

射频收发器在数字波束合成相控阵中实现强制杂散去相关性

Peter Delos、Michael Jones和Mark Robertson
ADI 公司

简介

在大型数字波束合成天线中，人们非常希望通过组合来自分布式波形发生器和接收器的信号这一波束合成过程改善动态范围。如果关联误差项不相关，则可以在噪声和杂散性能方面使动态范围提升 $10\log N$ 。这里的N是波形发生器或接收器通道的数量。噪声在本质上是一个非常随机的过程，因此非常适合跟踪相关和不相关的噪声源。然而，杂散信号的存在增加了强制杂散去相关的难度。因此，可以强制杂散信号去相关的任何设计方法对相控阵系统架构都是有价值的。

在本文中，我们将回顾以前发布的技术，这些技术通过偏移LO频率并以数字方式补偿此偏移，强制杂散信号去相关。然后，我们将展示ADI公司的最新收发器产品，**ADRV9009**，说明其集成的特性如何实现这一功能。然后，我们以测量数据结束全文，证明这种技术的效果。

已知杂散去相关方法

在相控阵中，用于强制杂散去相关的各种方法问世已有些时日。已知的第一份文献¹可以追溯到2002年，该文描述了用于确保接收器杂散不相关的一种通用方法。在这种方法中，先以已知方式，修改从接收器到接收器的信号。然后，接收器的非线性分量使信号失真。在接收器输出端，将刚才在接收器中引入的修改反转。目标信号变得相干或相关，但不会恢复失真项。在测试中实现的修改方法是将每个本振(LO)频率合成器设置为不同的频率，然后在数字处理过程中以数字方式调谐数控振荡器(NCO)，以校正修改。文献里还提到了若干其他方法^{2,3}。

多年以后，随着完整的收发器子系统被先进地集成到单个单片硅片当中，收发器产品中的嵌入式可编程特性为实现以下文章描述的杂散去相关方法提供了可能：《**数字相控阵中的非线性失真：测量与缓解**》。¹

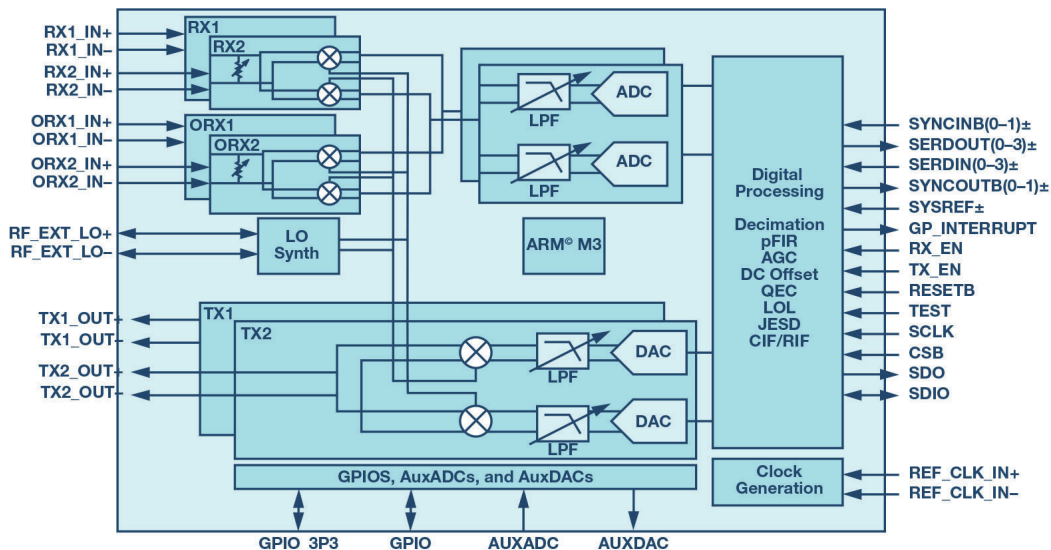


图1. ADRV9009功能框图。

实现杂散去相关的收发器功能

图1所示为ADI公司收发器ADRV9009的功能框图。

每个波形发生器或接收器都是用直接变频架构实现的。Daniel Rabinkin的文章《前端非线性失真与阵列波形合成》详细地讨论了各种直接变频架构。⁴ LO频率可以独立编程到各IC上。数字处理部分包括数字上/下变频，其NCO也可跨IC独立编程。Peter Delos的文章《宽带射频接收器架构的选项》对数字下变频进行了进一步的描述。⁵

