

毫米波雷达系统射频前端测试方法

郭大路^{1,2}, 李珈莹^{3*}, 乔灵博^{1,2}, 程亚运⁴

- (1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. 危爆物品探测技术国家工程研究中心, 北京 100084;
3. 北京东方波泰无线电频谱技术研究所有限公司, 北京 100043;
4. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 通过研究基于毫米波雷达的前端架构、原理模型, 以及毫米波元器件通用测量方案, 提出了针对高频段雷达射频前端核心指标的一系列测试方法。工作围绕信号质量、收发天线和接收链路三部分展开, 对信号噪声、扫频性能、天线方向图和噪声系数等核心指标进行了详细分析和对应的测试方案设计。在测试条件限制, 尤其缺少毫米波频段网络分析仪等情况下, 重点讨论了利用频谱分析仪配合频率扩展模块, 进行指标测试和性能评估的实用创新方法。同时结合数学模型和电路原理, 提出了改善相关指标的可行手段。该研究对于优化和改进毫米波硬件设计, 提升雷达系统整体性能具有积极意义。

关键词: 毫米波雷达前端; 频谱分析仪; 信号测试; 天线方向图; 噪声系数

中图分类号: TN952

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025085

引用格式: 郭大路, 李珈莹, 乔灵博, 等. 毫米波雷达系统射频前端测试方法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(5): 499-505.

GUO Dalu, LI Jiaying, QIAO Lingbo, et al. Front-end testing method based on millimeter wave radar system [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(5): 499-505.

Front-End Testing Method Based on Millimeter Wave Radar System

GUO Dalu^{1,2}, LI Jiaying^{3*}, QIAO Lingbo^{1,2}, CHENG Yayun⁴

- (1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. National Engineering Laboratory for Dangerous Articles and Explosives Detection Technologies, Beijing 100084, China;
3. Beijing OET Spectrum Institute Limited Company, Beijing 100043, China;
4. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the front-end architecture, radar theoretical model, and the millimeter wave components general measurement solution, a range of test methods for the key parameters of the radar RF front-end are proposed in the high frequency band. Three parts are involved in the work: signal quality analysis, transceiver antenna testing, and receive link testing. The signal noise, frequency sweep performance, antenna pattern and noise figure are discussed in detail, and the corresponding test plans are designed. Practical and innovative methods for the parameter measurement and performance evaluation are discussed and provided, focusing on a spectrum analyzer equipped with a frequency extension module. This approach is particularly useful when test conditions are limited, especially when a millimeter wave network

收稿日期: 2025-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61901242, 61731007)

作者简介: 郭大路(1988—), 男, 工程师, 博士, 主要从事毫米波、太赫兹电路与系统研究。E-mail: guodalu@mail.tsinghua.edu.cn。

* 通信作者: 李珈莹(1984—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事无线电监测和频谱管理研究。E-mail: lijy@cetsi.com。

analysis is lacking. Referring mathematical model and circuit principle, this work also proposes feasible means to optimize the parameters, which have great significance to improve the hardware and the whole system performance.

Key words: millimeter wave radar front-end; spectrum analyzer; signal test; antenna pattern measurement; noise figure

0 引言

随着电磁波频谱的不断拓展,近十余年间,毫米波技术在雷达和通信等领域陆续得到了广泛应用^[1]。由于毫米波波长相对于微波更短,波束更窄,方向性更强,加之其充足的带宽,在雷达应用中,同等口径下结合各种算法能够实现更高的分辨率。在安检成像、自动驾驶、军事制导、工业检测和生物监测等诸多方向,毫米波雷达技术具有不可替代的实用价值。

由于频谱竞争的加剧,同时对工作带宽和波束性能的高要求,毫米波雷达系统的典型工作频率从早期Ka波段(24~26.65 GHz),逐步发展到了V波段(59~64 GHz)和E波段(76~81 GHz),以及W波段(92~96 GHz),甚至更高到太赫兹波段。毫米波雷达系统电路也由分立元器件组合搭建,演进为高密度互联电路、单模块集成封装和数模混合集成系统等结构模式^[2]。毫米波雷达前端高频率、大带宽、易损耗、无源元器件与非线性电路高度混合集成的特点,对射频前端功能测试和性能评估带来了诸多挑战。

