

宽带高动态范围限幅放大器

Adam Winter

高级微波设计工程师

Jerry Cornwell

产品开发经理

摘要

宽带高动态范围微波限幅放大器是电子战(EW)系统中的关键元器件,因为这些系统需要在很宽的输入功率范围内提供稳定/压缩输出功率。这些EW系统通常需要高增益和平坦的响应,必须能够在恶劣热环境中工作。要在多个倍频程频段内保持可接受且可靠的性能,需要对放大器链进行精心设计。放大器链的不当级联和饱和可能导致性能不可靠且无法预测。本文将演示2 GHz至18 GHz的设计,它使用ADI器件实现大于40 dB的限幅动态范围,输出功率变化小于2 dB,噪声系数为4 dB,工作温度范围为-40°C至+85°C。利用ADI独特的MMIC优势和子系统设计能力,我们能够提供出色的解决方案,满足客户对高级应用的需求。下文展示了性能测试结果。

1.0简介

很多新型EW系统需要低噪声接收机,能够耐受多个倍频程带宽范围内的宽输入功率变化。这些接收机是保护敏感元器件免受RF过驱影响、消除传入信号AM调制所必需的。此外,由于采用多通道系统设计并且靠近接收机天线,因而需要低功耗和小封装尺寸。应用包括IFM和测向前端、DRFM和干扰器系统。这些系统必须在很宽的温度范围内工作,在所有工作条件下都需要平坦的频率响应和低谐波成分。ADI的限幅放大器拥有业界领先的封装尺寸、电气/RF性能,易于集成到更高级别的组件中,非常适合很多前述应用。微波限幅放大器是高增益多级放大器,随着输入功率增加而连续压缩内部增益级,从而限制输出功率。增益级从输出级向输入压缩,其设计经过优化,能够在所有工作条件下避免各个增益级过驱。宽带限幅放大器设计面临着诸多挑战,包括有效功率限制、热补偿、多个倍频程带宽范围内的频率均衡。此外,低噪声、低功耗和小封装尺寸的系统要求也增加了设计的复杂性。

本文将回顾2 GHz至18 GHz限幅放大器的设计考虑因素和技巧,要求 45 ± 1.5 dB的增益、-40°C至+85°C的工作温度范围、小于1.5 W dc功率、40 dB的限幅动态范围。限幅动态范围定义为RF输出功率固定的输入功率范围。ADI提供2 GHz至18 GHz宽带限幅放大器产品HMC7891,满足上述要求。该放大器包括内部稳压功能,采用密封连接器式封装。

2.0 构建和放大器考虑因素

微波限幅放大器设计首先是选择首选构建方法和内部增益级放大器。对于高频应用,混合芯片和电线组件通常优于表面贴装设计,以便最大程度地减少由于封装寄生效应导致的不良性能影响,混合芯片和电线组件的可靠性非常出色,因为混合组件经过了彻底检测,能够很好地应对环境压力。此外,这些组件体积小,重量轻,易于密封。混合芯片和电线组件包括裸片形式的单芯片微波集成电路(MMIC)、薄膜技术、可线焊的无源组件。

选择内部增益级的主要考虑因素包括工作频率范围、增益与温度的关系、增益平坦度、饱和谐波成分、非线性性能。成功的限幅放大器设计应该最大程度地减少增益级和专用器件数,以减少热补偿和平坦度问题。此外,设计成功很大程度上还取决于器件最大输入功率额定值,以及所选增益级的压缩特性。为了完成具有40 dB限幅动态范围要求的设计,建议部署至少四个增益级,理想情况下,每个放大器级将在小于10 dB的压缩条件下工作。四个增益级还应在温度范围内充分实现45 dB的小信号增益要求。

由于具有高增益和低功耗性能,宽带MMIC增益模块放大器或低噪声放大器(LNA)适合用于限幅放大器设计。噪声系数要求通常需要使用低噪声放大器,而不是增益模块放大器。但是,由于RF输入功率额定值通常较低,LNA增益级可能带来设计挑战。理想的增益级器件具有较高的最大RF输入功率额定值,在高压缩级别下能够安全工作。