接下来，我们将展示一种方法，可以用于在多个收发器上强制杂散去相关。首先，通过编程板载锁相环(PLL)偏移LO的频率。然后，设置NCO的频率，以数字化补偿施加的LO频率偏移。通过调整收发器IC内部的两个特性，进出收发器的数字数据不必在频率上偏移，整个频率转换和寄生去相关功能都内置在收发器IC中。

图2所示为具有代表性的波形发生器阵列功能框图。我们将详细描述波形发生器的方法，展示波形发生器的数据，但该方法同样适用于任何接收器阵列。

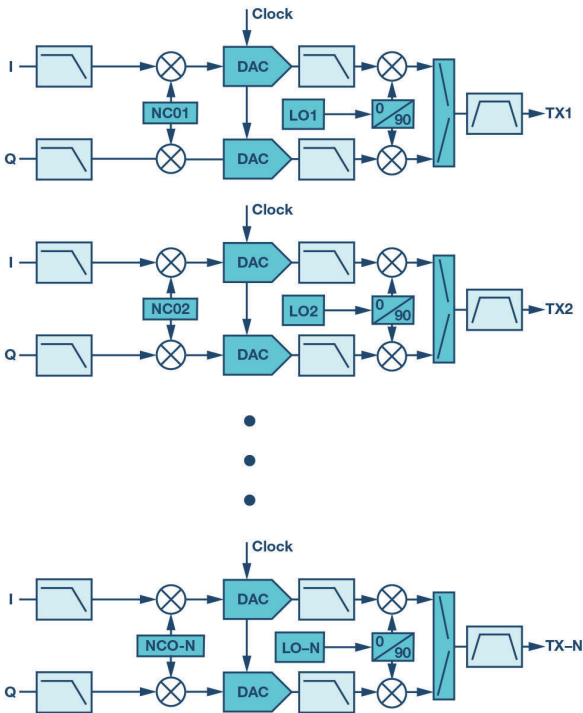


图2. 通过编程波形发生器阵列的LO和NCO频率，强制杂散去相关。

为了从频率角度说明概念，图3展示了一个带有来自直接变频架构的两个发送信号的示例。在这些示例中，射频位于LO的高端。在直接变频架构中，镜像频率和三次谐波出现在LO的相对侧，并显示在LO频率下方。当将不同通道的LO频率设置为相同的频率时，杂散频率也处于相同的频率，如图3a所示。图3b所示为LO2的设置频率高于LO1的情况。数字NCO同等地偏移，

使RF信号实现相干增益。镜像和三次谐波失真积处于不同的频率，因此不相关。图3c所示为与图3b相同的配置，只是RF载波添加了调制。



图3. 用频率显示杂散信号的光谱示例。三个示例：(a) 无杂散去相关的两个组合CW信号；(b) 强制杂散去相关的两个组合CW信号；以及(c) 强制杂散去相关的两个组合调制信号。

测量结果

组装了一个基于收发器的8通道射频测试台，用于评估相控阵应用的收发器产品线。评估波形发生器的测试设置如图4所示。在该测试中，将相同的数字数据应用于所有波形发生器。通过调整NCO相位实施跨通道校准，以确保射频信号在8路组合器处同相并且相干地组合。