在毫米波频段,能否实现雷达系统整体的高灵敏度和分辨率,良好性能的射频前端至关重要。不少业内研发人员对毫米波信号发射和接收端核

心指标理解薄弱,同时,对毫米波元器件的测试限于基础操作。目前,通用射频仪表的最高测试频率只能到50 GHz或67 GHz。高出工作频段的毫米波元器件参数测试,需要网络分析仪配合外部频率扩展模块搭建复杂的专用测试系统。该方法需要高端硬件选件支持,设置繁琐复杂,实现成本较高。本文基于毫米波雷达前端架构和频谱分析仪,分析链路前端各节点的关键参数与指标,并对应研究设计较为简化可靠的参数测量和性能评估方法。相关的测试方法研究对于射频前端的反馈优化和设计,以及提升雷达系统整体性能具有重要价值和意义。

1 毫米波雷达前端架构与分析

1.1 雷达射频前端架构

与传统微波雷达类似,毫米波雷达基于惠更斯-菲涅尔原理工作,即发射的毫米波信号在不同折射率界面处发生反射,根据接收到的反射信号处理获取目标的距离、角度、速度、材质或形状等扩展信息^[3]。调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)技术^[4]的出现,使得雷达系统在保证分辨率和测距精度的前提下,结构简单更易硬件实现。

图1为典型的毫米波雷达前端组成架构。

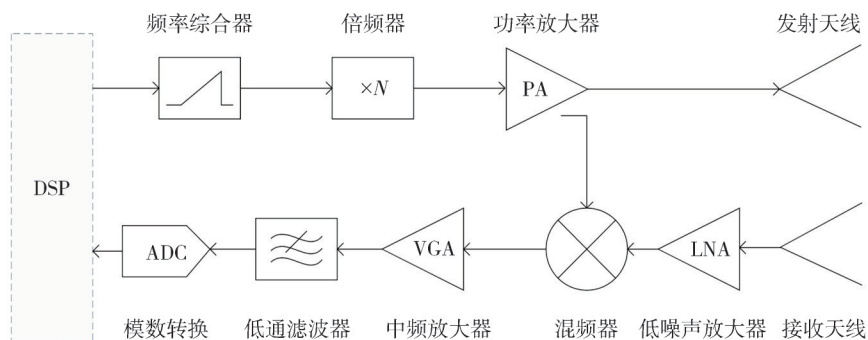


图1 毫米波雷达前端架构示意

Fig. 1 Millimeter-wave radar front-end architecture

由于满足需求的高频段毫米波信号难以直接产生,因此,由数字电路控制低频段的频率综合

器(通常为X或Ku频段的锁相环或直接数字合成器)生成。所产生的信号首先进入倍频器实现频

率的变换,随后由放大器推至高功率并馈入天线发射。

位于一定距离处的目标散射的微弱回波信号,通过接收天线首先被低噪声放大器进行电平放大后,进入混频器射频输入端。混频器的本振输入由发射链路端信号耦合或功分电路提供,以保证收发通道间的相参性。由于设计发射信号的频率变化特性和发射信号经目标反射的时延,混频器中频输出为含有目标信息的低频率信号。

上述发射和接收通道共同组成了毫米波雷达前端。中频信号经中频放大器、抗混叠低通滤波器后,进入模数转换电路采样转化为数字信号。最终数据由信号处理单元进行算法处理,并反演获得目标信息。

1.2 射频前端关键指标分析

以最大探测距离 R_{\max} 作为系统特性的目标函数,雷达方程模型通常用于评估雷达系统的整体性能^[5]。根据电磁波空间辐射和收发传播模型推导,雷达工作距离与各指标间关系为

