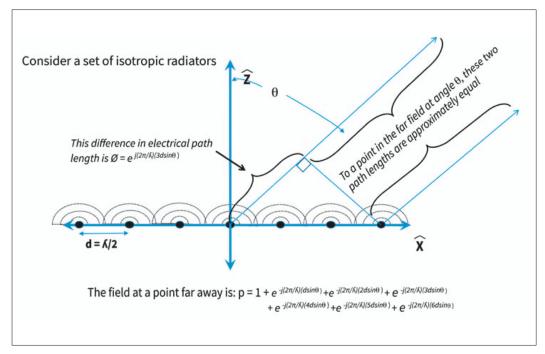
Grundlagen der aktuellsten Antennentechnik

Beamforming und Phased-Arrays für 5G



Eines ist sicher: Die Aktivantennen-Beamforming-Technologie für die Millimeterwellenbänder ist essentiell, um 5G umzusetzen.

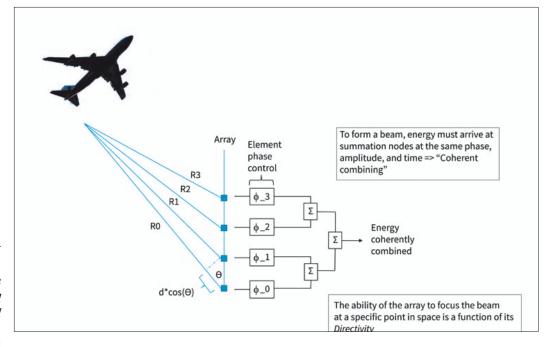
Dieser zweiteilige Artikel stellt die grundlegenden Beamforming-Konzepte vor sowie allgemeine Beamforming-Architekturen in aktiven Antennen.

Eine aktive Antenne in Form einer Phased-Array-Antenne lässt sich als System aus mehreren stationären Elementen definieren, welche so gespeist werden, dass variable Phasenlagen oder Laufzeiten möglich sind, sodass man das Richtdiagramm (Beam: Richtkeule, mehrere sind möglich) elektronisch steuern (im Wesentlichen im Raum schwenken) kann.

Kennzeichen

Bewegliche mechanische Teile entfallen dabei; ein Spezial-IC erlaubt die elektronische Steuerung. Hier taucht der Begriff "soft failure mechanism" auf, der bedeutet: Weil viele Elemente in einem Array zusammenwirken, wirken sich Abweichungen und Ungenauigkeiten bei einigen wenigen Elementen nur geringfügig auf die Gesamt-Performance einer solchen Antenne aus. Die Beams sind innerhalb von Mikrosekunden veränderbar, und dies gelingt bei mehreren Beams unabhängig. Doch nicht nur die Vorzugsrichtung lässt sich ändern, auch Nullstellen kann man herstellen und quasi im Raum schwenken. Das ermöglicht es, Interferenzen und Störsignale auszublenden.

Für die 5G-Kommunikation arbeiten diese Antennen auf Millimeterwellen-Frequenzen wie 24, 26, 28, 37 und 39 GHz. Diese geringen Wellenlängen erlauben es, viele Antennenelemente in einer kompakten, hochgradig ausgerichteten



Quelle:
Millimeter-Wave 5G
Beamforming and Phased
Array Basics, by David
Corman, Anokiwave, Inc.,
2019, www.anokiwave.com
übersetzt von FS

Bild 1: Kohärente Summierung von Energie beim linearen Array

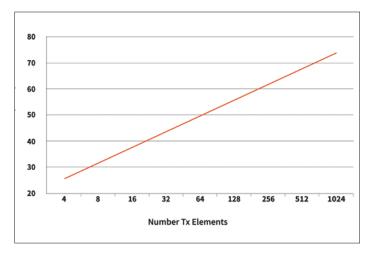


Bild 2: So variiert G/T mit der Arraygröße (Elementabstand hier $\lambda/2$, System-Rauschmaß 5 dB und 0,5 dB Gesamtverlust durch Anpassung und Radome)