另一个重要考虑因素是每个增益级的饱和谐波成分。谐波成分要求取决于限幅放大器的应用。例如，对于旨在生成方波输出波形应用，需要使用具有较低偶次谐波输出和较强奇次谐波输出的增益级放大器。为了避免破坏输出波形，最好在所有四个增益级位置使用相同的器件。最后，所选MMIC放大器必须无条件地保持稳定，理想情况下无偏置序列要求，以简化设计。

HMC462是完成限幅放大器设计的理想MMIC。HMC462是一款自偏置LNA，仅需单个5 V电源，提供大于13 dB的增益、2 GHz至18 GHz的极佳增益平坦度、平均2.5 dB的噪声系数。该器件具有18 dBm的饱和输出功率电平，能够在频段范围内安全地运行大于14 dB的压缩。最大输入功率额定值几乎与器件的饱和输出功率相等，这使得它非常适合在一系列级联增益级中工作。二阶谐波很低，MMIC具有强大的平坦三阶谐波。饱和dc功率低于400 mW。

3.0 RF预算分析

选择限幅放大器增益级后，接下来应考虑RF系统预算分析。RF预算分析检查限幅放大器内不同测试点的宽带频率响应和RF功率电平。必须完成分析，才能针对最坏情况的工作温度、增益斜率和宽RF输入功率范围进行校正。如第2.0部分所述，具有40 dB限幅动态范围的限幅放大器的基本布局是级联的四个增益模块放大器或LNA。理想的设计仅使用一个或两个专用放大器器件，以减少在不同频率下的功率变化，最大程度地减少热/斜率补偿需求。

图1显示了温度校正和斜率补偿之前的首批初始限幅放大器框图。完成宽带限幅放大器设计的一种推荐技巧是：

1. 管理限幅功率动态范围，消除RF过驱条件。
2. 优化温度范围内的性能
3. 最后，校正功率滚降，将小信号增益变平。
4. 最后一个细微校正可能是必需的，即在频率均衡功能被纳入设计后，重新考虑温度补偿。

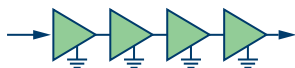


图1 初步设计框图。

3.1 功率限制

图1所示初步设计的主要问题是，随着RF输入功率增加，RF过驱很可能在输出增益级发生。当任何增益级的饱和输出功率超过队列中下一个放大器的绝对最大输入时，将发生RF过驱。此外，设计容易出现与VSWR相关的纹波，由于小型RF封装中的高无阻尼增益，还很可能出现振荡。

为了防止RF过驱、消除VSWR效应并降低振荡风险，可在各增益级之间添加固定衰减器，以降低功率和增益。RF盖上还可能需要RF吸收器以消除振荡。需要足够的衰减，将各增益级的最大输入功率减小到MMIC的额定输入功率电平以下。必须包括足够的衰减，以容纳顶级输入功率裕量，适应温度变化和器件间差异。图2显示了限幅放大器链中需要RF衰减器的位置。

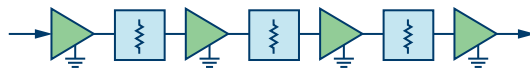


图2 RF过驱校正框图。

ADI的宽带限幅放大器HMC7891采用四个HMC462增益级，以让工作范围达到10 dBm。绝对最大输入功率为15 dBm。各增益级能够耐受18 dBm的最大RF输入。按照上一段中概述的设计步骤，已在两个增益级之间添加衰减器，以确保最大放大器输入功率电平不超过17 dBm。图3显示在设计中添加固定衰减器的情况下，每个增益级输入端的最大功率电平。

