

Radartutorial

Buch 3 „Antennentechnik“

Vorwort:

Der Ursprung des Wortes Antenne geht auf den italienischen Erfinder Guglielmo Marconi zurück. 1895 experimentierte er mit damaligen Funkanlagen. Eine 2,50 m lange Zeltstange, an der ein Draht gespannt war, fungierte als Antenne. In der italienischen Sprache wird eine Zeltstange als *l'antenna centrale* bezeichnet, und eine solche Zeltstange, mit dem daran entlanggeführten Draht, wurde damals einfach **l'antenna** genannt. Marconis Gebrauch des Wortes *l'antenna* führte schnell zu der populären Begriffsbildung für das Bauteil, was heute einheitlich Antenne genannt wird.

Eine Antenne dient zum Empfangen oder Senden von elektromagnetischen Wellen. Die Baugröße liegt in der Größenordnung der Wellenlänge und reicht von mehr als 100 m für den Langwellenbereich bei ca. 100 kHz bis hinab zu wenigen Millimetern für den Höchsthfrequenzbereich. Eine Antenne hat die Aufgabe, aus einem elektromagnetischen Feld Energie zu entnehmen oder die von einem Sender (Hochfrequenzgenerator) erzeugte Energie in Form von elektromagnetischen Wellen in den freien Raum auszustrahlen. In diesem Abschnitt werden neben einigen Grundlagen der Antennentechnik speziell Antennen behandelt, die in Radargeräten verwendet werden.

Inhaltsverzeichnis:

Radartutorial.....	1
Vorwort:	1
Lernziele:	2
Funktionen einer Radarantenne	2
Kennwerte von Antennen	3
Antennengewinn	3
Antennendiagramm	3
Polarisation	5
Dipolantenne	6
Parabolantennen	7
Cosecans ² - Antennen.....	9
Phased Array Antennen	11
Arbeitsprinzip	11
Lineare Arrays	11
Planare Arrays	12
Phasenschieber	12
Digitale Formung des Antennendiagramms	12
Monopulsantennen	13
Monopulsverfahren.....	14
Minimumpeilung	15
Wissenstest.....	16

Lernziele:

Die hier genannten Lernziele sollen einen Überblick über die zu erwartenden Themen in diesem Kapitel geben. Dieses Kapitel der Homepage „Radargrundlagen“ vermittelt Kenntnisse über spezielle Radarantennen. Am Ende dieses Kapitels sollte der Lernende die verschiedenen Radarantennen kennen und deren Einsatzmöglichkeiten bewerten können. Er sollte:

- den Zusammenhang zwischen der Richtwirkung einer Antenne und ihres Antennengewinns kennen;
- die Entstehung der Richtwirkung anhand eines einfachen Parabolreflektors erläutern;
- das Antennendiagramm einer Parabolantenne beschreiben;
- das Zustandekommen einer Richtwirkung bei einer Phased- Array Antenne
- und das Konzept einer Monopulsantenne erläutern können.

Funktionen einer Radarantenne

Die Antenne ist eines der anfälligsten Teile der Radaranlage. Sie erfüllt im Gesamtsystem eines Radargerätes folgende Funktionen:

- Die Antenne setzt die hochfrequente Energie des Senders in elektromagnetische Felder um und verteilt die Leistung in bestimmte Richtungen. Dieser Prozess ist umkehrbar für den Empfang der Echosignale.
- Die Antenne sichert das erforderliche Antennendiagramm und die erforderliche Leistungsverteilung im Raum. Das Antennendiagramm muss im Seitenwinkel sehr schmal sein, damit ausreichende Genauigkeit und Auflösungsvermögen erreicht werden.
- Die Antenne muss schnell genug die empfangenen Daten der Ziele aktualisieren. Im Falle einer mechanischen Raumabtastung muss die Antenne sich also sehr schnell drehen. Diese schnelle Drehung kann ein erhebliches mechanisches Problem bereiten, weil die Antennenreflektoren in bestimmten Frequenzbereichen sehr große Dimensionen erreichen.
- Die Antenne muss den aktuellen Abstrahlwinkel mit hoher Genauigkeit messen.
- Die Antennenkonstruktion muss diese Aufgaben unter allen Witterungsbedingungen sicherstellen.

