WHITE PAPER — 白皮书

评估信号质量
以确保太赫兹通信系统性能

安立白皮书 · EVM、相位噪声与 S 参数的三步定位法



安立 Anritsu

测试与测量解决方案 | 太赫兹与 6G 通信测试 | 2026 年 10 月

Onetest 仪器资源库 整理发布 | 原文来源：安立通讯科技 Anritsu《评估信号质量以确保太赫兹通信系统性能》。本文仅供技术参考，商标与内容版权归安立所有。

01 引言

超过 100 GHz 的亚太赫兹（Sub-THz）与太赫兹（THz）频段正被研究用于 6G 之后的无线通信。这些频段可用的大带宽能够实现高速数据传输，针对收发信机、天线和调制方案的研究已经广泛展开 [1]。此外，由于太赫兹信号受大气吸收与散射的影响显著，传播特性与信道建模也已成为重要的研究课题 [2]。

太赫兹收发信机采用多种性能指标进行评估，包括误差矢量幅度（EVM）、相位噪声和 S 参数 [3]–[5]。例如，针对太赫兹频段通信调制方案的研究表明，仅评估相位噪声是不够的，还必须考虑峰均功率比（PAPR），因为当同时考虑这两种效应时，关于各调制方案相对性能的结论可能发生改变 [3]。此外，亚太赫兹研究通常会综合使用多项性能指标，包括误码率（BER）、EVM、邻道功率比（ACPR）和 PAPR，因为通信性能受相位噪声、I/Q 失配和功率放大器（PA）非线性等多种损伤因素的影响 [4]。

在此背景下，仅凭EVM 的恶化无法判断其根本原因是相位噪声、PA 非线性还是频率响应劣化。同样，仅凭相位噪声或频率响应的测量结果，也可能不足以确定其对整体系统性能的影响，或找出最有效的改进措施 [3], [4]。

本文聚焦于太赫兹通信系统的射频特性表征与频率响应评估，阐述从 EVM、相位噪声、频率响应和 S 参数测量中能够获得哪些信息，并讨论为查明性能劣化的根本原因所需的补充评估。

02 太赫兹通信收发信机的关键性能评估指标

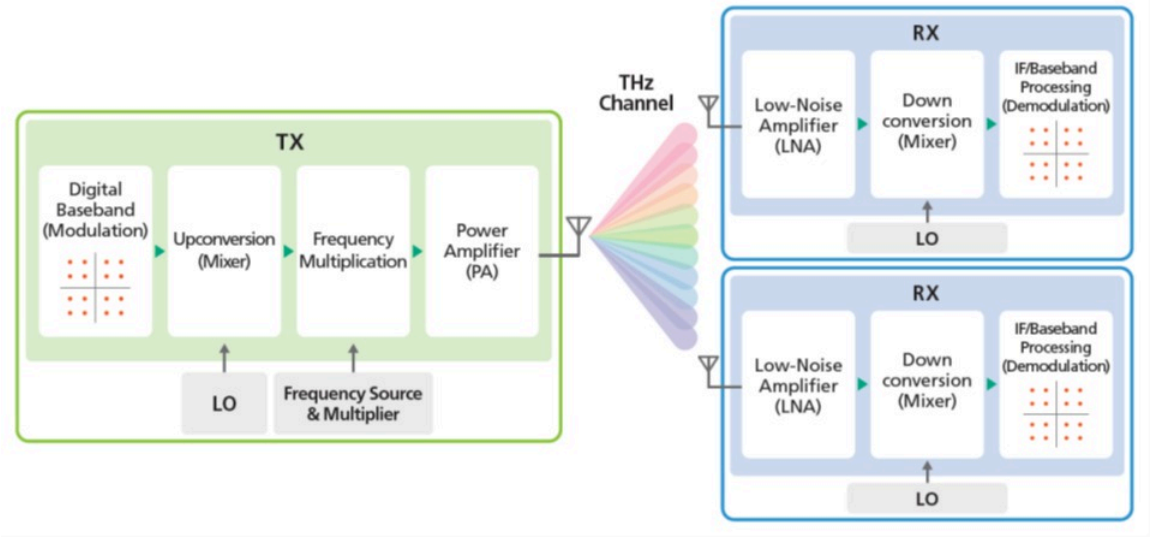


图 1：太赫兹通信系统配置示例

太赫兹通信预期通过使用数十GHz量级的带宽来支持大容量数据传输，同时借助 256-QAM、1024-QAM 等高阶调制方案提升频谱效率。与此同时，太赫兹频段增大的自由空间路径损耗对通信距离和链路预算设计有重大影响 [6]。

