

Technical White Paper

AFE7950-SP 在卫星通信中的应用



Zoe Aboab
Bhavesh Rathod

High Speed Data Converters
Wireless Infrastructure

摘要

卫星通信 (SATCOM) 系统需要在严格的功率和尺寸限制条件下, 实现多频带灵活性、高吞吐量和抗辐射可靠性。本文介绍了 AFE7950-SP, 这是一款符合航天标准的 4T4R2F 射频收发器, 可提供宽带覆盖范围、高级数字功能和低功耗运行能力。本文旨在为系统架构师、有效载荷工程师及设计人员提供清晰、客观的视角, 阐述 AFE7950 在卫星通信领域的功能与局限。

具体而言, 本文展示了该器件在各类 SATCOM 应用场景下的灵活架构, 例如中继器、相控阵和多频带系统, 并概述了关键限制因素 (如带宽、频率间隙和功耗权衡), 以帮助设计人员评估 AFE7950 并根据任务需求规划开发工作。

内容

1 简介	2
1.1 现代卫星通信系统概述.....	2
1.2 AFE7950 作为集成射频设计的演示文稿.....	2
2 AFE7950 在 SATCOM 应用中的技术优势	3
2.1 频谱灵活性和敏捷性.....	3
2.2 SATCOM 系统设计的优势.....	4
2.3 辐射耐受性.....	4
2.4 功耗优化.....	6
3 结语	9
4 参考资料	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

1.1 现代卫星通信系统概述

卫星通信 (SATCOM) 已从最初主要用于遥测、跟踪和命令 (TT&C) 的窄频带、低数据速率链路，演进为支持宽带互联网、高清视频、机器对机器遥测以及新兴物联网星座连接的宽带、高吞吐量网络。当代 SATCOM 有效载荷可在多个频带运行：L 频带、S 频带、C 频带、X 频带、Ku 频带、Ka 频带和 V 频带。这些频带采用先进的调制编码方案 (如 QPSK、8PSK、16QAM、LDPC、ACM)，并集成自适应波束成形与频率复用技术，以最大化频谱效率。

SATCOM 架构的主要发展趋势包括：

- 多频带、多模式运行
 - 平台必须在频带之间快速切换，支持快速跳频，同时保持相位相干
- 更高的吞吐量需求
 - 用户终端与中心站所需链路速率从兆位/秒提升至数千兆位/秒
- 严格的功率预算
 - 卫星有效载荷受到可用功率有限的限制，SmallSat 和 CubeSat 平台尤为突出
- 恶劣环境稳健性
 - 辐射、极端温度和机械振动要求部件具有高可靠性和内置容错能力

这些驱动因素促使射频前端设计人员寻求高度集成、低功耗、大带宽且可编程的方案，以适应多种任务场景，无需进行大量重新设计。

表 1-1. SATCOM 的具体要求

要求	典型规格	对 SATCOM 的意义
带宽	每通道 100MHz - 2.4GHz (取决于工作模式)	支持高阶调制及载波聚合等吞吐量增强技术
线性度和 EVM	取决于调制方案	对于高阶 QAM 和 PSK 星座及密集频率复用场景下避免互调至关重要
温度范围	-40°C 至 +110°C (符合航天标准)	确保从发射到在轨热循环全过程的可靠性能
辐射耐受性	总电离剂量 (TID) = 100krad(Si)	防止在整个任务生命周期出现功能下降
外形尺寸和集成	17mm × 17mm	减少布板空间、重量和 BOM 复杂性，对于 SmallSat 平台尤其重要
可编程性	通过 SPI 进行射频调谐、可调增益和双工控制	单一硬件设计可支持多频带，并支持发射后任务更新

同时满足所有这些指标极具挑战性；SATCOM 需要射频 (RF) 前端兼具高性能模拟模块、数字功能与紧凑低功耗架构。

1.2 AFE7950 作为集成射频设计的演示文稿

德州仪器 (TI) 的 AFE7950 是一款四发四收两反馈通道 (4T-4R-2F) 射频收发器，专为宽频卫星与航天应用设计。符合表 1-1 中所列 SATCOM 要求的收发器主要架构特性包括：