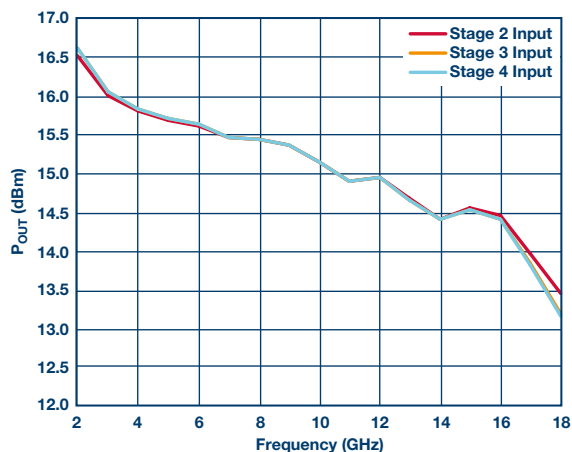


图3 仿真 P_{out} 和频率的关系，RF过驱校正。

3.2 热补偿

第二个步骤是对设计进行热补偿，以便扩大工作温度范围。限幅放大器应用的通用热范围要求为-40°C至+85°C。根据经验，0.01 dB/°的增益变化公式可用于估算四级放大器设计的增益变化。增益随着温度降低而增加，反之亦然。使用周边环境增益作为基线，总增益预期在85°C下降低2.4 dB，在-40°C下上升2.6 dB。

为对设计进行热补偿，可插入市售的Thermopad®温度可变衰减器，以取代固定衰减器。图4显示了市售的宽带Thermopad衰减器的测试结果。根据Thermopad测试数据和估算的增益变化，显然需要使用两个Thermopad衰减器，对四级限幅放大器设计进行热补偿。

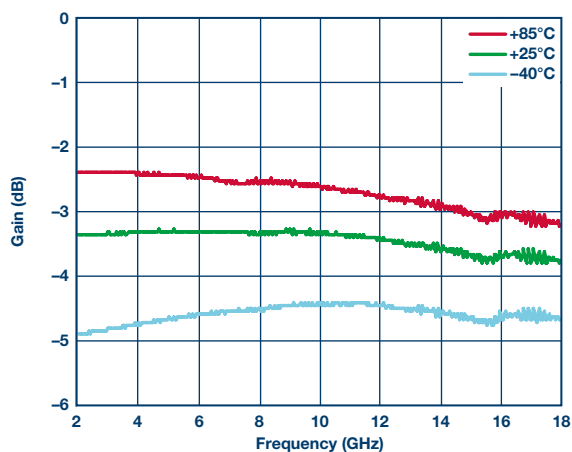


图4 温度范围内的Thermopad损耗。

决定在何处插入Thermopad是一个重要决策。由于Thermopad衰减器的损耗会增加,特别是在低温条件下,因此避免在接近RF链输出端的位置添加元器件是一种好的做法,这是为了维持较高的限制输出功率电平。Thermopad的理想位置是在前三个放大器级之间,也就是图5中突出显示的位置。

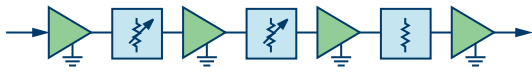


图5. 热补偿框图。

ADI的热补偿HMC7891小信号性能的仿真结果如图6所示。在频率均衡之前,增益变化减少至最高2.5 dB。这在 ± 1.5 dB增益变化要求的范围内。

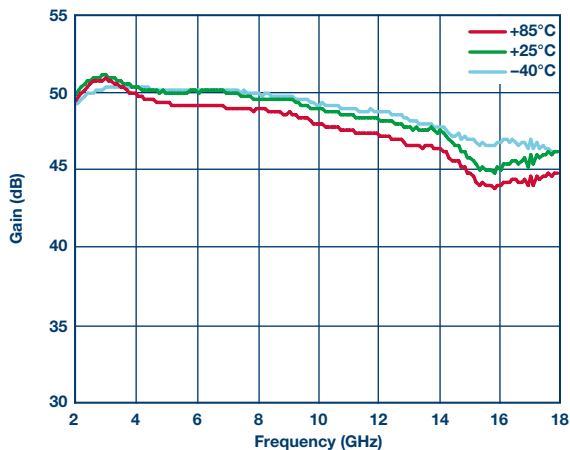


图6. 温度范围内的HMC7891仿真小信号增益。

3.3 频率均衡

从而补偿大多数宽带放大器中的自然增益滚降。有各种均衡器设计,包括无源GaAs MMIC芯片。无源MMIC均衡器尺寸小巧,没有直流和控制信号要求,因此非常适合限幅放大器设计。需要的频率均衡器数量取决于限幅放大器的未补偿增益斜率,以及所选均衡器的响应。一条设计建议是轻微地过度补偿频率响应,以抵消传输线路损耗和连接器损耗,以及在较高频率下对增益影响更大的封装寄生效应。图7显示了定制ADI GaAs频率均衡器的测试结果。

