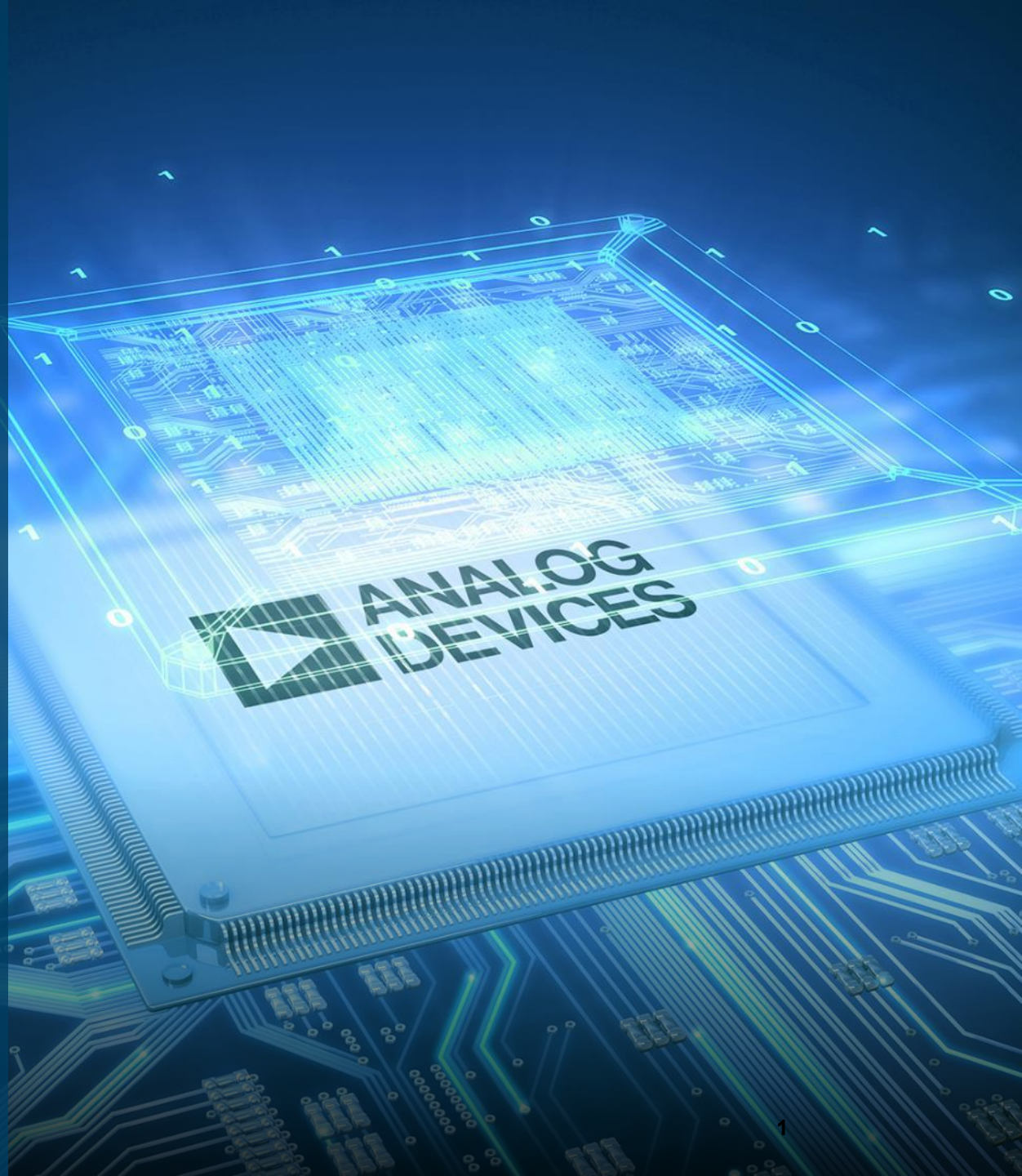
ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

数字波束赋形技术针对相控阵系统

PETER DELOS
技术主管
航空航天和防务应用部
北卡罗来纳州格林斯博罗



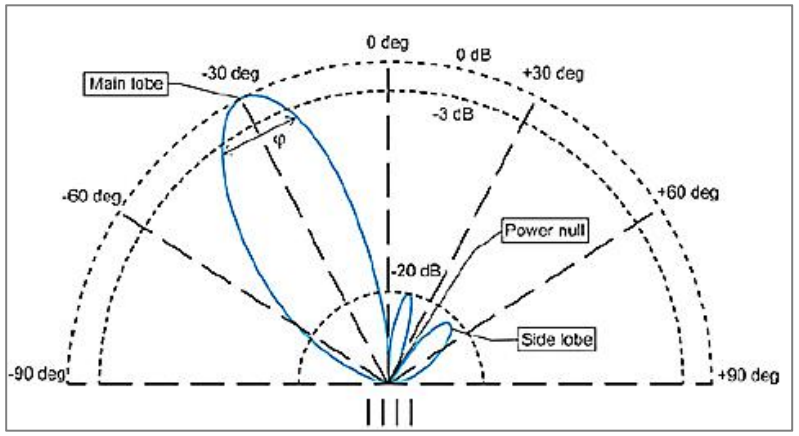
议题

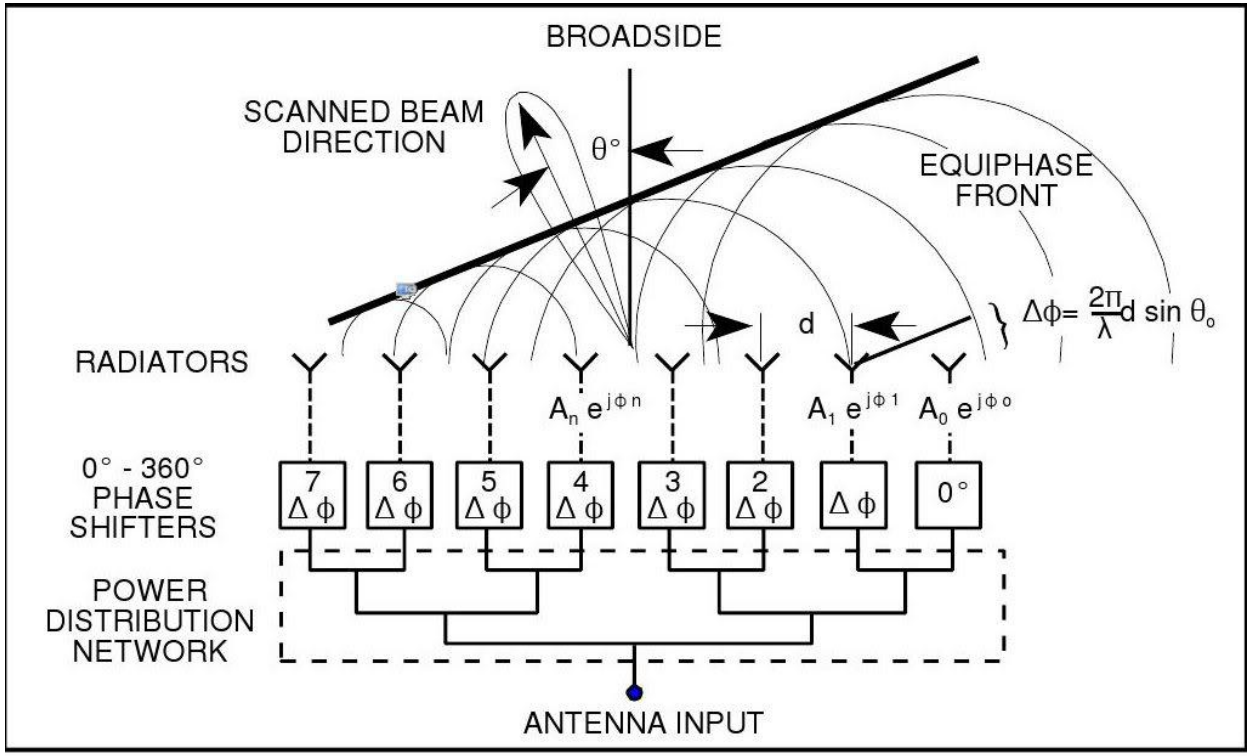
- 历史回顾
- 相控阵概述
  - 框图
  - 天线方向图
  - 优势和挑战
  - 元件间隔
- 前端子系统
  - T/R模块
  - 模拟波束赋形
- 级联分析
  - 噪声系数
  - 三阶交调截点
  - 相位噪声
- 接收机架构
  - 外差
  - 直接变频
  - 直接采样
- 校准
- 参考文献

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

相控阵概念

- 一个天线元件阵列，各元件的相对相位是变化的
- 有效辐射图在想要的方向（主瓣）上得到加强，在不想要的方向（旁瓣）上得到抑制
- 允许雷达将能量集中在一个地方，而其它地方保持隐形

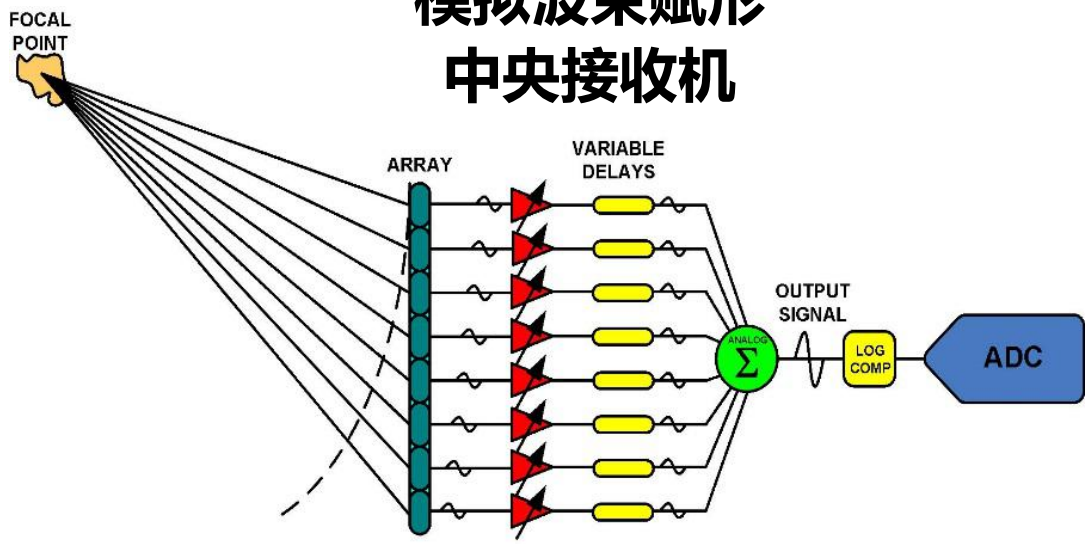




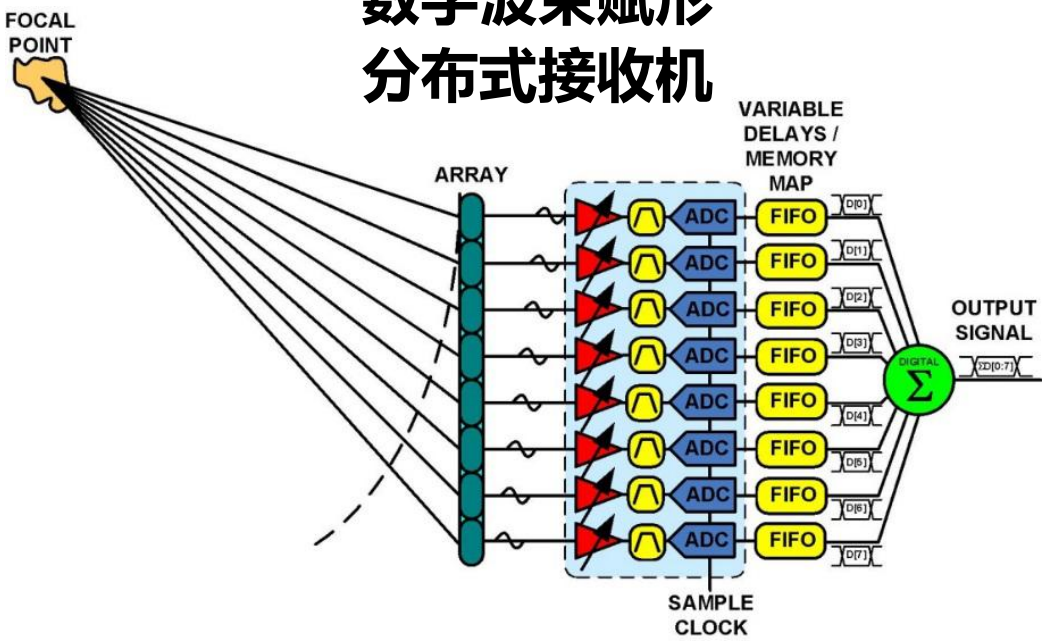
ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