Die Leistungsfähigkeit der Radaranlage ist mathematisch vereinfacht dargestellt direkt proportional zu dem Produkt aus der effektiven Antennengröße und der Sendeleistung. Eine Investition in die Antenne hat also immer eine direkte Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des Radargerätes.

Berücksichtigt man diese Forderungen an die Antennen, so sind für Aufklärungsradargeräte zwei Grundformen von Radarantennen hauptsächlich im Einsatz:

- **Parabolantennen** und
- **Phased Array Antennen.**

Beide Antennenformen werden in dieser Lernunterlage beschrieben.

Kennwerte von Antennen

Antennengewinn

Durch besondere Gestaltung der Antenne kann man die Strahlungsdichte in bestimmten Raumrichtungen konzentrieren. Ein Maß für die Richtfähigkeit einer verlustlosen Antenne bildet der „Antennengewinn“. Zu seiner Definition zieht man neben der eigentlichen Antenne eine Bezugsantenne heran. Meistens dient als Bezugsantenne ein fiktiver Kugelstrahler (isotroper Strahler), der in alle Richtungen gleichmäßig strahlt, oder ein einfacher Dipol, welcher zumindest in der betrachteten Ebene auch eine Referenz bilden kann.

Für die eigentliche Antenne ermittelt man nun die Strahlungsdichte (Leistung pro Flächeneinheit) an einem Punkt in einer bestimmten Entfernung und vergleicht diese mit dem Wert, der sich bei Verwendung der isotropen Antenne ergibt. Der Antennengewinn ist dann das Verhältnis aus den beiden gemessenen Strahlungsdichten.

Erzeugt eine Richtantenne beispielsweise in einer bestimmten Raumrichtung eine 200-mal so große Strahlungsdichte wie eine isotrope Antenne, so hat der Antennengewinn G in dieser Richtung den Wert 200 oder 23 dB. Je schmaler das Antennendiagramm ist und je kleiner die Nebenkeulen sind, umso mehr Energie wird in eine ganz spezielle Richtung ausgesendet, umso größer ist also der Antennengewinn.

Antennendiagramm

Je nach Anwendung soll eine Antenne nur aus einer bestimmten Richtung empfangen, die Signale aus anderen Richtungen jedoch nicht aufnehmen (z.B. Fernsehantenne, Radarantenne), andererseits soll z.B. die Autoantenne Sender aus allen möglichen Richtungen empfangen können.

Die gewünschte Richtcharakteristik erreicht man durch den gezielten mechanischen und elektrischen Aufbau einer Antenne. Eine Richtcharakteristik gibt an, wie gut eine Antenne in einer bestimmten Richtung empfängt bzw. sendet. Sie wird in einer grafischen Darstellung (Richtdiagramm, Antennendiagramm) als Funktion des Azimutwinkels (Horizontaldiagramm) und des Elevationswinkels (Vertikaldiagramm) angegeben.

