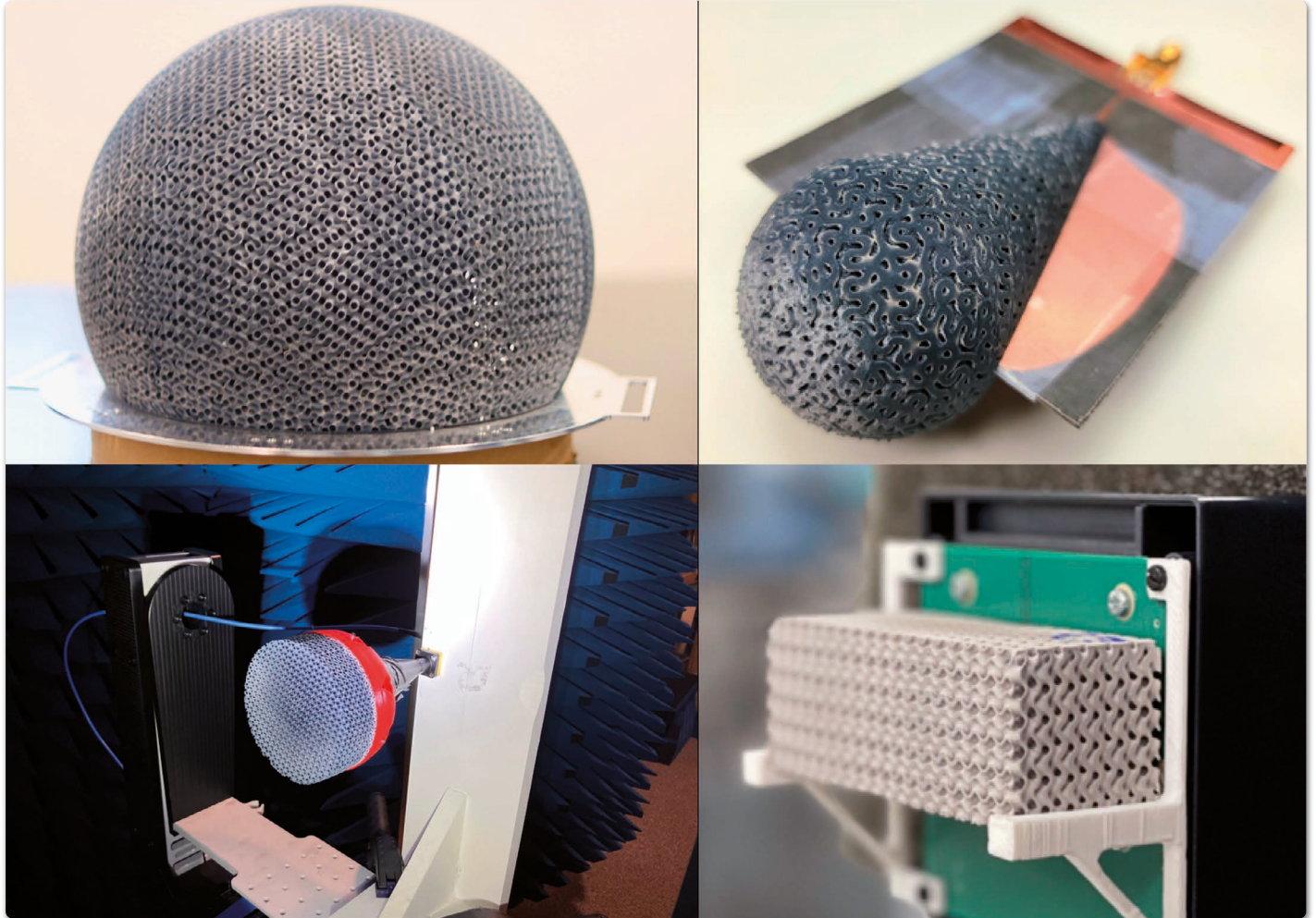


Verbesserung des Antennen-Designs mit 3D-gedruckten Dielektrika



3D-gedruckte Dielektrika werden in Antennen in einer Vielzahl von Branchen eingesetzt, von 5G- und Satelliten-Kommunikation bis hin zu Verteidigungs- und Raumfahrtanwendungen. Mit Fortifys hochauflösender 3D-Drucktechnologie für Verbundwerkstoffe mit hohem Durchsatz nutzen Produkt-Designer, HF-Ingenieure und Forscher Komponenten wie 3D-gedruckte HF-Linsen, Radome, Schäume und mehr, um enorme Verbesserungen bei ihren Mikrowellenantennen-Designs zu erzielen. Dieser Artikel stellt neun konkrete Möglichkeiten vor.