高阶调制与宽带信号的使用还会增加系统对以下因素的敏感性：振荡器的相位波动、频率变换级的频率响应特性、放大器线性度，以及射频信号通路的传输与反射特性。由于这些因素直接影响接收信号质量，而接收信号质量最终决定了可实现的数据速率和调制格式，因此由振荡器、频率变换级、放大器和射频信号通路构成的收发信机，是决定太赫兹通信系统整体性能的关键环节 [5], [6]。

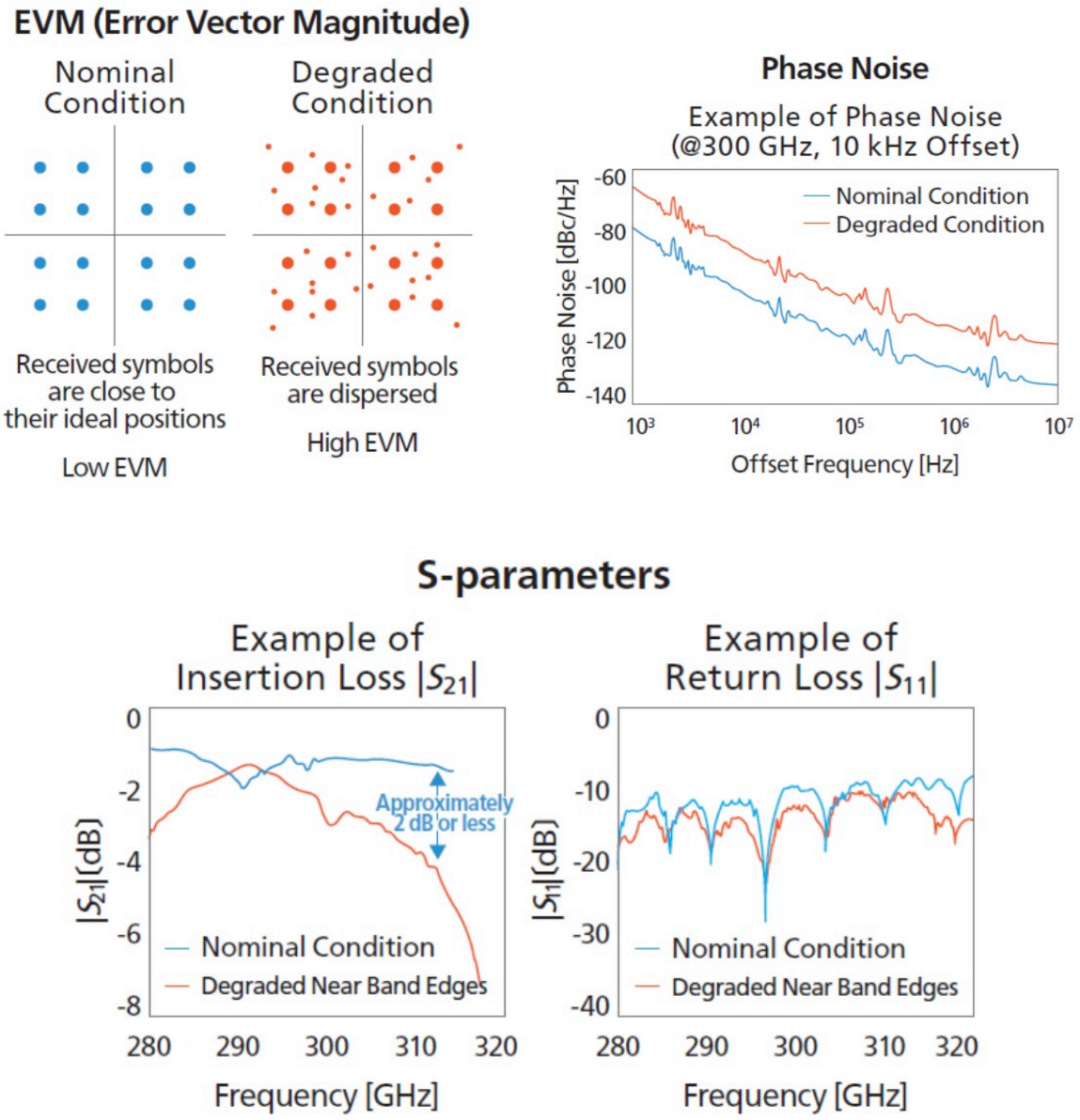


图 2：正常条件与劣化条件下测量结果的对比。EVM 反映调制精度，相位噪声表征信号稳定性，S 参数描述射频传输与反射特性

太赫兹通信收发信机通常需要评估以下性能特性：

> 256-QAM、1024-QAM 等高阶调制信号的信号质量

> 振荡器与频率变换级的相位稳定性

> 宽带信号传输时信号通路的传输与反射特性

EVM、相位噪声和 S 参数被广泛用于评估这些特性 [2]–[5]。

EVM 是量化接收信号与其理想参考信号之间偏差的指标，广泛用于评估高阶调制信号的质量。EVM 按下式计算：

$$EVM = \frac{\sqrt{\Sigma |S_{meas} - S_{ideal}|^2}}{\sqrt{\Sigma |S_{ideal}|^2}}$$

其中：

S_ideal： 理想信号

S_meas： 实测信号

EVM 通常以百分比（%）或 dB 表示。相位噪声是用于评估振荡器和频率变换级产生的相位波动的指标。根据 IEEE Std. 1139 的定义，相位噪声是距载波指定频偏处的噪声功率与载波功率之比（归一化），计算公式如下：

$$L(f) = 10\ log_{10}\left(\frac{S_\phi(f)}{2}\right)$$

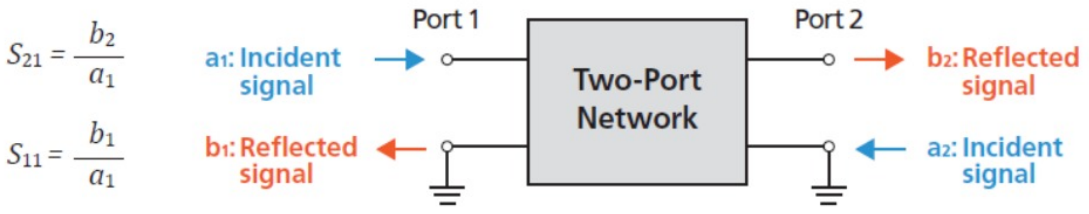
其中：

L(f)： 频偏 f处的单边带（SSB）相位噪声