模拟与数字波束赋形

模拟波束赋形
中央接收机



数字波束赋形
分布式接收机

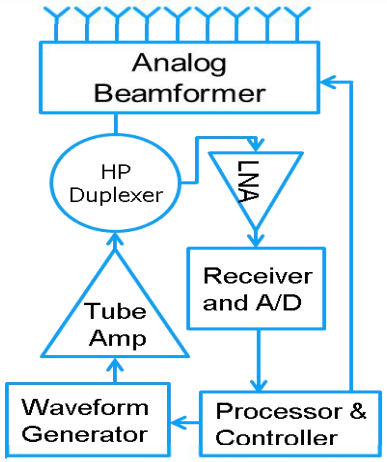


- **模拟波束赋形系统：传统，灵活性有限**
- **数字波束赋形系统：新兴，最为灵活**
  - 尺寸、重量和功耗(SWaP)挑战
    - 所有数据的数字处理需要相当大的功耗
    - 难以靠近天线实现
- **许多系统采用混合架构（子阵架构）**
  - **带较少数字通道和数字波束赋形的模拟子阵列**

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

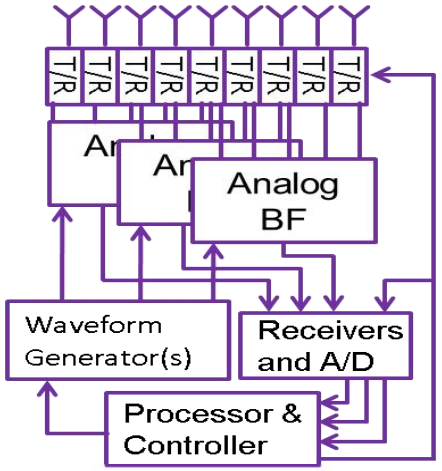
相控阵雷达系统演变

经典



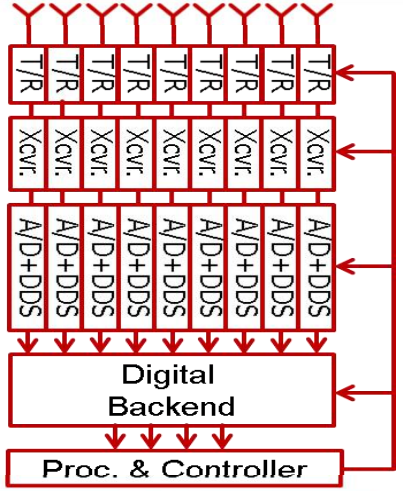
- 模拟波束赋形或机械扫描
- 中央接收机和激励器
  - 电子元件数量少：

混合解决方案



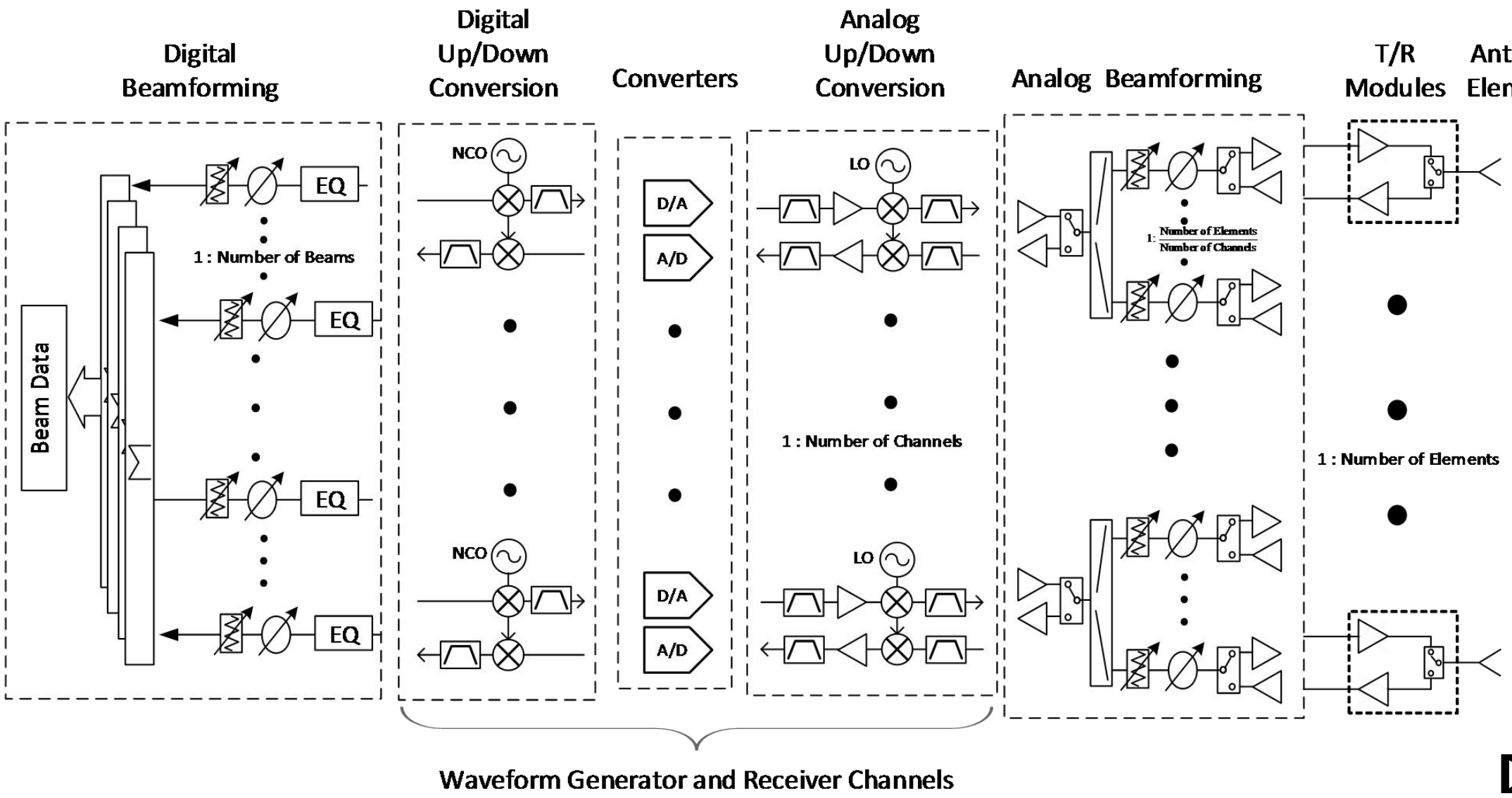
- 子阵架构
  - 模拟/数字波束赋形
- 分布式接收机和激励器
  - 在子阵级别

全数字



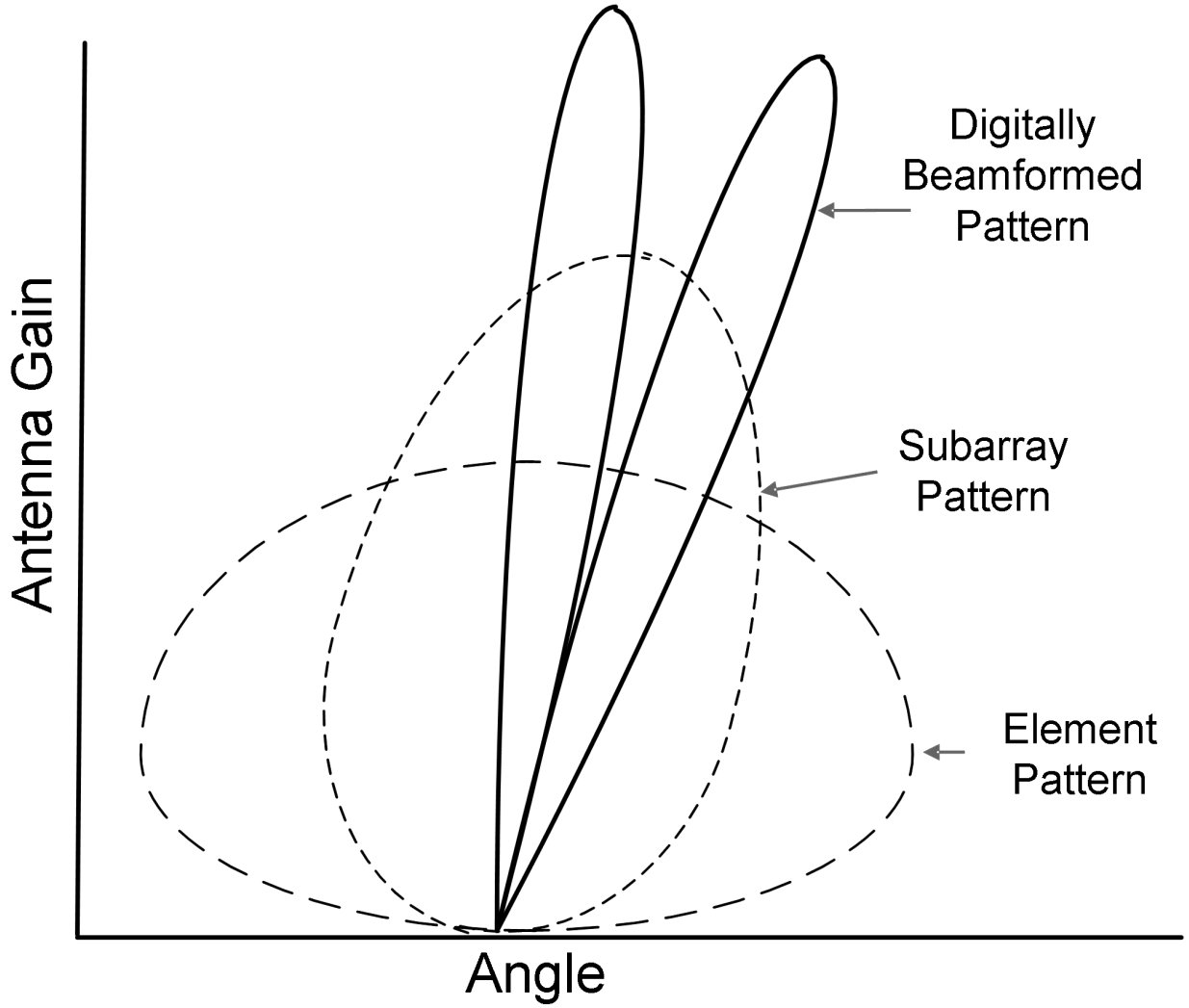
- 每元件数字波束赋形
  - 无模拟波束赋形
- 分布式接收机和激励器
  - 在每元件级别

通用数字波束赋形相控阵信号流



ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

数字波束赋形天线方向图



关键点

- 考虑三种波束方向图
  - 元件方向图
  - 子阵方向图
  - 数字波束赋形方向图
- 子阵方向图局限
  - 天线增益造成数字波束赋形方向图外的干扰
  - 多个数字波束赋形方向图的定向分集