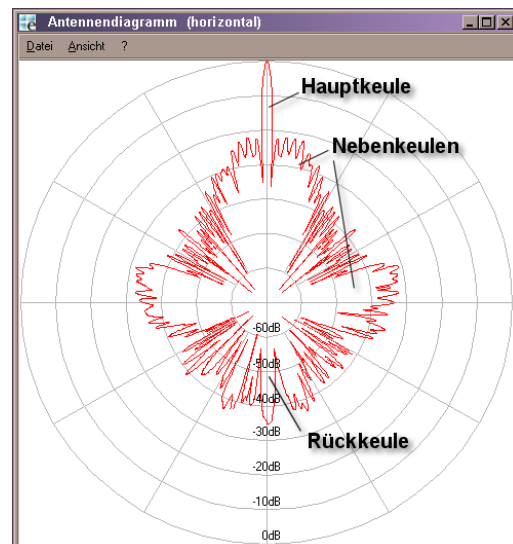


Abb. 1: ein horizontales Antennendiagramm in einem Polarkoordinatendiagramm

Richtdiagramme von Antennen werden oft als Ortskurve in einem Polarkoordinatensystem gezeichnet. Es ist anschaulicher als z.B. ein Kartesisches Koordinatensystem, da es die Richtung unmittelbar angibt. Das horizontale Antennendiagramm ist eine Draufsicht auf das elektromagnetische Feld einer Antenne. Es ist eine zweidimensionale Ebene mit der Antenne im Mittelpunkt. Die lokalen Maxima in dem Diagramm heißen bildlich Keulen:

- die **Hauptkeule** mit dem größten Energieanteil;
- die **Nebenkeulen** mit kleineren ausgeprägten Maxima und
- die **Rückkeule**, die in die entgegengesetzte Richtung der Hauptkeule zeigt.

Das Antennendiagramm wird oft logarithmisch in Dezibel aufgetragen, da die Nebenkeulen um mehrere Größenordnungen kleiner sein können als die Hauptkeule und bei einer linearen Auftragung sonst schwer zu erkennen wären.

Sollen aus dem Antennendiagramm Messwerte abgelesen werden, so ist eine Darstellung in einem kartesischen Koordinatensystem günstiger zu handhaben.

Aus dem Antennendiagramm sind viele Parameter einer Antenne ablesbar, welche die Qualität und Richtwirkung einer Antenne bestimmen:

- das Vor-Rück-Verhältnis (VRV), auch Rückdämpfung genannt,
- das Vor-Seiten-Verhältnis (VSV) und
- die Nebenkeulendämpfung.

Bei der Betrachtung eines Antennendiagramms wird die folgende Vereinfachung getroffen:

Halbwertsbreite

Unter der Strahlbreite (Öffnungswinkel) versteht man den Winkelbereich des Antennendiagramms, in dem noch mindestens die Hälfte der maximalen Leistung abgestrahlt wird!

Grenzpunkte der Hauptkeule sind somit die Punkte, an denen die Feldstärke im Raum um 3 dB bezüglich der maximalen Feldstärke abgefallen ist. Der Winkel θ (sprich: Theta) wird dann als Öffnungswinkel oder „Halbwertsbreite“ der Antenne bezeichnet. Eine gute Parabolantenne sollte zum Beispiel eine Strahlbreite von etwa $1,7^\circ$ haben.

Effektive Antennenfläche

Eine wichtige Kenngröße von Antennen wird effektive Antennenfläche A_e genannt. Da die Strahlungsdichte des elektromagnetischen Feldes am Empfangsort eine Größe ist, welche eine Strahlungsleistung pro Flächeneinheit darstellt, dann kann also dem Zahlenwert einer bestimmten Leistung, die eine Antenne diesem Feld entnimmt, eine Fläche zugeordnet werden. Es ist dann eine Fläche, die durch eine Antenne in einem elektromagnetischen Feld repräsentiert wird. Diese Fläche kann etwa die geometrische Fläche einer Antenne sein, ist aber meist kleiner.

Der Antennengewinn und die effektive Antennenfläche stehen in folgender mathematischer Beziehung zueinander:

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_e}{\lambda^2} \quad A_e = A \cdot K_a$$

Dabei bedeuten: λ = Wellenlänge
 A_e = effektive Antennenfläche
 A = geometrische Antennenfläche
 K_a = Effektivität der Antennenfläche (1)

Die effektive Antennenfläche ist abhängig von der Strahlungsverteilung über die geometrische Antennenfläche. Ist diese Strahlungsverteilung linear, dann ist $K_a = 1$. Diese hohe Effizienz bei einer linearen Strahlungsverteilung hat aber auch stark ausgeprägte Nebenkeulen zur Folge. Wenn die Nebenkeulen auf eine für den praktischen Einsatz einer Antenne geringere Größe gehalten werden sollen, dann muss die Strahlungsverteilung nichtlinear sein und die effektive Antennenfläche ist dann kleiner als die geometrische Antennenfläche ($A_e < A$).

