

## ZIF 和 RF Sampling 简述

Wenjing Lu

### 摘要

ZIF (Zero IF 零中频) 和 RF Sampling (射频直采) 作为 Transceiver 的两种全平台主流构架, 前者以低功耗见长, 在 Massive MIMO 和 Small Cell (小站) 应用中更具竞争力; 后者以超宽带多频段见长, 为宏站形态下多模式兼容设计提供最优解决方案。本文以 AFE77xx 作为 ZIF 架构的代表, AFE79xx 作为 RF Sampling 架构的代表, 对两种架构的异同点进行论述。

### 目录

1	引言 .....	2
2	ZIF 架构简介 .....	2
	2.1 ZIF TX 架构简介 .....	2
	2.2 ZIF RX 架构简介 .....	3
3	RF Sampling 架构简介 .....	3
	3.1 RF Sampling TX 架构简介 .....	3
	3.2 RF Sampling RX 架构简介 .....	4
4	ZIF 和 RF Sampling 应用区别 .....	5
	4.1 单/双频段和带宽 .....	5
	4.2 功耗比较 .....	5
	4.3 性能比较 .....	6
	4.3.1 边带和本振泄露 .....	6
	4.3.2 TX 发射功率和 NSD .....	6
	4.3.3 RX 满幅电平, NF/NSD 和 IIP2 .....	6
	4.3.4 外置滤波器 .....	7
5	结论 .....	7
6	参考文献 .....	7

### 图

Figure 1.	ZIF TX 架构框图 .....	2
Figure 2.	ZIF RX 架构框图 .....	3
Figure 3.	RF Sampling TX 架构框图 .....	3
Figure 4.	RF Sampling RX/FB 架构框图 .....	4
Figure 5.	双频工作模式频率规划 (以联通 1.8+2.1 为例, 左图 RX 频率规划, 右图 TX 频率规划) ..	5

## 1 引言

AFE77xx 4T4R2F 零中频架构单频段 transceiver, 发射和反馈最大 DPD 带宽 600MHz, 接收 300MHz 带宽, 适用于 Massive MIMO, Small Cell, Macro (宏站) 等 sub 6G 全平台应用。AFE79xx 4T4R2F 射频直采架构双频段 transceiver, RFADC 最高采样速率 12GSPS 支持第一/第二 Nyquist 模式, RFADC 最高采样速率 3GSPS; 除了支持 Massive MIMO, Small Cell, Macro 等 sub 6G 全平台应用外; 还支持 5G 超宽带应用, 单频段工作模式下发射/接收带宽 1.2GHz @7.5GHz 中频; 以及宏站场景下的 1.8GHz+2.1GHz 双频段应用。综上所述, AFE77xx 和 AFE79xx 均为全平台收发信机, 前者专注于单频段场景下的低功耗应用, 后者则是单一芯片多模式兼容平台设计的最优选择。

