

## 无线系统中天线校准原理及 TI 器件解决方案

Fanlong Li

Telecom FAE Team

### 摘 要

随着 5G 时代的到来，基站中的收发天线数目急剧增加，天线校准（beamforming）功能也成为了一个非常核心的功能。该功能使得通过增加天线数目的复用，极大的提高了终端的信噪比和吞吐量。同时，为了保证天线校准这一系统功能，对各部件都提出了要求，对 TI 具体体现在对时钟芯片（LMX 系列），数据转换芯片（RFAD/DA 系列）的相位波动要求。这些要求也成为了衡量和定义一个器件性能的重要指标。本文将按照先系统后器件的思路来阐述天线校准的原理，最终介绍对器件的要求以及 TI 对应的的解决方案。

**Key words:** 无线系统 天线校准（beam-forming）AD/DA

### 目录

1、引言 .....	2
2 天线校准的目的 .....	2
3 无线系统中天线校准的原理 .....	3
4 天线校准的一个实例-4T4R .....	6
5 天线校准对器件相位要求及其解决方案 .....	7
6 参考文献 .....	8

### 图

Figure 1 矢量叠加示意图 .....	2
Figure 2 波束赋形原理示意图 .....	2
Figure 3 TDD RRU 中信道互易特性示意图 .....	3
Figure 4 TDD RRU 单通道收/发模型 .....	4
Figure 5 收/发通道中相位变化分解图 .....	5
Figure 6 天线校准单通道模型 .....	5
Figure 7 非互易信道及其校准原理说明 .....	6
Figure 8 多器件之间时钟抖动测量方法 .....	8
Figure 9 TI 器件的时钟解决方案框图 .....	8

# 1、引言

在无线系统中有限的频谱资源及其珍贵，为了提高频谱使用效率，过去采用了从制式（TDD 系统 TX/RX 共享频谱），编码方式（高密度的编码 64QAM 256QAM）等方式入手，然而这一些方式在 4G 时代几乎碰到了天花板。但技术的瓶颈无法阻止人类需求的变化/增长，例如用户对高清视屏，数据下载速率的要求，为了满足这些需求，5G 上提出了新的频段和空间上的复用技术即通过使用微波频段和增加天线数来提高数据的吞吐量。随之提出了多天线 MIMO 和多维度(3D) MIMO 的技术，这些技术都将依赖于天线校准(Beamforming)来实现。所以，天线校准是 5G 时代一个非常关键的技术，掌握和理解该技术更有利于对器件的定义和使用。基于此考虑， 本文将对无线系统中天线校准原理进行详细介绍，并最终给出器件侧的要求和测试方法。

# 2 天线校准的目的

在通信中，终端用户接收到的信号是各个天线上发射信号的幅度叠加即电压的叠加，电压为矢量，矢量的叠加具有方向性，如下图所示，各个矢量方向性越相似，那么合矢量越大，当方向完全相同时时候，合矢量最大，此刻终端接收到的信号最强。矢量的方向性用其相位来衡量。

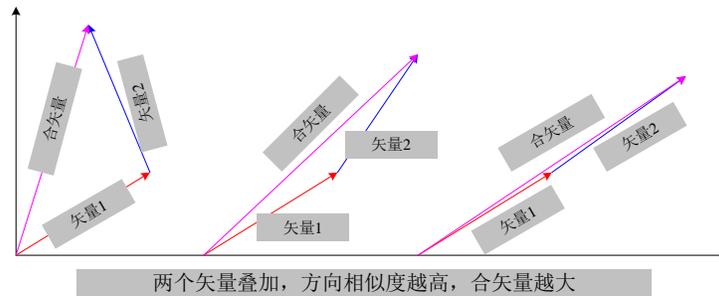


Figure 1 矢量叠加示意图

很直观的可以看到，通过控制各个天线上发射信号的相位和幅度，就可以达到控制终端接收信号的的目的，这即是天线校准或者叫波束赋形(beamforming)。利用数字信号处理技术和信号传输的空间特性，通过调整各个天线上发送信号的幅度和相位，产生空间定向的波束，将无线电信号导向具体的方向，使天线的主波束自适应地跟踪用户主信号到达方向，旁瓣或者零陷对准干扰信号到达的方向，达到充分高效利用移动用户型号并删除或者抑制干扰信号的目的。在多个指向不同用户的并行天线波束控制下，可以显著减低用户信号彼此间的干扰。