- 宽带前端支持连续频率覆盖，无需重新设计即可实现跨 Ku 频带、Ka 频带及更低频带卫星窗口运行
 - 发送器 (TX)：600MHz 至 12GHz
 - 接收器 (RX)：5MHz 至 12GHz
- 片上自动增益控制 (AGC) 模块用于控制数字步进衰减器 (DSA) 以稳定 RX 通道输入功率水平
- 多路 GPIO 用于控制功率放大器保护 (PAP) 和数控振荡器 (NCO) 跳频等数字功能
- 全双工操作的典型功耗约为 7.5 瓦，断电模式可将功耗降低到 1 瓦以下
- 耐辐射加固保障 (RHA) 通过测试验证，单粒子门锁 (SEL) 耐受高达 70MeV·cm²/mg，总电离剂量 (TID) 高达 100krad(Si)
- 采用 0.8mm 间距、17mm × 17m BGA 封装

总的来说，这些特性使 AFE7950 成为单芯片、多频带射频前端，可以缩减物料清单 (BOM) 的大小、电路板面积和开发时间，同时仍能提供 SATCOM 有效载荷所需的性能包络。

2 AFE7950 在 SATCOM 应用中的技术优势

2.1 频谱灵活性和敏捷性

AFE7950 是一款高性能多通道收发器，在一个裸片上整合了四条射频采样数字音频转换器 (DAC) 发送器路径、四条射频采样模数转换器 (ADC) 接收器路径和两条射频采样 ADC 反馈路径。

每个接收器 (RX) 通道都包含一个数字步进衰减器 (DSA)，后跟一个 3GSPS 非交错射频采样 ADC。每个通道还包含模拟峰值功率检测器、多个用于内外自动 AGC 控制的数字功率检测模块，以及保障器件可靠性的射频过载检测器。ADC 输出馈送灵活的单频带或双频带数字下变频器 (DDC)，从而将采样率降低到目标频带。

反馈 (FB) 链通常用作外部线性化 DPD 引擎的功率放大器 (PA) 输出的观察路径，但也可用作额外接收器。FB ADC 与 RX ADC 相同。

每个发送器 (TX) 通道都有一个单频带或双频带数字上变频器 (DUC)，可驱动 12GSPS 射频采样 DAC，后跟一个 DSA 模块。

在单频带 DUC 或 DDC 模式下，每个上变频链和下变频链都集成了 16 个独立的数控振荡器 (NCO)，可在射频频率之间进行快速切换，同时保持任何空闲 NCO 的相位。在双频带 DUC 或 DDC 模式下，每个链提供两个 NCO，可在两个射频频率间快速切换并保持相位相干。

2.1.1 宽频率范围 (600MHz 至 12GHz)

AFE7950 的 12GSPS 直接射频采样无需外部混频器即可覆盖 L 频带、S 频带、C 频带和 X 频带，使该器件高度适配各类应用场景。直至 X 频带，该器件均可作为真正的射频采样方案工作。针对更高频率，该器件可无缝支持外差架构，尤其在 Ku 频带中，其 8GHz 能力可实现高效的频率规划。

2.1.2 可配置的带宽

AFE7950 器件具有可配置的带宽，支持两种模式：单 DDC 模式和双 DDC 模式。这些带宽设置是可编程的，并且可以从广泛的可用范围中选择，从而使 AFE7950 具有可扩展性和灵活性。