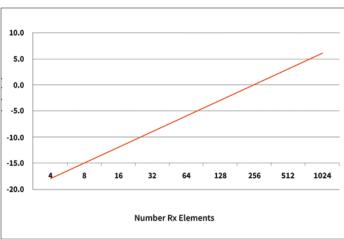


Bild 3: Abhängigkeit der EIRP von der Antennengröße (Elementabstand $\lambda/2$, 9 dBm Sendeleistung pro Element)

Apertur zusammenzubringen, wobei die hohen Pfadverluste in diesen Frequenzbereichen ausgeglichen werden können. Ein weiterer großer Vorteil dieser hochgradig konzentrierten Beams besteht darin, dass sie die Spatial-Diversity-Spielart, in welcher mehrere Beams das selbe Frequenzspektrum nutzen, ermöglichen. Gerade der Spatial-Diversity-Betrieb macht es möglich, in großartiger Weise die Systemkapazität zu vergrößern.

Beamforming-Prinzipien

Die Aufmachergrafik skizziert ein lineares Array entlang der x-Axe, wobei die Antennenelemente im Abstand einer halben Wellenlänge zueinander angeordnet sind. Wenn jedes Element mit entsprechender Phasenlage angesteuert wird, so lässt sich ein Beam formen mit Hauptstrahlrichtung gemäß Phasenlagen. In Bild 1 soll ein Ziel am Himmel bestmöglich empfangen werden. Dieses Flugzeug sei so nahe, dass die Abstände (R, Ranges) zu jedem Antennenelement im Array nicht mehr als gleich für jedes Element angenommen werden können. Infolge des Halbwellen-Abstands der Elemente d und des Einfallswinkels der Energie vom Flugzeug T von 0° ergibt sich eine Zunahme der Pfadlängen-Differenz zwischen benachbarten Elementen von d x cos(T). Um diesen Unterschied in der Pfadlänge zu kompensieren, kann man Phasenschieber hinter jedem Element einfügen. Wenn dadurch die angemessene Phasen-Shift erreicht wird, so lässt sich durch Zusammenfügen der Ausgänge ein Beam im Fernfeld formen. Das Kennzeichen dieser Technik ist die gleiche Phasenlage der summierten Signale bei gleicher Amplitude. Man nennt das "coherent combining".

Array-Directivity und Gewinn

Die Directivity (Richtwirkung) ist das Messergebnis darüber, wie konzentriert der Antennengewinn in einer gegebenen Richtung ausfällt. Der Gewinn sei hier in Bezug auf den isotropen Strahler definiert. Er folgt einer Beziehung gemäß 10 x log(N), wobei N die Anzahl der Elemente im Array ist. Der Gewinn unterscheidet sich vom

Richtfaktor durch die ohmschen und Scan-Verluste (s. weiter unten). Daher kann man allgemein schreiben:

$$\begin{split} & Array\text{-}Gewinn = 10 \text{ x log(N)} + \\ & G_e - L_{ohmsch} - L_{Scan} \\ & G_e \dots Element\text{-}Gewinn im Array} \\ & L \dots Loss \text{ (Verlust)} \end{split}$$

Wenn die Elemente sowohl in Azimuth- wie in Elevationsrichtung eine halbe Wellenlänge Abstand aufweisen, so beansprucht jedes Element einen