## 2 ZIF 架构简介

### 2.1 ZIF TX 架构简介

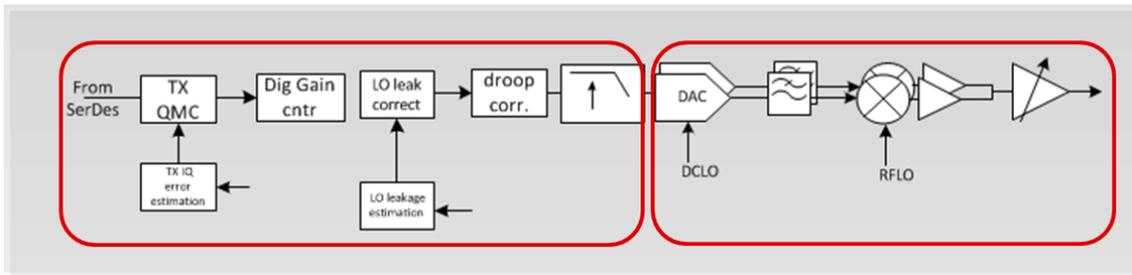


Figure 1. ZIF TX 架构框图

Figure 1.所示 AFE77X 零中频架构发射链路单元框图。右侧框图为 ZIF 架构发射模拟部分, 主要由最高采样速率为 3.3GSPS 14bit 的两路 IQDAC 组成, 跟随可调三阶重建滤波器以滤除每路 DAC 产生的镜像产物, 然后由 IQ modulator (IQ 调制器) 将零中频信号/低中频信号(~100Mhz IF) 搬移到 sub6G 射频载波位置, 最后级为 40dB(1dB per step)增益范围的 PPA 完成发射电路的发射功率控制, 其中的 IQ modulator 的本振由独立的高性能内置 RFPLL\_TX 提供。左侧框图为 ZIF 架构发射机的数字部分, 主要由 interpolation (内插) 模块组成以完成从接口速率到 DAC 采样速率的内插转换以降低基带接口速率。数字功能模块包括: ZIF 架构所特有的 TX QMC (Quadrature Modulation Correction 正交调制修正)和本振泄露修正模块。前者用以修正由于模拟 IQ 两路幅度, 相位, group delay (群时延) 的非对称性导致的边带; 后者用于修正来自于基带 IQDAC 的 flicker noise (闪烁噪声) 和 modulator 处的本振泄露。其余的有用的数字功能模块还包含: 用于功放保护的 PAP (Power Amplifier protection 功放保护) 模块, 用于带内平坦度调整的 droop correction 模块, 以及用于 DSA 出厂增益相位校准电路。

## 2.2 ZIF RX 架构简介

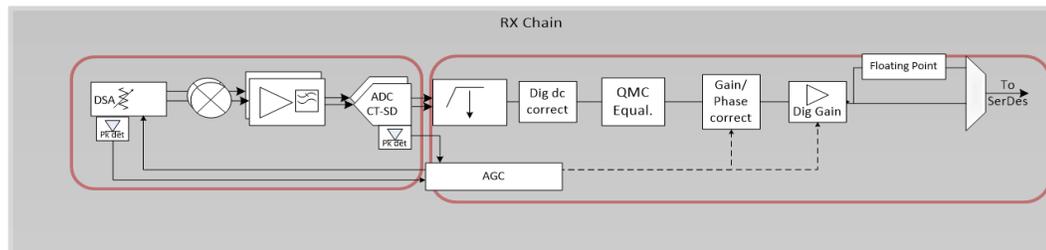


Figure 2. ZIF RX 架构框图

Figure 2.所示 AFE77X 零中频架构接收链路单元框图。左侧框图为 ZIF 架构接收模拟部分，从左至右依次为：动态范围为 28dB 的电阻阵列 DSA (Digital Step Attenuators, 数控衰减器是 AGC 模拟部分主控电路)；passive IQ demodulator 实现模拟信号从射频载波到零中频或者低中频信号 (<100MHz) 的搬移，并且 passive demodulator (无源解调器)提供了比 active demodulator (有源解调器)更为出色的 flicker noise 性能, IQ demodulator 的本振由独立的高性能内置 RFPLL\_RX 提供；TIA 电路实现了电压到电流的转换，同时实现了链路增益和抗混叠滤波器的作用；最后一级为最高采样率为 3.3GSPS CTSD ADC (continuous time sigma delta ADC)支持最大带宽 300MHz。右侧框图为 ZIF 架构接收机的数字部分，主要由 decimation (抽取) 模块组成，以完成从 ADC 高速采样速率到接口速率的抽取转换，以降低基带接口速率。数字功能模块包括：ZIF 架构所特有的 RX QMC 和本振泄露 修正模块。前者用以修正由于模拟 IQ 两路幅度，相位，group delay 的非对称性导致的边带；后者用于修正主要来自于射频电路的本振泄露和基带电路的 flicker noise。其余的有用的数字功能模块还包含：增加接收链路输入信号范围防止大信号情况下 ADC 饱和的 AGC (Automatic Gain Control 自动增益控制) 控制模块及其 DSA 出厂增益相位校准电路。