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma E_i(n)}{k T_0 B_n F_n \left(\frac{S}{N}\right) (4\pi)^3 L_t L_r} \quad (1)$$

式中: P_t 为发射信号功率; G_t 和 G_r 分别为发射和接收天线增益; λ 为工作中心频率波长; σ 为目标散射截面积; $E_i(n)$ 为 n 个脉冲累积实现的增益; k 为玻尔兹曼常数; T_0 为工作温度; B_n 为系统接收带宽; F_n 为由系统信噪比换算得来的噪声系数; L_t 和 L_r 分别为发射链路和外界传输的损耗。

由方程模型可知,对特定目标的探测,除增加发射功率 P_t 和脉冲累积次数外,减小系统接收链路带宽 B_n 、噪声系数 F_n , 以及内部信号传输损耗 L_t 等方式可提升系统性能。因此,有必要对系统各参数的测量和获取方法进行展开分析。

1.3 毫米波元器件测试

为验证雷达射频前端性能和工作状态,需要对图 1 原理框图中的各元器件逐一进行测试。其中,包含频率综合电路的生成信号频率、功率和信号质量,倍频器的带内输出功率和谐波抑制度,功率放大器的增益、饱和输出点,收发天线的驻波、方向图和增益,低噪声放大器的增益、噪声系数,混频器的变频损耗,以及定向耦合器的插入损耗、耦合度和定向性等诸多重要参数。

毫米波前端常用测试工具主要有矢量网络分析仪、频谱分析仪、信号发生器和功率计等射频仪表。网络分析仪作为 S 参数基础测量工具,在放大器增益、天线驻波,以及无源器件的传输、损耗等参数测试中不可或缺^[6]。配有选件支持的网络分析仪可进一步进行器件变频测试、噪声系数测试和信号频谱分析等。

对于超过仪表测量上限的信号,频谱分析仪主机配合外部的高次谐波混频器能够实现测量频率的扩展^[7]。频谱仪内部扩展出的本振和中频接收端口,与混频器构成的频率扩展模块组合,实现对测量信号的下变频转换。根据已知的扩展模块混频谐波次数和变频损耗,校准和补偿获得原信号的频率和功率幅度。该方案利用单颗谐波混频器实现,简单实用,成本较低。通过频率扩展,频谱仪可完成毫米波频段一系列前端指标评估。

2 毫米波收发前端测试方法

2.1 雷达发射信号测试

在 FMCW 体制系统中,雷达的距离分辨率由发射信号带宽决定,速度分辨率则由 Chirp 信号的脉冲周期决定。频率综合电路根据设计参数生成低频段扫频信号,经倍频放大链路输出,实现所需频段和功率的发射信号。

信号的质量可由相位噪声、杂散和扫频线性度等参数从不同角度表征^[8]。相位噪声通过表征信号相位随机变化的情况反映频率稳定性,主要表征近载波噪声。高性能雷达的相噪指标需要足够好,才能避免较弱信号被噪声淹没,实现慢速动目标的探测^[9]。

以锁相环组成的频率综合电路为例,近端相位噪声主要来源于参考晶体整荡器、分频器和鉴相器电荷泵等,中端则来源于环路滤波器,远端主要来源于压控震荡器。后级倍频放大链路中,除自身产生的附加噪声,如 $1/f$ 噪声、PM 白噪声级联,以及非线性变换的 AM-PM 转换噪声和远端谐波成分外,同时存在对输入信号 N 次倍频转换增加的相位噪声。此时频率和相位参数均会增大 N 倍,即相位噪声对应抬高 $20\lg N$ dB。因此,频率综合电路作为前级,其性能在发射链路中具有决定因素。

相位噪声的测试评估可通过有相位噪声测试选件的频谱分析仪或信号源分析仪实现。通过设置频

综电路为连续点频输出状态,接入仪表,可直观得到该载波频点下近端(通常最大频偏 ≤ 100 MHz)的噪声分布情况。倍频放大后的毫米波信号可利用频率扩展方式进一步评估相噪指标。