Gradient Refractive Index (GRIN) Designs sind die Grundlage für viele der aufgeführten

Anwendungen. Fortify ermöglicht die GRIN-Technologie durch den Druck von Gitterstrukturen – komplexen Netzwerken aus Oberflächen und Poren, deren Strukturgrößen deutlich kleiner sind als die elektromagnetische Wellenlänge. Durch Variation des Volumenanteils von dielektrischem Material zu Luft in einem Bereich eines 3D-gedruckten Gitters kann eine lokale effektive Dielektrizitätskonstante realisiert werden.

Der Volumenanteil des Gitters kann von Ort zu Ort variiert werden. Durch die Kombination dieser Druckfähigkeiten mit verlustarmen dielektrischen Materialien wie dem Radix Printable Dielectric von Rogers Corporation oder dem 97%igen reinen

Aluminiumoxid von Fortify ist eine große Vielfalt an Breitband- und Hochleistungsanwendungen möglich.

Konforme Antennen

Eine konforme Antenne ist eine Kombination aus einem nicht-planaren, verlustarmen dielektrischen Substrat mit einer Metallisierung, die direkt auf die gedruckte Geometrie aufgebracht wird. Das Substrat wird in die gewünschte Form gedruckt und in einem sekundären Prozess mit Leitermaterialien wie Kupfer, Silber oder Silber-Nano-Tinten konform beschichtet.

Welche Probleme werden damit gelöst? Diese Strukturen ermöglichen die Integration von Antennenkomponenten in Systeme

Quelle:

*RF Applications Guide
„9 Ways to Transform your
Antenna Design with 3D
Printed Dielectrics“
Fortify
www.3dFortify.com*

*übersetzt und leicht gekürzt
von FS*

mit begrenzten Abmessungen, sodass man Mikrowellenantennen in Bereiche einbauen kann, in die typische Antennen nicht passen. Darüber hinaus wird durch die Integration die Gesamtmaterielliste reduziert, was die Komplexität verringert und die Kosten senkt. Zusätzlich können HF-Designer die potenzielle Verbesserung der Anpassung, der Bandbreite und des Strahlungsdiagramms in Betracht ziehen, die sich aus dem Wechsel von planaren zu 3D-Antennen-Designs ergibt.

Das Foto zeigt ein kegelförmiges Antennensubstrat, das mit konformen Kupfergeometrien für Luft- und Raumfahrt- sowie Verteidigungsanwendungen beschichtet ist.



Mikrowellen- und Millimeterwellen-Antennen erfordern eine hervorragende Oberflächenbeschaffenheit und verlustarme Substrate. Mit dem DLP-basierten 3D-Druckverfahren von Fortify mit hoher Auflösung und hohem Durchsatz in Kombination mit Mikrowellenmaterialien wie RadixTM von Rogers Corporation kann das nahezu perfekte Substrat für die konforme Leiterplattenbeschichtung gedruckt werden.

Konforme Antennen sind eine hervorragende Lösung für Flugzeuge, Drohnen und Raketen, bei denen der Platz aerodynamisch begrenzt ist. Überall dort, wo ein Gerät klein und leicht sein muss, ist eine 3D-gedruckte konforme Antenne eine hervorragende Option.

Die Anpassungsstruktur



© *Machining and Microwaves* YouTube Channel

Eine Anpassungsstruktur ist eine eigenständige dielektrische Komponente oder Geometrie, die in ein 3D-gedrucktes Design integriert ist. Die Struktur wird verwendet, um die Impedanz der Antenne an die Speisequelle anzupassen, sodass die Antenne im gewünschten Frequenzband mit maximaler Effizienz und verbesserter Anpassung und Strahlungsdiagramm betrieben werden kann. Diese Strukturen werden in Radoms, Linsen, Hörnern und anderen Gebilden verwendet.