## 3 RF Sampling 架构简介

### 3.1 RF Sampling TX 架构简介

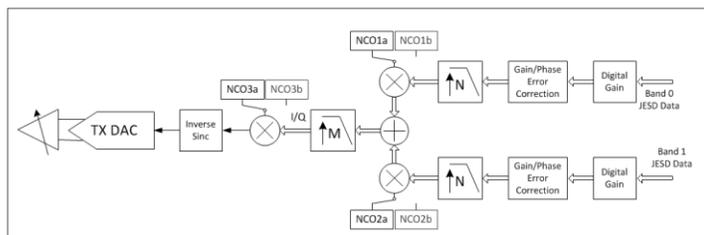


Figure 3. RF Sampling TX 架构框图

Figure 3.所示 AFE79X 射频直采架构发射链路单元框图。RF Sampling 架构发射模拟部分相对简单主要由一路最高采样速率为 12GSPS RFDAC (支持最高 1.2GHz 信号带宽, 默认 0.1dB 带内 ripple, 80% 接口速率; 如果带内 ripple 放松到 1dB, 最高带宽可达 90%接口速率即 1.35GHz) 组成, 紧接着就是用于发射功率控制的 40dB (1dB per step) PPA 电路。RF Sampling 架构发射机的数字部分, 主要由两路数字上变频 DUC 模块组成以实现双频段应用需求, 例如 1.8GHz +2.1GHz。之所以采用两路 DUC 的架构是为了降低双频段场景下基带信号传输带宽的要求, 双频段场景有两种实现方式: 第一种用超宽单频带同时传输双频信息, 另一种方式是使用两个窄带仅传输有用信号, 然后在 transceiver 芯片内部实现两路窄带信号的合路和搬移, AFE79xx 选用的就是后者。并且 AFE79xx 采用了两级 NCO (numerically-controlled oscillator 数控振荡器) 模式, NCO1 和 NCO2 在 1.5GSPS/3GSPS 速率下实现双频段合路即双频段相对位置搬移, 然后由 NCO3 实现双频段频率的整体搬移即双频段绝对频率搬移; 双级 NCO 架构的好处在于两路 DUC (Digital up Converter 数字上变频) 在合路前可以工作在较低的频率下以节省功耗。其余的有用的数字功能模块还包含: 用于功放保护的 PAP 模块, 用于带内平坦度调整的 droop correction 模块, 以及用于 DSA 出厂增益相位校准电路。