远端的信号噪声作为杂散,包含了谐波、寄生成分和互调产物等。由于倍频器原理是利用晶体管的非线性特性筛选出所需的谐波成分,因此,原输入信号、其他阶数谐波和干扰噪声同样不可避免地泄露叠加进信号中。而两个以上频率成分的信号在变频和放大非线性电路中,进一步组合出现互调失真,从而产生更多的频率分量。

对杂散的评估分析,同样可设置发射机为点频模式,利用频谱分析仪进行直观测试频谱。在连接频率扩展模块时,仪表无法直接分辨混频模式下的假镜像频率和本振谐波,会显示出更多的虚假频率成分,干扰信号的分析。此时可采用镜像频移或抑制法,通过调谐本振频率识别出真实信号。

信号的相位噪声和谐波杂散指标体现了信号的质量,并间接反映发射端的信噪比情况。为改善信号的噪声性能,有以下可行方法:选型低相位噪声的晶振(如飞秒级或恒温晶振)、锁相环和压控振荡器等器件,为锁相环电路设计合适带宽的环路滤波器抑制带外噪声等。

理想的线性调频信号在设计周期内,频率随时间线性变化。受压控振荡器、锁相环等器件自身的相位噪声,以及闭环反馈下频率建立时间的影响,实际生成的信号与理想斜坡相比存在抖动偏差。对扫频信号的质量评估,可引入调频线性度指标,从时间-频率域反应信号的频率变化稳定程度。利用频谱仪(或示波器)和矢量信号分析软件(如89600 VSA),对输入信号高速采样并进行拟合分析,可得到信号的线性度等相关数据(精度可至 10^{-5} 数量级)。

对信号进行矢量分析需要频谱分析仪具备覆盖扫描频率的实时带宽。数百 MHz 至 GHz 级别的实时带宽,仅有部分高端仪表选件支持。当硬件配置不满足时,可通过频谱仪的迹线最大保持(Max hold)设置,实现信号在频域的较长时间累积。通过观察信号累积后的频谱进行直观分析。

图2为频谱仪在75~110 GHz频段内,对工作频段92~96 GHz的发射链路生成信号进行频谱累积的迹线显示效果。通过观察带内输出,可判断信号的频率扫描起始点是否正确,中间有无缺失频点。信号的输出平坦度、带外谐波和杂散信

号等信息也同时反映在测试图中。为实现较高的累积效率,选用较大的分辨率带宽(Resolution Bandwidth, RBW)设置,可减小累积时间。此外,输入扩频模块的信号功率应首先进行合适的预衰减(通常小于 -10 dBm),使谐波混频器工作在线性区间,避免其饱和出现测试错误。该方法的测量精度与设备硬件以及频段相关,通常在 ± 1 dB量级。

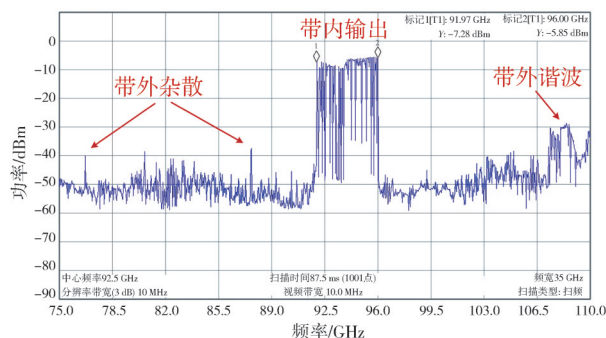


图2 扫频信号累积频谱测试

Fig. 2 Cumulative spectrum of sweep signal

上述方法同样适用于低频段频综电路的输出信号评估。为保证输出功率的平坦度,可在频综电路输出端加入限幅器;或引入驱动放大器,首先进行饱和和放大,再根据倍频链路的功率需求进行精确衰减。