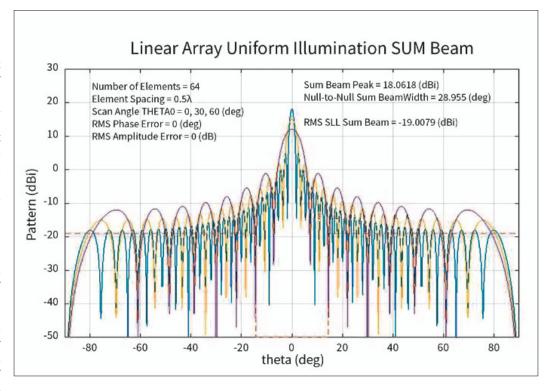


Bild 4: Beispiele für Uniformally-Illuminated-Lineararrays mit 64, 32 oder 16 Elementen

hf-praxis 11/2019 37

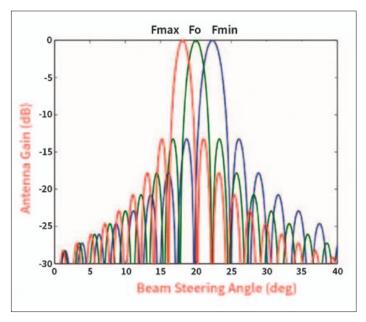


Bild 5: Zum Beamsquint

Bereich (Area) von einem Vierterl einer quadrierten Wellenlänge ($\lambda 2/4$). Weil der Antennengewinn der Beziehung 4 $\pi/\lambda 2$ x Ae gehorcht, in der Ae die effektive Area der Antenne (Wirkfläche) darstellt, erreicht der Gewinn Ge dann den Faktor π entsprechend 5 dBi. Man sollte beachten, dass für jedes

dem Array hinzugefügte Element das Verhältnis G/T eines Empfängers mit Array um 10 x log(N) zunimmt, wie in Bild 2 dargestellt. Hinweis: Das Verhältnis aus Verstärkung G (Gain) und Rauschtemperatur T eines Empfängers lässt sich in 1/K oder dB/K angeben und fasst die Qualität der Empfangskette

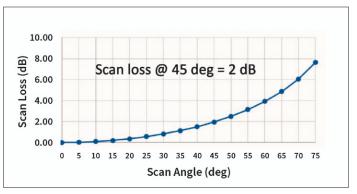


Bild 6: Zum Scanloss

einschließlich Empfangsantenne zusammen. Das heißt: Die Aperturgröße wird zwar erhöht, aber das Rauschmaß bleibt konstant. Hingegen nimmt die EIRP (equivalent isotropically radiated power) eines Senderarrays um 20 x log(N) zu, denn mit jedem neuen Element wird gewissermaßen Gewinn eingebracht. Dies zeigt beispielhaft Bild 3.

Systemingenieure definieren typischerweise detaillierte G/Tund EIRP-Budgets, wobei es einen breiten Bereich von Variablen gibt, einschließlich Systemrauschmaß, Embedded-Element-Gewinn, Arbeitsfrequenz, Sendeleistung pro Element, Verlust zwischen den Elementen, Scan-Verlust, Einfluss von Polarizers und Radomes sowie Temperatur.

Bild 4 stellt einige Beispiele von linearen Arrays vor mit 16, 32 und 64 Elementen. Der Graph zeigt sowohl Hauptkeule als auch Seitenzipfel. Die Antennen-Richtwirkung folgt der Regel 10 x log(N). Mit jeder Verdopplung der Größe der Antenne halbiert sich die Halbwertsbreite beim Richtdiagramm. Mit anderen Worten: Der Gewinn vergrößert sich um 3 dB.

Ein Thema im Zusammenhang mit der Nutzung von Phasenschiebern zur Steuerung des Richtdiagramms von aktiven Antennen nennt sich "beam squint", siehe hierzu Bild 5. Dahinter steht die Tatsache, dass bei der elektrischen Steuerung der Richtcharakteristik durch Phasenschieber eine Zeitverzögerung (time delay) auftritt. Dies bedeutet, dass die perfekte Ausformung nur bei einer bestimmten Frequenz möglich ist, bei höheren oder niedrigeren Frequenzen kommt es zu Abweichungen. Einen Ausweg gibt es hier leider nicht, sodass Phasenschieber-Anwendungen zumindest im Millimeterwellen-Bereich ein Breitbandeinsatz verwehrt bleibt.