Sϕ(f)： 频偏 f处相位波动的功率谱密度

相位噪声通常以 dBc/Hz 表示。太赫兹收发信机普遍使用倍频器。在理想的倍频过程中，相位噪声按 20logN dB 增加（N 为倍频系数）。因此，经过倍频级之后，振荡器的相位波动会变得更加显著。正因如此，应对包括频率变换级在内的整个信号产生链路评估相位稳定性，而不能只评估参考振荡器本身 [3], [5]。

S 参数是表征信号通路传输与反射特性的指标，广泛应用于宽带信号的频率响应评估。最常用的 S 参数定义如下：



其中：

a1：端口 1 的入射信号

b1：端口 1 的反射信号

b2：端口 2 的传输信号

S21：传输特性（正向传输系数）

以 300 GHz 收发信机的 256-QAM 信号评估为例：QPSK 信号可能接收正常，而 256-QAM 信号的星座点却出现发散，导致 EVM 超出目标规格。这是因为 256-QAM 的判决边界比 QPSK 紧密得多，微小的幅度和相位误差对接收信号质量的影响更大。

在亚太赫兹通信研究中，通常综合使用 BER、EVM、ACPR、PAPR 和频谱效率等多项指标来比较通信方案 [2]。BER 表示接收比特流中错误比特的比例，用于评估端到端传输性能；EVM 则量化实测星座点与理想星座点之间的差异，用于评估调制质量。在收发信机开发过程中，EVM常用于评估调制质量的变化，而 BER 用于评估数据传输性能[4]。

在评估本振链路时，相位噪声是关键测量参数。太赫兹收发信机通常通过倍频器和混频器将振荡器输出上变频至太赫兹频率。由振荡器或频率变换级引入的相位波动，通常表现为接收端星座点的扩散。通过测量相位噪声，工程师可以评估本振与频率变换级产生信号的稳定程度。

比较太赫兹通信调制方案的研究报告指出，当同时考虑相位噪声和 PAPR 时，不同调制格式的相对性能可能发生改变 [3]。这一发现表明，在太赫兹通信中，相位噪声会直接影响调制格式的选择和系统性能评估。

