

Elektronische Signalerzeugung und -analyse im THz-Bereich

Die ersten kommerziellen 6G-Netze sollen 2030 an den Start gehen. Dafür werden Funktechnologien mit noch geringeren Latenzen, höheren Kapazitäten und einer besseren gemeinsamen Frequenznutzung benötigt, als bei 5G.

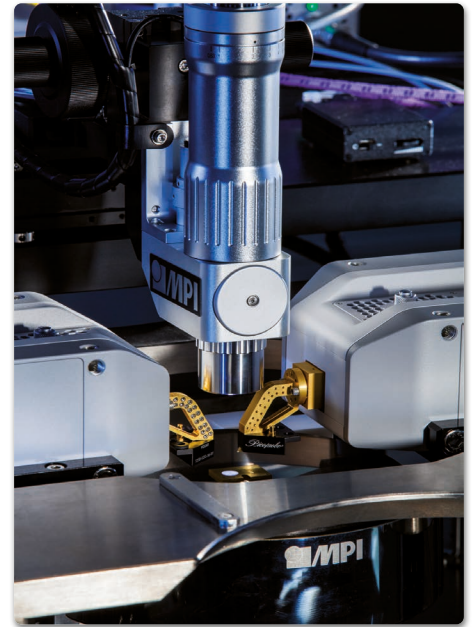


Bild 1: Mit dem R&S ZNA VNA lassen sich Messungen im THz-Bereich unter Einsatz von Millimeterwellenkonvertern ebenso komfortabel konfigurieren wie in niedrigeren Frequenzbereichen (links). Das integrierte MPI TS150-THz Sondensystem mit Mikroskop ist mit dem R&S ZNA für Messungen auf Wafer-Ebene bis 330 GHz konfiguriert. Hohlleitersonden von GGB Industries Inc. sind direkt am Ausgang der R&S ZC330 Millimeterwellenkonverter montiert (rechts)

So soll der Frequenzbereich von 0,1 bis 0,3 THz für drahtlose Kommunikation genutzt werden, um bisher unerreichte Datenraten umsetzen zu können. Ein Forschungsschwerpunkt liegt bei rein elektronischen Übertragungen im D-Band-Spektrum von 110 bis 170 GHz. Dafür sind effiziente, stabile sowie kompakte Quellen und Empfänger notwendig, die dieses Spektrum abdecken.

Hohe Hürden

Der Erfolg des Mobilfunks der sechsten Generation wird entscheidend von kürzeren Latenzzeiten, höheren Datenraten, einer besseren Dienstgüte (Quality of Service, QoS) sowie von einer erweiterten Systemkapazität abhängen. Die Hürden für die Verwirklichung solcher Netze der Zukunft sind jedoch hoch. Wellen im THz-Frequenzbereich von 0,1 bis 10 Terahertz (THz) bzw. Wellenlängen zwischen 3 mm und 30 μm nehmen dabei eine wesentliche Rolle ein. Sie decken das Spektrum zwischen Mikrowellen und optischen Wellen ab und sind neben der Kommunikation für verschiedene Anwendungsfelder wie beispielsweise Bildgebungsverfahren und Spektroskopie interessant [1].

Die Aussicht auf große, zusammenhängende Frequenzbänder, die extrem hohe Datenraten bis zu Tbit/s ermöglichen, machen den THz-Bereich zu einem zentralen Forschungsthema für 6G.

*Autor:
Dr. Taro Eichler
Technology Manager Wireless
Communications & Photonics
Rohde & Schwarz
www.rohde-schwarz.com*

THz-Strahlung kann auf verschiedene Weise erzeugt werden. Elektronische integrierte monolithische Mikrowellenschaltungen, sogenannte MMICs, sind eine naheliegende Wahl. Hinzu kommen Verfahren, die auf photonischen Technologien basieren.

Aufwärtskonvertierung: elektronische Erzeugung und Analyse von THz-Wellen

Für die elektronische Erzeugung von THz-Strahlung ist die verfügbare Technik äußerst kompakt und kann bei Raumtemperatur betrieben werden. Allerdings stößt die klassische Elektronik hinsichtlich Bandbreite und Effizienz an ihre Grenzen. Schwerer noch wiegt, dass elektronische Quellen bei THz-Frequenzen ineffizient werden und nur begrenzte Möglichkeiten zur Frequenzabstimmung bieten.

Zahlreiche 6G-Forschungsaktivitäten in der Halbleiterindustrie befassen sich derzeit zum Beispiel mit der Charakterisierung von Bauelementen und Schaltkreisen im Millimeterwellen- und THz-Bereich. Ein bedeutender Forschungsschwerpunkt liegt hier auf dem D-Band-Spektrum. Hierfür sind bereits fortschrittliche HF-Test- und Messgeräte von führenden Messtechnikern wie Rohde & Schwarz erhältlich.