在单频带 DDC 模式下，ADC 前端数字抽取块可通过编程设置，支持 100MHz 至最大 1200MHz 的瞬时带宽。

在双 DDC 模式下，该器件可支持 2400MHz 的总带宽，同时保持每个通道的 NCO 独立控制。

2.1.3 跳频对 SATCOM 的重要意义

跳频可实现抗干扰、频谱共享和链路层敏捷性，为卫星通信提供显著优势。

快速 NCO 重新编程功能支持伪随机或自适应跳频序列，可在轨更新且开销极低。此外，跳频间保持相位相干的能力可实现不同频率波束间的无缝切换，无需重新训练解调器。

表 2-1 列出了 AFE7950 器件支持跳频的相关特性。

表 2-1. AFE7950 对跳频的支持

参数	规格	运行影响
NCO 数目	双 DDC 模式下每通道两个，单 DDC 模式下每通道 16 个 NCO	用户可通过 16 个独立可配置的 NCO 将器件配置为覆盖多个频带
相位相干 NCO 跳频	保留跨跳的 NCO 相位	使用 SPI 或 GPIO 在上行链路和下行链路上实现相位相干跳频
双 DDC 模式	每个通道两个数字混频器	支持用户对同一宽带信号在每条 DDC 或 DUC 链独立配置两组抽取系数与两个 NCO
基于 GPIO 的跳变触发	专用 HOP 引脚 (边沿触发)	有助于在没有 CPU 干预的情况下实现确定性跳变调度

2.1.4 JESD204B 和 JESD204C 灵活性

AFE7950 兼容 JESD204B 和 JESD204C。AFE7950 支持 8b/10b 和 64b/66b 编码方案，使得该器件与大多数 FPGA 和 ASIC 兼容。该器件支持符合 JEDEC 标准的多项附加功能。

2.1.4.1 子类 1 同步

AFE7950 实现了 JESD204B 与 JESD204C 子类 1 功能，可提供确定性延时，并在多器件间实现基于 SYSREF 对齐的帧起始。通过单一共享 SYSREF 脉冲即可实现多器件同步，确保相控阵收发器中的每个 AFE7950 对射频前端进行同步采样。多器件同步是高通量 SATCOM 相干波束成形与 MIMO 技术的前提。

2.1.4.2 通道缩减以节省功耗

AFE7950 器件支持多种 LMFS 设置。这对于卫星有效载荷尤其有用，因为节省的每瓦功率均可转化为更大的有效载荷裕度或更长的任务寿命。JESD 数据传输可配置使用通道 1、通道 2、通道 3 和通道 4 的任意组合。

2.1.4.3 建议的 JESD 编码

8b/10b 模式具有低延时和高稳健性。传输控制平面数据，或在易受辐射影响的环境中工作需要更强的检错能力时，请选择此模式。

64b/66b 模式具有高吞吐量和较低的开销。对于批量 IQ 采样流传输，请选择 64b/66b 模式；64b/66b 模式可实现约 93% 的线路效率，而 8b/10b 模式的线路效率为 80%。AFE950 的内部成帧逻辑会自动插入所需的同步字符，且器件可按每条链路独立切换编码方式。切换编码支持混合模式数据路径，例如一个通道上的低延迟控制和其余通道上的高吞吐量采样。

2.2 SATCOM 系统设计的优势

确定性延时简化了星载数字后端与地面段时序对齐的时序预算计算。

功耗感知链路缩放功能允许设计人员在链路预算允许降低采样率时（如低流量时段），以牺牲原始数据速率为代价节省功耗。

编码方式选择提供了一种调节手段，可在抗辐射位翻转稳健性（优先选择 8b/10b 编码）与频谱效率（优先选择 64b/66b 编码）之间取得平衡，无需重新设计硬件。

2.3 辐射耐受性

AFE7950-SP 是一款专为航天应用设计的航天级射频采样收发器。AFE7950-SP 的辐射耐受性已通过一系列标准化测试进行了验证，可在近地轨道 (LEO)、中地球轨道 (MEO) 和对地静止轨道 (GEO) 等恶劣环境中保持可靠的性能。

2.3.1 AFE7950-SP：航天级版本

为验证 AFE7950-SP 抗强辐射能力，我们对器件进行了长时间、高强度辐射测试。

2.3.1.1 总电离剂量 (TID)

该器件在德州仪器 (TI) 位于得克萨斯州达拉斯的 CLAB 实验室中，利用 Co-60 伽马源，接受了速率为 120rad(Si)/s 的高总电离剂量 (TID) 辐照。共有 25 片器件在 5 个剂量等级下接受辐照：3、10、30、50 和 100krad(Si)。辐照后的电气测试证实，所有器件的性能均保持在数据表规定的指标范围内，即使在最大测试剂量 100krad(Si) 下也未观察到功能降级。该测试验证了器件在长期空间辐射环境下的稳健性。