Welche Probleme werden damit gelöst? Anpassungsstrukturen dienen dazu, die Reflexionen an einer Einspeisungsstelle zu minimieren, wie z.B. bei Hohlleitern oder Hörnern. Dies mit dem Ziel, die Leistungsübertragung zu maximieren und die Gesamteffizienz des Systems zu verbessern. Im Fall einer Parabolantennen-Einspeisung passt der 3D-gedruckte dielektrische Gradientenstab in die Einspeisung und dient der Rauschunterdrückung, der Optimierung der Schüsselausleuchtung, der Minimierung von Überstrahlungsverlusten und der Verbesserung des Strahlungsmusters.

Die Technologie von Fortify ermöglicht die Herstellung von Gradienten-Dielektrika einschließlich kontinuierlicher, gleichungsbasierter dielektrischer Profile innerhalb einer beliebigen Hülle. Die Materialeigenschaften des Gradienten-Dielektrikums und/oder die Form der gedruckten Komponente können so abgestimmt werden, dass sie als leistungsstarke Anpassungsstruktur dienen.

Anpassungsstrukturen sind überall zu finden - im Falle des dielektrischen Stabs für eine Speiseantenne jedoch typischerweise in Parabolantennen für

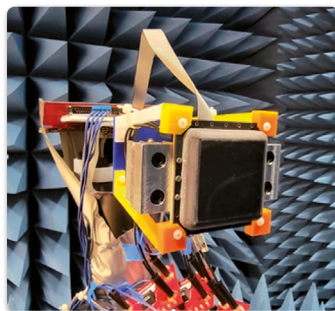
die Downlink-Kommunikation. Andersorts ist die Anpassung in fast jedem mmWave- und Mikrowellen-Antennensystem in irgendeiner Form zu finden.

Mikrowellen- und mmWave-Randoms



© *San Diego State University* Antenna and Microwave Laboratory

Ein Radom ist eine Vorrichtung, die sich über der Elektronik und den empfindlichen Antennenkomponenten befindet. Radoms werden entworfen und gedruckt, um die dielektrischen und geometrischen Anforderungen von Hochleistungs-Mikrowellen- und mmWave-Anwendungen zu erfüllen. Sie können Oberflächenreflexionen, Strahlverzerrungen und Verluste reduzieren. Radoms müssen mit präzisen Formen, spezifischen Dicken und geringer Oberflächenrauigkeit hergestellt werden, um für Mikrowellen- und mmWellen-Antennen geeignet zu sein.



© *San Diego State University* Antenna and Microwave Laboratory

Die 3D-Drucker von Fortify drucken verlustarme dielektrische Materialien und technische Keramiken, wie 97% reines Aluminiumoxid. Im Bild oben ein 3D-gedrucktes mmWave-Radom zum Schutz einer flachen Antennengruppe. Unten eine elektronisch gescannte Fla-

chante mit 3D-gedrucktem Radix-Radom, montiert in der Testkammer zur Charakterisierung des Strahlungsdiagramms.

Kurzum: Radoms werden bei vielen Antennen für den öffentlichen und privaten Sektor eingesetzt - von Telekommunikations-Basisstationen und SATCOM-Terminals bis hin zu Raketen spitzen und elektromagnetischen Fenstern für Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge.