天线校准的核心是智能算法，通过算法自适应的得到各个天线阵元的加权系数，进而得到所需空间域滤波器的作用。如下图所示，通过控制加权系数  $a_1 \dots a_n$  即可控制波束的方向性。

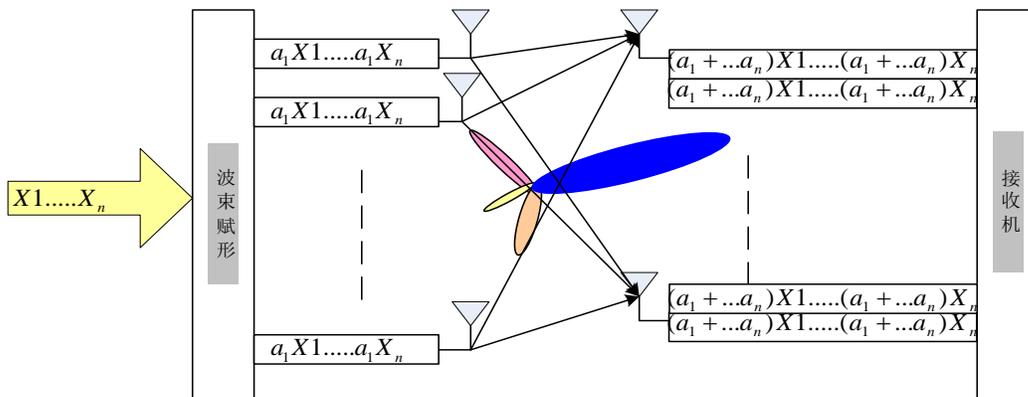


Figure 2 波束赋形原理示意图

### 3 无线系统中天线校准的原理

#### 3.1 无线系统中的互易和非互易信道

互易信道是指从发射到接受信号传播所经过的路径与从接受到发射信号所经过的路径相同，路径相同也就意味着信号传输的空间特性相同。TDD 系统的特点即表现出更为良好的互易信道特性。

TDD 系统中，由于上下行信道使用同样的频率，仅仅靠不同的时间来区分上下行，那么在相干的时间内，可以认为上下行通道在空中经过的路径衰落特性是相同的，即具有互易特性。

天线校准的核心需要计算出各个天线阵元的加权系数，而信道的互易特性为加权系数的计算提供了理论基础。基于互易的特性即可以通过接收数据的特性变化推算出发射特性，从而控制发射信号相位。

TDD 中任何形态的 RRU，发射通道和接收通道都是分开的，按照互易信道的特性，以天馈口为界限，天馈口到终端侧，信道都是互易的，而在 RRU 内部有 TX 和 RX 公用部分和非公用部分，公用部分具有互易特性，非公用部分不具有互易特性。

RRU 中非互易部分是收发通道分开的地方（例如：RX 处理、TX 处理分开的通路），互易部分是收发通道共用的地方&双向性能相同的地方（例如：收发共用的滤波器、天线馈缆、天线）。

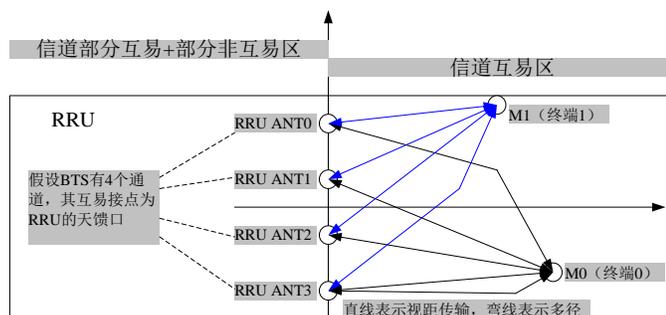


Figure 3 TDD RRU 中信道互易特性示意图

#### 3.2 天线校准的两大功能

从天线校准的目的→得到天线校准的核心是获取加权系数→获取加权系数基础是信道互易从而通过接受信道估算发射信道→RRU 中存在信道非互易部分，所以天线校准中包括了消除 RRU 中的非互易部分，保证通道的互易特性。总括而来，天线校准包括了 2 大部分功能：