图 2-1 展示了 AFE7950-SP 器件在辐射暴露测试中的性能。另请参阅 [AFE7950-SP TID 辐射报告](#)。

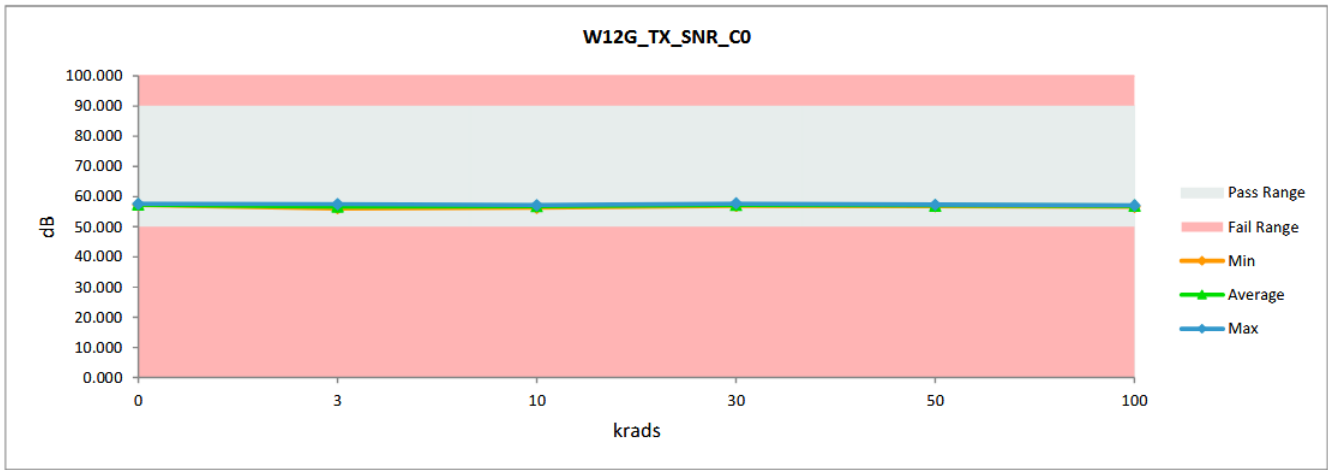


图 2-1. AFE7950-SP 性能

2.3.1.2 单粒子闩锁 (SEL)

除 TID 之外，还对 AFE7950-SP 的单粒子闩锁 (SEL) 抗扰度进行了评估。该器件在 125°C 结温下的抗扰度高达 70MeV·cm²/mg，在所有测试样片中均未记录闩锁事件。这种抗扰度水平对确保在高能粒子普遍存在的太空环境中不间断工作至关重要。

2.3.1.3 单粒子功能中断 (SEFI)

SEFI 稳健性是 AFE7950-SP 的核心关注要点。SEFI 需通过断电重启与重新编程恢复。如要测量 SEFI，根据注量率设定辐射束运行时长 (1E2 时通常为五分钟)。每个时间间隔结束后，辐射束暂停，器件恢复至初始状态。如果 RX 通道 1 SNR 恢复到 100dB 本底噪声，则测试继续；如果没有，则在断电重启后重新配置器件。根据累积注量计算给定 LET 的 SEFI 横截面。