Verfügbare Messtechnik für die Sub-THz und THz-Forschung

Für die (Sub)-THz-Forschung sind zum Beispiel Vektor-Netzwerkanalysatoren zur Bauelementcharakterisierung verfügbar, die mit Frequenzumsetzern bis 1,1 THz messen



Bild 2: Testaufbau für Signalerzeugung und -analyse im D-Band (110 GHz bis 170 GHz) mit R&S FE170ST Frontend (Sender) und R&S FE170SR Frontend (Empfänger)

können. Der Frequenzbereich für Signal- und Spektrumanalysatoren lässt sich noch erweitern, indem externe Harmonischen-Mischer für das D-Band und andere Frequenzbänder bis 500 GHz hinzugezogen werden. Bei Signalgeneratoren können die Frequenzbereiche mithilfe von Frequenzvervielfachern bis 170 GHz erweitert werden. Die Signalerzeugung und -analyse im D-Band-Spektrum ist mit Sende- und Empfangsumsetzern möglich. Darüber hinaus haben Forscher die Möglichkeit, die Antennenstrahlungsleistung im D-Band in Vollabsorberkammern messen.

VNAs für hochgenaue THz-Messungen

Vektor-Netzwerkanalysatoren eignen sich für Messungen bis 67 GHz. Für Tests im Millimeterwellen- und THz-Bereich sind zusätzliche externe Frequenzkonverter erforderlich, die wie beispielsweise der R&S ZC1100 Frequenzen bis 1,1 THz abdecken können. Solche Frequenzkonverter mischen die Stimulussignale nach oben und die Antwortsignale nach unten.

Die Charakterisierung aktiver Komponenten im linearen und nichtlinearen Bereich erfordert eine definierte Eingangsleistung an der Tasterpitze. Da eine Pegelkalibrierung auf Wafer-Ebene nicht direkt durchführbar ist, wird der Pegel am Hohlleiterausgang kalibriert, sodass der Verlust in zusätzlichen Hohlleitern, 1-mm-Kabeln oder der Messspitze im Kalibriervorgang berücksichtigt ist. Für diese Messungen bietet sich ein Highend-VNA wie der R&S ZNA von Rohde & Schwarz an, der für Pegel-Sweeps und Kompressionspunktmessungen über eine integrierte Kalibrierroutine verfügt. Diese kompensiert Nichtlinearitäten von Millimeterwellenkonvertern, was die Messdynamik sowie die Reproduzierbarkeit erheblich verbessert. Das ermöglicht Mess-

ungen an aktiven Komponenten bei hohen Frequenzen mit metrologischer Präzision [2].

Breitbandsignal-Erzeugung und -Analyse im D-Band

Bild 2 zeigt einen typischen Test- und Messaufbau zur Signalerzeugung und -analyse im D-Band, wie Forscher ihn zur Untersuchung von künftigen 6G-Komponenten und -Transceivern benötigen. Der Aufbau verwendet das R&S FE170ST Sende-Frontend, welches die modulierten Signale wie beispielsweise potenzielle 6G-Signalförmungen vom R&S SMW200A VNA in den Frequenzbereich von 110 bis 170 GHz hochkonvertiert. Als Gegenstück dient das R&S FE170SR Empfangs-Frontend. Es konvertiert die Signale herunter und übermittlelt die Zwischenfrequenz (ZF) an den R&S FSW Signal- und Spektrumanalysator. Damit beim demodulierten Signal die Error Vector Magnitude (Fehlervektorgröße) möglichst gering bleibt, muss das erzeugte Signal ein extrem niedriges Phasenrauschen aufweisen.

Messung der Strahlungsleistung im D-Band

Bei 5G wurden im Zusammenhang mit der Entwicklung von Over-the-Air-Testkonzepten erstmals Millimeterwellenfrequenzen für die Mobilfunkkommunikation eingesetzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass große und stark miniaturisierte Antennenarrays für leitungsgebundene Messungen nicht mehr zugänglich sind [3]. Solche OTA-Antennentestkonzepte können auf das D-Band und darüber hinaus erweitert werden, um die THz-Kommunikation und -Sensorik zu untersuchen. Zukünftige Geräte werden noch höher integrierte aktive Antennensysteme für Ultra-Massive MIMO- und Sensor-Anwendungen enthalten.

Da die 6G-Forschung den Fokus auf Frequenzen über 100 GHz legt, sind nicht nur neue Breitbandantennenkonzepte mit hoher Verstärkung erforderlich, sondern auch darauf zugeschnittene neue Antennenmessverfahren.