Eine andere Einschränkung aller dieser aktiven Antennen ist der Verlust an Apertur-Gewinn dann, wenn der Beam von seiner Fernsichtrichtung (boresight direction) weggesteuert wird. Diese Eigenschaft nennt man " scan loss", und sie folgt der Beziehung 10 x log(cosN(T)), wobei

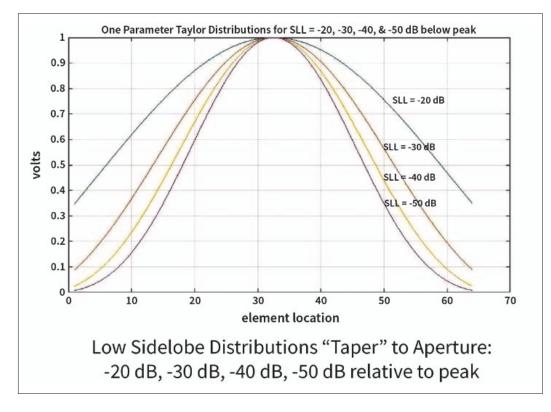


Bild 7: Tapering vs. Sidelobe-Level

38 hf-praxis 11/2019

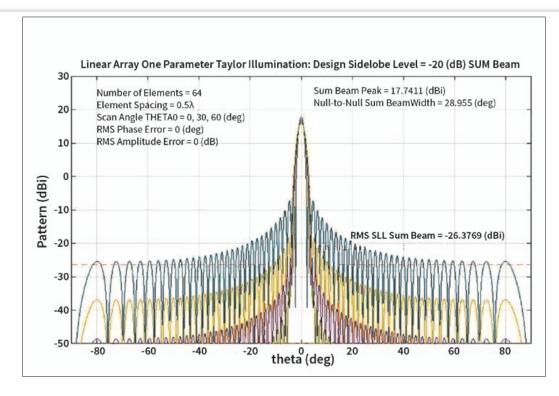


Bild 8: Zur Ausbildung von Nebenzipfeln

T der Abweichwinkel von der Fernsichtrichtung (scan angle off boresight) ist und N ein numerischer Wert von typisch 1,3, mit dem das nichtideale isotrope "Benehmen" des Gewinns des eingebetteten (embedded) Elements berücksichtigt wird.

Bild 6 dokumentiert den Zusammenhang zwischen Scan-Verlust und Scan-Winkel, wobei der Boresight-Winkel natürlich mit 0° angesetzt wurde. Hier gibt es keinen Scan-Loss. Bei einem Scan-Winkel von 45° (60°) hingegen gibt es 2 (4) dB Scan-Verlust. Solche Aktivantennen müssen daher mit entsprechender Reserve dimensioniert werden, damit sich das geforderte G/T und die geforderte EIRP auch bei maximalen Scan-Abweichungen noch ergeben.

Tapering oder Taper (Verjüngen, kegelförmig zulaufen lassen) nennt man den Prozess der Zuweisung von verschiedenen Gewinnen zu den einzelnen Elementen innerhalb des Arrays, wobei die in der Mittel liegenden Elemente den höchsten Gewinn zugewiesen bekommen. In Bild 7 wird gezeigt, wie man verschiedene Tapering-Niveaus erreichen kann. Grundlage ist ein 64-elementiges Array, sodass die Kurve mit dem maximalen Gewinn bei Element 32 in der

Mitte des Arrays erreicht wird. Wichtig hierbei: Umso schneller der Element-Gewinn infolge der zunehmenden Entfernung der Elemente von der Mitte absinkt, umso größer ist die Unterdrückung von Nebenzipfeln (sidelobes) im Richtdiagramm. In der Grafik sieht man diese Auswirkungen bei Sidelobe-Levels von -20, -30, -40 und -50 dB. Das ist der Grund, warum Beamforming typischerweise die Amplitudensteuerung bei jedem Element erfordert, nicht nur die Phasensteuerung. Wenn alle Elemente mit dem gleichen Gewinn ausgestattet werden, spricht man von "uniform illumination." Uniform Illumination bedeutet -13 dBc für die ersten auftretenden Nebenzipfel (first side lobe levels), was für einige Applikationen unakzeptabel sein kann mit Blick auf Vorschriften, Interferenzen oder andere Gründe. Die Gewinnsteuerung erlaubt es dem Systemingenieur, den Gewinn pro Element so einzustellen, dass die vorgeschriebene Maximalgröße der Nebenzipfel eingehalten werden kann.