表 2-2. SEFI 运行

注量率 (离子·cm ² /s)	离子	LET (MeV·cm ² /mg)	时间	通量	SEFI ?
1.00 × 10 ⁴	Ar	9.75	25 秒	2.45 × 10 ⁵	否
1.00 × 10 ⁴			50 秒	4.88 × 10 ⁵	否
1.00 × 10 ⁴			75 秒	7.15 × 10 ⁵	否
1.00 × 10 ⁴			100 秒	9.53 × 10 ⁵	是
1.00 × 10 ²	Cu	24.54	5 分钟	4.43 × 10 ⁴	否
1.00 × 10 ²			10 分钟	8.79 × 10 ⁴	否
1.00 × 10 ²			15 分钟	1.28 × 10 ⁵	否
1.00 × 10 ²			20 分钟	1.71 × 10 ⁵	否
1.00 × 10 ²			25 分钟	2.16 × 10 ⁵	否
1.00 × 10 ²			30 分钟	2.56 × 10 ⁵	否
1.00 × 10 ²			35 分钟	3.00 × 10 ⁵	是
1.00 × 10 ²	Ag	57.73	5 分钟	3.92 × 10 ⁴	否
1.00 × 10 ²			20 分钟	1.60 × 10 ⁵	否
1.00 × 10 ²			25 分钟	2.00 × 10 ⁵	否
1.00 × 10 ²			30 分钟	2.39 × 10 ⁵	是

表 2-3. 最坏周 LEO 和 GEO 轨道下 SEFI 的 SET 事件率计算

轨道类型	有效起始 LET _{EFF} (MeV-cm ² /mg)	σ SAT (cm ²)	事件发生率 (/天)	事件发生率 (FIT)	MTBE (年)
LEO (ISS)	1	2.33 × 10 ⁻⁵	9.48 × 10 ⁻⁵	3.95 × 10 ³	2.89 × 10 ¹
GEO			8.29 × 10 ⁻⁴	3.45 × 10 ³	3.30

2.3.1.4 辐射批次验收测试

为保证各生产批次辐射性能一致，同时实施了辐射批次验收测试 (RLAT)。每个晶圆批次选取 5 个代表性样品，接受最高 100krad (Si) 的辐照。

2.3.1.5 释气符合 ASTM E595 标准

AFE7950-SP 符合 ASTM E595 低释气标准。在 125°C、真空度低于 5 × 10⁻⁵Torr 的环境下，对 5 个单元进行了 24 小时的释气测试。材料筛选标准为总质量损失 (TML) ≤ 1%，收集的可冷凝材料 (CVCM) ≤ 0.1% 阈值。

表 2-4. 释气测试结果

样片	材料	TML 1%	CVCM < 0.1%
AFE7950ALKSHP	底部填充胶	通过	通过
AFE7950ALKSHP	基板	通过	通过
AFE7950ALKSHP	TIM	通过	通过

这种合规性可最大限度地降低航天器内部敏感光学或热表面受到污染的风险，从而延长任务寿命并提高性能。实际上，AFE7950-SP 中使用的材料都符合要求。

2.3.2 在 SATCOM 领域的优势

AFE7950-SP 的抗辐射能力直接转化为卫星通信系统的可靠性。即使在强烈的宇宙辐射下，该器件也能正常工作，因为该器件不受 SEL 的影响，无需使用复杂的门锁保护电路。这对长期受高能粒子影响的 LEO、MEO、GEO 任务尤为有利。

此外，该器件在经受辐射照射后仍可保持可靠工作，这有助于维持高质量的强信号，并稳定系统运行。AFE7950-SP 集高频性能 (支持最高 12GHz 工作频率，配备采样率为 12GSPS 的 DAC 和采样率为 3GSPS 的 ADC) 和航天级可靠性于一体，使其成为以下应用的理想选择：

- 卫星通信
- 相控阵天线
- 波束成形系统
- 高吞吐量卫星链路

2.4 功耗优化

AFE7950-SP 采用灵活的电源架构设计，支持工程师根据任务要求优化能源使用。功耗差异很大，具体取决于：

- 有源通道数量
- JESD 接口配置
- 数字处理设置 (例如，内插或抽取)