Nebenkeulendämpfung

Außer der Hauptkeule findet man im Strahlungsdiagramm einer Antenne mehrere Nebenkeulen und eine Rückkeule. Diese Erscheinungen sind unerwünscht, da sie den Richteffekt ungünstig beeinflussen und zusätzlich der Hauptkeule Energie entziehen. Das Verhältnis zwischen Hauptkeule und größter Nebenkeule nennt man Nebenkeulendämpfung. Die Nebenkeulendämpfung sollte einen möglichst hohen Wert aufweisen. Bei einer guten Parabolantenne werden Werte größer als 20 dB erreicht.

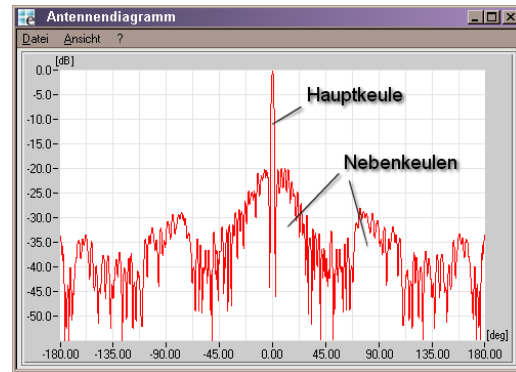


Abb. 2: gleiches Antennendiagramm in einer Darstellung mit kartesischen Koordinaten

Vor- /Rückverhältnis

Das Vor- /Rückverhältnis oder auch Rückdämpfung genannt, stellt das Verhältnis des Gewinns der Hauptkeule in 0° zum Gewinn der Rückkeule in 180° dar. Auch dieses Verhältnis sollte möglichst groß sein.

Polarisation

Bei dem durch eine Antenne abgestrahlten elektromagnetischen Feld stehen die Kraftlinien des elektrischen Feldes senkrecht zu dem magnetischen Feld. Beide Feldkomponenten hängen von der Lage der Antenne bezogen zur Erdoberfläche ab.

Die Richtung der elektrischen Feldkomponente einer elektromagnetischen Welle bestimmt die Polarisation der Abstrahlung. Man unterscheidet zwischen der linearen und der zirkularen Polarisation.

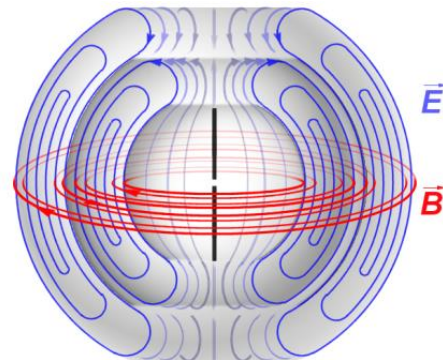


Abb. 3: elektrisches Feld (blau) und magnetisches Feld (rot) eines vertikal polarisierten Dipols

Lineare Polarisation

Aus der linearen Polarisation lassen sich zwei weitere Hauptformen der Polarisation ableiten:

- Die vertikale Polarisation mit senkrecht zur Erdoberfläche verlaufendem elektrischem Feld.
- Die horizontale Polarisation mit parallel zur Erdoberfläche verlaufendem elektrischem Feld.

Die lineare Polarisation kann natürlich auch alle anderen Richtungen im Raum einnehmen.

Zirkulare Polarisation

Bei der zirkularen Polarisation rotiert der Feldstärkevektor rechts- oder linksdrehend senkrecht zur Ausbreitungsrichtung Z (rechtsdrehende-/linksdrehende Zirkularpolarisation). Eine zirkulare Polarisation entsteht durch zwei um 90° phasenverschoben gespeiste und gleichzeitig um 90° versetzte linear-polarisierte Antennen. Sind die Amplituden zweier solcher Linearer Komponenten nicht gleich groß, entsteht eine elliptische Polarisation.