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

数字波束赋形：优势和挑战

优势

- 最灵活的可编程系统
- 支持许多同时发生的波束方向图
- 支持自适应天线方向图编程
- 将分布式波形发生器和接收机合并可改善噪声性能

挑战

- 许多波形发生器和接收机通道的同步/校准
  - 上电同步
  - 通道间漂移
- LO/时钟分配
- 直流电源分配
- 与波形发生器和接收机设计相关的SWAP-C
  - 在较高频率的工作频段更困难
- 处理大量数字数据

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

通道尺寸考虑

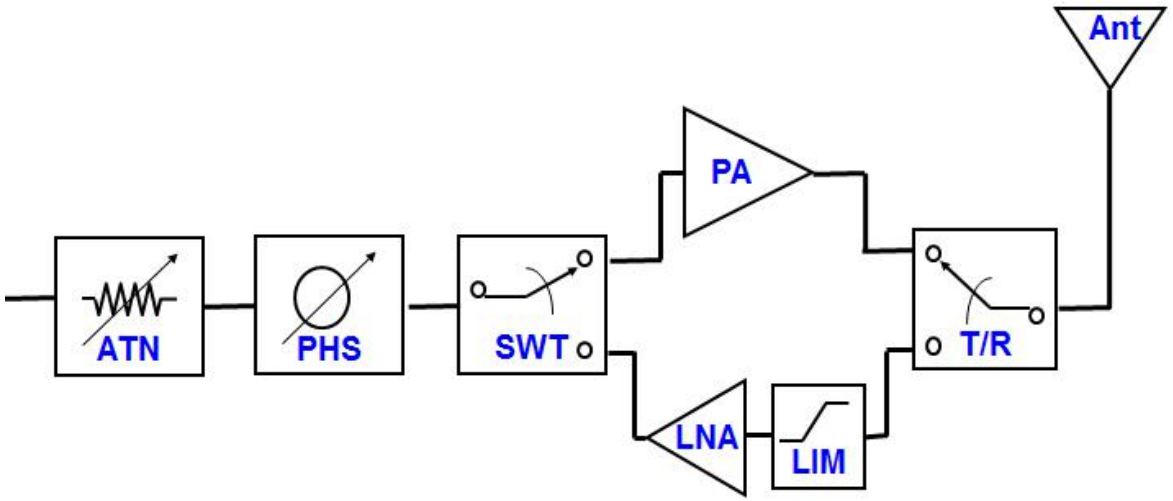
- 元件间隔
  - 最大间隔为λ/2 -> 工作频率↑，通道间隔随之↓
  - 基于扫描角度和旁瓣目标而减小
  - 由于机械结构而减小
  - 双极点系统减半
- 模拟波束赋形影响
  - 发射与接收模块尺寸分配通常不变
  - 波形发生器、接收机和处理器数量减少
    - 尺寸分配更宽松
    - 性能要求可能更严格
- 膨胀阵列：
  - 电子元件比天线面更宽
  - 提高系统电子元件容量的方法
  - 降低可扩展性

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

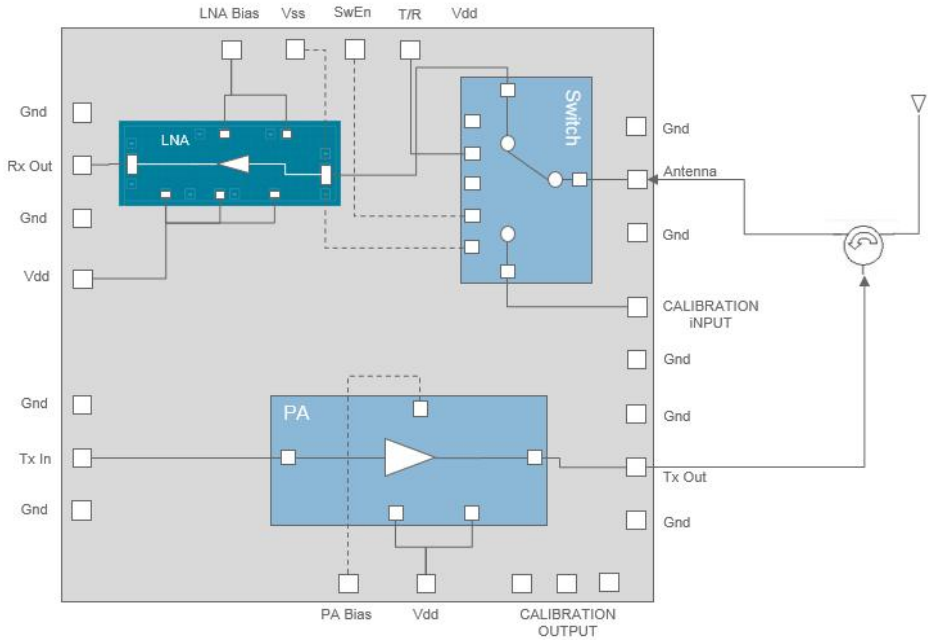
基本雷达发射与接收模块(TRM)图

- TRM
  - 集PA、LNA、TR开关于一体，还可能包含相位/增益控制
  - 高集成度解决方案

功能框图



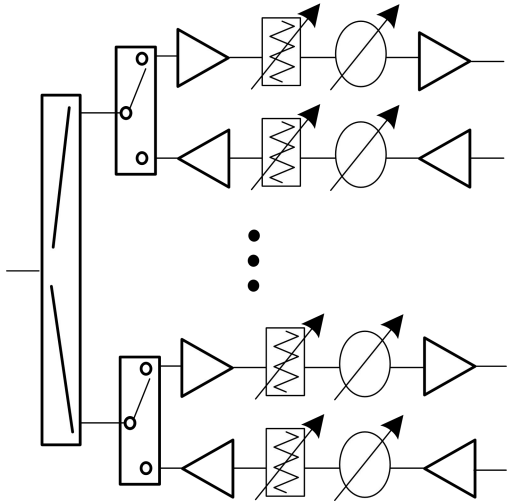
前端集成方法示例



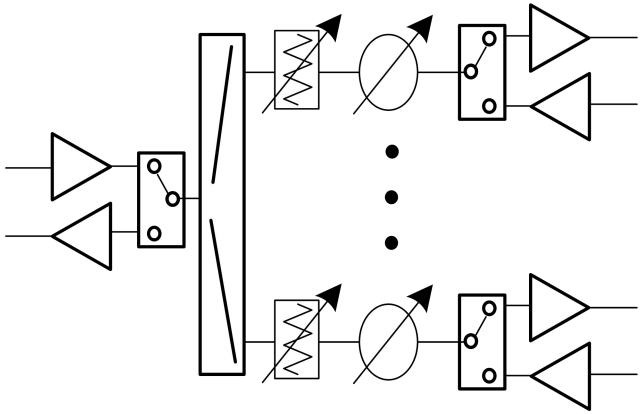
ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