为进一步降低发射信号的杂散和谐波影响,可选用噪声较低的非线性器件搭建倍频器和功率放大器。同时增加滤波电路,减少变频过程中不必要的谐波成分。此外,可优化电源质量和信号线路布局,如使用更低噪声的线性稳压器件,并提高信号传输中的屏蔽,减少外部电磁干扰的影响等。

2.2 雷达收发天线测试

作为空间能量转换和空域信号处理的天线是射频前端中最重要的元件之一。为减小信号损耗,实现小尺寸与多元阵列,除传统的反射面、透镜和波导腔体天线等之外,与有源电路混合集成的贴片、封装和片上天线等形式也广泛应用在毫米波雷达中^[10]。高频率、高集成度的特点给毫米波频段天线的测试带来了挑战。

除驻波外,方向图和增益也是天线的核心指标。由方向图数据可进而评估天线的增益、波束形状和副瓣电平。近场、远场和紧缩场等不同测试方式下,收发天线间的距离要求不等。传统的天线方向图测试,将待测和标准天线分置连接

于矢量网络分析仪两端口直接测量。通过发射端产生激励信号对应监测参考电平,另一端进行测量接收,由机械平台运动至不同位置的收发电平比较(即 S_{21} 参数)得到辐射方向图。该方式主要适用于频率较低、传输线损耗较小的频段天线(通常 18 GHz 以下)。在毫米波频段,主机直连的同轴电缆的相位波动和传输损耗变大。更高频段的外部频率扩展,需要多根射频电缆和供电连接,加之波导接口的模块体积较大,测试中面临较多工程问题。尤其是远场距离下,系统部署变得臃肿复杂,成本随之变高。

此时可利用信号源和频谱分析仪进行变频模式下的天线方向图测量。收发两端满足远场测量条件,即待测天线和源天线间距离 $R > 2D^2/\lambda$ 。此时,源天线的球面波到达被测天线边缘与中心的相位差小于 $\pi/8$,可近似作为平面波处理。测试结果对天线相位中心和波前相位差不敏感,同时收发天线间耦合、外部环境的多次反射影响较小,单转台即可实现旋转扫描。

如图 3 所示,将待测天线作为发射端(根据实际情况,收发天线可易位互换)。通过外部信号发生器或内部集成的有源倍频链路直接产生信号,馈入待测天线发射。接收天线与频率扩展模式下的频谱仪连接,频谱仪设置为零频宽状态($span=0$),此时仪表横轴显示为时间。接收频率与发射端相同。为避免收发两侧存在频率误差,频谱分析仪的参考频率与发射端同步,或选用较大分辨率带宽($RBW \geq 5$ MHz)。为滤除噪声带来的迹线波动,视频带宽适当调窄,可设置为 1 kHz 附近。收发天线的机械轴调整为水平共线,可参考显示电平作为对准辅助。频谱仪扫描设置为单次触发,扫描时间与转台运动时间相同。转台设置启停点后,配合频谱仪同时触发扫描,完成天线方向图的测试数据记录。

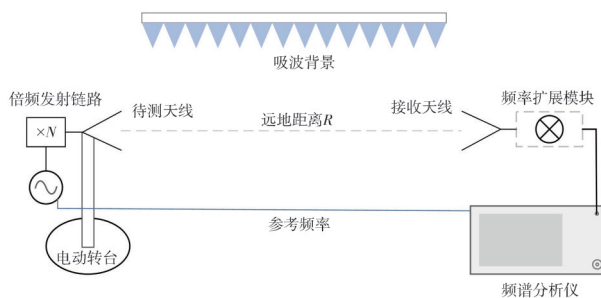


图 3 频谱仪进行天线方向图测试

Fig. 3 Antenna pattern test using spectrum analyzer

对于不支持外部频率扩展的频谱仪,可将接收混频器改为对应频段的检波器。与此同时,发射信号源设置模拟振幅(Amplitude Modulation, AM)调制状态,在发射载波上调制一个低频连续波(如 1 MHz)。频谱仪的中心频率对应设置为被调制的低频信号,其余设置不变。当接收信号功率位于检波器工作线性区时,检波输出为 AM 信号的调制包络,该频率下电平的变化可对应反推出原始接收电平的情况。