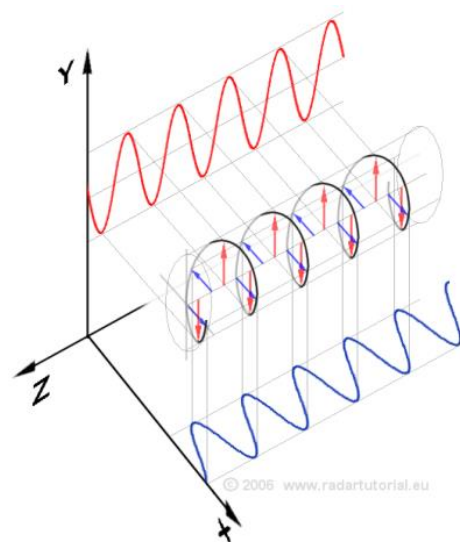


Abb. 4: Entstehung der zirkularen Polarisation

Durch Unregelmäßigkeiten in der Atmosphäre, insbesondere der Ionosphäre und dem Reflexionsverhalten von Gegenständen treten häufig Polarisationsverschiebungen auf. Sie erzeugen Dämpfungserscheinungen, das sogenannte Polarisationsfading (-schwund). Die durch die Hindernisse hervorgerufenen Dämpfungen durch Polarisationsdrehung nennt man **Depolarisation**.

Für einen optimalen Empfang müssen Antennen gleicher Polarisation verwendet werden. Wird eine falsch polarisierte Antenne eingesetzt, so entstehen erhebliche Verluste, in der Praxis zwischen 20 und 30 dB. Auf Grund dieser Tatsache kann man durch bewusste Änderung der Polarisation sowohl atmosphärische Störungen als auch bestimmte elektronische Störungen unterdrücken. In der Praxis wird z.B. beim Auftreten von starkem Wetterclutter gern auf eine zirkulare Polarisation umgeschaltet.

Dipolantenne

Das einfachste Resonanzgebilde in der Antennentechnik ist der Halbwellendipol. Er bildet das Grundelement fast aller Antennenformen und wird neben dem isotropen Kugelstrahler manchmal auch als Bezugsantenne verwendet.

Der Ausdruck „Dipol“ bedeutet „Zweipol“ und kennzeichnet, dass der Halbwellenstrahler in seiner geometrischen Mitte aufgetrennt ist. An den dort entstehenden „2 Polen“ kann die Speiseleitung, der Sender oder der Empfänger angeschlossen werden. Der sogenannte Faltdipol ist eine spezielle Art des $\lambda/2$ -Dipols, bei dem die Speisung in der Mitte zweier paralleler Drähte erfolgt, die an den Enden kurzgeschlossen sind. Seine Impedanz ist 4-mal höher als die des gestreckten Dipols.

Wie schon der Name sagt, hat der Halbwellendipol eine Längenausdehnung, die etwa der halben Wellenlänge ($\lambda/2$) der jeweils verwendeten Frequenz entspricht. In diesem Fall befindet sich der Dipol in Resonanz mit der Wellenlänge. Von seinem Strom- und Spannungsverhalten entspricht er einem Parallelschwingkreis.

Die Impedanz eines idealen $\lambda/2$ -Dipols mit einem Leiterdurchmesser von 0 ist $(73 + j42,5) \Omega$, seine Halbwertsbreite ist 78° . Das Richtdiagramm des elektrischen Feldes eines horizontalen $\lambda/2$ -Dipols ähnelt in einem vertikalen Schnitt einer querliegenden Acht. Um einen praktischen Halbwellendipol resonant zu machen, muss ein Verkürzungsfaktor von 0,96 angewandt werden. Das heißt ein $\lambda/2$ -Dipol ist eigentlich $0,48 \lambda$ lang. Wenn die Durchmesser der Dipolelemente > 0 ist, sinkt der Verkürzungsfaktor in Abhängigkeit vom realen Durchmessers weiter ab. Gegenüber einem isotropen Kugelstrahler mit dem Antennengewinn von genau 1 hat er aber schon einen Gewinn von etwa 1,5-fach bzw. 2,2 dB (da er ja bereits eine Richtung bevorzugt).

