采用积木式模块开发超宽带机载探雪雷达

Prototyping an UWB Airborne Radar for Snow Probing Using Modular Building Blocks

F. Rodriguez-Morales, C. Carabajal, A. Paden and C. Leuschen
Center for Remote Sensing of Ice Sheets, University of Kansas, Lawrence, Kan.
J. McDaniel
Advanced Radar Research Center, University of Oklahoma, Norman, Okla.
A. Wolf and S. Garrison
Kansas City National Security Campus, Kansas City, Mo.

利用快速原型设计技术，基于定制的微波滤波器以及来自商业合作供应商的现成积木式电路和定制的直流偏置电路，开发出一套小型超带宽（UWB）雷达收发模块。作为实现全系统小型化的中间步骤，使用该技术的微波器件集成电路能够用于评估不同的配置，通过减小的形状来提高雷达性能。在1瓦的发射功率和小范围旁瓣的条件下，模块化的发射机和接收机可提供160分贝的环路灵敏度。这些模块计划用于需要多个GHz带宽以实现厘米级垂直分辨率的机载雪地探测应用。实验室测试结果表明，与其它较大的连接组件相比，该模块的整体性能有了全面的提高，雷达图像显示，这些模块可用于从远距离的飞机上测量陆地和海洋冰面上的雪层厚度。这项工作由能源部的堪萨斯市国家安全园区和美国国家航空航天局（授权号NNX10AT68 G）资助，国家安全园区由霍尼韦尔联邦制造和技术有限责任公司运营（合同编号DE-NA002439）。

超带宽微波雷达由于其工作带宽宽，被广泛应用于从医学成像和隐蔽物体探测到航空地球物理测量和基础设施测绘[1-4]等各种应用。这种仪器能够分辨出空间密集的目标和介质的界面，使其成为测量积雪厚度和绘制季节性积雪变化图的理想设备（见图1）[5]。堪萨斯大学的UWB雪地雷达是一个工作于2至18GHz的调频连续波（FMCW）系统，最初用于测量海洋冰面上的积雪厚度，并以厘米分辨率绘制积雪堆高度[6]。该仪器的早期版本在射频(RF)部分采用了带连接器的组件或连接器/印刷电路板（PCB）混合组件，并装备在大型固定翼飞机上，用来大范围收集积雪厚度信息[6-7]。