例如，某系统使用 QPSK 时性能令人满意，而使用 256-QAM 时 EVM 劣化。此时应通过相位噪声测量来评估本振链路的信号质量。太赫兹调制方案的对比研究表明，当同时考虑相位噪声和 PAPR 时，评估结果会有所不同 [3]。这些结果凸显了在评估高阶调制方案时相位噪声评估的重要性。

对于宽带信号评估，使用 S 参数来表征太赫兹信号通路的频率响应。例如，在收发带宽为 20 GHz 的信号时，EVM 在频带中心可能保持在目标范围内，但仅在带边附近劣化。此时应使用矢量网络分析仪（VNA）测量 S 参数，以识别信号带宽内的增益滚降、反射或阻抗失配。其中S_{21}用于评估传输特性， S_{11}和S_{22} 用于评估输入和输出匹配特性。如果观察到带边附近的增益下降或阻抗失配，则各频率分量之间的幅度和相位变化可能妨碍信号的正常重构，并导致点扩散。

在太赫兹频段测量中，使用 VNA 进行频域表征是被广泛采用的标准评估方法 [5]。此外，ETSI 射频硬件建模报告将射频/模拟损伤、信道带宽和收发信机效率确定为太赫兹系统的关键评估对象 [5]。

综上：EVM 用于评估256-QAM、1024-QAM 等高阶调制信号能否以所需信号质量进行收发；相位噪声用于评估振荡器和频率变换级的相位稳定性；S 参数用于评估宽带信号通路的传输与反射特性。将这些测量相结合，工程师便能够评估太赫兹通信收发信机的信号质量、振荡器稳定性和传输通路特性。

这些评估能够揭示收发信机的信号质量、相位稳定性和频率响应特性。然而，它们未必能识别出对所观察到的性能劣化贡献最大的因素。

下一章将说明如何利用补充测量，在 EVM、相位噪声和 S 参数评估结果的基础上缩小潜在根本原因的范围。

03 用于识别性能劣化因素的补充评估

EVM、相位噪声和 S 参数是评估太赫兹通信收发信机性能的关键指标。然而，仅凭这些指标并不总能唯一确定性能劣化的根本原因。例如，EVM 劣化可能由多种因素导致，包括相位噪声、放大器非线性和传输通路特性。因此，改进系统性能不仅需要审视测量结果本身，还需要进行补充评估以分离出各自的影响因素。

补充评估通过将测量结果与收发信机的各个子系统相关联，来缩小潜在根本原因的范围。 例如，当观察到 EVM 劣化时，可以通过相位噪声测量评估振荡器链路的贡献；随后利用 S 参数测量评估信号通路的传输与反射特性；此外，还可以在改变输出功率的同时测量 EVM，以确定放大器非线性的影响。通过这一流程，可以逐步定位限制性能的因素。

以使用 256-QAM 信号评估的 300 GHz 收发信机为例：若实测 EVM 超出规定限值，仅凭该结果无法判断根本原因在于振荡器链路、放大器还是传输通路。假设相位噪声测量证实振荡器链路满足目标规格；与此同时，用 VNA 进行的 S 参数测量发现信号带宽边缘附近S_{21}下降——这一结果表明传输通路特性很可能是导致 EVM 劣化的因素。此外，若在改变发射功率的同时测量 EVM，发现劣化仅出现在较高输出电平，则放大器非线性成为另一个可能的因素。由此可见，补充评估的重点是查明劣化的来源，而不只是收集更多的测量数据。

相位噪声评估考察相位噪声随频偏的变化曲线。例如，100 kHz 频偏附近相位噪声的上升，可能表明振荡器或频率变换级存在问题。在许多太赫兹收发信机中，振荡器输出经倍频器和混频器搬移至更高频率，相位噪声的影响可能在频率变换之后被放大 [1], [3], [5]。由于即使是微小的相位误差，在 256-QAM、1024-QAM 等高阶调制格式下也会导致 EVM 劣化，因此将相位噪声与 EVM 结合评估，有助于确定振荡器链路的贡献 [3], [4]。

传输通路特性评估通过 S 参数测量来考察整个信号带宽内的增益变化和阻抗匹配情况。例如，在传输带宽为 20 GHz 的信号时，EVM 在频带中心可能达标，但仅在带边劣化。此时可通过S_{21}测量判断带边附近是否存在增益滚降。若观察到增益劣化，传输通路便成为问题的可能来源。此外， S_{11}或S_{22} 的增大可能表明连接器、波导或 PCB 互连存在阻抗失配。由于在太赫兹频率下，即使是微小的反射或损耗也会影响通信质量，因此将 S 参数结果与 EVM 性能相关联，是识别传输通路损伤的有效方法 [1], [5]。