2.4.1 电源模式配置

2.4.1.1 仅 Rx 模式

在该模式下，仅启用 4 个 ADC，所有 DAC 在 TDD 模式下保持待机。在这些条件下，器件的功耗约为 4.85W。

2.4.1.1.1 Rx 模式用例

该配置通常用于窄带监测或低数据速率遥测等对能效要求严苛的应用场景。

2.4.1.1.2 Rx 模式的优势

在 Rx 模式下，JESD 通道的使用量得以最小化。在低功耗模式下运行可以降低热应力，并有助于在恶劣环境下实现长期可靠性。

表 2-5. Rx 模式下的电气特性

$T_A = +25^{\circ}\text{C}$ 时的典型值，整个温度范围为 $T_{A,MIN} = -40^{\circ}\text{C}$ 至 $T_{J,MAX} = +110^{\circ}\text{C}$ ；TX 输入速率 = 491.52MSPS， $f_{DAC} = 8847.36\text{MSPS}$ 交错模式； $f_{ADC} = 2949.12\text{MSPS}$ ；标称电源；-1dBFS 时为 1 个子载波；DSA 衰减 = 0dB；串行器/解串器速率 = 24.33Gbps；除非另有说明。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
I_{VDD1P8}	3A 组：VDD1P8FB + VDD1P8RX + VDD1P8TX	模式 7b：TDD 4R (TX 处于待机模式) TX 9G 和 FB 3G - 16 位：368.64M；DSA = 6dB，非交错模式，待机 RX 3G：368.64M。16 位 串行器/解串器：25gbps -> 2 个通道用于 Rx/FB (通道共享)、2 个通道用于 Tx		789.5		mA
	3B 组：VDD1P8FBCLK + VDD1P8RXCLK + VDD1P8TXDAC + VDD1P8GPIO + VDDA1P8			471.3		mA
	3C 组：VDD1P8PLL + VDD1P8PLLCO			73.4		mA
I_{VDD1P2}	2A 组：VDD1P2FB + VDD1P2RX			599.3		mA
	2B 组：VDD1P2TXCLK + VDD1P2TXENC			169.6		mA
	2C 组：VDD1P2FBCML + VDD1P2RXCML + VDD1P2PLLCLKREF			39.1		mA
I_{VDD0P9}	1A 组：DVDD0P9 + VDDT0P9			1645.3		mA
P_{diss}	功率耗散			4851.9		mW

2.4.1.2 典型工作模式

该配置采用 TDD 模式和 4T4R1FB 设置，总功耗为 7.62W，在性能与功耗效率之间实现了均衡。尽管在采样率和 JESD204 吞吐量方面进行了适度扩展，但该模式仍能高度满足 SATCOM 应用的需求：

- 支持 8GHz (X 带) 宽带传输
- 通过高速 JESD204 链路实现可靠的数据传输
- 通过反馈通道实现实时监测和自适应校准
- 通过 TDD 结构，适用于优先处理上行链路 (例如机载或移动终端) 的系统
- 专为具有严格散热和能源限制的平台而设计

表 2-6. 典型工作模式的电气特性

$T_A = +25^{\circ}\text{C}$ 时的典型值，整个温度范围为 $T_{A,MIN} = -40^{\circ}\text{C}$ 至 $T_{J,MAX} = +110^{\circ}\text{C}$ ；TX 输入速率 = 491.52MSPS， $f_{DAC} = 8847.36\text{MSPS}$ 交错模式； $f_{ADC} = 2949.12\text{MSPS}$ ；标称电源；-1dBFS 时为 1 个子载波；DSA 衰减 = 0dB；串行器/解串器速率 = 24.33Gbps；除非另有说明。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
I_{VDD1P8}	3A 组：VDD1P8FB + VDD1P8RX + VDD1P8TX	模式 7b：TDD 4R (TX 处于待机模式) TX 9G 和 FB 3G - 16 位：368.64M；DSA = 6dB，非交错模式，待机 RX 3G：368.64M。16 位 串行器/解串器：25gbps -> 2 个通道用于 Rx/FB (通道共享) 以及 2 个通道用于 Tx		789.5		mA
	3B 组：VDD1P8FBCLK + VDD1P8RXCLK + VDD1P8TXDAC + VDD1P8GPIO + VDDA1P8			471.3		mA
	3C 组：VDD1P8PLL + VDD1P8PLLCO			73.4		mA
I_{VDD1P2}	2A 组：VDD1P2FB + VDD1P2RX			599.3		mA
	2B 组：VDD1P2TXCLK + VDD1P2TXENC			169.6		mA
	2C 组：VDD1P2FBCML + VDD1P2RXCML + VDD1P2PLLCLKREF			39.1		mA
I_{VDD0P9}	1A 组：DVDD0P9 + VDDT0P9			1645.3		mA
P_{diss}	功率耗散			4851.9		mW