Da die Komplexität integrierter Schaltkreise mit der Frequenz drastisch ansteigt, ist die Zielsetzung der meisten aktuellen Entwicklungsanstrengungen ein neuer inkrementeller Schritt im D-Band und im G-Band (140 bis 220 GHz). Eine sphärische Abtastlösung zur Messung der Strahlungsleistung im D-Band mit hohem Dynamikbereich lässt sich zum Beispiel in der R&S ATS1000 Absorberkammer realisieren. Die Lösung nutzt ein neues Sonden-Design mit direkter Abwärtskonvertierung, das einen Dynamikbereich von mehr als 50 dB bei 170 GHz ermöglicht. Das vereinfacht die Testanforderungen, da für die Messung des Amplitudengangs sowie des kohärenten Phasengangs eines Messobjekts im D-Band keine mechanischen Änderungen notwendig sind und auch keine zusätzliche HF-Verkabelung.

Beispiel: OTA-Test einer D-Band-Antenne

Bild 3 zeigt im Rahmen rechts oben eine neu entwickelte linsenbasierte D-Band-Antenne mit Leckwellenspeisung des Herstellers IMST als Prüfling in einem kompakten Testsystem mit sphärischer Nahfeldabtastung. Die Messungen der Strahlungsmuster werden im sphärischen Abtastbereich der R&S ATS1000 durchgeführt. Diese Vollabsorberkammer enthält einen Positionierer mit verteilten Achsen. Der Prüfling könnte in 6G-Fronthaul-Punkt-zu-Mehrpunkt-Szenarien eingesetzt werden. Die vereinfachte Speisestruktur besteht aus einer elliptischen Linse und einem Lambda/2-Leckwellen-Lufthohlraum, der durch einen WR6-Hohlleiter (D-Band) angeregt wird.

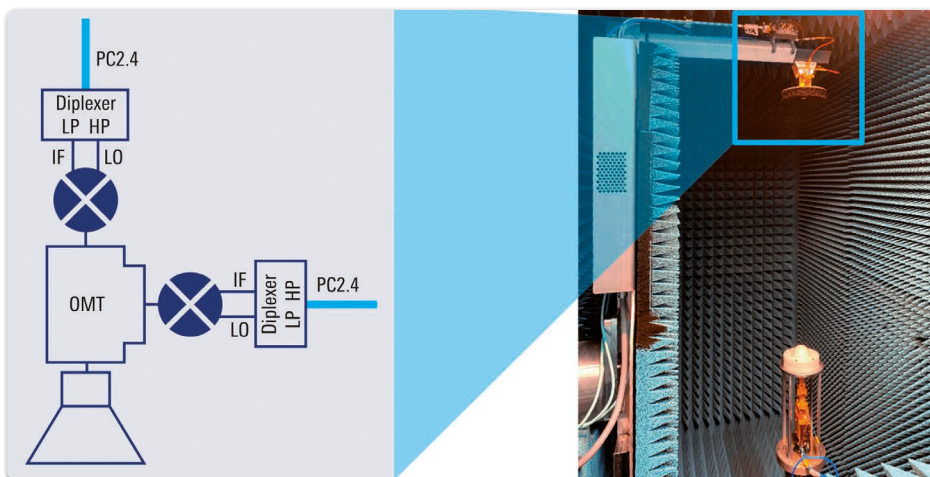


Bild 3: Links Blockdiagramm der frequenzkonvertierenden Sonde, rechts Messaufbau mit einem kompakten sphärischen Abtastsystem mit frequenzkonvertierender Sonde und Prüfling am Azimutpol

Das Strahlungsmuster kann durch Verschieben des Speisepunkts entlang der Brennebene der Linse gesteuert werden.

In Bild 3 unten sieht man die DUT-Einspeiseanordnung unter der zu vermessenden Linsenantenne. Mit dieser Anordnung kann die Leistung der Antenne phasenkohärent und zeitstabil gemessen werden. Sie besteht aus einem subharmonischen D-Band-Mischer, der mit dem an der Sonde verwendeten Mischer identisch ist, sowie einem D-Band-Isolator, der am WR6-Split-Block des DUTs angeschlossen ist. Die Messungen wurden mit Hilfe des R&S ZNA43 Viertor-VNAs durchgeführt, wobei ein Messtor an der Vorderseite das ZF-Signal zum DUT leitet.

Das Blockdiagramm in Bild 3 stellt das Konzept der Messsonde dar. Ein Orthomode Transducer (OMT, Orthomodenkoppler) ist an eine quadratische 20-dBi-Hornantenne angeschlossen, die eine 3 dB-Strahlbreite von 16° und eine Kreuzpolarisationsisolierung von 25 dB über den gesamten D-Band-Frequenzbereich aufweist. Die Anordnung arbeitet reziprok und kann zwei orthogonal polarisierte Felder senden/empfangen, wenn das DUT auf Empfangen (RX) bzw. Senden (TX) eingestellt ist. Die Ab- oder Aufwärtskonvertierung erfolgt direkt an der Sonde, wodurch Kabelverluste bei HF-Frequenzen ausgeschlossen werden. Beide Polarisationen können gleichzeitig gemessen werden.