### 3.2 RF Sampling RX 架构简介

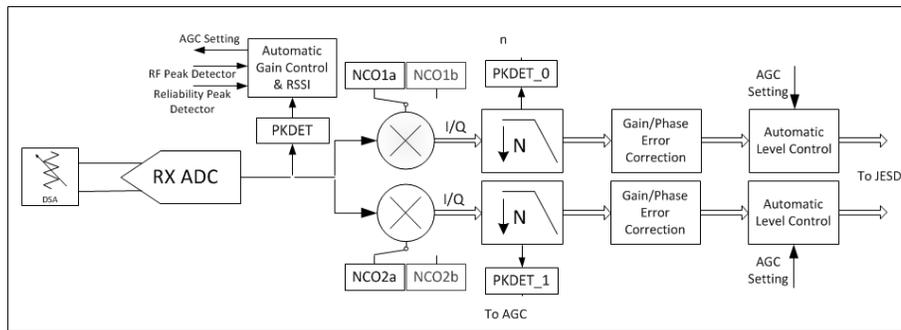


Figure 4. RF Sampling RX/Feedback 架构框图

Figure 4 所示 AFE79X 射频直采架构接收/反馈链路单元框图。RF Sampling 架构接收模拟部分由动态范围为 25dB 的电阻电容阵列 DSA (AGC 模拟部分主控电路), 跟随单路最高采样速率为 3GSPS 非内插射频直采 RFADC (支持最高 1.2GHz 信号带宽) 组成。RF Sampling 架构接收机的数字部分, 主要由两路数字下变频 DDC (Digital down Converter) 模块组成以实现双频段应用需求。和发射链路的 DUC 类似, 两路 DDC 的目的也是为了降低双频段场景下基带信号传输带宽的要求, 每个频段由各自的 NCO 搬移到基带分别同时处理。其余的有用的数字功能模块还包含: AGC 控制模块及其 DSA 出厂增益相位校准电路。反馈电路相较于接收电路的不同在于: 1. 只有一路 DDC, 双频段信息进行顺次错时处理。由于 DPD (Digital Pre-distortion 数字预失真) 参数具有一定的时效性, 无需实时监控, 所以对于双频段的应用, 可以通过两个不同频段的 NCO 分时跳转传递不同的频段信息。2. 由于反馈链路信号稳定, 所以无需 AGC 控制。另外, AFE77xx 的反馈链路也采用了射频直采架构。同时, AFE77xx 和 AFE79xx 在 TDD 模式下, 支持接收/反馈共用同一模拟前端即接收模拟前端 (AGC 在反馈时隙进入 frozen 状态), 以进一步降低功耗。

## 4 ZIF 和 RF Sampling 应用区别

### 4.1 单/双频段和带宽

宏站形态多样: 制式(FDD/TDD), 频带数(单频/双频), 通道数(4T4R/8T8R 等), 带宽(主流 200MHz\_sub-6G/800MHz+\_ 5G)。AFE77xx 和 AFE79xx 虽然都是全平台产品, 但是由于 AFE79xx 的超高带宽和双 DDC/DUC 架构, 使得 AFE79xx 在兼容设计方面拥有更大的灵活性。AFE79xx 支持 6GSPS/9GSPS 采样率下第一/第二 Nyquist 域输出, 支持 12GSPS 采样率下第一 Nyquist 输出。单频段模式下支持最高带宽 1.2GHz, 输出中频高达 7.5GHz 的 4T4R 5G 场景。在双频段应用场景下, 由于第一级 DUC 最高工作速率 3GSPS, 所以可以支持两个频段最远射频频拉远为 3GHz 的双频段应用, 但在实际应用场景中受限于外围射频 PA 的带宽和效率折中, 主流的双频应用仍局限于 FDD 1.8+2.1。需要注意的是, 双频应用中的频率规划, 应尽量避免每个频段的二次谐波/三次谐波及双频的二次三次交调产物。RF Sampling 架构的频率规划主要是通过调节 RFADC 和 RFDAC 采样率实现的, AFE79xx RFDAC 采样速率(GSPS)支持 4, 4.5, 5, 6, 7.5, 8, 9, 10, 12; RFADC 采样速率(GSPS)支持 1.25, 1.5, 2, 2.25, 2.5, 3。并且, RFADC / RFDAC 的采样钟由同一内置 PLL 生成, 使得 RFADC 和 RFDAC 存在 2/3/4 的整除关系。如下图以联通 1.8+2.1 双频模式为例, RFDAC 工作在 9GSPS (右图), RFADC 工作在 3GSPS (左图, 2.1 频段仅被本身 HD4 击中)。AFE77xx 仅适用于最大带宽不超过 300MHz 的单频段应用。