- 消除 RRU 内部的非互易部分：通过校准，得到非互易信道（RX、TX）部分的 Gain、Time Delay、Phase，然后通过基带部分加权来消除非互易部分。
- 获取互易部分的控制特性来加权：通过上行来评估下行，获取信道在空中的相位，幅值，然后加权到基带从而来控制天线的波束和方向。

#### 3.2 天线校准模型

##### 3.2.1 单天线发射和接收模型

无线系统的单天线，都可以用下面的模型进行描述，收发端通过 PA 模块内部的环形器分开。

按照信道互易的特点，很清晰的看到，凡是 TX 和 RX 公用的部分，都是互易区，分开的部分是非互易区。天线校准的第一步首先要消除非互易区，通过校准非互易区 TX 和 RX 的相位，使得他们在互易区和非互易区交界处（也称之为校准点）具有固定的相位和幅度关系，从而屏蔽了硬件特性体现的非互易性。

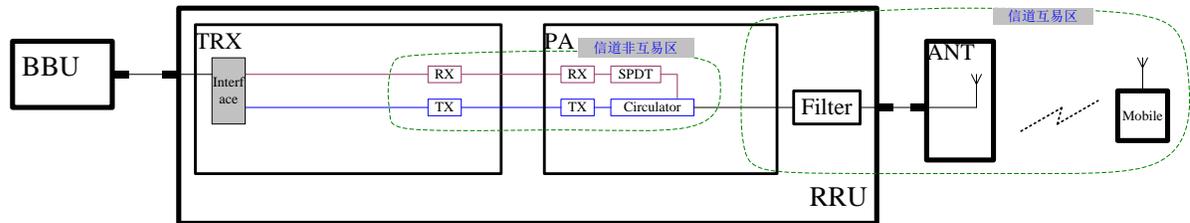


Figure 4 TDD RRU 单通道收/发模型

天线校准的核心基于通道的互易特性，用上行（接收）信号的特性，推导出下行（发射）信号的通道特性，从而通过加权使得接收端的信号强度最高。所以，要求在互易区 RX 通道的特性能反应出 TX 的通道特性，即要寻找出如下的函数  $f$ 。

$$TX = f(RX)$$

接收和发射信号最终都可以归一化为电压信号，是一个矢量信号。用幅度和相位可以完整的表达一个矢量信号的特性，任何一个矢量信号  $y$  都可以用下面的函数表示。

$$\vec{y}(t) = a(t) \times e^{j\omega t}$$

因此，通道对信号的影响体现在两个方面，对幅度的影响，其主要是通道的增益特性，对相位的影响，其主要体现通道的延迟特性。

天线校准中需要通过接收信号的特性计算出发射信号的特性，所以参考基准是接收信号，即发射通道的增益特性和延迟特性相对于接收通道的关系，这种关系通过校准得到。

RRU 中通道的增益（幅度）特性，可以通过工装写表的方式获得，即常常说的频率增益特性，收发通道可以单独获取。

RRU 中通道的延迟（相位）特性，可以通过发送一个已知特性的信号（序列），然后通过接收该段信号，和发射的信号比较，即可计算出相位的改变。在 TDD-LTE 中，对于相位计算的信号有特殊的规定，上行信号中常常采用的是 SRC（Sounding Reference Signal）。

参考上图，可以看出仅仅通过 TX 和 RX 通路构成的环路是无法分别区分出 RX 和 TX 的相位，也无法给出它们之间的关系。这就必须借助于第三个通道，即校准耦合通道。