In Bild 8 werden überlagernd Sidelobe-Levels für verschiedene Taper-Konstellationen dargestellt. Konkret erreichen diese -20, -30, -40 und -50 dB relativ zur Spitze. Man kann deutlich

die Sidelobe-Unterdrückung in Abhängigkeit vom Tapering-Niveau erkennen. Basis ist ein 64-elementiges Array mit einem Richtfaktor von 18 dBi gemäß der Beziehung 10 x log(64).

Die Gewinnsteuerung per IC ermöglicht z.B. einen Bereich von

0 bis 31,5 dB in 0,5-dB-Schritten. Das Taper-Ergebnis hängt übrigens nicht vom Scan-Winkel ab. Taper ist eine gute Sache, hat aber seinen Preis. Wenn Taper zum Einsatz kommt, dann ist der Richtfaktor geringer als bei uniform Illumination und die Halbwertsbreiten im Richtdiagramm liegen weiter voneinander entfernt. Etwa bei -20 (-50) dB Sidelobe-Level-Unterdrückung erhält man Richtfaktoren von rund 18 (16,1) dBi.

Eine andere Eigenart dieser aktiven Antennen ist das Auftreten von Nebenzipfeln in Form eines Gitters (grating lobes), wobei sich der Abstand der Gitter aus dem Abstand der Elemente zueinander (d) ergibt. Um solch parasitäre Grating Lobes zu vermeiden, muss man folgende Regeln beachten:

 $d/\lambda_o < 1/(1+\sin T)$ für ein rechteckiges Gitter (min. Abstand 0,5 λ_o bei 90° Scan)

 $d/\lambda_0 < 1,15/(1+\sin T)$ für ein dreieckiges Gitter (min. Abstand 0,575 λ_0 bei 90° Scan)

 λ_o ... Freiraum-Wellenlänge

T ... max. Scan-Winkel

Kostengünstigen 5G-Transceiver mit 64-elementigem Phased-Array

Beim Tokyo Institute of Technology und bei der NEC Corporation in Japan hat man einen kostengünstigen 39-GHz-Transceiver mit eingebauter Kalibrierung für 5G-Applikationen entwickelt. Er könnte in fortgeschrittenem 5G-Drahtlol-Equipment wie Basisstationen, Smartphones, Tablets sowie dem Internet of Things Anwendung finden. Die Herstellung erfolgte in einem Standard-65-nm-CMOS-Verfahren auf Basis von Silizium, was die geringen Kosten ermöglicht.

Der neue Transceiver basiert auf einem 64-elementigen (4 x 16) Phased-Array-Design. Die erwähnte interne Gewinn-Phasenkalibrierung erlaubt es, die Beamforming-Genauigkeit zu verbessern, also unerwünschte Sendefeldanteile besser zu unterdrücken und das Signal noch besser auf den/die Empfänger zu konzentrieren. Es konnte gezeigt werden, dass der RMS-Phasenfehler (Root Mean Square) mit 0,08° äußerst gering ist. Während typische aktuelle Transceiver eine Gewinnvariation von mehr als einem 1 dB im Abstimmbereich aufweisen, liegt die Gewinnvariation hier unter 0.04 dB über den vollen 360°-Abstimmbereich. Der Transceiver hat eine maximale EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) von 53 dBm. Dies ist ein beeindruckendes Kennzeichen der Wirkungsweise der 64 Antennen.