放大器相关影响评估则将 EVM 和 ACPR 作为发射输出功率的函数进行测量。如果随着输出功率升高，EVM 劣化且 ACPR 同时增大，则放大器非线性很可能就是导致性能劣化的原因。这对于高 PAPR 信号尤为

重要，因为放大器的工作条件会显著影响整体性能。因此，应使用能够代表实际工作条件的高阶调制信号进行评估 [3]。

如上例所示，识别性能劣化因素需要的不仅仅是独立地评估 EVM、相位噪声和 S 参数。将用于评估振荡器链路的相位噪声测量、用于评估传输通路特性的 S 参数测量，以及用于表征放大器行为的随输出功率变化的测量相结合，工程师便能够缩小对所观察到的劣化贡献最大的因素的范围。

下一章将回顾用于这些补充评估的测量仪器，并说明从其测量结果中可以获得哪些信息。

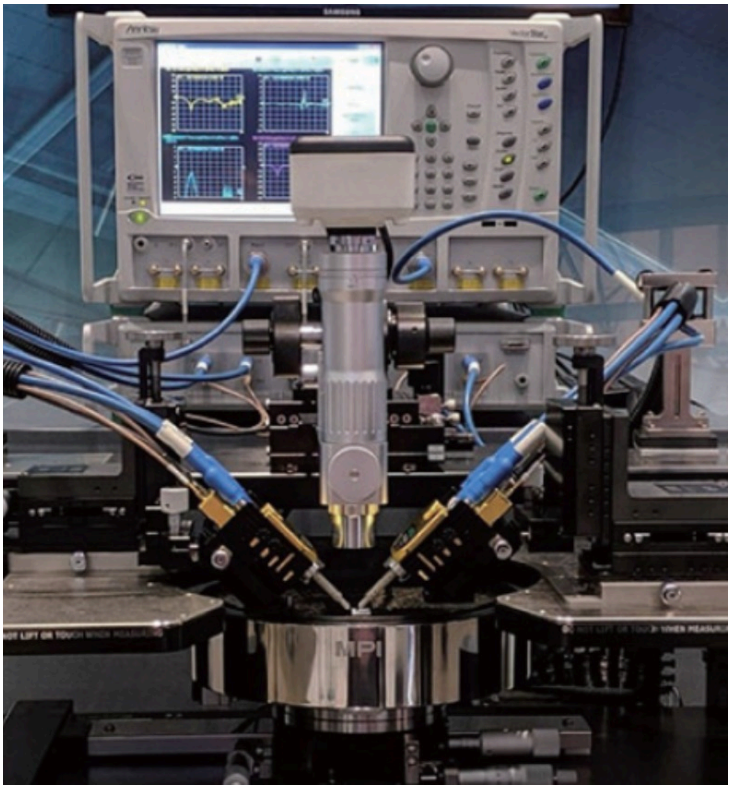
04 使用测量仪器评估性能劣化因素

上一章说明仅凭 EVM、相位噪声和 S 参数测量往往不足以查明性能劣化的根本原因，还需要补充测量来缩小潜在原因的范围。本章回顾用于根因分析的主要测量仪器，并解释从其测量结果中能够获得的洞察。



信号分析仪被广泛用于评估 256-QAM、1024-QAM 等高阶调制信号的质量，能够同时观测星座图、EVM 和信号频谱。例如，当实测 EVM 超出规定限值时，星座点的分布形态可以提供关于损伤性质的线索：星座点在所有方向上均匀扩散可能表明存在噪声；而沿特定方向的扩散或星座旋转则可能表明相位误差或 I/Q 不平衡。因此，EVM 测量是检测性能劣化的有效手段，也是进一步调查的起点。

评估振荡器子系统的贡献时，通常使用具备相位噪声测量功能的信号分析仪。在太赫兹收发信机中，振荡器输出通常经倍频器和频率变换器搬移至太赫兹频率，因此振荡器相位噪声成为影响通信性能的关键因素 [1], [3], [5]。例如，即使在 256-QAM 评估中观察到 EVM 劣化，如果相位噪声测量结果满足目标规格，则可以排除振荡器子系统作为劣化原因。反之，特定频偏处相位噪声的升高，则可能表明振荡器或频率变换级存在性能限制。



