 和 PolarFire 评估教程: <https://youtu.be/t1XG7gQiy90>



更多信息, 请联系:
Nicolas Chantier,
市场总监
信号和数据处理解决方案
nicolas.chantier@teledyne.com



更多信息, 请联系:
Stéphane Breyse
应用工程师
信号和数据处理解决方案
stephane.breyse@teledyne.com