Breitband-Nosecones

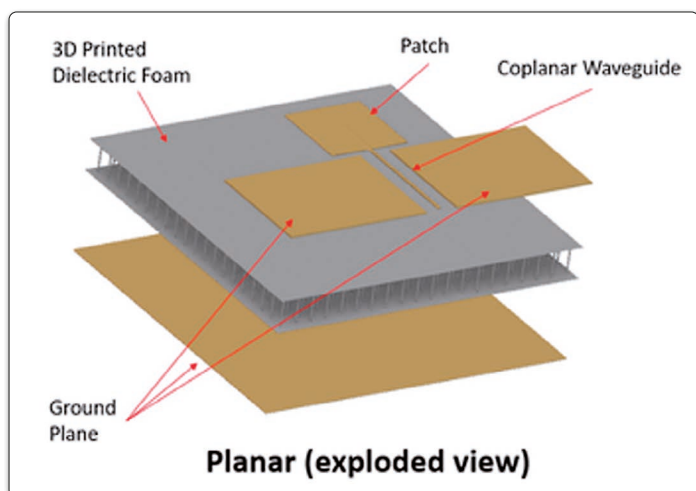
Ein Breitband-Nosecone („Nasenkegel“) ist ein Gerät, das über der Elektronik und den empfindlichen Antennenkomponenten sitzt und diese schützt, während es gleichzeitig hervorragende HF-Übertragungseigenschaften aufweist. Ein Nosecone sitzt in der Regel an der Nase eines Flugzeugs und schützt die Elektronik vor den Kräften und erhöhten Temperaturen, die bei Hochgeschwindigkeitsflügen auftreten.



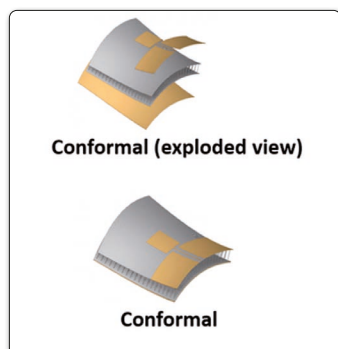
Durch den Einsatz von A-, B- oder C-Typ-Sandwich-Schaumstoffkonstruktionen können Nosecones ein hervorragendes Breitbandverhalten aufweisen. Im Bild ein A-Typ-Verbundschamstoff-Sandwich-Nosekegel, hergestellt aus 3D-gedruckter technischer Keramik aus 97% reinem Aluminiumoxid. Innen- und Außenfläche des Kegels besteht aus einem festen Dielektrikum, während der Kern aus einer leichten Schaumstruktur mit niedriger Dielektrizitätskonstante besteht.

Schäume mit niedriger Dielektrizitätskonstante

Ein 3D-gedruckter Schaumstoff ist ein verlustarmer Abstandhalter mit geringer Dielektrizität, der in der Regel verwendet



wird, um ein leitendes Element (z.B. ein Patch oder eine Mikrostreifenleitung) von einer Grundplatte zu trennen. Traditionell werden solche Schaumstoffe in Form von Platten und in vordefinierten Dicken verkauft. Das macht es schwierig und teuer, sie in die richtige Form für nicht-planare Anwendungen zu bringen. Während des Laminierens von Leiterplatten neigen sie außerdem dazu, sich zu verformen, was sich negativ auf die Antennenleistung auswirkt.



Die Technologie von Fortify ermöglicht die Herstellung verlustarmer dielektrischer Schaumstoffe unter Verwendung von Materialien wie Radix. So werden alle mit der herkömmlichen Schaumstoffverarbeitung verbundenen Herausforderungen reduziert. Mit der Möglichkeit, die Dielektrizitätskonstante und die Bauteilfestigkeit über die Geometrie des Bauteils zu verändern, bietet Fortify eine einzigartige Kombination aus struktureller Integrität und dielektrischen Eigenschaften.

Oben das Diagramm einer koplanar-wellenleitergespeis-

ten Patch-Antenne mit einem 3D-gedruckten Schaumstoffsubstrat mit niedriger Dielektrizitätskonstante. Die grauefarbte Struktur ist das 3D-gedruckte Material und die goldfarbenen Strukturen sind leitende Elemente. Darunter eine konforme Version einer koplanar-hohlleitergespeisten Patch-Antenne.