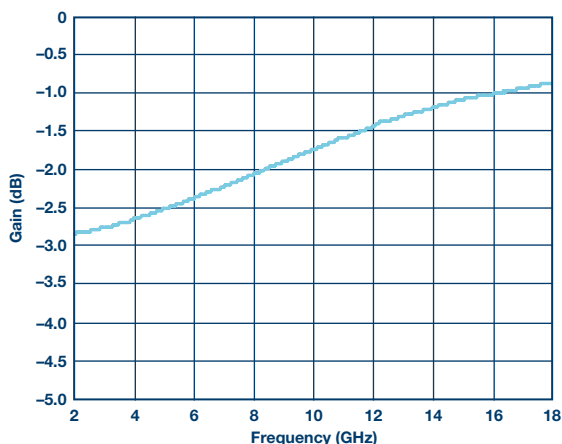


图7. 测量的频率均衡器损耗。

ADI的HMC7891限幅放大器需要三个频率均衡器,以校正经过热补偿的小信号响应。图8显示了HMC7891经过热补偿和频率均衡的仿真结果。决定在何处插入均衡器对成功设计至关重要。在添加任何均衡器之前,切记理想的限幅放大器应在所有增益级之间均匀分布最大放大器压缩,以避免过度饱和。换言之,在最坏条件下,每个MMIC应该同等压缩。

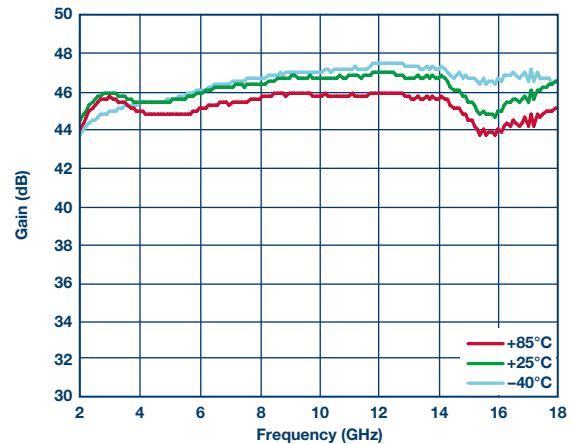


图8. 温度范围内的HMC7891仿真频率均衡小信号增益。

在图5所示的当前设计阶段,可在器件输入端添加与Thermopad衰减器串联的均衡器,取代器件输出端的固定衰减器。在限幅放大器输入端添加均衡器会降低第一个增益级的功率。因此,级1的压缩减小。增益级压缩减小相当于限幅动态范围减小。另外,由于均衡器的衰减斜率,限幅动态范围在频率范围内分散。频率越低,动态范围缩小越多。为了补偿缩小的限幅动态范围,RF输入功率必须升高。但是,由于均衡器的斜率,输入功率不均匀地升高又会增加放大器增益级过驱的风险。可以在器件输入端添加均衡器,但这不是理想的位置。

其次,添加与Thermopad串联的均衡器,将减小后续放大器的压缩。这会导致放大器压缩在增益级之间分布不均匀,缩小整体限幅动态范围。不建议将均衡器与Thermopad衰减器串联。

第三,使用一个或多个均衡器替代固定衰减器,只会改变输出级放大器的压缩水平。为了最大程度地减小这种变化,并且避免RF过驱,均衡器损耗应与从系统中删除的固定衰减值大致相等。此外,正如上文所述,在增益级之前添加均衡器,将会导致限幅动态范围与频率的分散。为了最大程度地减少这种效应,请替换尽可能少的均衡器。