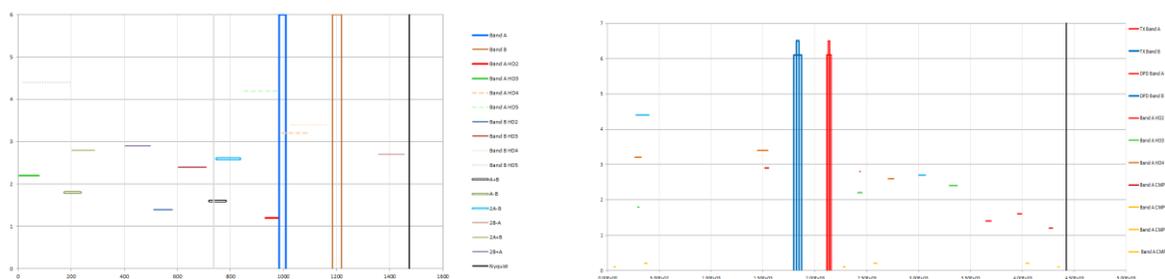


Figure 5. 双频工作模式频率规划 (以联通 1.8+2.1 为例, 左图 RX 频率规划, 右图 TX 频率规划)

### 4.2 功耗比较

在 200MHz TDD 4T4R1F 场景下 (以 75% [TX+FB] /RX duty cycle 为例), AFE77xx 基准功耗为 4.5W, AFE79xx 为 5.5W (RFDAC 6GSPS)。进一步降功耗的举措为: 1.降低 FB 的 duty cycle; 2. 以牺牲 RX NSD 3dB 为代价将 RX 采样率将为半速。另外 AFE79xx 影响功耗的因素还包括: 双频段支持 (粗略估计 FDD 模式下+1W); 发射采样率 (粗略估计 6SGPS VS 9GSPS: +0.6W @FDD)。在相同的工艺制成下, 窄带应用场景下 (小于 300MHz), ZIF 相较于 RF Sampling 有一定的功耗优势; 但是在多频带和超宽带场景下, RF Sampling 的功耗就要明显优于 ZIF: 多频段应用, ZIF 架构需要硬件翻倍; 超宽带直接导致了接收机 CTSD 设计难度指数型倍增。

## 4.3 性能比较

### 4.3.1 边带和本振泄露

ZIF 架构中的 IQ 模拟分量引入了边带和本振泄露；而射频直采架构由于单路模拟 RFADC/RFDAC 不存在模拟 IQ 分量而免疫于边带恶化和本振泄露的系统困扰。AFE77xx 提供芯片级 TX/RX QMC 和 LO leakage (本振泄露) 校准，但是有以下几点需要系统设计时注意：1. TX QMC 和本振校准考虑到和 DPD 的时序协调问题，建议使用 ASIC/FPGA 侧的校准能力（如果具备的话），以便和 DPD 统一协调处理。2. RX 侧的 QMC 和 LO leakage 校准建议启用芯片自身的校准功能即可。ZIF 架构即使有校准算法的修正仍难以避免对系统性能的影响：TX 侧 EVM (Error vector magnitude) 受限于本振相位噪声，修正后的边带和本振对下行 EVM 影响不大；但是 RX 侧由于本振泄露校准算法类似于高通数字滤波器，造成基带附近信号损失（受损信号带宽和收敛速度存在折中，即跟踪修正速度越快受损带宽越宽，但是考虑到环境温度的非突变性可以选用慢速收敛最小化受损带宽），系统影响表现在上行灵敏度，特别是高阶调制模式例如 256QAM 场景下。所以在高阶调制的应用场景中，RF Sampling 的上行方案由于没有本振泄露和边带失调的影响将会是更优的灵敏度解决方案。

### 4.3.2 TX 发射功率和 NSD

ZIF 架构中，有用信号输出在 DAC 的近 DC 附近，再经由 modulator 搬移到射频载波频率。由于基带信号位于 DAC 的 DC 附近，来自于 NRZ DAC (Non return to Zero DAC) 的 SINC 滚降和模拟射频 Droop 效应都不明显，所以 ZIF 架构 TX 输出功率较高。RF Sampling 架构中，射频直接输出，DAC 输出功率损耗来自两方面：一方面来自于 DAC 的脉冲响应传输函数损耗，例如第一 Nyquist 应用中 NRZ DAC 的 SINC 滚降，滚降的损耗取决于（Fc 载波/Fs 采样率），载波频率越高 SINC 损耗越大；另一方面的损耗来自于模拟的 droop 效应，类似于模拟低通滤波器相应，同样也是随着载波频率的增大而增大。所以一般来说在常用的 2.6GHz/3.5GHz，ZIF 的输出功率要比 RF Sampling 高 2~3dB。由于绝对噪底相当，所以就 NSD 指标 ZIF 也相较于 RF Sampling 好 2dB，提供更好的发射动态。