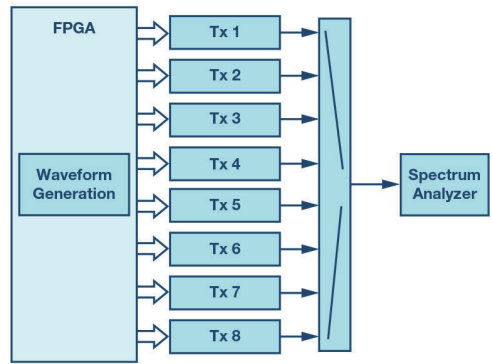


图4. 波形发生器杂散测试设置。

接下来，我们将展示测试数据，比较以下两种情况下的杂散性能：一是将LO和NCO都设为相同的频率；二是偏移LO和NCO的频率。所使用的收发器在一个双通道器件内共用一个LO（见图1），因此对于8个射频通道来说，共有4个不同的LO频率。

在图5和图6中，收发器NCO和LO都设置为相同的频率。在这种情况下，由镜像、LO泄漏和三次谐波产生的杂散信号都处于相同的频率。图5所示为通过频谱分析仪测得的各发射输出。图6所示为组合输出。在这个特定的测试中，相对于载波以dBc为单位测量的镜像杂散和LO泄漏杂散展现出改善的迹象，但三次谐波没有改善。在测试中，我们发现，三次谐波在各个通道

之间始终相关，镜像频率始终不相关，LO频率根据启动条件而变化。这反映在图3a中，其中，我们展示了三次谐波的相干叠加、镜像频率的非相干叠加以及LO泄漏频率的部分相干叠加。

在图7和图8中，收发器LO全部设为不同的频率，并且同时调整数字NCO的频率和相位，使得信号相干地组合。在这种情况下，由镜像、LO泄漏和三次谐波产生的杂散信号被强制设为不同的频率。图7所示为通过频谱分析仪测得的各发射输出。图8所示为组合输出。在这个测试中，相对于载波以dBc为单位测量的镜像杂散、LO泄漏杂散和三次谐波杂散开始扩散进噪声，将通道组合起来后，每种杂散都展现出改善的迹象。