### 3.2.2 TX/RX 相位变化模型

天线校准的核心计算相位和幅度，其中相位的计算是一个难点。无线系统中，无论是 TX 链路还是 RX 链路，都需要经过基带→中频→射频的变化过程，所经过的不同路径都会引入延迟（相位）的变化。无论引入相位变化的器件有何不同，总可以抽象出相位变化模型如下图所示。按照参考模型将各个段的相位变化分解图中所示。

从图中可以很容易计算到如果 TX 和 RX 的链路中各段变频都采样相同的频率（无频差），那么在恒定温度下收发之间的相位总是恒定值，其大小由链路的延迟决定，在实际系统中链路延迟占主要部分的是数字部分的滤波器，比如削峰 CFR 滤波器，数字预失真 DPD 的延迟。

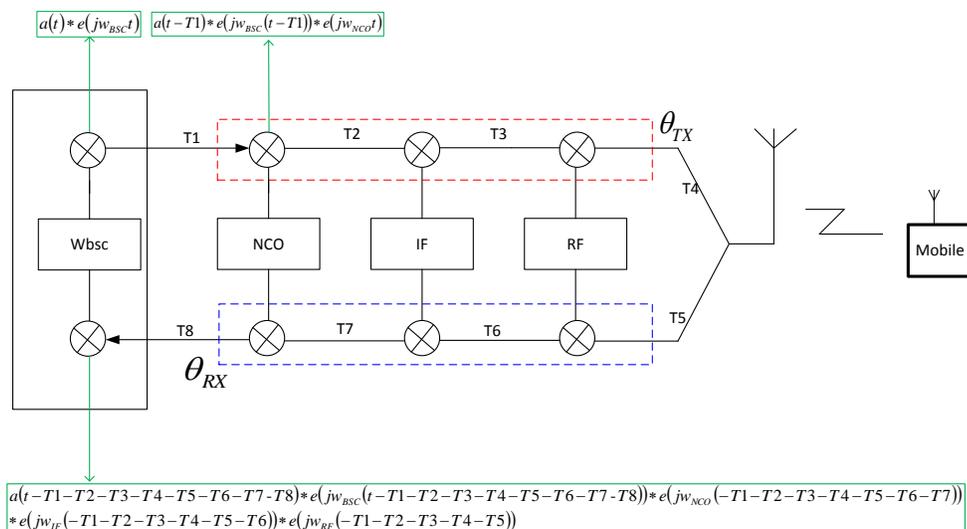


Figure 5 收/发通道中相位变化分解图

### 3.2.3 天线校准模型

天线校准必须借助校准耦合通道来完成，无论何种形态的 RRU，其校准模型都可以用下图来表示。

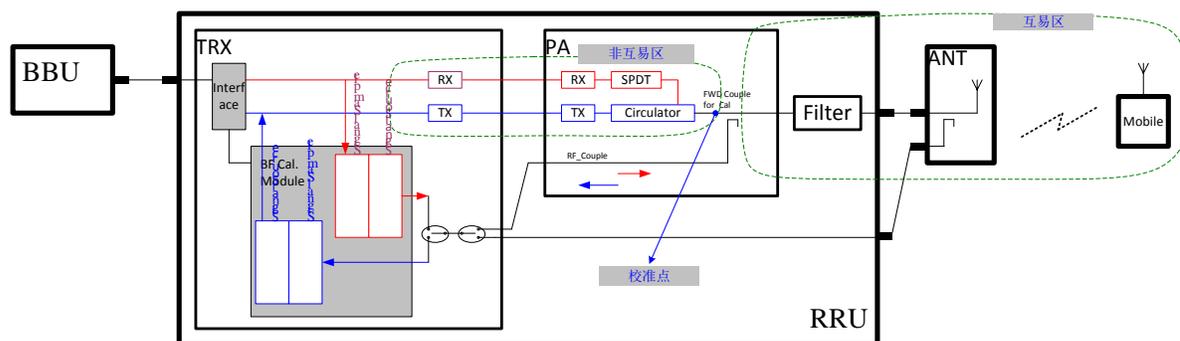


Figure 6 天线校准单通道模型

参考上图从校准点单独耦合出一个通道专门为校准所用，该通道作为一个统一的参考量，在知道同一个参考量与 TX 和 RX 构成的环路相位变化量后，便可以得到 TX 和 RX 之间的关系。天线校准的业务运用，只需要知道 TX 和 RX 的相对相位关系即可。知道了 TX/RX 之间的相位关系就可以消除 RRU 内部的非互易区，所以耦合通道是用来消除 RRU 内部的非互易区，消除后，基带侧再通过 RX 来估计 TX 的相位从而保证了在天线口所有天线发出的相位到终端接收到的都是相同。

图中给出了两个耦合点的两条耦合通道，从而衍生出两个校准环路。

- 内校准环路：耦合通道从 PA 模块的内部耦合。
- 外校准环路：耦合通道从 ANT 模块的内部耦合。

通常，我们仅仅用内校准环路，不同的校准环路对校准原理无影响，区别仅仅在于校准覆盖的链路范围。下面将用内环校准环路来说明 TX 和 RX 校准时候的信号流向：