模拟波束赋形拓扑

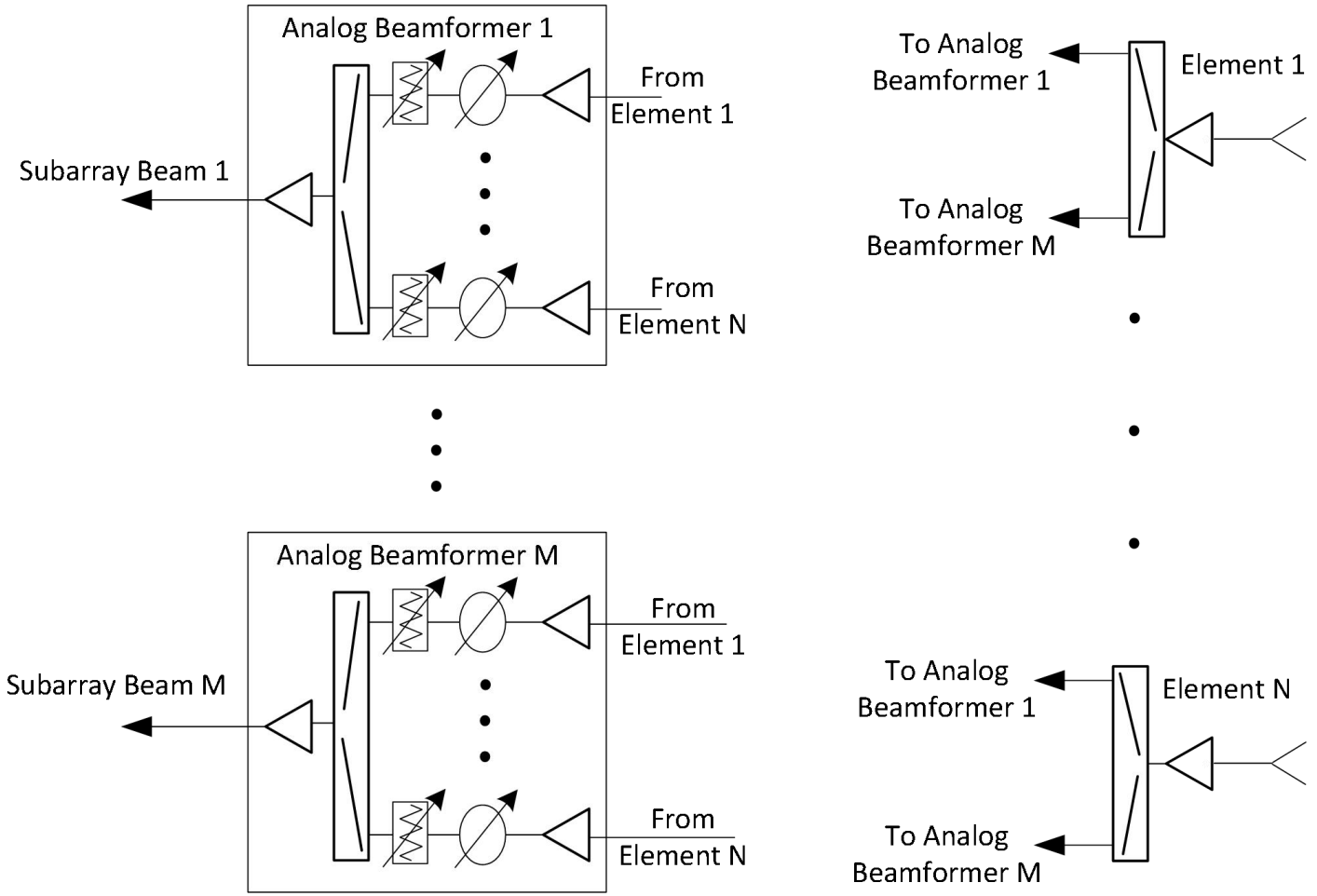
通用模拟波束赋形器



重用移相器和衰减器



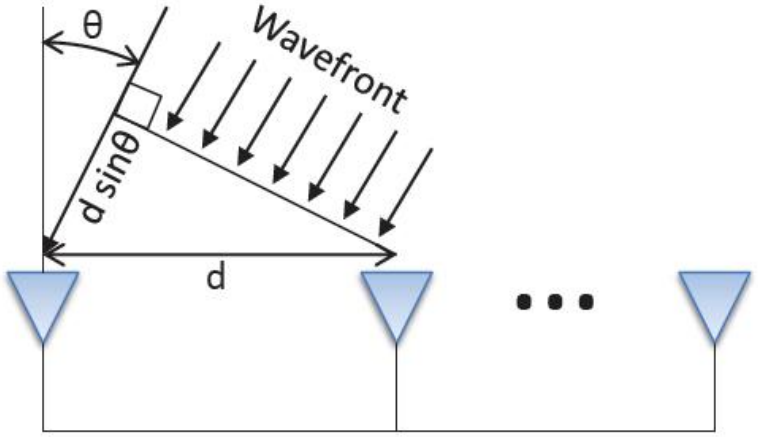
多子阵模拟波束赋形架构

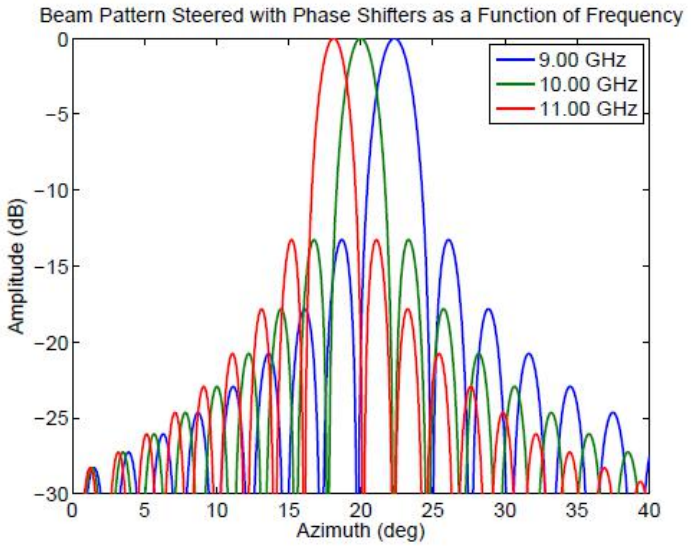


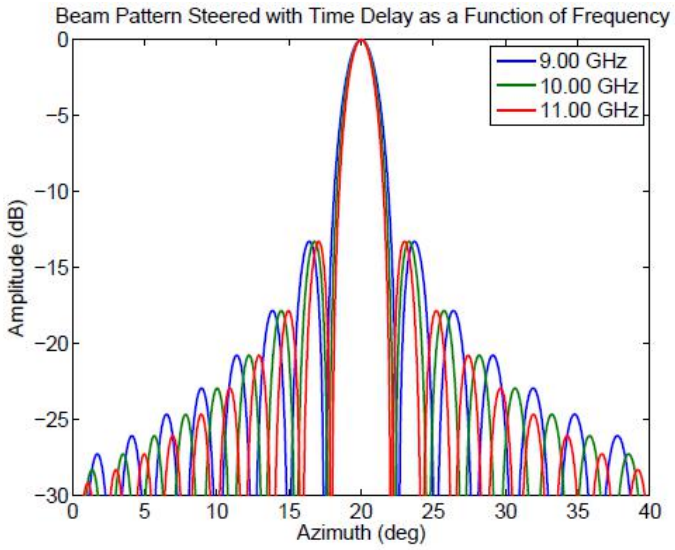
ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

移相与真实时间延迟

波束斜视：波束方向变化与频率的关系
窄带：相移器足够
宽带：使用真实时间延迟







图像来源：

True Time-Delay Beamsteering for Radar

Matt Longbrake
Wright State University
Air Force Research Laboratory Sensors Directorate
Dayton, OH

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

级联分析

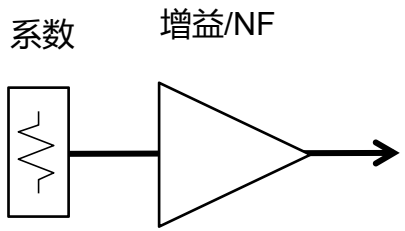
接收机噪声

- 接收机设计的很多工作花在最小化噪声系数(NF)上面。噪声系数衡量信噪比的降低程度。

$$F = \frac{(S/N)_{In}}{(S/N)_{Out}} \quad , \text{ standardized at } 290\text{K}(\text{T}_\text{O})$$

$$NF = 10\log F$$

- 器件或子系统噪声系数的影响是使输出噪声功率高于热噪声水平，并被噪声系数放大。



噪声功率 = -174dBm/Hz + 增益(dB) + NF(dB)

级联噪声系数等式

$$F_{Total} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{Gain_1} + \frac{F_3 - 1}{Gain_1 * Gain_2} + \cdots + \frac{F_N - 1}{Gain_1 * Gain_2 * \cdots * Gain_{N-1}}$$

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

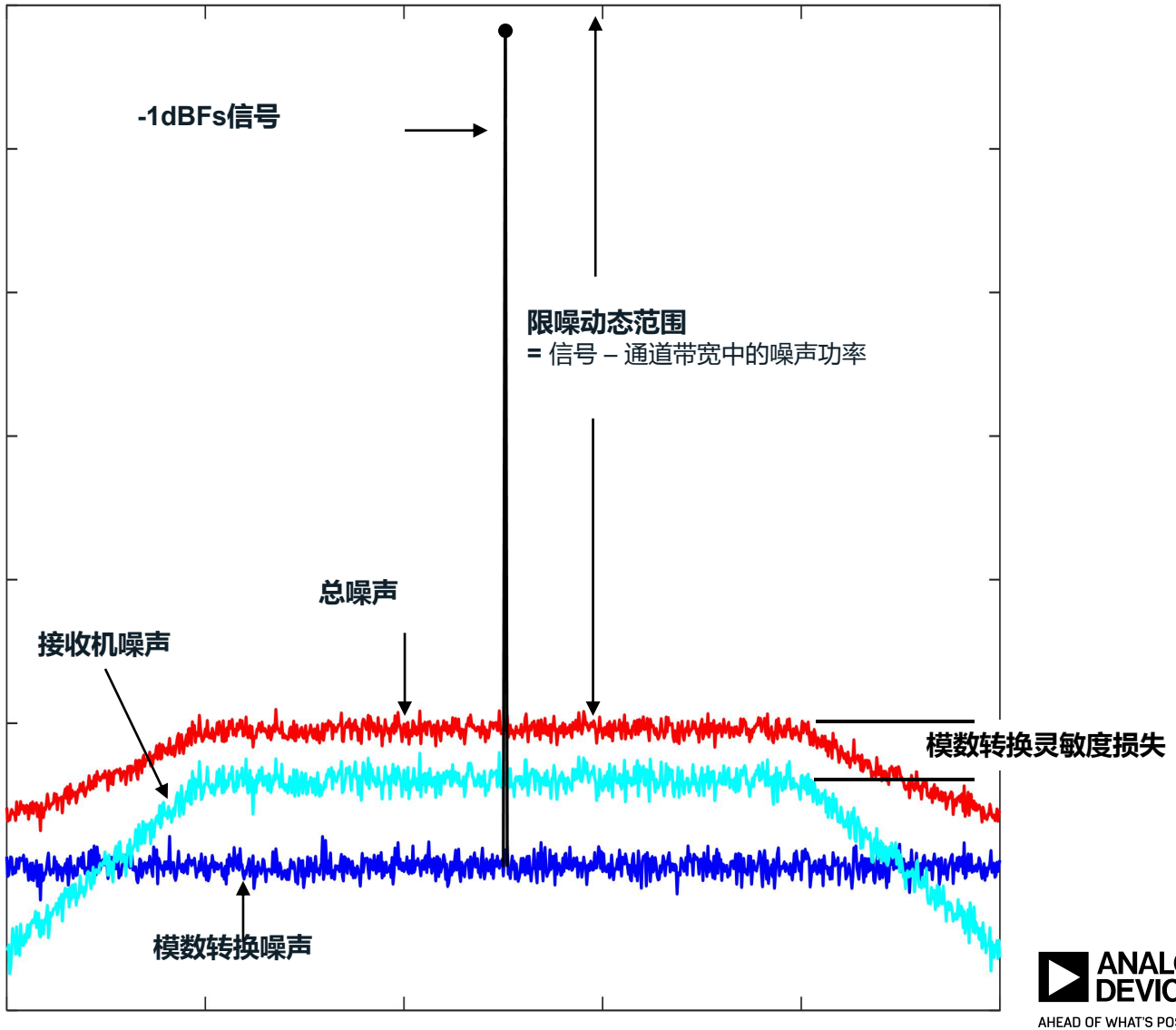
接收机噪声（续）

- 接收机总噪声
  - RF部分与模数转换部分之和
  - RF部分由抗混叠滤波器整形
  - 模数转换噪声通常是平坦的
- 计算方法
  - 转换为常用单位
  - 噪声以功率单位相加
- 限噪动态范围
  - 信号 – 通道带宽中的噪声功率

$$\text{A/D Noise}(dBm/Hz) = \text{A/D Full Scale}(dBm) + \text{A/D NoiseDensity}(dBFs/Hz)$$

$$\text{Total Noise}(dBm/Hz) = 10\log_{10}\left(10^{\frac{\text{Receiver Noise}(dBm/Hz)}{10}} + 10^{\frac{\text{A/D Noise}(dBm/Hz)}{10}}\right)$$

$$\text{A/D Sensitivity Loss}(\text{dB}) = \text{Total Noise}(dBm/Hz) - \text{Receiver Noise}(dBm/Hz)$$

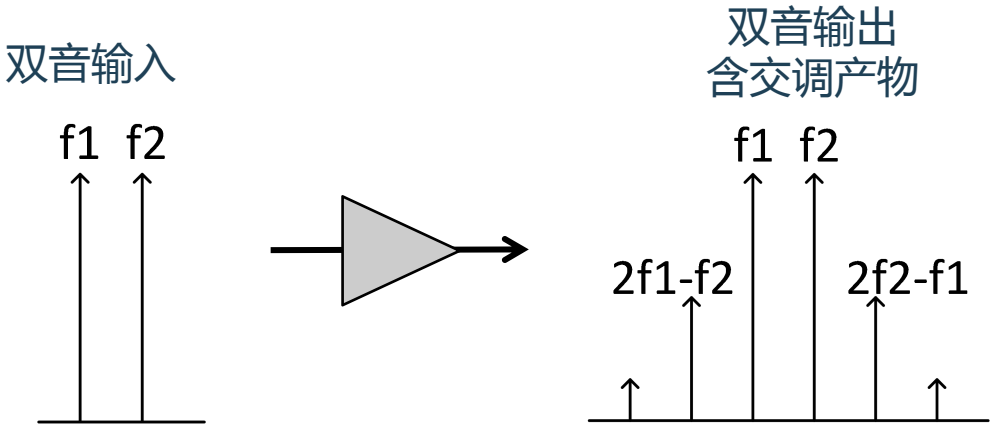


ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

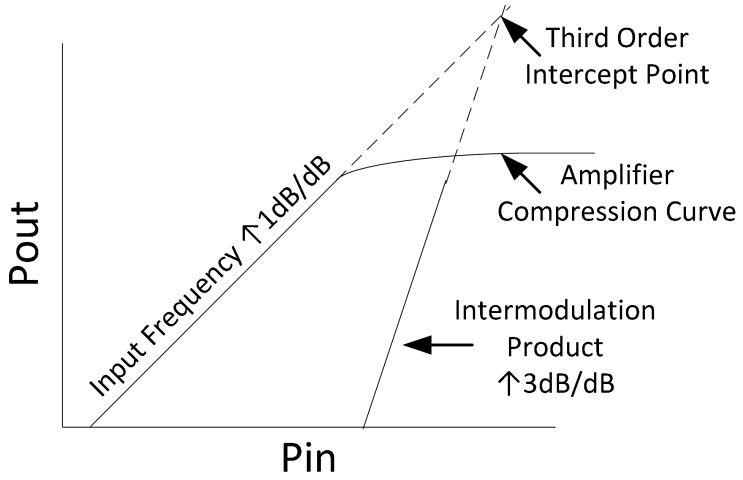
三阶交调截点(TOI)

- 用途：衡量RF放大器线性度的工业标准指标

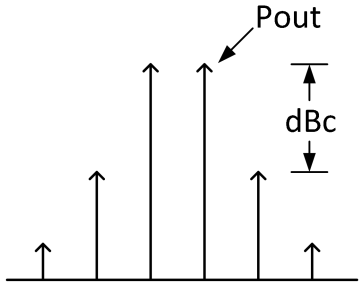
双音交调图解



截点概念



计算方法



Output Third Order Intercept

$$OTOI = Pout + \frac{dBc}{2}$$

Input Third Order Intercept

$$ITOI = OTOI - Gain$$

级联ITOI

$$\frac{1}{ITOI_{Total}} = \frac{1}{ITOI_1} + \frac{1}{\frac{ITOI_2}{Gain_1}} + \cdots + \frac{1}{\frac{ITOI_N}{Gain_1 Gain_2 Gain_{N-1}}}$$