对于未来的应用，如在无人驾驶飞行器上使用，需要减少雷达的SWAP。作为实现系统全

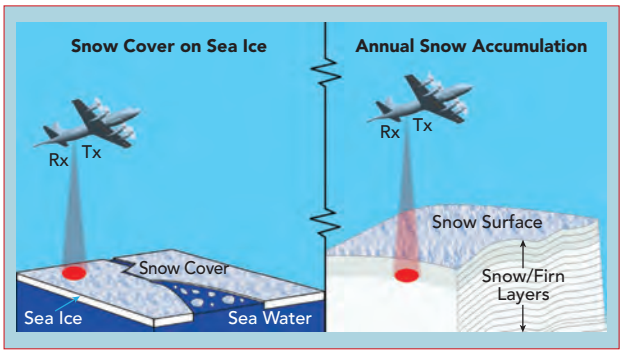


图1：UWB雷达能够测量雪的厚度以及雪堆高度的季节性变化。

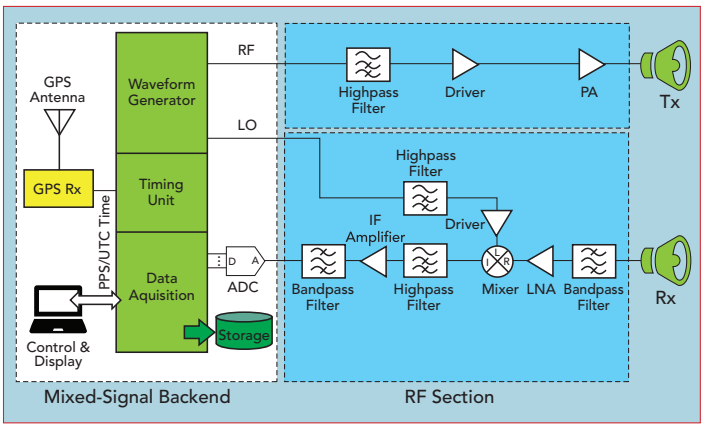


图2：UWB雷达方框图。

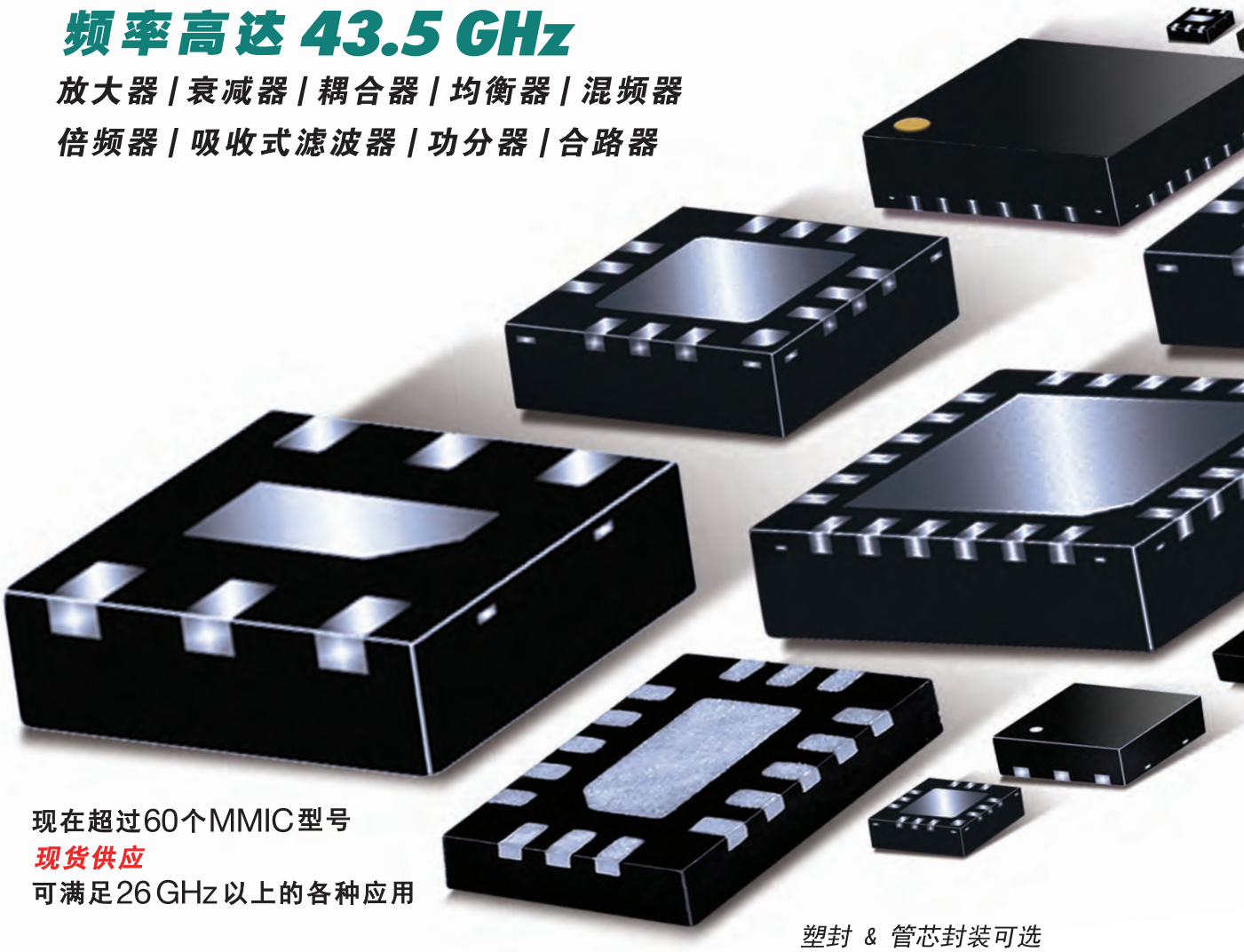
毫米波 MMIC 产品

多倍频带宽

频率高达 43.5 GHz

放大器 | 衰减器 | 耦合器 | 均衡器 | 混频器

倍频器 | 吸收式滤波器 | 功分器 | 合路器



现在超过60个MMIC型号

现货供应

可满足26 GHz以上的各种应用

塑封 & 管芯封装可选

Mini-Circuits... 我们重新定义价值所在！

CELEBRATING 50 YEARS

Mini-Circuits®

ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED

www.minicircuits.com

P.O.Box 350166，Brooklyn，NY 11235-0003

(718) 934-4500 sales@minicircuits.com

Mitron Inc.