- TX 校准：所有 TX 通道同时发送相同的系列，然后顺序的在耦合通道来接收，图上蓝色所示的信号流

向，从而可以得到每个天线对比耦合通道的相位差值（注意虽然是顺序接收，但由于每个通道时间间隔都非常小在 ms 数量级，所以如此短的时间内各个通道的延迟不会发生变化）。

- **RX 校准：**在基带侧某一个 TX 上发送信号，通过耦合通道分别在每个接收通道上来接收，图上红色所示的信号流向。

从单天线很容易扩展到 N 天线，例如 8 天线，无非是将 TX 通道增加，同时耦合器输入的通道增加到 8 通道。信号的流向和每个 TX 上发送的系列和单天线完全一样

### 4 天线校准的一个实例-4T4R

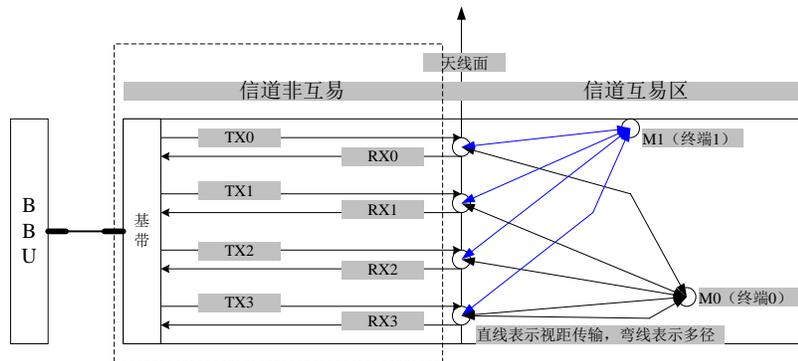
每一个 RRU 都包含了互易和非互易部分，所以天线校准必然存在着消除非互易校准的过程。采用上行估算下行的天线校准算法，要求 BTS 的基带↔终端的双向传送信道为互易信道（从 S 参数角度解释，互易就是 S21=S12）。

对比互易信道，非互易信道中分别多引入了 TX(0..3) 的相位和 RX (0..3) 的相位。天线校准在通过 RX 相位来计算 TX 相位，如果只需要将多出的相位校准掉，那么就可以变为互易信道。所以非互易信道中需要多加入 TX(0..3) 的相位和 RX (0..3) 的相位校准，校准值等式始终是：RX 相位减去 TX 相位。

对应上述的两种校准加权方法，分别对应获取如下值：

- **绝对校准加权算法：**获取  $PhaseRX [0..3]-PhaseTX[0..3]$ ，即获取 TX 相对 RX 相位变化量绝对值作为天线校准量参与加权。
- **相对校准加权算法：**获取  $(PhaseRX [0..3]-PhaseTX[0..3])-(PhaseRX[0]-PhaseTX[0])$ ，即获取 TX 相对 RX 相位变化量相对于参考变化量的相对值作为天线校准量参与加权。