Der Halbwellendipol ist aus einem einfachen Schwingkreis entstanden. Stellen wir uns einfach vor, dass die Kondensatorplatten des Schwingkreises ein wenig auseinandergebogen werden. Damit verringert sich zwar die Kapazität, aber der Kondensator bleibt ein Kondensator. Bei einem weiteren Auseinanderbringen der Kondensatorplatten haben die elektrischen Feldlinien einen immer größeren Weg zurückzulegen. Der Kondensator ist dann als solcher schon gar nicht mehr zu erkennen. Die Feldlinien des elektrischen Feldes treten in den freien Raum über. Es ist ein Halbwellendipol entstanden, der über eine Zuleitung gespeist wird.

Auch in Radarantennen werden neben der Hauptantenne oft Dipolantennen als zusätzliche Rundstrahler verwendet. Sie heißen dort aufgrund ihrer Rundstrahlcharakteristik meist „Omnidirectional Antenna“ und dienen der aktiven Nebenkeulenunterdrückung.

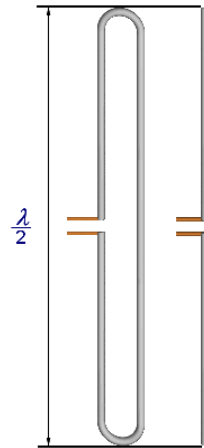


Abb. 5: Faltdipol und gestreckter Halbwellendipol

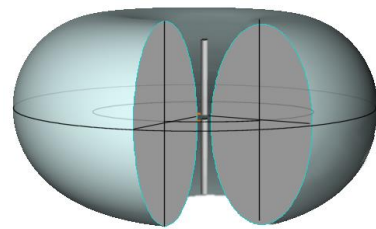


Abb. 6: Räumliche Richtcharakteristik eines Dipols, die Oberfläche des Körpers repräsentiert gleiche Feldstärken

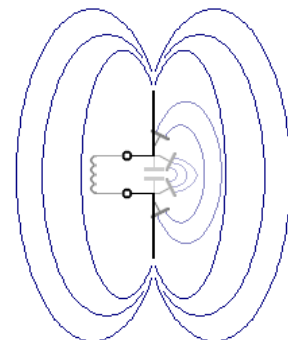


Abb. 7: Entstehung des Dipols aus einem Schwingkreis

Parabolantennen

Die Parabolantenne stellt von den in der Radartechnik eingesetzten Antennentypen die am häufigsten angewendete Form dar. In der Abbildung ist der Aufbau einer „normalen“ (symmetrischen) Parabolantenne skizziert. Der Punktstrahler leuchtet den symmetrischen Reflektor aus.

Der runde Reflektor, ein Ausschnitt aus einem Rotationsparaboloid, ist meist eine Metallkonstruktion, oft nur ein Gitternetz in einem Metallrahmen. Die Löcher in dem Gitternetz müssen kleiner als $\lambda / 10$ sein. Dieser Reflektor wirkt als Spiegel für die elektromagnetischen Wellen.

Gemäß den Gesetzen der Optik (und der Geometrie) werden an der Oberfläche dieses Reflektors alle Strahlen parallel zur Antennenachse reflektiert. Diese Strahlen verlassen den Strahler kugelförmig, werden am Reflektor mit einem Phasensprung von 180° reflektiert und zu einer ebenen Wellenfront geformt, bei der alle Strahlen parallel verlaufen. Damit weisen die Strahlen bis zu einer beliebigen Ebene senkrecht zur Parabolachse keine Wegunterschiede auf.