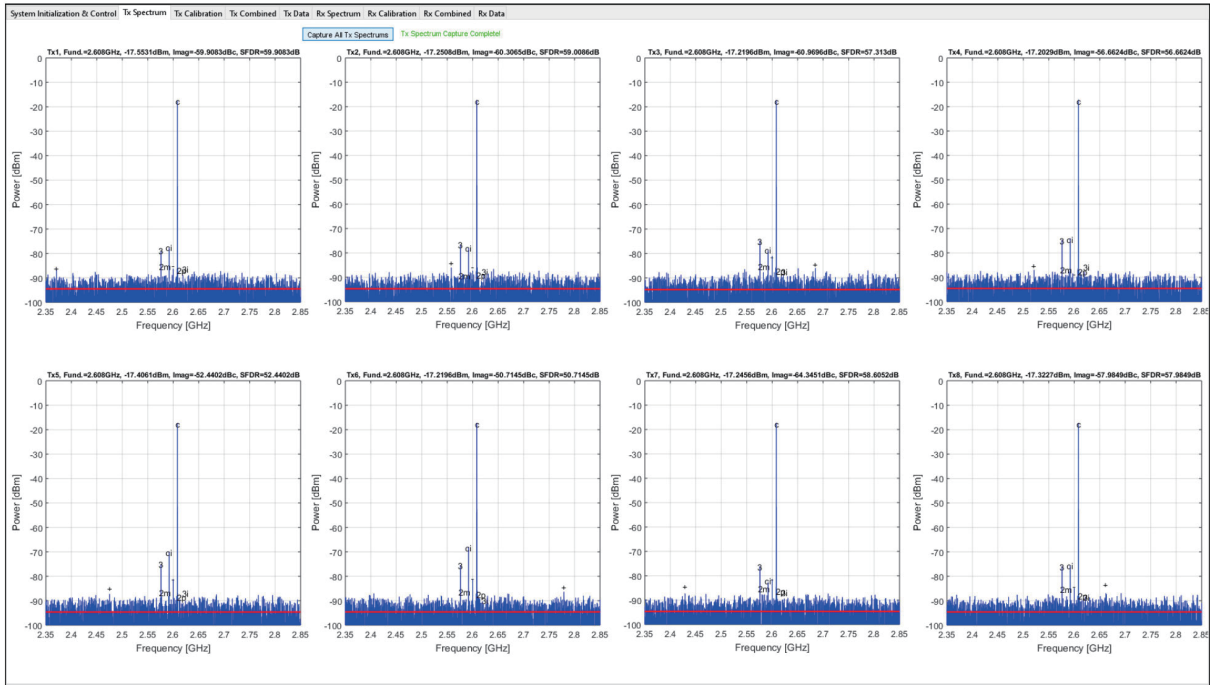


图5. 各通道的波形发生器杂散 (LO和NCO设为相同的频率)。

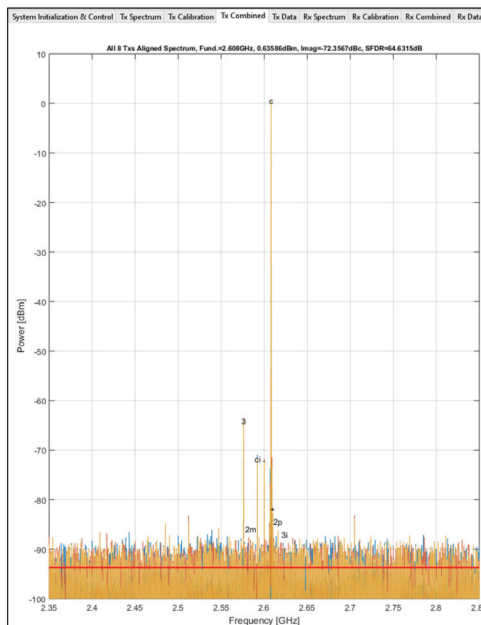


图6. 组合波形发生器杂散 (LO和NCO设为相同的频率)。注意，在这种配置中，三次谐波杂散没有改善。

当组合非常少量的通道时，比如在本测试中，杂散的相对水平实际上提高了 $20\log(N)$ 。这是由于信号分量相干地组合并以 $20\log(N)$ 递增，而杂散根本没有组合。在实践中，通过组合大通道阵列和更多通道，改善程度有望接近 $10\log(N)$ 。原因有二。首先，在组合大量信号的情况下，充分扩散杂散以独立考虑每个杂散是不现实的。以1 MHz调制带宽为例。如果规格规定，要在1 MHz带宽内测量杂散辐射，那么最好扩散杂散，使它们相距至少1 MHz。如果无法做到，则每1 MHz的测量带宽都会包括多个杂散分量。由于这些分量将处于不同的频率，所以，它们将不相干地组合，并且在每1 MHz带宽中测得的杂散功率将

以 $10\log(N)$ 递增。然而，任一1 MHz测量带宽都不会包含所有杂散，因此在这种情况下，杂散 N 小于信号 N ；尽管改进增量为 $10\log(N)$ ，但一旦 N 足够大，使其杂散密度能在测量带宽内容纳多个杂散，则与无杂散信号去相关的系统相比，绝对改善量仍然优于 $10\log(N)$ ——也就是说，改善量将介于 $10\log(N)$ 和 $20\log(N)$ 分贝（或dB）之间。其次，这个测试是用CW信号完成的，但现实信号会被调制，这将导致它们扩散，使得在组合大量信道的情况下，不可能实现不重叠的杂散信号。这些重叠的杂散信号将是不相关的，并且在重叠区域以 $10\log(N)$ 不相干地递增。