此等式使用线性ITOI，而非dB

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

级联分析-ADISimRF

- 用途
  - 重要RF参数的累积跟踪
    - 信号功率、累积增益
    - NF、噪声功率、TOI
    - 压缩裕量
- 常见方法
  - 电子表格
    - 优点：用户灵活性最大
    - 缺点：剪切粘贴易出错
  - RF仿真
  - 工业计算器
    - 示例：ADISimRF

ADISimRF示例

- 包含许多器件
- 易于添加用户自定义模块
- 计算大多数常用重要参数

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

相位噪声：定义

- 衡量信号的零交越偏差
- 考虑有相位波动的余弦波

$$x(t) = \cos\left(2\pi ft + \phi(t)\right)$$

f = instantaneous frequency

$\phi(t)$ = randomly fluctuating phase in radians

- 功率谱密度

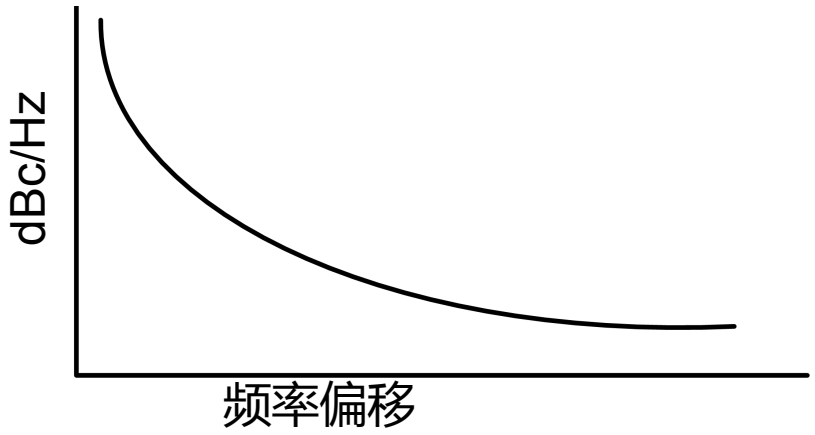
$$S(f) = \frac{\phi(t)^2_{RMS}}{BW} \quad \text{with units of} \quad \frac{\text{rad}^2}{\text{Hz}}$$

- 相位噪声： 单位为dBc/Hz，得自 $10log(L(f))$

$$L(f) = \frac{S(f)}{2}$$

  - 绝对相位噪声
    - 输出端总相位噪声
    - 源振荡器与器件之和
  - 残余相位噪声
    - 器件的加性相位噪声
    - 器件噪声与所用信号源无关

绘图方法

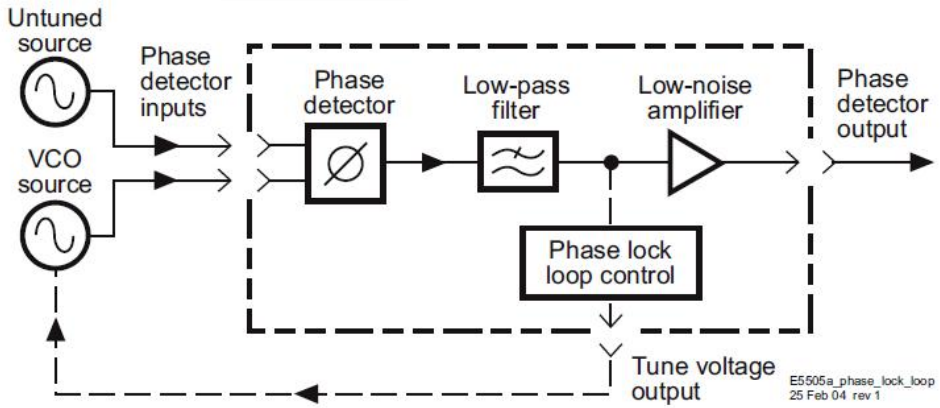


ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

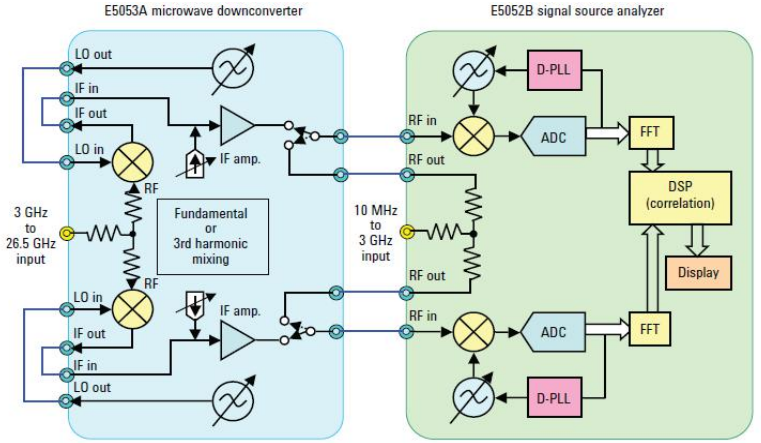
相位噪声测试设置

绝对相位噪声

鉴相器方法

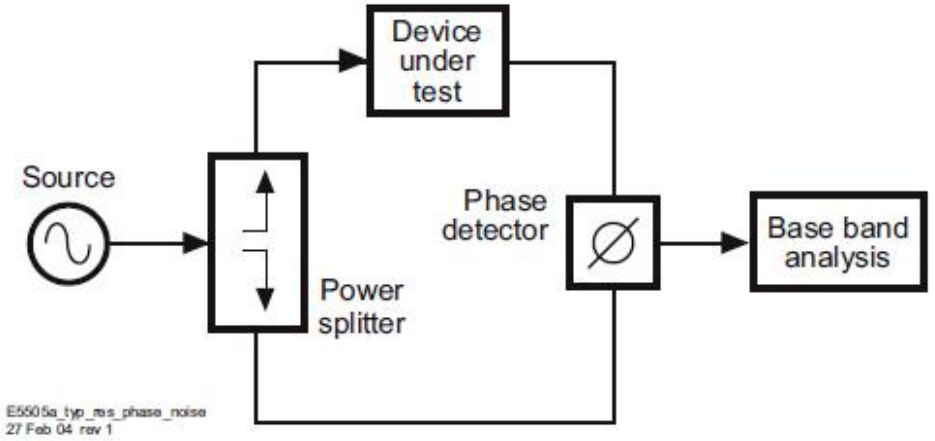


交互相关方法

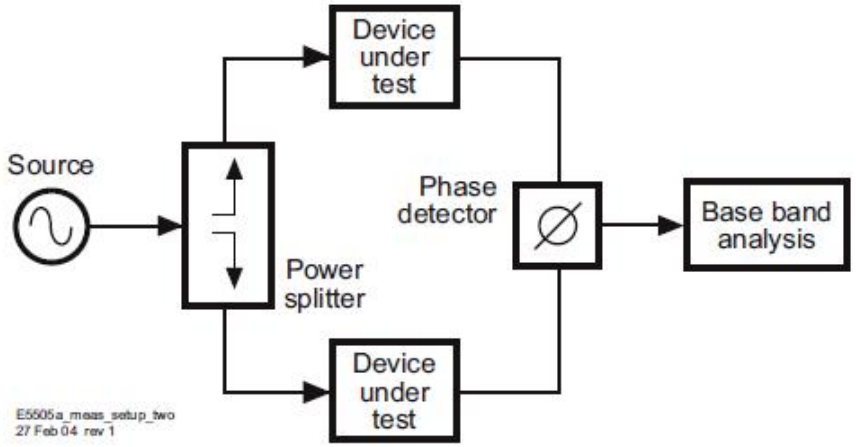


残余相位噪声

无频率转换的DUT



有频率转换的DUT



图形来自Keysight应用笔记

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

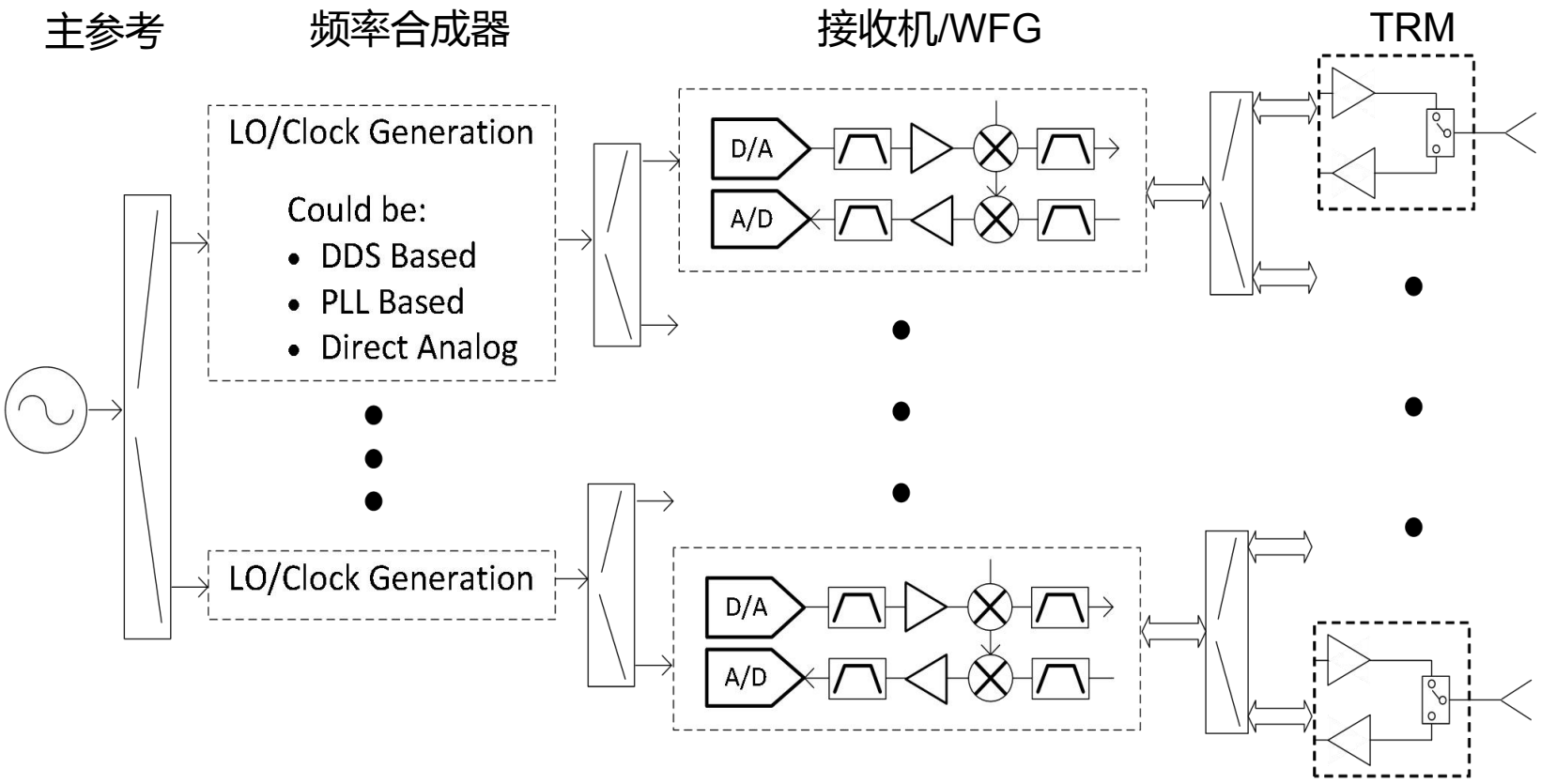
系统相位噪声考虑

相干合成

- **噪声电压之和**
  - $v_T = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2cv_1v_2}$
  - *C = 相关系数*
    - *范围-1至+1*
      - *-1 -> 相消*
      - *0 -> 不相关*
      - *1 -> 100%相关*
- **不相关噪声**
  - **信号提高20logN，**
  - **噪声提高10logN**
  - **-> 10logN改进**