Authorized Mini-Circuits Rep in China

伟博电讯——把最好的微波射频产品带给中国

总部地址：福建省福州市349信箱 邮编：350003

全国免费服务热线：400-887-3088 传真：0591-87870011

E-mail：sales@mitron.cn 网址：www.mitron.cn

更多产品资讯

关注伟博电讯公众号

IF/RF MICROWAVE COMPONENTS

面小型化的中间步骤，来自商业供应商X-microwave的模块化组件[8]被用于评估不同的接收器和发射器配置。该技术使用无源和有源元件，这些元件安装在以网格方式排列的分立PCB载体上，并通过柔性GSG（地-信号-地）跳线连接。这种方法便于在进行最终设计之前优化雷达的射频性能，如线性度、接收机灵敏度、发射功率和总体性能等。它还能使合适的芯片组适用于无论是集成封装还是分立封装的形式，以适应未来的小型化。

首先，使用商用连接器部件建立一个工作频率为2~18 GHz的雷达参考系统，确立雷达的性能基准。该雷达试验台在实验室完成了相应的调测调试，并用于在NASA飞机飞越北极和南极上空时收集大量的积雪数据，以支持2017年冰山行动[9]。随后就开发出了使用X-Microwave框架的发射机和接收机模块，并集成在改进的雷达演示器中。

本文介绍了模块化接收机、发射机以及升级后的2～18GHz雷达系统。这些经过精心选择和增加了集成度的组件提高了雷达性能，并证明了机载雷达系统的新模块在测量积雪厚度方面的实用性。

系统概述

图2显示了雷达系统的简化框图。波形发生器产生一个2至18 GHz频谱范围内的线性调频信号（chirp，又称啁啾信号）。该调频信号在馈送发射天线之前通过发射机进行滤波和放大。来自观测场景的散射信号被第二个天线捕获，并由接收器前端滤波器和低噪声放大器进行调节。另外，发送信号的副本被注入混频器的本地振荡器端口以对放大的接收信号进行去调频（de-chirp）处理。混频器输出处的中频信号被高通滤波，以抑制由于发射天线和接收天线之间的直接耦合而产生的频谱成分。在数据采集系统中，中频信号需在模数转换器转换之前经过放大和带通滤波，该系统存储有GPS时间戳距离信息。雷达搭载在机载平台上，天线安装在机身下方。由于UWB的加入和运行，其系统的高分辨率对于检测海洋冰面上的薄雪覆盖和测绘冰川上或地面上季节性积雪是有好处的（见图1）。

滤波器的开发

微波滤波器在雷达应用中提供频率选择性，特别是在接收机输入端，它可以消除其它工作在甚高频（180至210 MHz）、超高频（600至900 MHz）和Ka波段（32至38 GHz）的机载雷达产生的干扰。Yan、McDaniel等人[6,10]在悬浮衬底带状线上开发了一套特制的高通和低通滤波器，工作频率为2-18GHz。他们对这些滤波器的同轴发射结构进行了修改，以创建一个与X-Microwave积木结构兼容的插入式组件。

安装在试验车辆上的滤波器（见图3a）能够顺利过渡到与同轴探头相连的平面传输线上。图3b和3c显示了两个滤波器的测量响应，补偿了探头损耗，并与分立式组件进行了比较。高通滤波器的响应与其连接的对应滤波器的响应相当，在6.5到16GHz频率范围内，回波损耗有了全面的改善。这两种实现方式的回波损耗在8 GHz以下及15 GHz以上基本相当，但针对不同的频率还是存在一些差异。插入式低通滤波器的衰减速度略快于连接式滤波器。在同一批次的其他样品中也有类似情况，伴随着后面一直到18GHz频段回波损耗的良好表现，它表明是滤波器响应的差异，而不是同轴结构的问题。

模块组件

为了获得最佳的总体性能，工作人员测试了多个接收器和发射器的芯片组。尤其是针对不同的混频器设备进行了评估，以使接收器中的短程泄漏[11]或“相干噪声”最小。相干噪声是FMCW雷达固有的一种伪影，它是由发射机和接收机的各种回路和机械结构（包括天线和混频器端口）耦合而产生的。相干噪声的主要贡献者包括啁啾（chirp）本身的相位噪声和带内谐波，以及啁啾信号与内反射自混合的产物。混频器阻抗匹配和端口间隔离是减小相干噪声的关键。在所评估的宽带混频器中，最好的是具有现场可更换连接器的连接组件，且该组件用作插入块。使用低相位噪声的LO驱动放大器也可提高雷达性能。为了获得至少1w的输出功率（与连接式参考系统中