下面以绝对相位加权来对 4T4r 作详细说明。



屏蔽TX和RX不同导致的信道非互易说明：

- 通过上行信道特性得到上行信道特性原则不变，对一个天线，上行总相位为：互易区相位+RX相位；对于下行总相位为：下行TX相位+互易区相位。
- BBU侧加权为：取上行总相位的共轭即-（互易区相位+RX相位）。
- 加权的相位发送后信号通过了TX和下行互易区，总相位为：TX相位+下行互易区相位-上行互易区相位-RX相位=TX相位-RX相位，为残留相位。
- 用校准值将残留相位抵消掉掉，所以校准相位为RX相位-TX相位。
- 无论何种校准方式，校准相位始终是：RX相位-TX相位。
- 抵消后保证了到达终端相位相同。

Figure 7 非互易信道及其校准原理说明

表格 1: 天线校准加权算法详细说明

各节点的信号的相位分析	通路 0	通路 1	通路 2	通路 3
终端 1 的发送信号的相位	MobileTxPhase[0]	MobileTxPhase[1]=MobileTxPhase[0]	MobileTxPhase[2]= MobileTxPhase[0]	MobileTxPhase[3]= MobileTxPhase[0]
	A	A	A	A

上行通路相位特性（终端→RRU 各共用节点）	PhaseUplink[0] -10 度	PhaseUplink[1] -20 度	PhaseUplink[2] -30 度	PhaseUplink[3] -40 度
RRU 各共用节点的 RX 信号（相位）	Phase[0] = MobileTXPhase[0] + PhaseUplink[0] A-10	Phase[1] = MobileTXPhase[0] + PhaseUplink[1] A-20	Phase[2] = MobileTXPhase[0] + PhaseUplink[2] A-30	Phase[3] = MobileTXPhase[0] + PhaseUplink[3] A-40
RX 通路（RRU 各共用节点→BBU 基带）的特性	PhaseRX[0] -11 度	PhaseRX[1] -21 度	PhaseRX[2] -31 度	PhaseRX[3] -41 度
BBU 基带 RX 信号（相位）	Phase[0] + PhaseRX[0] A-10-11	Phase[1] + PhaseRX[1] A-20-21	Phase[2] + PhaseRX[2] A-30-31	Phase[3] + PhaseRX[3] A-40-41
BTS 的 Baseband 发送信号	BbTxPhase[0] B	BbTxPhase[1]=BbTxPhase[0] B	BbTxPhase[2]=BbTxPhase[0] B	BbTxPhase[3]=BbTxPhase[0] B
BBU 基带 TX 信号加权（根据上行估算下行）（相位）——加权方案 1	加权值的相位为 BBU 接收的本通路基带 RX 信号的共轭= (-Phase[0] - PhaseRX[0])	加权值的相位为 BBU 接收的本通路基带 RX 信号的共轭= (-Phase[1] - PhaseRX[1])	加权值的相位为 BBU 接收的本通路基带 RX 信号的共轭= (-Phase[2] - PhaseRX[2])	加权值的相位为 BBU 接收的本通路基带 RX 信号的共轭= (-Phase[3] - PhaseRX[3])