Die Ergebnisse in Bild 4 zeigen eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen den DUT-Vollwellensimulationen und den Messungen. Dies unterstreicht die hohe Genauigkeit des Messsystems und der eingesetzten Messtechnik in Verbindung mit dem neuen Sondendesign. Die phasenkohärente Datenerfassung wie die Nahfeld-Fernfeld-

Transformation (NF2FF) lässt sich bei passiven Antennenmessungen erfolgreich anwenden. Bemerkenswerterweise zeigen die nicht transformierten Messergebnisse in Rot, dass der Hauptstrahl des Strahlungsmusters bereits nahe am asymptotischen Fernfeldverhalten liegt.

Zusammenfassung/Fazit

Das hocheffiziente D-Band-Linsenantennen-Design konnte einen Gewinn von mehr als 30 dB über 42% Bandbreite erzielen. Die präzise Charakterisierung dieser Antenne erfolgte über ein Testsystem mit sphärischer Abtastung, das stabile phasenkohärente Messungen mit direkter Frequenzumsetzung am Prüflingseingang und an den Messsondenausgängen ermöglicht. Phasenkohärenz ist unerlässlich, um die präzise Anwendung von Nahfeld-Fernfeld-Transformationsalgorithmen zu gewährleisten. Und diese ist essentiell für eine genaue

Bestimmung von Richtdiagramm-Nullstellen und Nebenkeulenpegeln.

Mobilfunkhersteller, die für 6G MMICs und das D-Band nutzen wollen, können somit schon heute eine präzise Messtechnik für Tests an ihren Komponenten einsetzen. Bei den photonischen Verfahren zur THz-Wellenerzeugung ist zur kommerziellen Nutzung noch viel Forschungsaufwand notwendig. In verschiedenen Versuchsübertragungen wurden aber bereits vor Jahren u.a. bei 300 GHz Datenübertragungen bis 850 m im Freien demonstriert. Rohde & Schwarz koordiniert ein vom BMBF gefördertes Forschungsprojekt 6G-ADLANTIK [4], um mit Forschungseinrichtungen und Herstellern die Technologie zur photonischen THz-Signalerzeugung und -analyse als Basis für neue, marktgerechte Lösungen für 6G voranzutreiben.

Literatur

- [1] T. Eichler und R. Ziegler: „Fundamentals of THz technology for 6G“, Rohde & Schwarz White Paper, 2022
- [2] A. Rumiantsev, T. Naing Swe und A. Henkel, „Achieving Metrology-Level Accuracy When Making THz Measurements“, in The Latest in mmWave and THz Test and Measurement Technology, www.microwavejournal.com/articles/27082, Microwave Journal, December 2021
- [3] R. Stuhlfauth und H. Mellein, „Over-the-air RF conformance measurements on 5G NR devices“, Rohde & Schwarz White Paper, 2021
- [4] www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/6g-adlantik

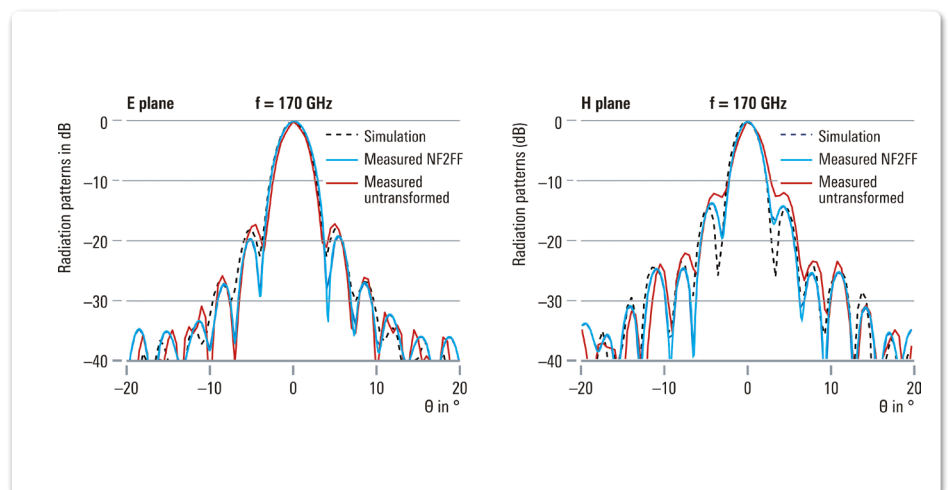


Bild 4: E-Ebene und H-Ebene. Simulierte, gemessene und von Nahfeld zu Fernfeld (NF2FF) transformierte normalisierte Richtcharakteristiken als Funktion der Frequenz für Strahlung in Hauptstrahlrichtung