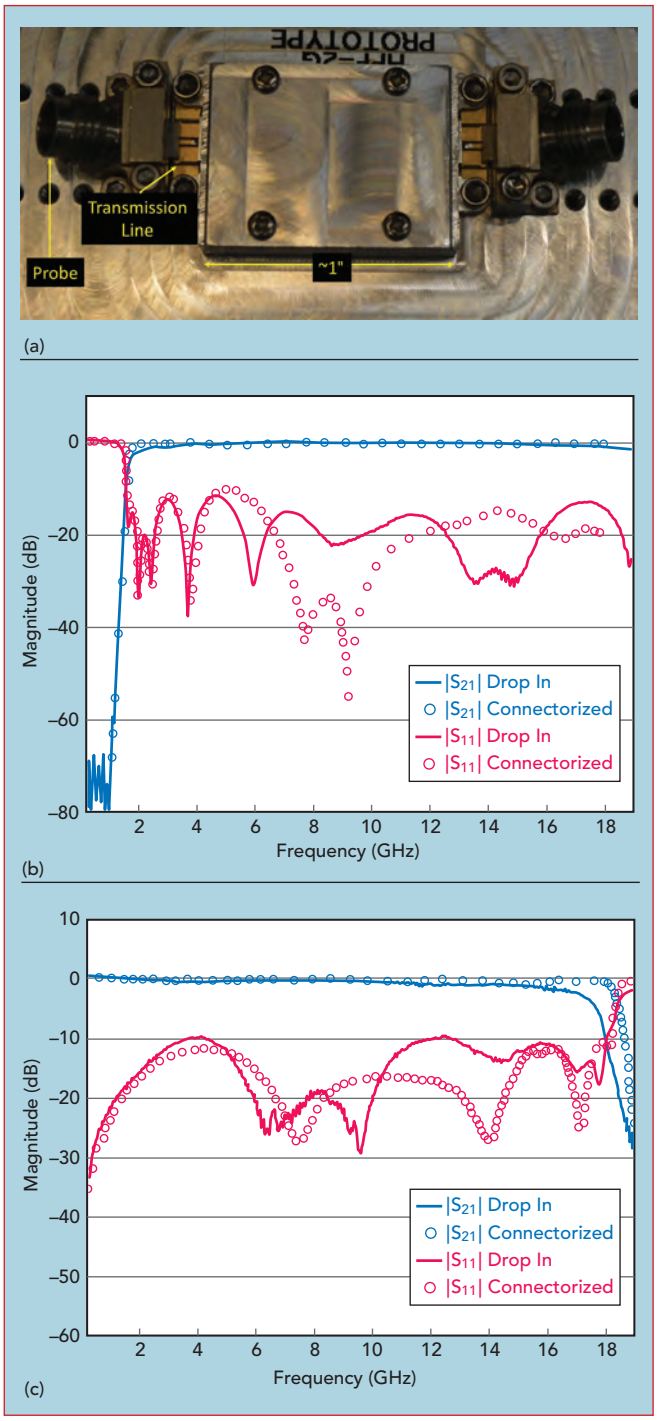


图3：测试车辆中的高通滤波器（a），插入式与连接式高通滤波器性能比较（b），插入式与连接式低通滤波器性能比较（c）。

MiCable

通过 ISO9001质量管理体系认证
通过GJB9001B国军标质量管理体系认证

创新技术 引领未来

迈可博® 0.5~40GHz 超宽带功率分配器/合成器

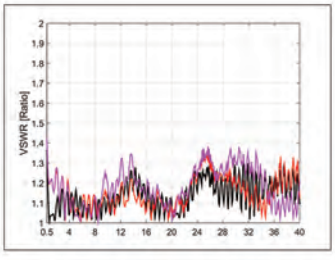
低驻波

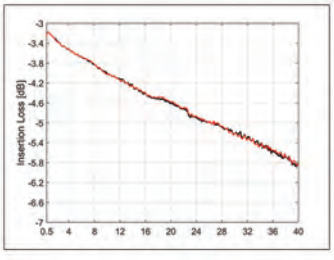
低插损

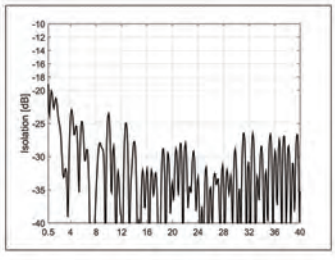
高隔离

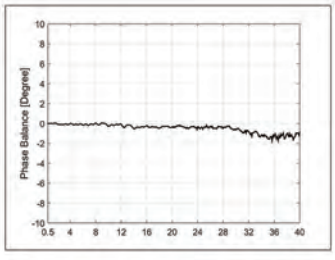
- 超宽工作频率：0.5~40GHz
- 多种接头可选，提供多频段工程定制
- 满足国军标（GJB150）环境标准
- 优异的幅度/相位平衡
- 高功率处理能力

功率分配器/合成器测试曲线
(P02N005400)









型号	路数	公共端驻波	分支端驻波	插入损耗*	幅度平衡	相位平衡	隔离度
		Max.（:1）		Max.（dB）		Max.（Deg.）	Min.（dB）
P02N005400	2	1.6	1.6	3.5	±0.5	±6	16
P04N005400	4	1.7	1.7	7.5	±0.5	±7	15
P08N005400	8	1.8	1.8	11	±0.8	±12	15

*不包含理论分配损耗
2路功分器 3dB; 4路功分器 6dB; 8路功分器 9dB

迈可博 —— 微波毫米波电缆组件 / 无源器件专家

福州迈可博电子科技股份有限公司
电话：400-918-0388
邮箱：sales@micable.cn
网址：www.micable.cn

经销商：伟博电讯有限公司
电话：400-887-3088
邮箱：sales@mitron.cn
网址：www.mitron.cn

的0.1w相比），选择了一个4w功率放大器，但驱动功率保持在不超过1w，以降低带内谐波和降低相干噪声。

使用X-Microwave积木块的一个要求是使组件链中的相邻载波与其对应的GSG跳线之间精确对准。为了更好地理解以及预测失调对互连性能的影响，采用全波电磁仿真，包括参数分析，让其中GSG跳线的水平位置从0（完全对准）到6 mils（严重失调）。当对准距离标称值在3mils以内时，透射系数和反射系数超过20GHz时均表现良好。在实践中，互连的对准是通过使用内置在载板中的对准标记并在高倍显微镜下安装来实现的。模块组安装在定制夹具中，同时直流电源电路安装在背面。有源偏置芯片确保了GaN放大器的正确功率顺序。无源增益均衡器和表面贴装衰减器改善了作为频率函数的增益和回波损耗。图4显示了组装好的发射机和接收机模块。

性能

采用多端口矢量网络分析仪对发射机和接收机进行测试。发射机的性能可通过测量其散射参数得到验证。图5a显示了测量的发射机增益，表明与连接系统相比增加了约10dB。这是意料之中的，因为模块化发射机被设计为在相同的输入驱动器上有10倍的输出功率。整个频带的增益变化也在意料之中，这主要是由于功率放大器良好的频率响应。

对于接收机，采用固定中频的频率偏移模式来模拟FMCW工作状态。射频范围设置为覆盖从1至19GHz，包括雷达数字化仪支持的四个频段内四个不同的中频频率：直流至125、125至250、250至375和375至500 MHz。图5b显示了中频频率为100 MHz的接收机的测量转换增益。对其它几个中频频率的响应也几乎相同。而连接式测试台接收器的响应可供参考。在频带的上下两端，衰减的细微差别是由于滤波器响应的细微差别造成的；这些变化对雷达性能的影响几乎可以忽略不计。

试验台测试

利用带有1.72μs光纤延迟线的光电收发器对集成到雷达系统中的模块进行了测试。利用发射机和接收机之间的延迟线模拟850英尺固定范围内的单个目标，用于评估雷达的脉冲响应和灵敏度。利用信号路径中的同轴衰减器模拟远程信号所经历的大功率损耗，总计90dB。在机载相干平均后，接收机的中频输出经过雷达数据采集系统数字化，并在快速傅氏变换(FFT)前对记录的时域样本应用汉宁窗函数，以获得一组功率与距离的关系曲线（见图6）。