- 噪声跟踪方法
  - 数量
    - 10logN
  - 频率调整
    - 20logN
  - PLL环路带宽

相控阵框图 - LO/时钟角度



目标

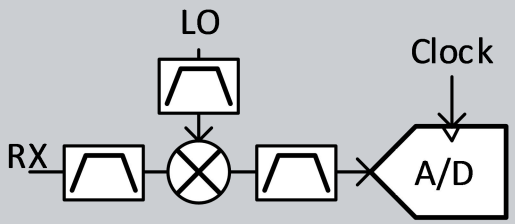
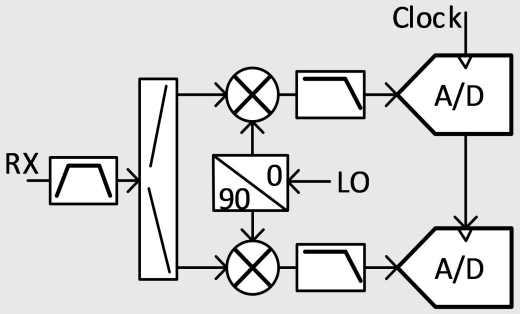
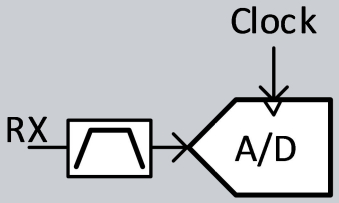
分布式波形发生器和接收机总共改进10logN

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

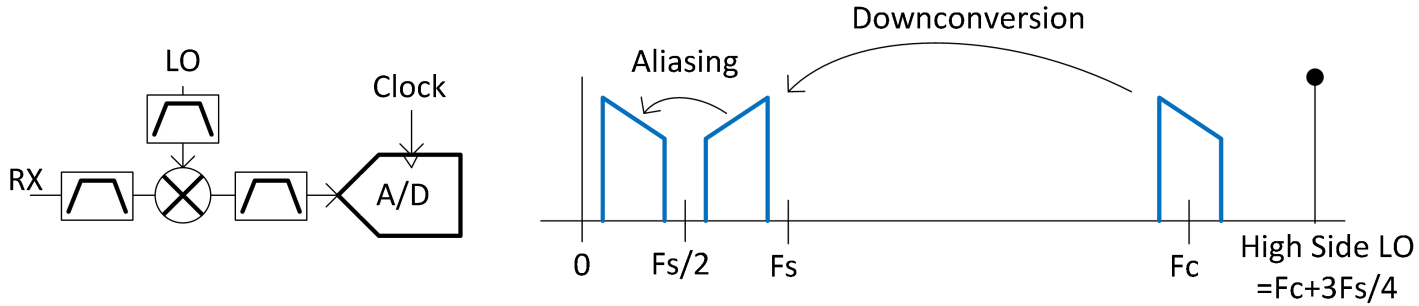
接收机架构

接收机架构方案

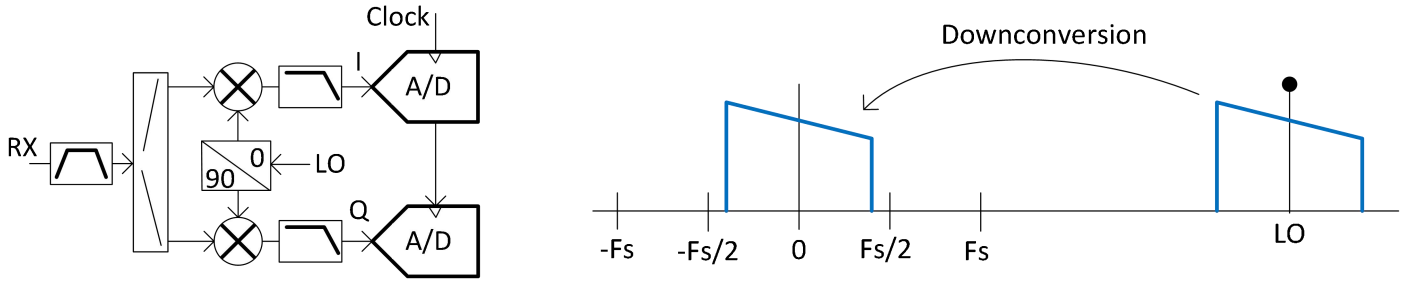
类型	配置	优势	挑战
外差		• 经过验证/可信赖 • 高性能 • 最优杂散 • 高动态范围 • EMI抗扰度佳	• SWAP • 很多滤波器
直接变频		• 模数转换带宽最大 • 宽带选项最简单	• 镜像抑制 -IQ平衡 • 带内IF谐波 • LO辐射 • EMI抗扰度(IP2) • DC和1/f噪声
直接采样		• 无混频 • 在L/S波段具实用性	• 模数转换输入带宽 • 增益不分布在整个频率范围