最后,均衡器可以添加到器件输出端。输出均衡会减小输出功率,但不会产生限幅动态范围分散。输出均衡会产生略正输出功率斜率,但这种斜率被高频封装和连接器损耗抵消。完成的四级限幅放大器布局如图9所示。



图9. 频率均衡框图。

图10显示了ADI HMC7891的输出功率与温度仿真结果。最终设计实现了40 dB的限幅动态范围，在所有工作条件下，仿真的最坏情况输出功率变化为3 dB。

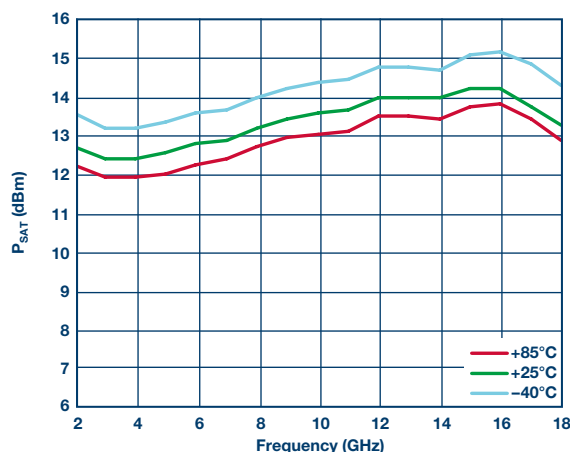


图10. 温度范围内，HMC7891的仿真 P_{SAT} 与频率的关系。

4.0 ADI限幅放大器测试结果

HMC7891的测试结果如图11至图18所示。这些结果证明，该设计能够实现47 dB的增益，饱和输出功率为13 dBm。放大器的输入功率范围为-30 dBm至+10 dBm，限幅动态范围为40 dB。该装置在-40°C至+85°C的工作温度范围中进行了测试。下面的图19显示了HMC7891的照片。虽然HMC7891最初是作为限幅放大器设计的，但凭借小巧尺寸和出色的RF性能，它在各种不同应用中都能发挥作用，包括用作三倍频器和LO放大器。本文所述的设计技术可用于未来的限幅放大器设计，对规格要求进行了修改，例如频率、输出功率、增益、噪声系数或限幅动态范围。