Switched-Beam-Arrayantennen



© ATT.com

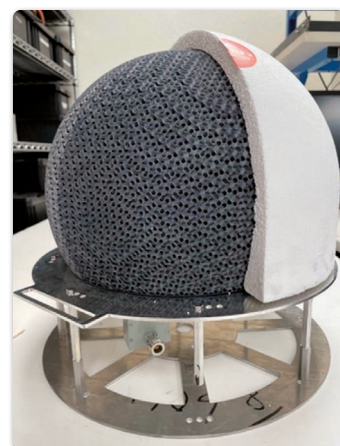
Dies ist eine neue Art von Antennenarchitektur, bei der große Linsen zur passiven Strahlformung und -richtungssteuerung eingesetzt werden. Hinter einer sphärischen Linse vom Typ Luneburg mit konformem Antennenanschluss verbirgt sich ein Switched-Beam-Array bzw. eine Switched-Beam Antenna (SBA), und das bedeutet eine Antenne mit hohem Gewinn, die mehrere Strahlen mit fester Position erzeugen und ausrichten kann. Die Linse hat natürlich einen Brennpunkt an der Oberfläche des Objektivs und erhöht die Verstärkung für alle Einspeisungen gleichermaßen. Oben die Giant Eyeball Antenna von

AT&T als ein hervorragendes Beispiel für eine Luneburg-Linse mit hoher Kapazität – ein Netzwerk für kleine Antennen, die den drahtlosen Dienst innerhalb des Service-Bereichs verbessern. Sie wird zur Sektorverdichtung eingesetzt, um den Durchsatz in einem starkbevölkerten Gebiet, wie einem Stadion oder einem Festivalterrain, zu erhöhen.

Die meisten aktuellen Beamforming- und Beamsteering-Antennen basieren auf aktiver Phasenverschiebung. Bei einer Phased-Array-Antenne schrumpft die Apertur bei der Abtastung eines Strahls, d.h., der Gewinn nimmt ab, wenn sich ein Strahl aus der Achsenrichtung bewegt – dies wird als Abtastverlust bezeichnet. Bei Frequenzbereichs-Multiplexsystemen können die Speiseantennen in einer SBA alle gleichzeitig empfangen oder senden.

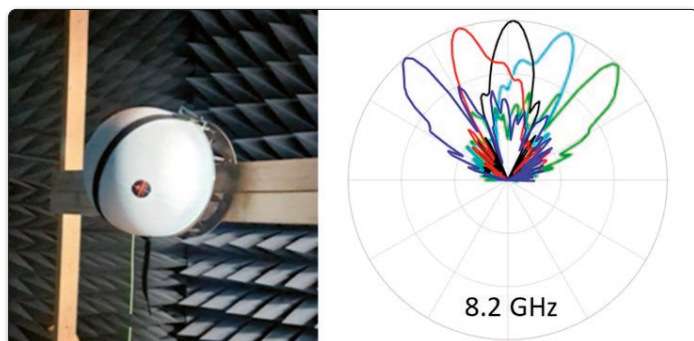
Luneburg-Objektive für SBAs in Mikrowellen- und mmWave-Anwendungen lassen sich mit der gitterbasierten Gradienten-Dielektrikum-Fertigungstechnologie leicht herstellen. Luneburg-Objektive in Kombination mit einem konformen Feed-Array ermöglichen einen gleichwertigen Gewinn für alle Feeds - das bedeutet, dass es keine Scan-Verluste gibt.

Spherical Switched Beam Array Lens Antennas sind derzeit in Bereichen zu finden, in denen ein hoher 5G-Durchsatz erforderlich ist, z.B. in Stadien und auf Festivals. Diese Antennen werden auch in terrestrischen Bodensatelliten-Kommunikationsstationen sowohl für kommerzielle als auch für militärische Anwendungen für höhere Frequenzen bis hin zum Ka-Band eingesetzt.



Im mittleren Bild eine halbkugelförmige Linse mit flacher Unterseite. Ein Switched-Beam-Array mit einem flachen Boden hat eine dielektrische Verteilung wie eine Linse im Luneburg-Stil, wobei der Gradient jedoch so verändert wird, dass alle Speiseelemente auf derselben Fläche unterhalb der Antenne angeordnet sind. Bei dieser Antennenarchitektur dient die Linse als passiver Phasenschieber, um die Strahlung zu lenken und zu fokussieren. Die flache Unterseite bietet viele der bereits erwähnten Vorteile der sphärischen SBA, vereinfacht aber die Konstruktion und den Zusammenbau der Linsenspeisestruktur erheblich. Bei einem herkömmlichen Phased Array ist der Phasenschieber-IC der begrenzende Faktor für die Betriebsbandbreite. Die Phasenverzögerung in einer Linse ist eine echte Zeitverzögerung und damit sehr breitbandig. Die Grundplatte trägt eine Gruppe von Hohlleiterantennen, wobei jede einen diskreten Strahl erzeugt.