图6a中的两条轨迹来自具有相同低功率发射机的模块式和连接式接收机。为了方便比较，无论是距离还是幅度都经过统一的标准化处理。图中可以看到，两种情况下的雷达回波都在噪声上方约60dB处被检测到，环路灵敏度则达到了150dB。响应中的主瓣宽度约为0.55英寸（1.4厘米）。在此两种情况下，其距离分辨率均与16GHz带宽加汉宁窗时的预期相符合，同样，正如汉宁平滑法所预期的那样，两种情况下的旁瓣范围也都很小。另外请注意模块化接收机主响应周围的“裙部”的改进，这表明了其卓越的线性度和优异的相位噪声性能。这都是采用更高的集成度并使用超线性啁啾发生器和低相位噪声的LO驱动器放大器所期望看到的结果。

图6b显示了较高功率模块化发射机的性能。在这里，该系统的信噪比提高了10分贝，因此总的环路灵敏度为160分贝。主瓣的宽度、距离分辨率和低前缘副瓣得以保留。响应的不对称性和稍大的后缘副瓣归因于前面所说的发射机增益变化。虽然这种变化会对雷达的系统响应产生不利影响，但由于发射功率的增加而增加了额外的灵敏度，这一优势将被抵消。系统增益波动通常可以在后处理中校正。