BBU 基带 TX 信号“校准补偿值方案 1 (Phase)”	校准补偿值的相位 = PhaseRX[0] - PhaseTX[0]	校准补偿值的相位 = PhaseRX[1] - PhaseTX[1]	校准补偿值的相位 = PhaseRX[2] - PhaseTX[2]	校准补偿值的相位 = PhaseRX[3] - PhaseTX[3]
TX 通路（BBU 基带→天线共用节点）的特性	PhaseTX[0]	PhaseTX[1]	PhaseTX[2]	PhaseTX[3]
RRU 各共用节点 TX 信号（相位）（对应加权方案 1+校准补偿方案 1）	BbTxPhase[0] + (-Phase[0] - PhaseRX[0]) + (PhaseRX[0] - PhaseTX[0]) + PhaseTX[0] = BbTxPhase[0] -Phase[0]	BbTxPhase[0] + (-Phase[1] - PhaseRX[1]) + (PhaseRX[1] - PhaseTX[1]) - PhaseTX[1] = BbTxPhase[0] -Phase[1]	BbTxPhase[0] + (PhaseRX[2] - Phase[2]) + (PhaseRX[2] - PhaseTX[2]) - PhaseTX[2] = BbTxPhase[0] -Phase[2]	BbTxPhase[0] + (PhaseRX[3] - Phase[3]) + (PhaseRX[3] - PhaseTX[3]) - PhaseTX[3] = BbTxPhase[0] -Phase[3]
下行通路相位特性（RRU 各共用节点→终端）	PhaseDownlink[0] = PhaseUplink[0]	PhaseDownlink[1] = PhaseUplink[1]	PhaseDownlink[2] = PhaseUplink[2]	PhaseDownlink[3] = PhaseUplink[3]
终端 1 的接收信号的相位	BbTxPhase[0] -Phase[0] + PhaseUplink[0] = BbTxPhase[0] - (MobileTXPhase[0] + PhaseUplink[0]) + PhaseUplink[0] = BbTxPhase[0] - MobileTXPhase[0]	BbTxPhase[0] -Phase[1] + PhaseUplink[1] = BbTxPhase[0] - (MobileTXPhase[0] + PhaseUplink[1]) + PhaseUplink[1] = BbTxPhase[0] - MobileTXPhase[0]	BbTxPhase[0] -Phase[2] + PhaseUplink[2] = BbTxPhase[0] - (MobileTXPhase[0] + PhaseUplink[2]) + PhaseUplink[2] = BbTxPhase[0] - MobileTXPhase[0]	BbTxPhase[0] -Phase[3] + PhaseUplink[3] = BbTxPhase[0] - (MobileTXPhase[0] + PhaseUplink[3]) + PhaseUplink[3] = BbTxPhase[0] - MobileTXPhase[0]