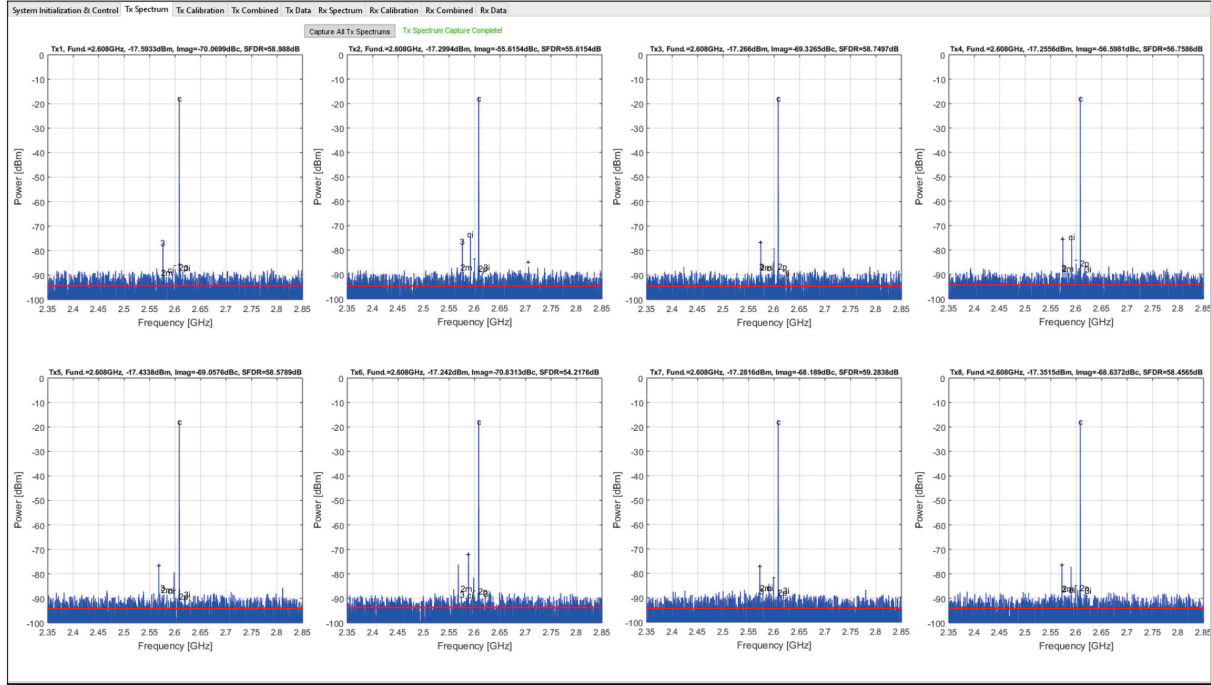


图7. 各通道的波形发生器杂散（LO和NCO的频率偏移）。

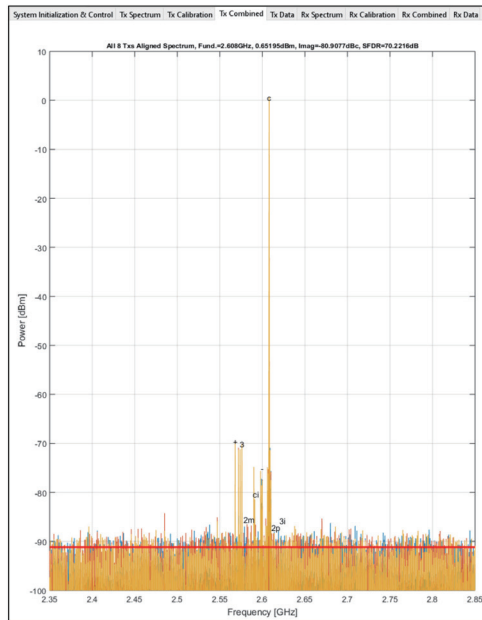


图8. 组合波形发生器杂散（LO和NCO频率偏移）。注意，在这种情况下，杂散的频率有所扩散，并且相对于单个通道SFDR，其SFDR有明显的改善。

当将不同通道的LO设为相同频率时，需要特别注意LO泄漏分量。当两个信号分支相加时，模拟调制器中LO的不完全消除，这是导致LO泄漏的原因。如果幅度和相位不平衡是随机误差，则剩余LO泄漏分量的相位也将是随机的，并且当将许多不同的收发器的LO泄漏相加时，即使它们的频率完全相同，它们也将以 $10\log(N)$ 不相干地叠加。调制器的镜像分量也应如此，但调制器的三次谐波则不一定这样。在少量通道被相干组合的情况下，LO相位不太可能是完全随机的，因此测得数据中展示了部分去相关的原因。由于信道数量非常多，因此，不同通道的LO相位更接近随机条件，并且预计为不相关叠加。