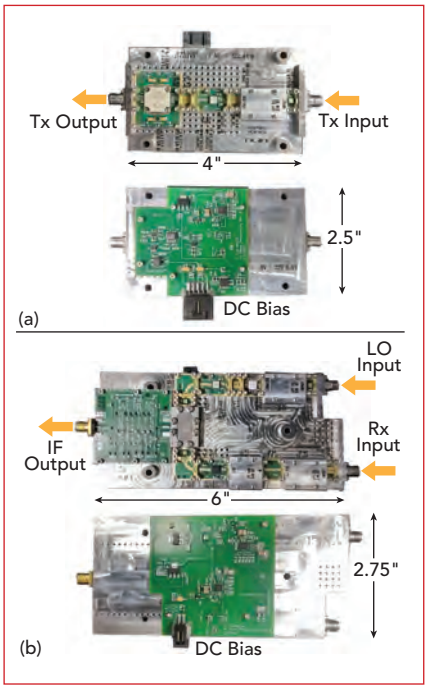


图4：Tx发射模块（a）和Rx接收模块（b）。

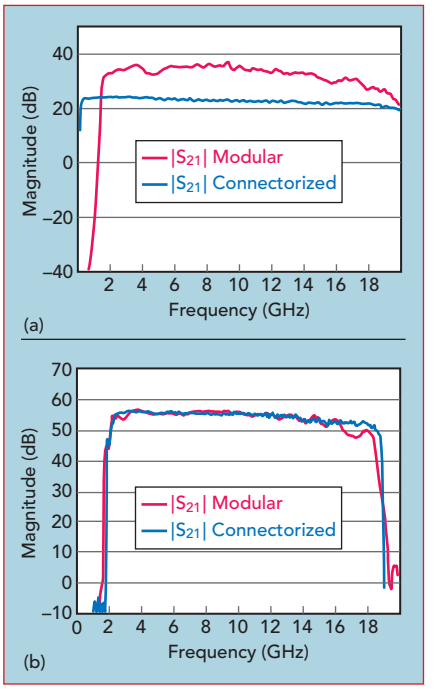


图5：测得的Tx插入增益（a）和Rx转换增益（b）。

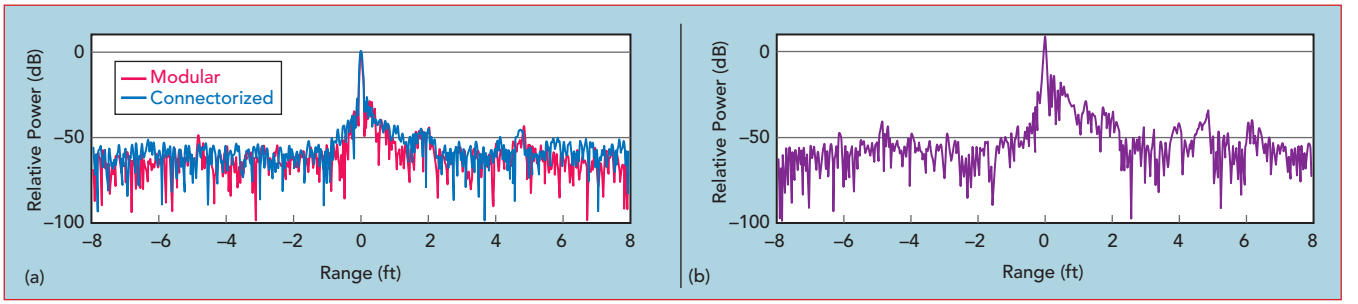


图6：带有相同低功率发射机的模块式以及连接式接收机（a）和带有较高功率发射机的模块式接收机（b）测得的雷达响应曲线。

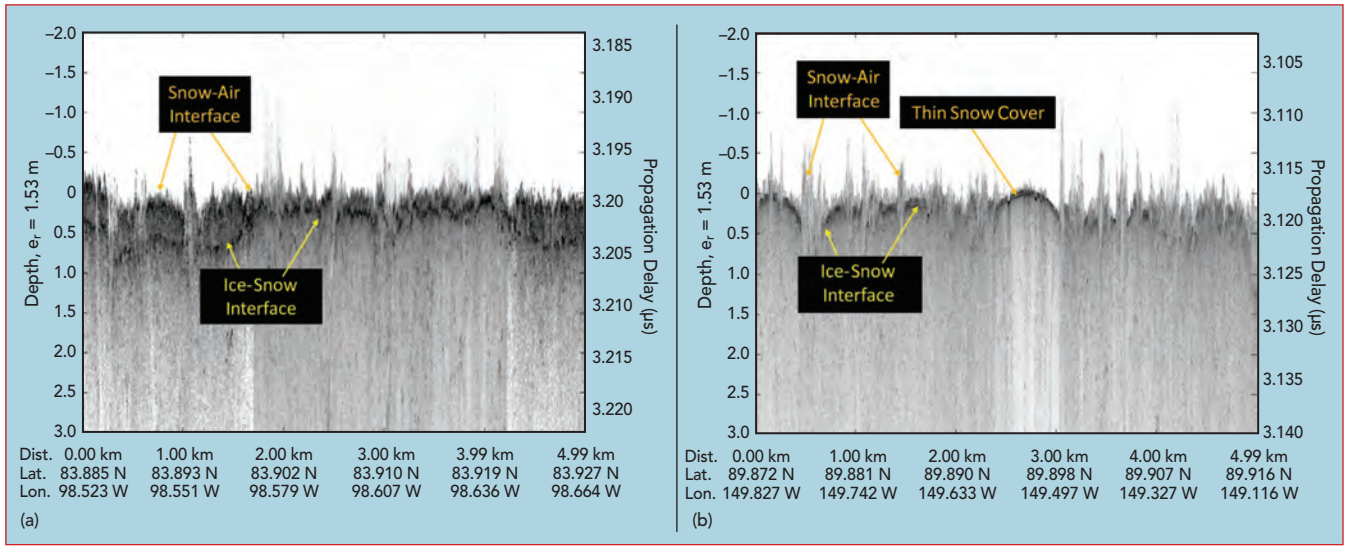


图7：在北极上空飞行测试得到的具有精细垂直分辨率的图像，显示北极海冰上有厚（a）和薄（b）的积雪。

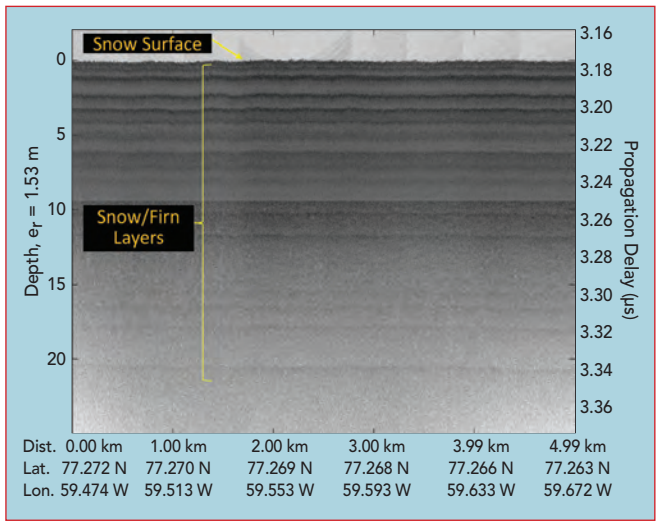


图8：格陵兰冰面的回声图数据显示雪在地表以下20米内堆积。

实地测试

作为美国航天局冰桥行动（NASA Operation IceBridge）的一部分，2018年对安装在美国航天局P-3飞机上的整套雷达系统进行了实地测试。发射机和接收机模被块安装在一个小型机架式机箱内，与系统其余部分协同工作，工作频率覆盖2至18 GHz。天线安装在飞机的“炸弹舱”，通过低损耗同轴电缆与雷达连接。在离地面1500英尺的高度测试并记录下了距离剖面图。图7显示了在北极附近两个5公里飞行段收集的数据中得到的不同海冰断面的雷达图像样本，对覆盖于冰面上的大于50厘米的厚雪和小于5厘米的薄雪，雷达充分展示了分辨空气-雪和雪-冰之间界面的能力。图8是从格陵兰冰原上收集的数据产生的回声图，显示了每年积雪变化的情况。■