接收机架构方案（续）

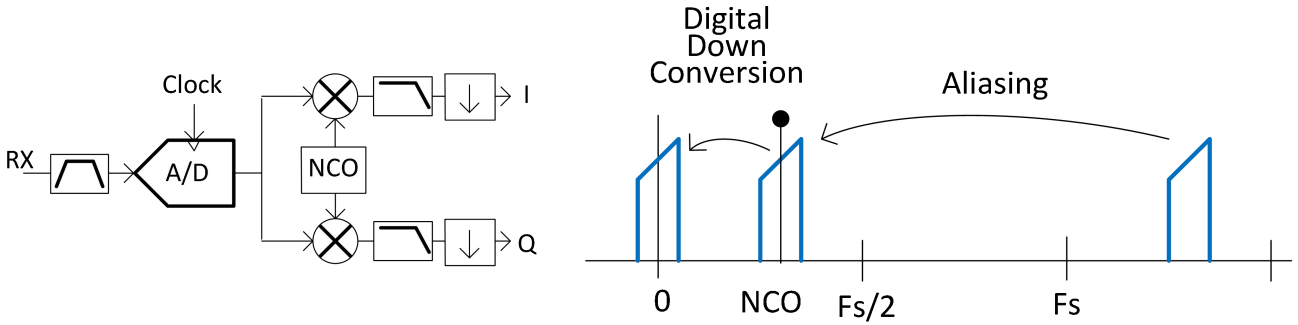
采用第二奈奎斯特中频采样的外差



直接变频/零中频



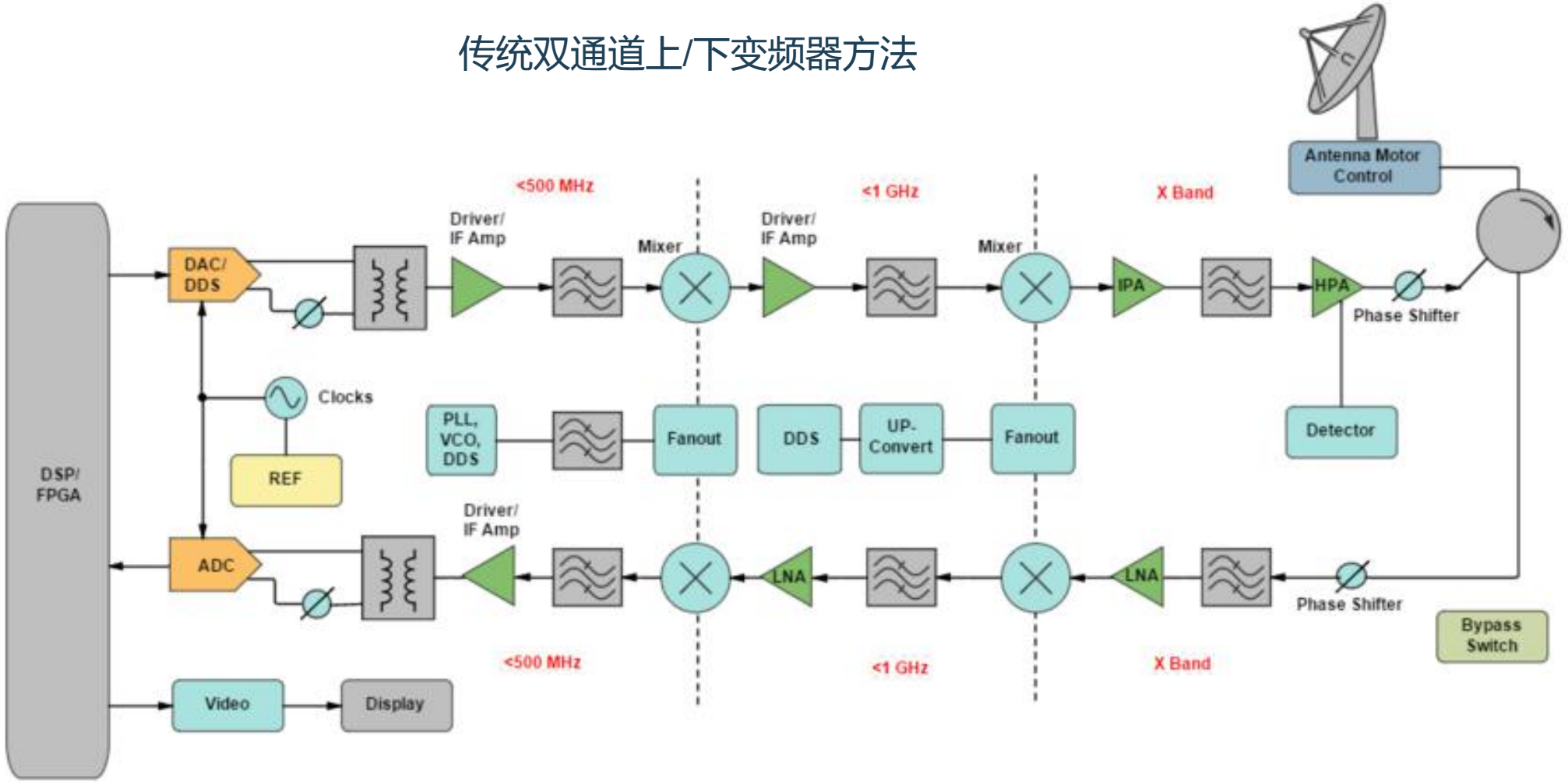
采用数字下变频的直接采样



ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

超外差解决方案

传统双通道上/下变频器方法

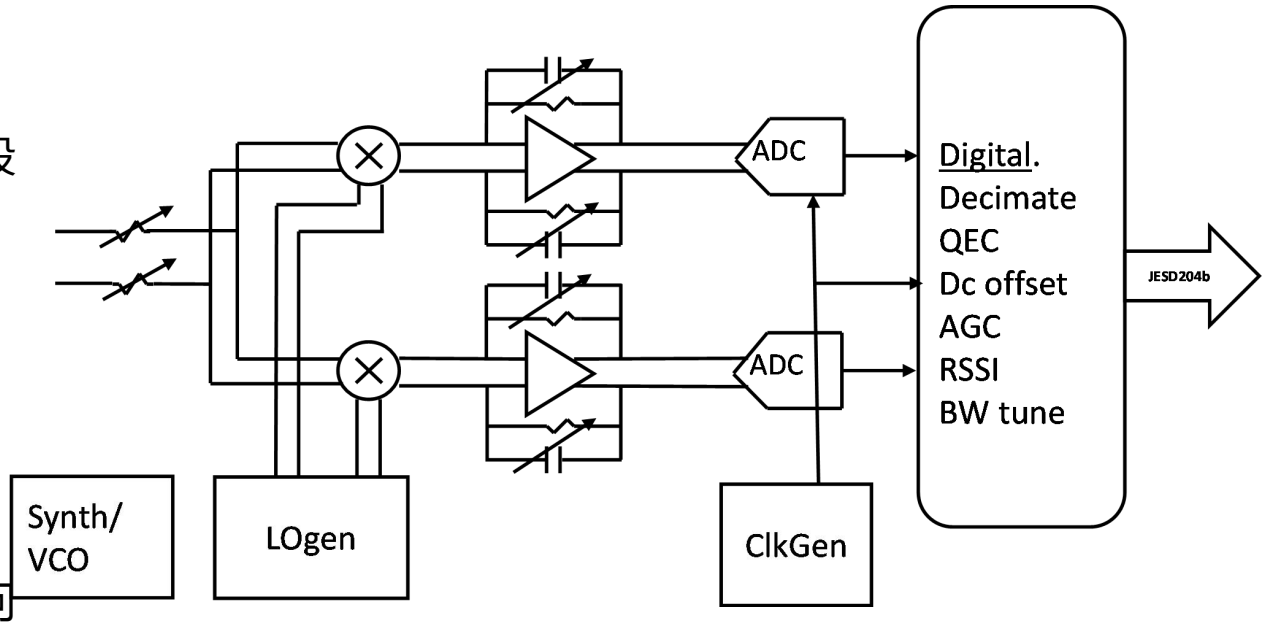


- 整个信号链都有ADI器件可用
- 支持将持续提供

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

直接变频架构趋势

- **架构优势**
  - 功耗最低：在最低可能的频率仅处理期望频段
  - 带外性能最佳：无镜像、NXM混频产物…
  - 尺寸最小：消除了一些滤波器并放松了要求
  - 系统成本最低
  - 减少滤波器：
    - 缩减成本和体积，提高灵活性
- **挑战：正交误差**
  - 利用CMOS中实现的数字辅助功能可以解决问题

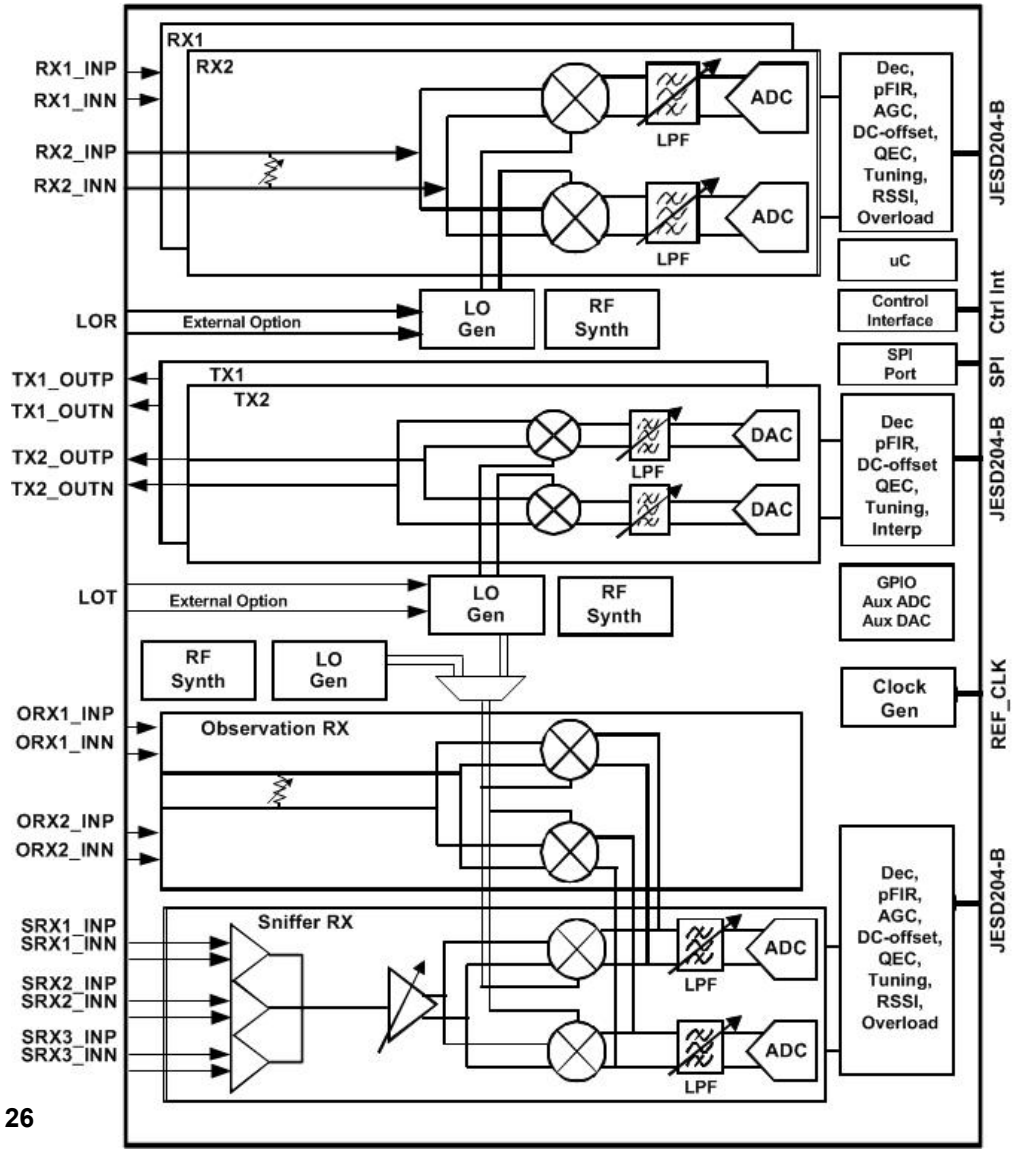


数字辅助模拟

- CMOS中实现的数字处理
- 校正模拟误差
  - I/Q匹配
- 带模拟校正的数字检测
  - 零功耗校正
  - 校正追随温度
    - 不经常更新
    - 更好的动态性能

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

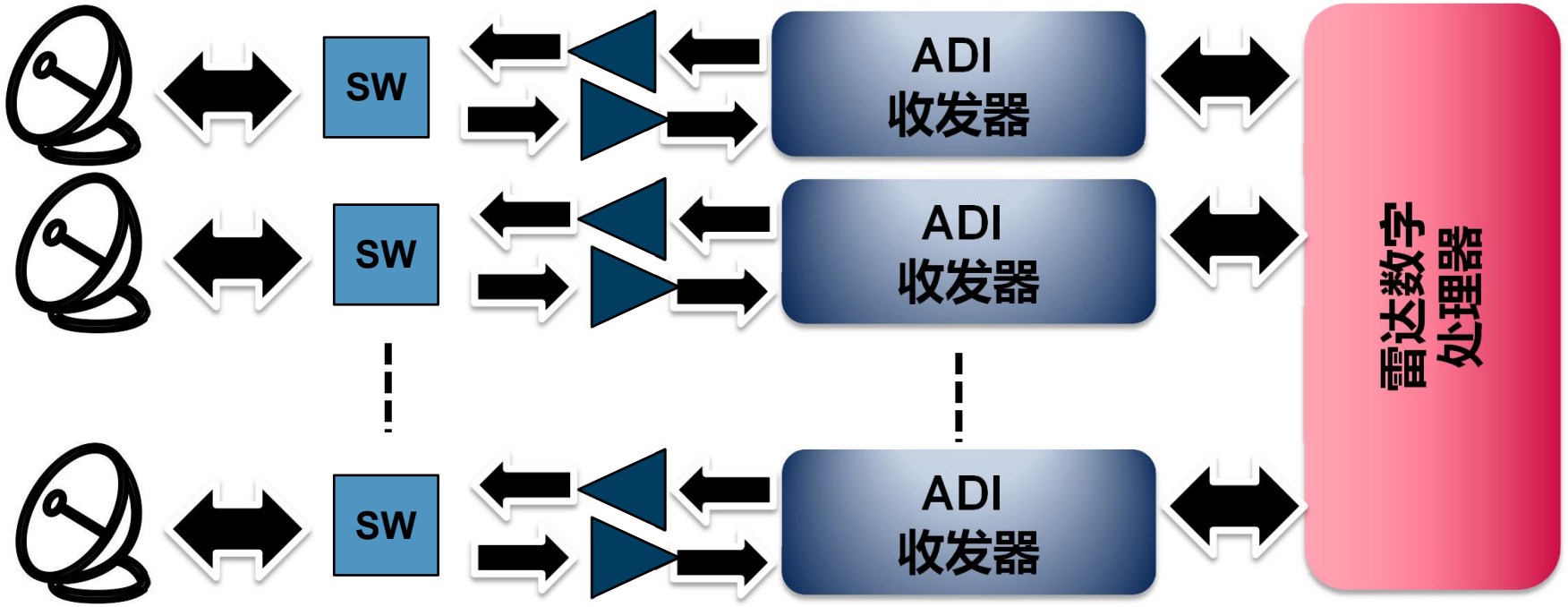
AD9371：带观测路径功能的集成式双通道RF收发器



- 集成双流量Rx和Tx
  - 调谐范围：300MHz < Fc < 6GHz
  - FDD/TDD操作
- 接收机
  - 最大接收带宽 = 100MHz
  - NF：14dB @ 3.5GHz、最大增益
  - IIP3 20dBm @ 3.5GHz、最大增益
  - IIP2：65dBm @ 3.5GHz、最大增益
  - 增益范围/步长(dB)：30/0.5
- 发射器
  - 最大发送带宽 = 250MHz
  - 64dBc ACLR (20MHz LTE)
  - OIP3：27dBm（5dB衰减器）
  - 增益范围/步长(dB)：42/0.05
- 集成观测和嗅探Rx
  - 最大ORx带宽 = 250MHz
    - 2路输入
  - 类似AD9361的嗅探前端
    - 专用LO
    - 3路输入
- 总功耗（最大带宽时）
  - 双Rx = 2.7W
  - 双Tx = 3.7W
  - FDD = 4.9W
- 数字特性
  - Tx/Rx QEC
  - 直流偏移
  - LO泄露
  - 6GSPS JESD204-B接口