从上表可以看到，通过相位天线校准算法后，到达终端的相位都是相等的从而实现了相位叠加的能量最大。

## 5 天线校准对器件相位要求及其解决方案

基于上述描述，可以看到天线校准中一个关键部分是消除 RRU 内部非互易信道，消除的方法就是通过计算出 RRU 内部的 TX 和 RX 相位然后在 BBU 侧加权完成。在实际系统中，对 RRU 互易部分的消除周期完成，目前系统定义的周期一般是半小时发起一次（注意，不能频繁发起，每发起一次都意味着要占用 BBU 的开销，同时会给 RRU 发固定的序列，该序列会对基站产生干扰）。所以意味着在 RRU 发起第二次校准的半个小时内，RRU 内部的链路相位不能有大的变化，否则就破坏了第一次 RRU 内部互易性校准的效果，同时必然影响了天线校准的结果。目前系统给的要求是变化的范围最大和最小值之差不能超过 5 度。这就对组成 RRU 内部的器件，特别是时钟相关的器件例如时钟，数据转换器，本振提出了严格的要求。这些要求中最主要的部分就是锁相环的温度特性，需要保证锁相环的温度特性不敏感。

实际使用中需要评测器件之间的时钟特性，下面会介绍评测方法和实际使用中具体消除时钟抖动的解决方案。

### 5.1 相位抖动的测试方法

下面以 TI 的第一代射频采样 DAC38RF83 为例来说明如何进行时钟特性的测量。

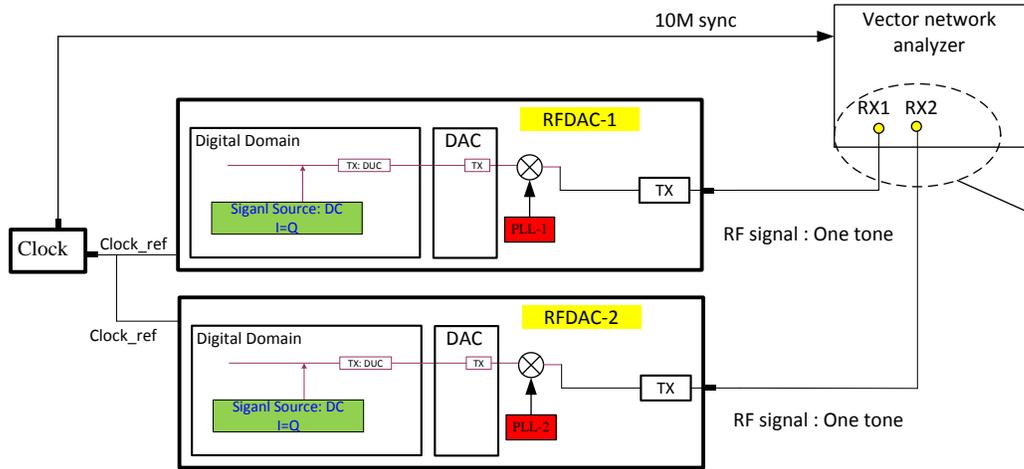


Figure 8 多器件之间时钟抖动测量方法

上图中是在客户一个实际使用项目中所采用的一个评测方法，其目主要评测不同器件之间的相位波动关系。图中虽以射频采样的 DAC 为例，但具有普遍性，可以用任何器件进行代替。按照上图的方式，可以评测出两片器件 PLL 之间的相位抖动，相位的温度特性。

### 5.2 解决方案

在器件层面，如何应对和支持天线校准系统需求一直作为一个核心需求加入到 TI 的新器件的定义中。比如 TI 第一代高集成 4T4R transceiver 芯片 AFE7689 的时钟方案，除了内部集成低抖动的 PLL 外还允许外部输入时钟，这样在较高要求的系统中就可以采用同一个外部时钟来达到各片之间同源。

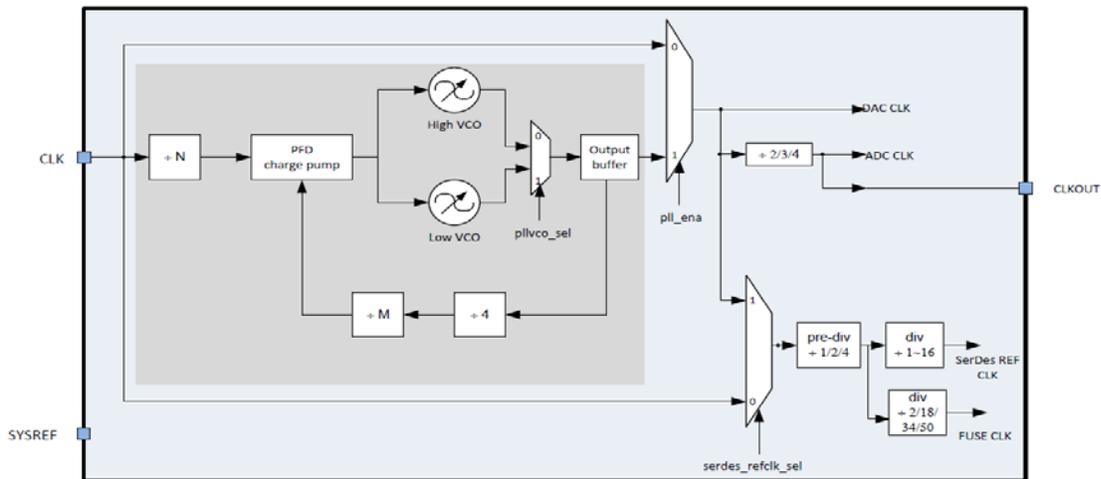


Figure 9 TI 器件的时钟解决方案框图

## 6 参考文献

数据手册 AFE7689 ， 2017 年 3 月份修改， Texas Instruments Inc。

## 有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。您就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默认的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

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 © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司