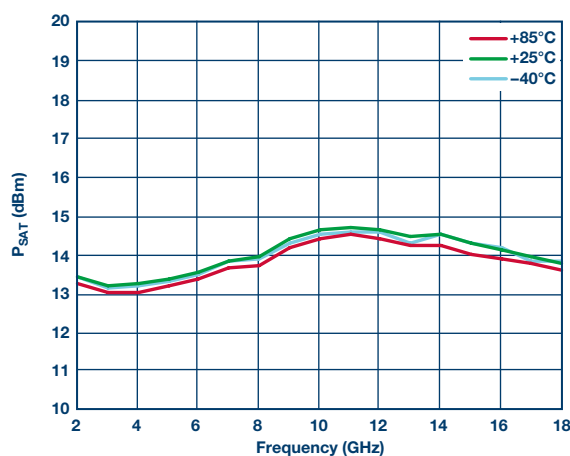


图11. 温度范围内，HMC7891的测量 P_{SAT} 与频率的关系。

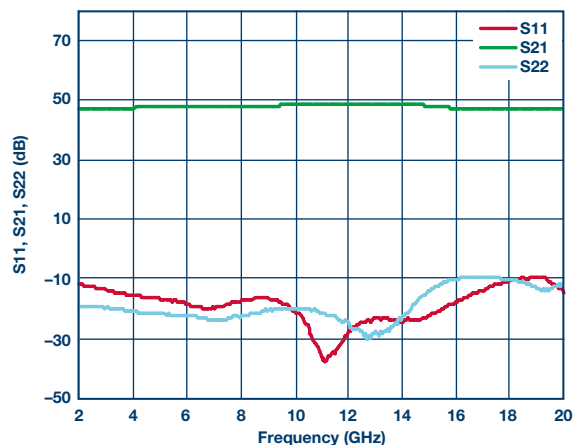


图12. HMC7891的测量增益和回波损耗。

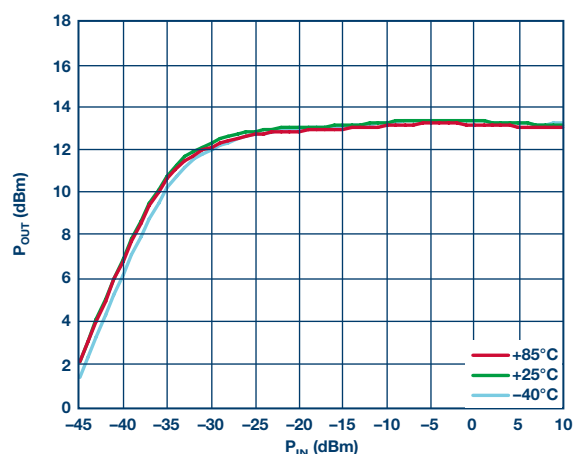


图13. 温度范围内，频率为2 GHz时，HMC7891的测量 P_{OUT} 与 P_{IN} 的关系。

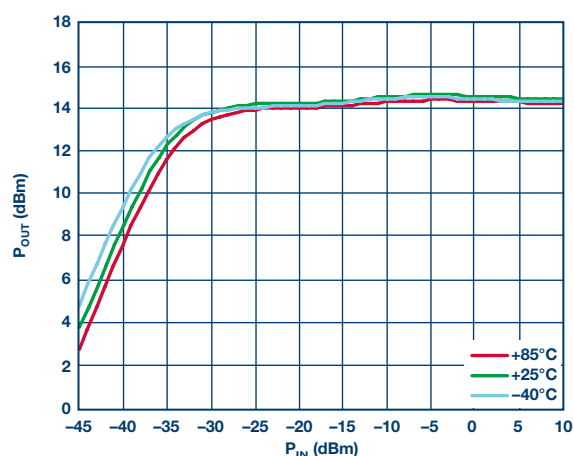


图14. 温度范围内，频率为10 GHz时，HMC7891的测量 P_{OUT} 与 P_{IN} 的关系。

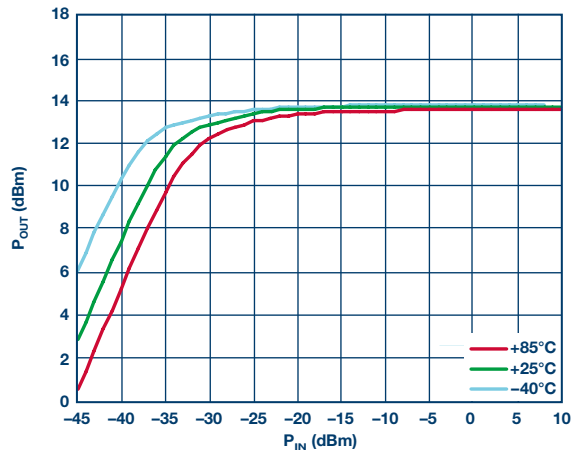


图15. 温度范围内, 频率为18 GHz时, HMC7891的测量 P_{OUT} 与 P_{IN} 的关系。

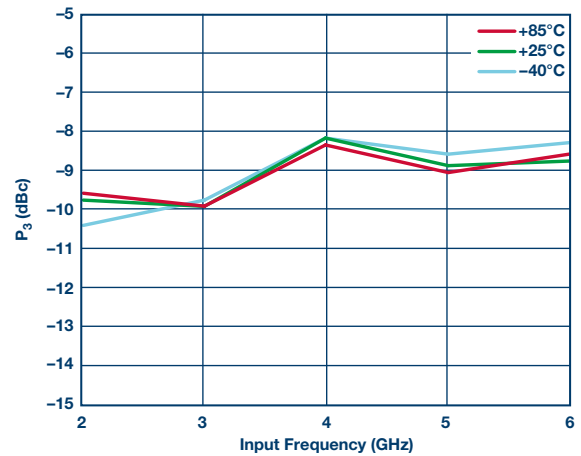


图18. HMC7891在 P_{SAT} 下的测量三次谐波与频率的关系。

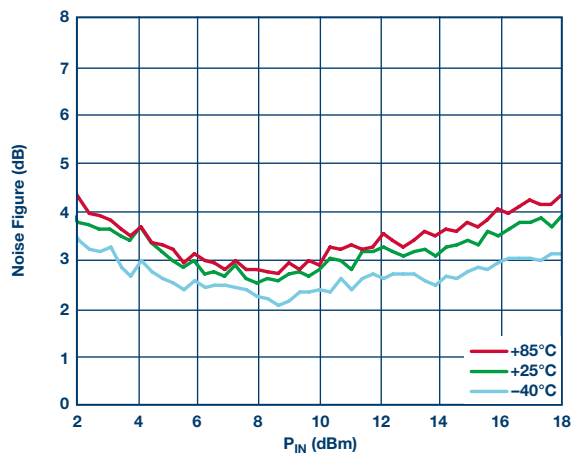


图16. 温度范围内, HMC7891的测量噪声系数与频率的关系。

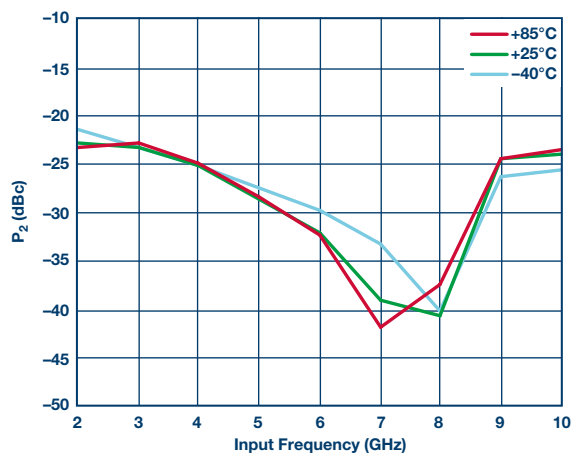


图17. 温度范围内, HMC7891在 P_{SAT} 下的测量二次谐波与频率的关系。

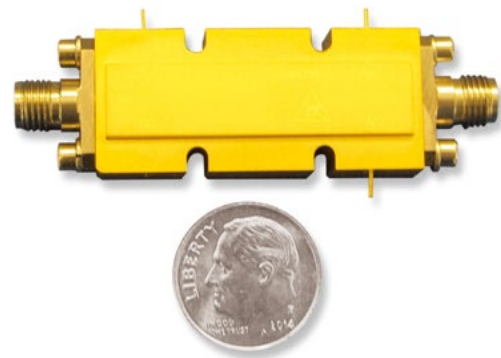


图19. HMC7891图片。

作者简介

Adam Winter拥有约翰·霍普金斯大学电子工程学士学位, 以及科罗拉多大学波尔得分校电子工程硕士学位。他在ADI公司担任高级微波设计工程师。加入ADI公司之前, Winter先生就职于Lockheed Martin Space Systems。他在军事/航空RF元器件、模块、定制组件的设计、开发和生产领域拥有近10年的经验, 谙熟高功率GaN放大器、毫米波频率转换器、发射机/接收机模块、SSPA和LNA。

Gerald Cornwell拥有新泽西理工学院电子工程学士学位。他在本行业拥有40多年的经验, 熟悉从设计到开发, 再到生产的所有方面。加入ADI公司之前, 他曾在Raytheon公司开发电子战系统; 在M/A-COM公司担任微波子系统部门工程设计副总裁, 服务于电子战、雷达和导弹市场, 以及航空航天和国防部门首席技术官; 还曾在Cobham Sensor Systems公司担任业务开发部门技术主管。之后Cornwell先生加入ADI公司, 担任模块和子系统部门高级业务开发经理。

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。

 **EngineerZone™**
中文技术论坛

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

©2016 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.
TA14408sc-0-5/16

analog.com/cn