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

采用RF收发器的全数字雷达



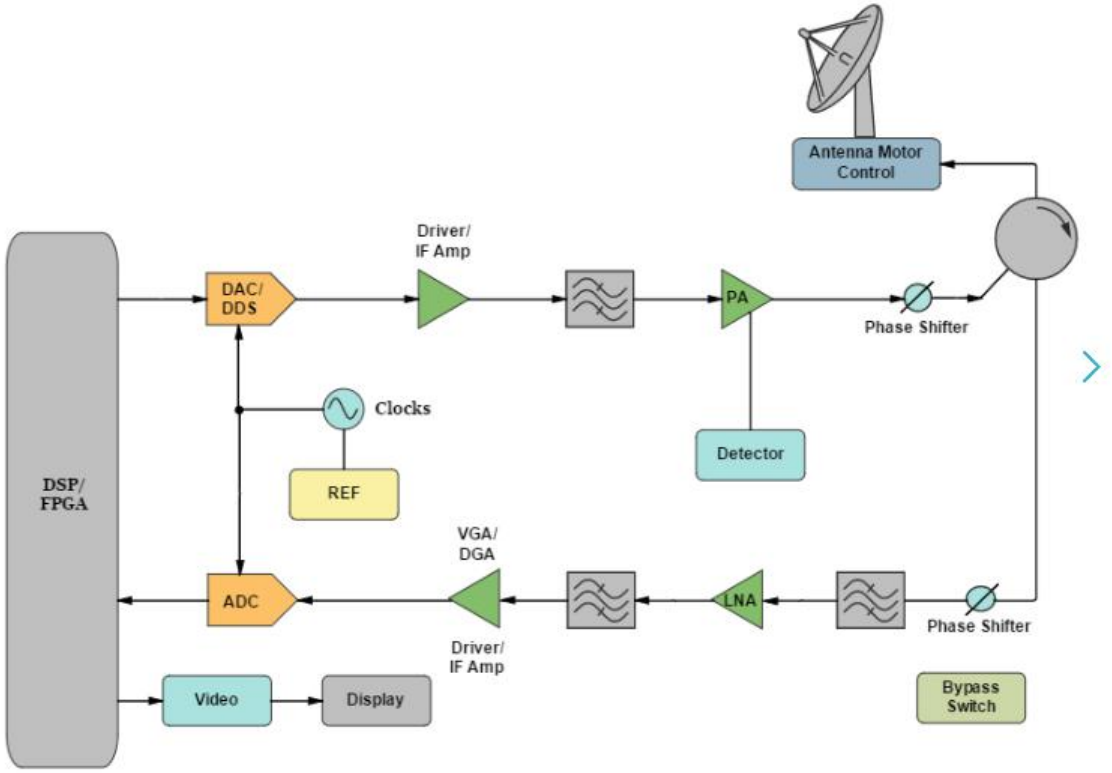
- 雷达中的ADI收发器
  - *集成度支持每元件数字化的SWaP需求*
  - 通过一致的接口连接基带处理器/FPGA
    - L和S波段的完整解决方案
    - 同ADI RF产品系列一起支持X、Ku、Ka波段系统
    - 灵活的频率规划
  - 高线性度直接变频架构
- 目前已运用于若干新一代雷达系统

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

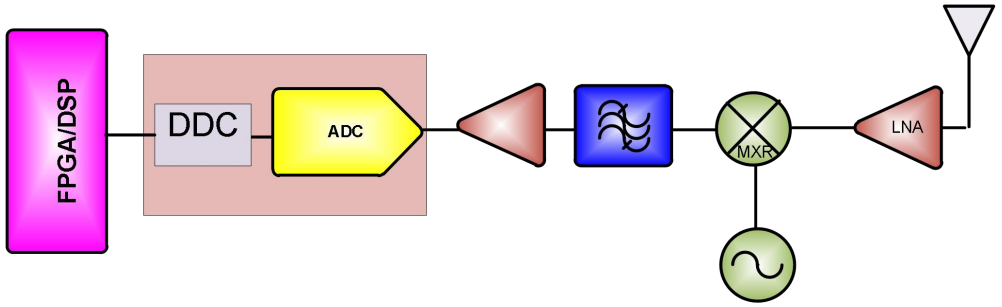
直接采样和更高IF变频的趋势

受数字化影响的架构

- L和S波段系统
  - 采用GSPS ADC/TRx解决方案的直接RF采样
  - 无分立式混频级
- X、Ku和更高
  - 模拟子阵IC
  - 利用GSPS ADC/TRx实现更高集成度，减少混频级
- DDC
  - 提高系统配置能力
  - 提高捷变性
  - 从宽带动态改变到窄带系统

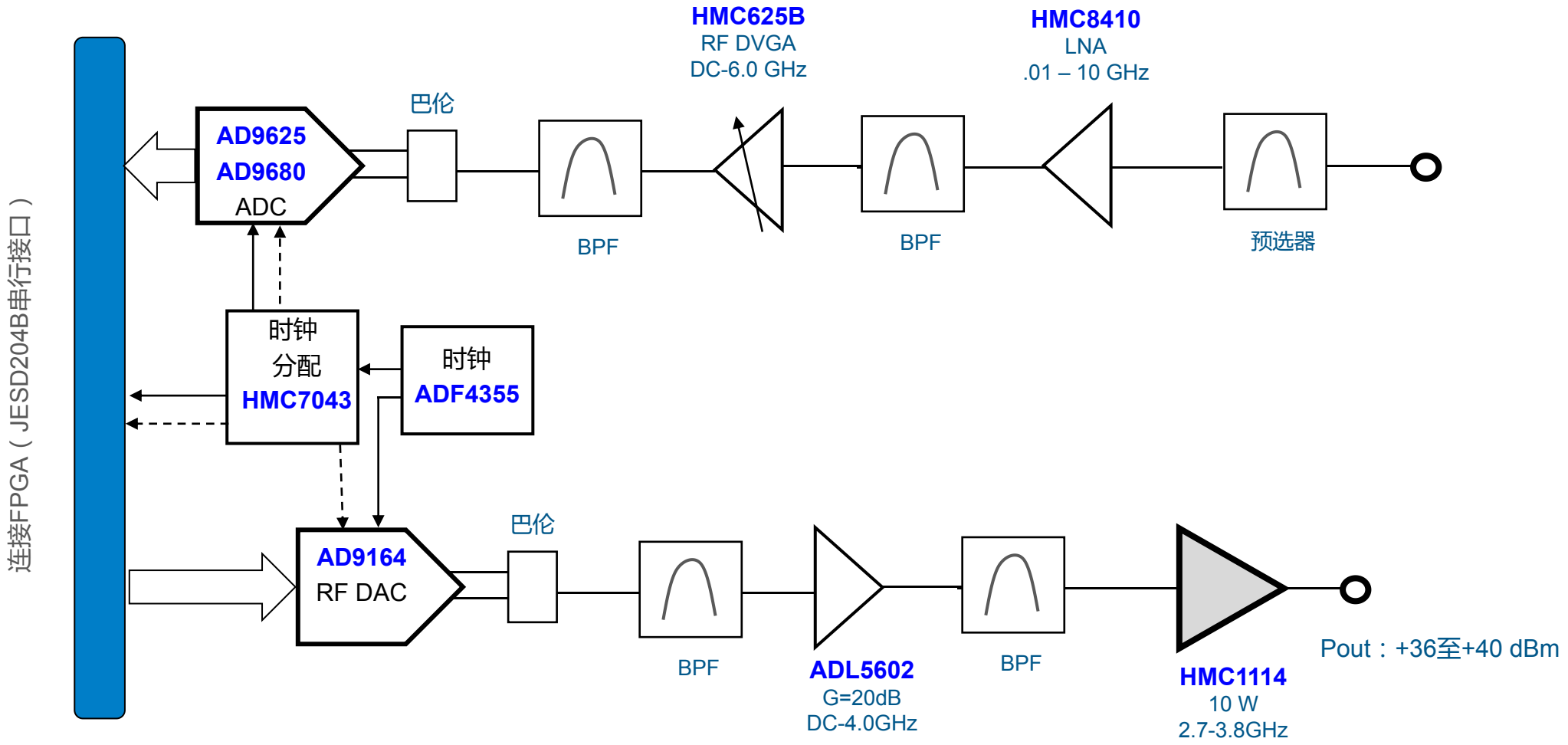


X和Ku波段，无第二IF并使用DDC



ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

直接采样解决方案示例

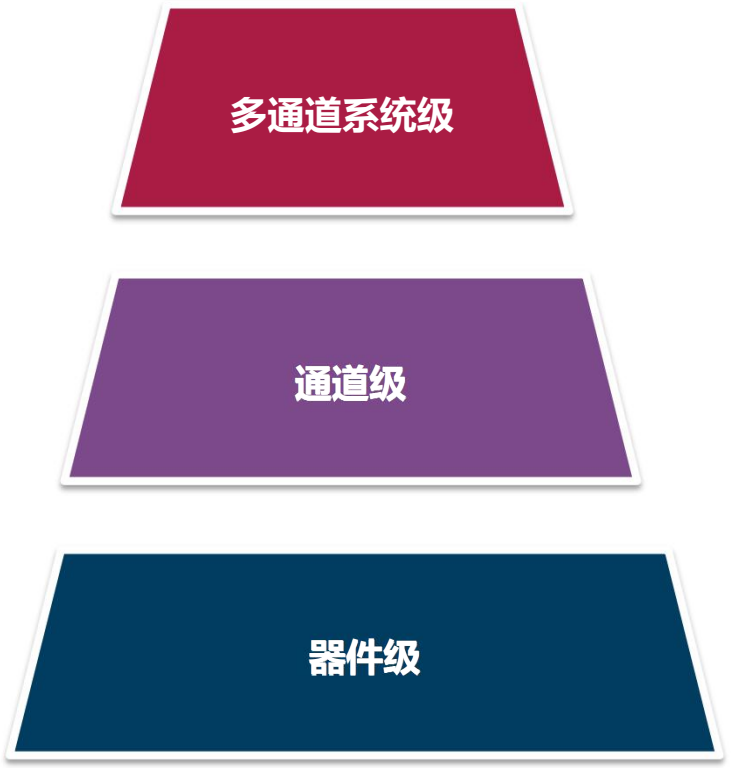


L波段直接采样现已可行，

新兴转换器使得S波段直接采样即将可行

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

器件和系统校准/同步挑战



同步并维持本地和远程系统级同步
- 大型相控阵雷达
- 分布式天线阵列

通道级，跨越多个器件
- 均衡
- 线性化
- I&Q匹配和补偿

- 转换器与FPGA/ASIC之间的延迟是确定的
- 器件级可编程能力

- **某些应用需要这样的解决方案：其在上电时仅以合理的程度运行，并且是逐周期重复的。**
- **高级/极端同步在某些情况下可以离线完成（不过可能并不需要），但时间应少于几毫秒(ms)，并且以已知的间隔/在已知的时刻发生。**
- **高级/极端同步可能需要连续监控环境条件以补偿温漂**

AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

构建解决方案

模块/系统
集成软件、固件和硬件

支持：
系统应用与ISS技术组

产品：
集成模拟、模块、SIPS和iSensor传感器融合

参考设计解决方案

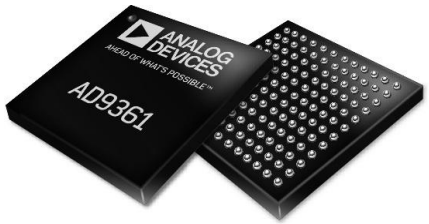
支持：
系统应用组

产品：
CFTL、FMC、原型、解决方案示例

高级器件

支持：
产品与系统应用组

产品：
裸片、EP器件、S级器件、集成产品



从器件到子系统的解决方案

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

参考文献

1. Delos，“RF电路设计参考”，高频电子，2015
2. Longbrake，“用于雷达的真实时间延迟波束控制”，IEEE，2012
3. McClaning，Vito，“无线电接收机设计”，纽约，Noble Publishing，2000
4. O’Donnell，“雷达系统工程”在线讲义，http://aess.cs.unh.edu/radar%20se.html
5. “RF和微波噪声系数测量基础知识”，Keysight应用笔记
6. “微波振荡器的相位噪声特性测试，鉴相器方法”，Keysight产品笔记11729B-1
7. “实用截点测量和级联交调方程”，Keysight应用笔记
8. Razavi，“直接变频接收机设计考虑”，IEEE，1997
9. Delos，“数字波束赋形相控阵的接收机设计考虑”，微波与RF，2014
10. Henderson，“微波系统中的混频器”，WJ技术笔记，1990.
11. Delos，“锁相环噪声传递函数”，高频电子，2016年1月
12. Harris，“数字下变频器的发展和更新”第一部分和第二部分，模拟对话，2016
13. Kester，“模数转换”，ADI公司，2004
14. Ali，“高速数据转换器”，IET，2016

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

总结

- 数字波束赋形相控阵概念回顾
  - 架构
  - 主要子系统
  - 优势和挑战
  - 信号链
  - 分析考虑
- 新兴相控阵技术的激增
  - RF半导体技术发展促成
- ADI面向未来

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

谢谢观看！

- ADI中国地区技术支持热线：4006 100 006
- ADI中国地区技术支持信箱：
  china.support@analog.com
- ADI样片申请网址：
  http://www.analog.com/zh/sample

ANALOG DEVICES
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™