### 4.3.3 RX 满幅电平，NF/NSD 和 IIP2

RX 接收满幅电平取决于 ADC 模块之前是否存在增益级，增益级的存在则是接收链路整体 NF (Noise Figure 噪声系数) 和功耗之间的折中考量。加入增益级，接收链路 NF 改善，可以减轻对于前端外置增益级 LNA/ pre-driver 的增益需求，但是会增加 transceiver 芯片的整体功耗，提高芯片散热设计的难度。AFE77xx 接收链路 ADC 前存在增益级，所以 RX 接收满幅电平-14dBm@2.6GHz，NF=11dB；AFE79xx 接收链路 ADC 前没有额外增益，接收满幅电平-2dBm@2.6GHz，NF=21dB。但是 AFE77xx 的 DSA 全部为模拟 DSA，NF 和 DSA 的关系遵循 1dB/dB 的恶化关系；AFE79xx 的 DSA 的前 3dB 却是数字衰减不恶化 NF，所以实际上 AFE79xx 的接收链路的动态范围 NSD (Noise spectral density 噪声谱密度) 要比 AFE77xx 好 5dB @ DSA>3。综上所述，使用 AFE79xx 为了取得较好的静态灵敏度可能需要比 AFE77xx 前端加一级预放。

另外，ZIF 架构相对于 RF Sampling 需要额外考量 IIP2 的性能指标，AFE77xx 提供器件自建 IIP2 校准，提供了良好的 IIP2 性能，并不会恶化阻塞模式下的灵敏度。

#### 4.3.4 外置滤波器

发射链路，ZIF 架构的 DAC 发射的信号为零中频/低中频信号，其镜像信号接近  $F_s$ ，已经被 NRZ DAC 的 SINC 滚降有效抑制，并且 DAC 后端的三阶重建滤波器也对镜像提供了进一步的抑制。所以 ZIF 架构里面发射链路在最末级 PA 之前无需加装外置滤波器。但是 RF sampling 架构，RF DAC 在不同的工作模式/采样率下，镜像信号位置可能离主信号只有几百 MHz 的距离，而且离主信号越近，镜像信号的输出功率等级差异越小，这时候就可能需要外置滤波器滤除临近镜像，避免镜像信号直接进入后级 PA 产生交调产物影响 DPD 性能。所以 RF Sampling 架构发射链路当镜像信号过近的时候，可能需要外置滤波器滤除镜像，而且滤波器的频率抑制需求需要依据频率规划针对性分析（RF DAC 工作模式/采样率）。

接收链路，ZIF 架构的 CTSD ADC 本身提供的低通特性节约了接收链路前端外置滤波器的设计需求，但是 RF Sampling 架构的 RF ADC 的全通特性和超宽模拟输入带宽导致外置抗混叠滤波器的不可或缺性。

## 5 结论

综上所述，ZIF 架构以低功耗见长；RF Sampling 架构以超宽带多频段，应用的兼容灵活性见长。其他方面则各有优缺：ZIF 外围极简；RF Sampling 则需要频率规划，有时需要外置滤波器进行镜像抑制。但是 RF Sampling 收发均无需本振和边带校准，简化系统设计；在 5G 高阶调制下，接收拥有更加优异的灵敏度性能。

## 6 参考文献

1. Datasheet “AFE77xx Quad-Channel RF Transceiver With Feedback Path”
2. Datasheet “AFE79xx Quad-Channel RF Transceiver With Feedback Path”

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122  
Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司