致谢

作者非常感谢University of Kansas的J. Paden博士提供的雷达图片以及X-Microwave的J. Richardson先生提供有价值的技术支持。

参考文献

1. T. Barret, “History of Ultra Wideband Communications and Radar: Part II, UWB Radars and Sensors,” Microwave Journal, Vol. 44, No. 2, February 2001, pp. 22–52.
2. A. D. Pitcher, J. J. McCombe, E. A. Eveleigh and N. K. Nikolova, “Compact Transmitter for Pulsed-Radar Detection of On-Body Concealed Weapons,” IEEE International Microwave Symposium Proceedings, June 2018, pp. 919–922.
3. M. Oyan, S. E. Hamran, L. Damsgård and T. Berg, “Compact Airborne C-Band Radar Sounder,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 52, No. 10, October 2014, pp. 6323–6332.
4. C. Wamsley, D. Draper, T. Pett and S. Roark, “Synthetic Aperture Radar for Pipeline Right-of-Way Monitoring,” Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XV, September 2018.
5. Y. Kim, T. J. Reck, M. Alonso-delPino, T. Painter, H. P. Marshall, E. H. Bair, J. Dozier, G. Chattopadhyay, K. N. Liou, M. C. F. Chang and A. Tang, “A Ku-Band CMOS FMCW Radar Transceiver for Snowpack Remote Sensing,” IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, Vol. 66, No. 5, May 2018, pp. 2480–2494.
6. J. B. Yan, S. Gogineni, F. Rodriguez-Morales, D. Gomez-Garcia, J. Paden, C. J. Leuschen, D. A Braaten, J. A Richter-Menge, S. L. Farrell, J. Brozena and R. D. Hale, “Airborne Measurements of Snow Thickness Using Ultrawide-Band Frequency-Modulated-Continuous-Wave Radars,” IEEE Geoscience Remote Sensing Magazine, Vol. 5, No. 2, June 2017, pp. 57–76.
7. J. McDaniel, J. B. Yan and S. Gogineni, “Design, Integration and Miniaturization of a Multichannel UWB Snow Radar Receiver,” Microwave Journal, Vol. 59, No. 5, May 2016.
8. X-Microwave LLC, www.xmicrowave.com/.
9. F. R. Morales, C. Leuschen, C. Carabajal, A. Wolf and S. Garrison, “Measurements of Snow Cover Using An Improved UWB 2-18 GHz Airborne Radar Testbed,” Proceedings of the IEEE Radar Conference, April 2018.
10. J. McDaniel, “Design, Integration, and Miniaturization of Multichannel Ultra-Wideband Snow Radar Receiver and Passive Microwave Components, Master’s Thesis,” The University of Kansas, Lawrence, 2015.
11. A. Melzer, A. Onic, F. Starzer and M. Huemer, “Short-Range Leakage Cancelation in FMCW Radar Transceivers Using an Artificial On-Chip Target,” IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Vol. 9, No. 8, December 2015, pp. 1650–1660.
Monopole Antenna,” IET Microwaves, Antennas and Propagation, Vol. 4, No. 4, April 2010, pp. 518–525.
19. C. Igwe, ”Axial Ratio of Antenna Illuminated by an Imperfectly Circularly Polarized Source,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 35, No. 3, March 1987, pp. 339–342.
20. B. Y. Toh, R. Cahill and V. F. Fusco, “Understanding and Measuring Circular Polarization,” IEEE Transactions on Education, Vol. 46, No. 3, August 2003, pp. 313–318.

Microwave Journal China 微波杂志
免费下载白皮书
探索可能性，迈向5G之路
• 5G：RF的未来。
• 氮化镓(GaN)：实现5G的关键技术。
• GaN：不再只是国防领域。
• 小基站助力5G连接。
• 利用GaN技术实现5G移动通信：为成功奠定坚实基础。
www.mwjournalchina.com/white_paper.asp