结论

当LO和NCO的频率偏移时，结果会测得SFDR，其清楚地表明，所产生的杂散全部处于不同频率并且在组合过程中不相关，从而确保在组合通道时SFDR能得到改善。现在，在ADI公司的收发器产品中，LO和NCO频率控制已经成为一种可编程的特性。结果表明，该功能可用于相控阵应用，相比单通道性能，可确保阵列级的SFDR改善。

参考文献

- ¹ Lincoln Cole Howard和Daniel Rabideau, 《数字相控阵中的非线性失真：测量与缓解》，2002 IEEE MTT-S国际微波研讨会文摘。
 - ² Salvador Talisa, Kenneth O' Haever, Thomas Comberiate, Matthew Sharp和Oscar Somerlock, 《数字相控阵的好处》，IEEE论文集，第104卷第3期，2016年3月。
 - ³ Keir Lauritzen, 《并行模数转换器阵列中的信号、噪声与谐波相关性》，博士论文，马里兰大学，2009年。
 - ⁴ Rabinkin, Song, 《前端非线性失真与阵列波形合成》，Radio and Wireless Symposium (RWS) 2015 IEEE。
 - ⁵ Peter Delos, 《宽带射频接收器架构选项综述》，ADI公司，2017年2月。
- Delos, Peter, 《相控阵能校准噪声吗？》，*Microwave Journal*, 2018年3月。
- Jonathan Harris, 《数字下变频器的发展和更新——第一部分》，《模拟对话》，2016年7月。

Jonathan Harris, 《数字下变频器的发展和更新——第二部分》，《模拟对话》，2016年11月。

Howard, Lincoln, Nina Simon和Daniel Rabideau, 《运用通道依赖型相移缓解数字相控阵中的相关非线性问题》，2003 EEE MTT-S Digest。

作者简介

Peter Delos是ADI公司航空航天和防务部门的技术主管，在美国北卡罗莱纳州格林斯博罗工作。他于1990年获得美国弗吉尼亚理工大学电气工程学士学位，并于2004年获得美国新泽西理工学院电气工程硕士学位。Peter拥有超过25年的行业经验。其职业生涯的大部分时间花在高级RF/模拟系统的架构、PWB和IC设计上。他目前专注于面向相控阵应用的高性能接收器、波形发生器和合成器设计的小型化工作。联系方式：peter.delos@analog.com。

Mark Robertson本科于1990年毕业于剑桥大学，获电气与信息科学学位。2012年，他在英国巴斯加盟ADI公司，担任系统工程师；此前，先后在测试和测量、手机和蜂窝基站等多个行业的多家公司供职，担任射频和模拟电路设计工程师。他仍然喜欢随时设计现实电路。联系方式：mark.robertson@analog.com。

Mike Jones是ADI公司航空航天与防务部门的一名首席电气设计工程师，在美国北卡罗来纳州格林斯博罗工作。他于2016年加入ADI公司。从2007年到2016年，他在北卡罗来纳州威尔明顿的通用电气公司工作，担任微波光子学设计工程师，致力于研发核工业微波和光学解决方案。他于2004年获得北卡罗来纳州立大学电气工程学士学位和计算机工程学士学位，2006年获得北卡罗来纳州立大学电气工程硕士学位。联系方式：michael.jones@analog.com。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区，与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问ezchina.analog.com



全球总部
One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部
上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路2290号展想广场5楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司
深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司
北京市海淀区西小口路66号
中关村东升科技园
B-6号楼A座一层
邮编: 100191
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司
湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路889号光谷国际广场
写字楼B座2403-2405室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2018 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA20572sc-0-B/18

analog.com/cn