hf-praxis 11/2019 39

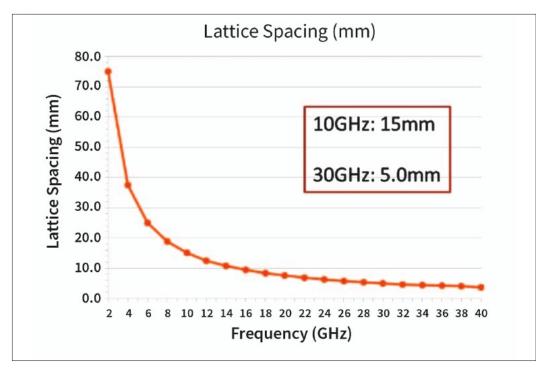
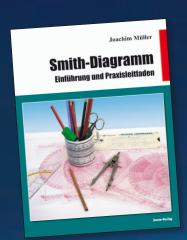


Bild 9: Verlauf des üblichen Elementabstands über der Frequenz

Ein allgemein üblicher Wert für den Gitterabstand bei diesen Antennen und rechteckigem Gitter ist 0,55 λ. Bild 9 informiert zum erforderlichen Gitterabstand als Funktion der Frequenz. Hier erkennt man, dass bei hohen Frequenzen (über 28 GHz) nur sehr wenig Raum zwischen den Elementen für die elektronisch zu realisierenden Funktionen Tx/Rx-Umschaltung und Beamforming zur Verfügung steht. Die Unterbringung dieser Funktionen direkt an den Elementen ist jedoch besonders für High-Performance-Antennen anzustreben, weil dadurch minimale Anpassungsverluste und somit maximale EIRP bzw. minimaler Rauschfaktor erreichbar sind. Ein hoher Integrationsgrad mit der Siliziumtechnologie wird hier kritisch und herausfordernd. Mehr dazu im nächsten Heft der hf-praxis. ◀

Fachbücher für die Praxis



Smith-Diagramm

Einführung und Praxisleitfaden

Joachim Müller, 21 x 28 cm, 117 Seiten, zahlreiche, teilweise farbige Abbildungen, beam-Verlag 2009, ISBN 978-3-88976-155-2, Art.-Nr.: 118082, 29,80 €

Das Smith-Diagramm ist bis heute das wichtigste Instrument zur bildlichen Darstellung der Anpassung und zum Verständnis der Vorgänge in HF-Systemen. In der einschlägigen Fachliteratur findet man zwar viele Stellen zum Smith-Diagramm, sie erfordern aber meist erhebliche mathematische Kenntnisse: Eine grundlegende Einführung sucht man vergeblich. Diese Lücke schließt dieses Buch als praxisnahe Einführung in den Aufbau und die Handhabung des Diagramms. Mathematikkenntnisse die zu einer elektrotechnischen Ausbildung gehören, reichen dabei aus.

Aus dem Inhalt:

Der Weg zum Smith-Diagramm - Komplexe Zahlen - Reflexion bei Einzelimpulsen und kontinuierlichen Sinussignalen - Reflexionsfaktor - Rückflussdämpfung, VSWR, Kreisdiagramme; Schmidt-Buschbeck-Reflexionsdiagramm Diagramm - CarterDiagramm - Praxis mit Kompensation Smith-Diagramm; Blindanteilen, Ortslinie über Frequenz - Leitung als Transformator, elektrisch kurze bzw. lange Leitung, S-Parameter und Smith-Diagramm - Leitwert-Smith-Diagramm - Darstellung von Leitwerten im Smith-Diagramm, Parallelschaltung von Bauelementen - Grundelemente unter der Lupe - Ortslinien von Induktivitäten und Kapazitäten, das Bauelement Leitung - Stubs - Anpassung mit dem L-Glied -Hilfsmittel für die Arbeit mit dem Smith-Diagramm - Software - Messtechnik

Unser gesamtes Buchprogramm finden Sie unter www.beam-verlag.de oder bestellen Sie über info@beam-verlag.de

40 hf-praxis 11/2019