对于集成有源发射电路的待测天线,或缺少带调制选件的信号源情况,可将检波器输出改连接至示波器输入,示波器适当降低采样率设置,配合一定存储深度以满足转台旋转扫描时间内的测试。此时检波器对毫米波信号响应为直流电平显示,配合转台位置同步控制,可同样得到待测天线的方向图。

待测天线可拆装情况下,将待测天线换为标准增益天线。前后天线的位置和发射链路状态均不变,进一步进行方向图测试。利用三天线法^[11],根据标准增益对测试电平进行换算,可得到待测天线的实际增益。由于对测试数据进行归一化处理,仅需获取其中的相对变化,因此,方向图的测试精度主要取决于接收机的线性度,在实际中可达到较理想效果(误差通常小于 10^{-2})。

2.3 信号接收链路测试

在接收机带宽固定情况下,接收链路的噪声系数成为影响雷达性能的核心参数。噪声系数描述为系统链路在输入端信噪比和输出端信噪比的比值。在低噪声放大器、混频器和中频放大器级联情况下,接收链路的整体噪声系数计算为

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2}, \quad (2)$$

式中: F_1 和 G_1 分别为低噪声放大器的噪声系数和增益。在阻抗匹配条件下,无源混频器的噪声系数 F_2 可等效为其变频损耗(增益 $G_2 = -F_2$)^[12]。由式(2)可知,接收链路中前级的低噪声放大器对整体的噪声系数最为关键。低噪声放大器的性能直接影响系统的信噪比,很大程度决定了雷达系统的探测灵敏度。为了实现链路噪声最低,低噪声放大器增益足够高前提下(未达到饱和),需要自身噪声系数尽可能低。

放大器等元器件的噪声系数测试通常利用 Y 因子法或冷源法。具备矢量网络分析仪的条件

下,通过提前精确测量的待测件增益 G ,结合输出功率 P_{out} ,能够在不依赖外部噪声源的情况下测定出噪声温度 T_e ($T_0=290$ K, k 为玻尔兹曼常数, B 为带宽)。由噪声温度可得到元器件对应的噪声系数 F' 。在毫米波高频段缺少商用噪声源,对噪声系数精度要求高的场景下,可优先采用冷源法^[13]。

$$T_e = \frac{P_{out}}{GkB} - T_0, F' = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (3)$$

网络分析仪配置条件不满足时,可利用Y因子法进行测量。Y因子定义为噪声源在开启和关闭时($T_{cold}=T_0$)两种状态下的输出噪声功率比值 $Y=P_{out,hot}/P_{out,cold}$ 。该方法的本质是在已知准确校准的超噪比(Excess Noise Ratio, ENR)条件下,分别测量冷热两种状态下的输出功率,联立求解计算得到测试中设备的噪声温度 T_e 和增益 G 。根据Y因子,解方程可得 T_e 和 F' ,

$$T_e = \frac{T_h - YT_h}{Y - 1}, F' = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (4)$$

式中: $T_h = T_0(ENR + 1)$, $T_{cold} = T_0$ 。

在高频段,频谱分析仪或噪声系数分析仪同样无法直接使用。如图4所示,通过频率扩展模块对输入信号进行下变频,配合毫米波噪声源和外部信号源(作为扩频模块的本振信号),可进行毫米波频段的噪声测试。

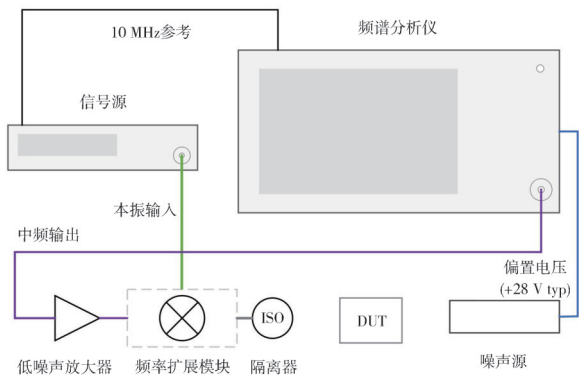


图4 频谱仪测量毫米波元器件噪声系数

Fig. 4 Millimeter-wave component noise figure measurement using spectrum analyzer