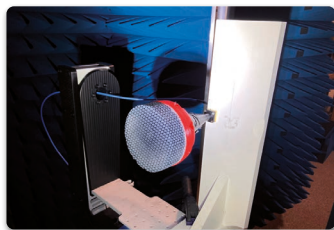
Schließlich im unteren Bild links eine SBA, montiert in einer Testkammer zur Charakterisierung im Frequenzbereich von 3,5 bis



8,2 GHz. Die Signalstärke wurde über den Winkel ermittelt. Das Linsensystem ist nur durch die Wahl der Antenneneinspeisung begrenzt – die Linse ist von Natur aus breitbandig und hat eine Grenzfrequenz von über 18 GHz. Rechts das Polardiagramm, das die von den einzelnen Wellenleitern erzeugten Strahlen zeigt.

Wie die Spherical SBAs sind auch die SBAs mit flachem Boden eine hervorragende Option für Verteidigungsanwendungen in der elektronischen Kriegsführung, für die Boden-Luft- oder Boden-Satelliten-Kommunikation, für Mobilfunk-Basisstationen und mehr.

Horn-Lösungen



Hornlinsen sind 3D-gedruckte Linsen, die vor einer Hornantenne mit hohem Gewinn eingesetzt werden, um die Leistung des Antennensystems aus Horn und Linse zu erhöhen. Im Folgenden stellen wir zwei Anwendungen für Hornlinsen vor.

- Punkt-zu-Punkt-Fokussierung

Eine Hornlinse mit Punkt-zu-Punkt-Fokussierung ist eine Zylinderlinse, die vor einem Horn mit einer dielektrischen Verteilung sitzt und auf eine optimale Leistung zugeschnitten ist. Die Linse hat einen größeren Querschnitt als das Horn und wird verwendet, um den Gewinn zu erhöhen und die Nebenkeulenpegel zu mindern. Welche Probleme werden damit gelöst? Die Hornlinse mit Punkt-zu-Punkt-Fokussierung ist deutlich kürzer als eine Hornantenne mit gleichem Gewinn, sodass kleinere Antennen mit ähnlicher oder besserer Leistung möglich sind. Hornlinsen dieses Typs wurden in bestehende Antennensysteme eingebaut, um die Leistung des Systems im laufenden Betrieb anzupassen oder zu ver-

bessern. Auch sind sie in Prüf- und Messsystemen zu finden, die zur Charakterisierung des HF-Verhaltens von Materialien oder Geräten eingesetzt werden. Das Bild zeigt eine Punkt-zu-Punkt-Fokussierungslinse, die an einem Ka-Band-Speisehorn in einer Prüfkammer montiert ist. Sie wurde von 20 bis 25,5 GHz charakterisiert und zeigt eine um 5...6 dB zusätzliche Verstärkung gegenüber dem nackten Horn.

- Breitbandanpassung und Gewinnverbesserung

Diese Hornlinse wird mit einem Horn mit großer Bandbreite, z.B. einem Dual- oder Quad-Ridge-Horn, gepaart und in der Regel direkt an der Stirnseite des Horns montiert. Die Linse nutzt Anpassungsstrukturen, wie sie weiter oben vorgestellt wurden. Welche Probleme werden damit gelöst? Breitbandhörner wie Dual- oder Quad-Ridge-Hörner leiden unter schlechter Anpassung, geringem Gewinn und sehr niedrigem Öffnungsgrad am oberen Ende ihres Frequenzbandes. Die Apertur-Effizienz kann bis zu 15% betragen. Die Einführung einer 3D-gedruckten dielektrischen Linse mit einer optimierten Verteilung kann alle diese unzureichenden Eigenschaften beheben und die Systemleistung erheblich steigern. Diese Lösungen eignen sich hervorragend für Punkt-zu-Punkt-Anwendungen in öffentlichen und privaten 5G- und Festnetz-Backhaul-Verbindungen sowie für sehr breitbandige Test- und Messsysteme.