VNA 用于评估传输通路特性。通过测量 S 参数，VNA 可以同时表征信号通路的传输与反射行为 [2]。例如，在评估带宽为 20 GHz 的信号时，EVM 劣化可能仅出现在带边附近。此时可用S_{21} 测量来识别整个频带内的增益变化，用S_{11} 和 S_{22}测量来获取阻抗匹配信息。如果在带边附近观察到增益滚降或阻抗失配，潜在原因可能包括波导、PCB 互连、连接器或模块内部连接。

评估放大器相关影响时，将 EVM 和 ACPR 作为输出功率的函数进行测量。例如，若 EVM 在低输出电平下保持达标，但在较高功率下迅速劣化，则放大器增益压缩很可能是原因；若在相同条件下 ACPR 也增大，则非线性失真导致的带外频谱再生是极大的可能。这类评估对于具有高PAPR 的高阶调制信号尤为重要，因为放大器的工作条件会显著影响整体性能。因此，随输出功率变化的测量是评估放大器行为的有效方法 [3]。

总结：信号分析仪用于评估调制质量和相位稳定性，VNA 用于表征传输通路性能。将这些测量结果相结合，工程师便可以判断性能劣化的主要来源是振荡器子系统、传输通路还是放大器。一旦查明根本原因，改进工作便可聚焦于收发信机的相关部分，从而实现更高效的设计优化流程。

05 总结

在太赫兹通信中，宽带信号与高阶调制方案的使用增大了信号质量、相位稳定性和传输通路特性对整体系统性能的影响。因此，EVM、相位噪声和 S 参数已成为评估太赫兹通信收发信机性能的关键指标。

然而，单一评估指标并不总能查明性能劣化的根本原因。例如，EVM 劣化可能源于多种因素，包括相位噪声、放大器非线性和传输通路损伤。因此，性能优化需要将相位噪声测量、S 参数测量和随输出功率变化的评估相结合，以分离导致劣化的各影响因素。

将主要性能指标、补充诊断测量和适当的测量仪器相结合的结构化评估流程，能够高效识别太赫兹通信收发信机的性能限制。从早期研发到生产设计建立一致的评估方法论，对于实现太赫兹通信系统预期的通信性能至关重要。

参考文献

[1] W. Jiang, Q. Zhou, J. He, M. A. Habibi, S. Melnyk, M. El-Absi, B. Han, M. Di Renzo, H. D. Schotten, F.-L. Luo, T. S. El-Bawab, M. Juntti, M. Debbah, and V. C. M. Leung, "Terahertz Communications and Sensing for 6G and Beyond: A Comprehensive Review," IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024.

[2] C. Han, Y. Wang, Y. Li, Y. Chen, N. A. Abbasi, T. Kürner, and A. F. Molisch, "Terahertz Wireless Channels: A Holistic Survey on Measurement, Modeling, and Analysis," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 3, pp. 1670–1707, 2022.

[3] C. T. Parisi, S. Badran, P. Sen, V. Petrov, and J. M. Jornet, "Modulations for Terahertz Band Communications: Joint Analysis of Phase Noise Impact and PAPR Effects," IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 5, pp. 412–429, 2024.

[4] P. Desombre, H. Farès, and Y. Louët, "Performance Comparison of Digital Modulations in the Presence of Gaussian Phase Noise in the Sub-THz Context," in Proc. 2021 Fourth International Workshop on Mobile Terahertz Systems (IWMTS), 2021.

[5] ETSI, "TeraHertz Technology (THz); RF Hardware Modeling," ETSI GR THz 004 V1.1.1, Jan. 2025.

[6] K. Rikkinen, P. Kyösti, M. E. Leinonen, M. Berg, and A. Pärssinen, "THz Radio Communication: Link Budget Analysis toward 6G," IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 11, pp. 22–27, Nov. 2020.

关于安立

安立公司是一家拥有130多年历史的创新通信解决方案供应商。公司的测试和测量解决方案包括无线、光通信、微波/射频和数字仪器，支持了系统以及研发、制造、安装和维护的解决方案。安立还为通信产品和系统提供精密微波/射频元件、光器件和高速器件。安立通过增加用于网络监控和优化的多维服务保证解决方案为现有和下一代有线和无线通信系统以及服务供应商提供完整的解决方案。安立业务遍布 90 多个国家，拥有约4,000名员工。