首先,对噪声源ENR和下变频链路的变频损耗进行校准测量,获得扩频模块的变频损耗 L_M 和噪声系数 F_M 。随后,将待测放大器插入噪声源和扩频模块间进行第二次测量,得到放大下变频接收链路的整体增益 G_R 和噪声系数 F_R 。由噪声级联关系,可进一步计算得到前级毫米波放大器 F_{LNA} 的噪声系数为

$$F_{LNA} = F_R - \frac{F_M - 1}{G_R - L_M} \quad (5)$$

同样,对毫米波混频器评估时,将扩频模块替换为待测件,基于上述方法可获得相应的变频损耗和噪声系数。为提高测量精度,应选用ENR和待测件噪声系数相近的噪声源。在缺乏毫米波频段商用噪声源时,可尝试采用毫米波射频源替代热源输入,等效模拟噪声源开启场景^[14]。该方式适用于待测器件噪声偏高,对测量不确定度要求不高的评估场合(测量误差百K量级)。

3 结论

复杂且高成本的测试方案给目前毫米波频段的雷达前端性能测试带来了一系列困难。在缺乏完善测试条件下,本文分别进行了发射信号评估、天线方向图测试,以及接收机噪声系数测试等关键环节的研究,并给出利用频谱分析仪等进行若干相应测试和评估的实用方法。相关方法思路可同样推广应用于毫米波频段通信、遥感等系统的测试中。

参考文献:

- [1] 洪伟,余超,陈继新,等.毫米波与太赫兹技术[J].中国科学:信息科学,2016,46(8):1086-1107.
HONG Wei, YU Chao, CHEN Jixin, et al. Millimeter wave and terahertz technology [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2016, 46(8): 1086-1107. (in Chinese)
- [2] HASCH J, TOPAK E, SCHNABEL R, et al. Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 GHz frequency band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(3): 845-860.
- [3] IOVESCU C, RAO S. The fundamentals of millimeter wave radar sensors [EB/OL]. [2024-12-23]. <https://www.ti.com/lit/pdf/spyy005>.
- [4] CHONG J S, WEI X F. Millimeter-wave LFM CW radar water surface detection experiment and its imaging algorithm[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2017, 8(1): 46-53.
- [5] BARTON D K. Radar system analysis and modeling [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005, 20(4): 23-25.
- [6] DUNSMORE J P. Handbook of microwave component measurements: with advanced VNA techniques [M]. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [7] VONDRAN DAVID J. Extending millimeter-wave

- measurement systems with harmonic mixer technology [J]. *Microwave Journal*, 2011, 54(8 Suppl.): 62-70.
- [8] AYHAN S, SCHERR S, BHUTANI A, et al. Impact of frequency ramp nonlinearity, phase noise, and SNR on FMCW radar accuracy[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(10): 3290-3301.
- [9] SIDDIQ K, HOB DEN M K, PENNOCK S R, et al. Phase noise in FMCW radar systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(1): 70-81.
- [10] ZHANG Y, MAO J. An overview of the development of antenna-in-package technology for highly integrated wireless devices[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(11): 2265-2280.
- [11] LU H C, CHU T H. Antenna gain and scattering measurement using reflective three-antenna method [C]// *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1999: 374-377.
- [12] POZAR D M. *Microwave engineering: theory and techniques* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2021.
- [13] PEPE D, BARNETT C, D'AMORE G, et al. On-chip millimeter-wave cold-source noise figure measurements with PNA-X[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(12): 3399-3401.
- [14] GUO D, LI M, QIAO H, et al. Design and measurements of a terahertz quasi-optical mixer integrated lens antenna[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(1): 113-116.