2.4.1.3 4T4R FDD 模式

4T4R FDD 模式启用了全部四个 ADC 和全部四个 DAC，并分别以 3GSPS 和 12GSPS 的满采样率运行。在此配置下，器件的峰值消耗约为 10.640W。

该模式其他特性包括：

- 通过满配 JESD 接口 (8 条发射通道, 4 条接收通道) 维持高数据速率
- 内部数字处理模块满负荷运行, 以处理用于带宽成形的内插与抽取操作

表 2-7. 4T4R FDD 模式的电气特性

$T_A = +25^\circ\text{C}$ 时的典型值, 整个温度范围为 $T_{A,MIN} = -40^\circ\text{C}$ 至 $T_{J,MAX} = +110^\circ\text{C}$; TX 输入速率 = 491.52MSPS, $f_{DAC} = 8847.36\text{MSPS}$ 交错模式; $f_{ADC} = 2949.12\text{MSPS}$; 标称电源; -1dBFS 时为 1 个子载波; DSA 衰减 = 0dB; 串行器/解串器速率 = 24.33Gbps; 除非另有说明。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位	
I_{VDD1P8}	3A 组: VDD1P8FB + VDD1P8RX + VDD1P8TX	模式 11d: FDD 4T4R 单频带: 8 倍插值, RX 使用 FBTX/FB/RX 速率 = 1474.56Msps $f_{DAC} = 11796.48\text{MSPS}$ $f_{ADC} = 2949.12\text{MSPS}$ $f_{TX} = f_{RX} = 8\text{GHz}$ 64/66 编码, 24.33Gbps TX: 8-8-2-1, FB/RX: 4-4-4-2		1260		mA	
	3B 组: VDD1P8FBCLK + VDD1P8RXCLK + VDD1P8TXDAC + VDD1P8GPIO + VDDA1P8			940		mA	
	3C 组: VDD1P8PLL + VDD1P8PLLVCO			73		mA	
I_{VDD1P2}	2A 组: VDD1P2FB + VDD1P2RX				630		mA
	2B 组: VDD1P2TXCLK + VDD1P2TXENC				1480		mA
	2C 组: VDD1P2FBCML + VDD1P2RXCML + VDD1P2PLLCLKREF				78		mA
I_{VDD0P9}	1A 组: DVDD0P9 + VDDT0P9				4200		mA
P_{diss}	功率耗散			10640		mW	

2.4.1.3.1 4T4R FDD 模式用例

该配置推荐用于高吞吐量 SATCOM 有效载荷, 其中多个波束或宽带信道同时处于活动状态。

2.4.2 节能策略

AFE7950-SP 提供多种功耗优化方案。

2.4.2.1 低功耗工作模式

2.4.2.1.1 待机模式

待机模式会禁用数据转换器, 但会使时钟和 JESD 接口保持运行状态。在空闲时隙中, 相应的链可以置于待机状态以节省功耗, 同时保持快速切换的就绪状态。这种方法使系统能够几乎立即保持同步并恢复运行, 而无需重新锁定 PLL 或重新初始化 JESD 链路。

待机模式的一些特性包括:

- 唤醒时间: 小于 $2\mu\text{s}$
- 控制: 通过 SPI 进行配置, 通过 GPIO 激活
- 用例: 适用于具有交替 Tx 和 Rx 时隙的基于 TDD 的 SATCOM 系统
- 优点: 保持同步, 可近乎瞬时恢复, 无需重新锁定 PLL 或重新初始化 JESD 链路

2.4.2.1.2 睡眠模式

与待机模式相比, 睡眠模式能够进一步降低功耗。但是, 睡眠模式还需要较长的唤醒时间, 因为 JESD 链路完全关闭且必须重新建立。

睡眠模式的一些特性包括:

- 唤醒时间: 由于需要重新初始化, 比待机模式更长
- 控制: 通过 SPI 或 SLEEP GPIO 引脚进行管理
- 用例: 适用于功率受限系统中长期空闲且无需全功能工作的时段

表 2-8. 睡眠模式的电气特性

$T_A = +25^\circ\text{C}$ 时的典型值，整个温度范围为 $T_{A,MIN} = -40^\circ\text{C}$ 至 $T_{J,MAX} = +110^\circ\text{C}$ ；TX 输入速率 = 491.52MSPS， $f_{DAC} = 8847.36\text{MSPS}$ 交错模式； $f_{ADC} = 2949.12\text{MSPS}$ ；标称电源；-1dBFS 时为 1 个子载波；DSA 衰减 = 0dB；串行器/解串器速率 = 24.33Gbps；除非另有说明。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
I_{VDD1P8}	3A 组：VDD1P8FB + VDD1P8RX + VDD1P8TX	模式 8：配置与模式 7 “睡眠模式” 相同。SLEEP 引脚上拉为高电平。		20.3		mA
	3B 组：VDD1P8FBCLK + VDD1P8RXCLK + VDD1P8TXDAC + VDD1P8GPIO + VDDA1P8			292.8		mA
	3C 组：VDD1P8PLL + VDD1P8PLLCO			12.6		mA
I_{VDD1P2}	2A 组：VDD1P2FB + VDD1P2RX			4.6		mA
	2B 组：VDD1P2TXCLK + VDD1P2TXENC			54.3		mA
	2C 组：VDD1P2FBCML + VDD1P2RXCML + VDD1P2PLLCLKREF			15.3		mA
I_{VDD0P9}	1A 组：DVDD0P9 + VDDT0P9			313.1		mA
P_{diss}	功率耗散			956.8		mW

2.4.3 SATCOM 睡眠和待机模式的优劣

睡眠模式和待机模式之间的权衡显而易见。待机模式能够以稍高的功耗实现快速恢复，而睡眠模式能够以唤醒速度变慢为代价最大限度地节能。对于 SATCOM 来说，这两种模式都对实现能效、热管理、快速恢复和灵活控制具有重要价值。

AFE7950-SP 提供宽运行范围，使设计人员能够通过精心配置活动通道、JESD 通道分配和数字处理参数，在性能和能效之间实现平衡。

3 结语

综上，AFE7950 在单一高集成度设计中融合了频谱灵活性、辐射稳健性和电源效率。该器件经验证的抗辐射能力确保其在恶劣空间环境下仍能保持可靠性。该器件具备宽频率覆盖范围、先进的 JESD204B 与 JESD204C 特性以及动态配置选项，可帮助设计人员在针对各类任务剖面提升性能的同时，减小尺寸、重量与功耗。

AFE7950 的 SEP 版本正在研发中，将进一步增强器件的可扩展性与性能，以支持包括 LEO 任务在内的多种任务剖面。展望未来，多种 AFE 配置可催生先进的相控阵及多输入多输出 (MIMO) 系统，从而实现更高容量与更稳健的卫星链路。这些功能使 AFE7950 成为下一代 SATCOM 平台的通用且面向未来的理想选择。

4 参考资料

- Agoro, Yusuf (2020 年 7 月)。《如何使用 AFE79xx 实现跳频》，德州仪器 (TI) 应用报告。
- Guibord, Matt (2015 年 4 月)。《JESD204B 多器件同步：分解要求》，德州仪器 (TI) 的模拟设计期刊
- Iyer, Srinivasan 和 Murphy, Srinivas (2023 年 5 月)。《AFE79xx 作为单芯片宽带中继器解决方案》，德州仪器 (TI) 应用手册。
- 德州仪器 (TI)，《AFE7950-SP 生产流程与可靠性报告》，辐射报告。
- 德州仪器 (TI)，《AFE7950-SP 总电离剂量 (TID) 辐射报告》，辐射报告。
- 德州仪器 (TI)，《搭载 12GSPS DAC 和 3GSPS ADC 的 AFE7950-x 4T6R 射频采样 AFE》，数据表。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月