Linse zur Verbesserung des Sichtfeldes für eine phasengesteuerte Antennengruppe

Eine Sichtfeldverbesserungslinse ist eine Linse, die in Verbindung mit einer phasengesteuerten Anordnung das Sichtfeld einer Anordnung um bis zu ± 90 Grad aus der Achsrichtung vergrößert. Die Linse enthält eine dielektrische Verteilung, um die HF-Wellen zur und von der Antenne zu leiten und gleichzeitig den Abtastverlust auf ein Minimum zu beschränken.



Welche Probleme werden damit gelöst? Moderne Phased-Array-Systeme sind in der Regel auf ein Sichtfeld von ± 60 Grad aus der Vogelperspektive beschränkt. In einem Szenario, in dem eine 360-Grad-Abdeckung erforderlich ist, müssten drei oder mehr Phased-Array-Antennen eingesetzt werden. Daher geht eine größere Abdeckung mit erheblichen Kosten und hoher Komplexität der Infrastruktur einher.

Im Bild eine Sichtfeldverbesserungslinse, montiert vor einem 32-Element Phased Array Innovator Kit während der Kammerprüfung. Dieser Typ Linsenantenne kann in einer Vielzahl von Branchen eingesetzt werden – überall dort, wo Phased Arrays derzeit verwendet werden. Dazu gehören Anwendungen in den Bereichen Radar, elektronische Kampfführung, 5G, Satellitenkommunikation, taktische Kommunikation und mehr.

Die Konstant-K-Linse

Was ist das? Eine Linse mit konstantem K-Wert ist eine Linse, bei der die Dielektrizitätskonstante nicht über das gesamte Teil variiert. Bei dieser Linse wird das Fokussierungsverhalten durch die Formgebung des

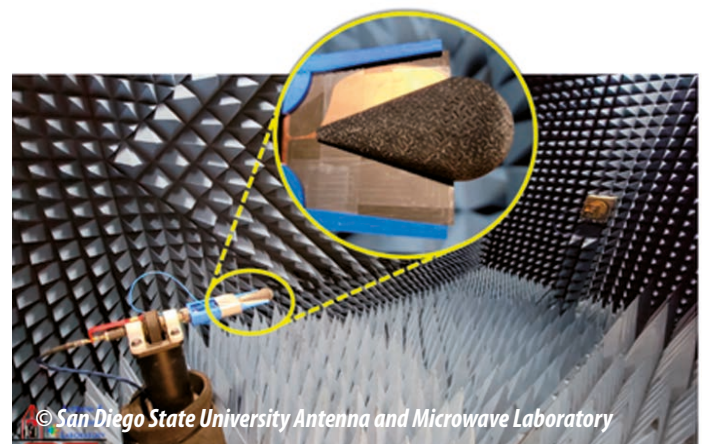
Linsenprofils erzeugt. Welche Probleme werden damit gelöst? Oft mangelt es den Vivaldi-Antennen trotz ihrer Leistung über sehr große Bandbreiten an Strahlungsleistung bei höheren Frequenzen. Durch die Kombination einer Linse mit dieser Antenne werden Nebenkeulen aufgrund eines geringeren Phasenfehlers der Apertur reduziert, was zu einem höheren Gewinn und einem verbesserten Strahlungsdiagramm bei Frequenzen bis zu 60 GHz führt.



© San Diego State University Antenna and Microwave Laboratory

Oben eine Linse mit konstanter K-Konstante (unveränderliche Dielektrizitätskonstante) in Verbindung mit einer Vivaldi-Antenne zur Erhöhung des Gewinns des Antennensystems insbesondere am oberen Ende des Betriebsspektrums. Diese Linsenantenne eignet sich am besten für Ultrabreitband-Anwendungen in der 5G- und Satelliten-Kommunikation, für Mikrowellenbildgebung und Radar.

Unten eine breitbandige, symmetrische, antipodische Vivaldi-Antenne (BAVA), montiert in einer Kammer zur Charakterisierung des Strahlungsdiagramms. ◀



© San Diego State University Antenna and Microwave Laboratory