Die Abbildung 9 zeigt eine idealisierte Form eines runden Radarreflektors und diese Antenne erzeugt einen sehr schmalen, sogenannten Pencil Beam. Wenn der Reflektor eine elliptische Form hat, dann wird ein fächerförmiger Strahl erzeugt. Aufklärungsradargeräte haben vertikal und horizontal unterschiedliche Antennendiagramme: im Seitenwinkel einen sehr schmalen Pencil Beam und im Höhenwinkel ein klassisches Cosecans²- Diagramm.

Dieser Idealfall kommt aber in der Praxis nicht vor. Bedingt durch herstellungstechnische Unzulänglichkeiten erfolgt die Abstrahlung eher keulenförmig. Eine Parabolantenne besitzt ein weitgehend rotationssymmetrisches Richtdiagramm von hohem Gewinn, hohem Vor-/Rückverhältnis und relativ kleinen Nebenzipfeln.

Der Antennengewinn einer Parabolantenne kann annähernd mit der folgenden Formel bestimmt werden:

$$G = \frac{160^2}{\theta_{Az} \cdot \theta_{El}} \quad \text{Dabei bedeuten: } \theta_{Az} = \text{Halbwertsbreite im Seitenwinkel} \quad \theta_{El} = \text{Halbwertsbreite im Höhenwinkel} \quad (2)$$

Das ist zwar nur eine Näherungsformel, reicht aber für die meisten Anwendungsfälle aus und lässt den Zusammenhang zwischen Antennengewinn und Halbwertsbreite des Antennendiagramms deutlich werden.



Abb. 8: Parabolantenne des Wetterradars „Meteor“ von AMS Gematronik

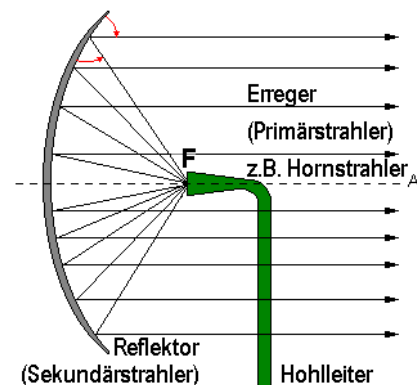


Abb. 9: Prinzip einer Parabolantenne

Parabolantenne mit Fächerdiagramm

Eine Fächerantenne ist eine Richtantenne mit einem Antennendiagramm, welches in der einen Dimension einen sehr schmalen Öffnungswinkel und in der anderen Dimension einen breiteren Öffnungswinkel aufweist. Dieses Diagramm wird erreicht, wenn ein Parabolreflektor abgeschnitten wird oder nur ein Segmentausschnitt eines Parabols genutzt wird. Da der Reflektor nun schmal in der vertikalen Ebene und breiter in der horizontalen Ebene ist, erzeugt er vertikal einen breiteren und horizontal einen sehr schmalen Öffnungswinkel. (Je breiter die Antenne, desto schmaler das Diagramm!)

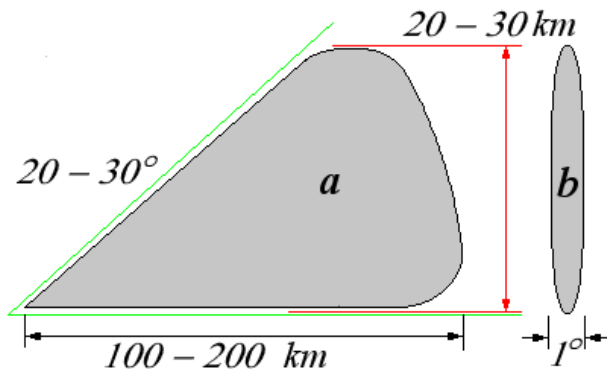


Abb.11: Diagramm einer Fächerantenne

a) Seitenansicht b) Frontalansicht

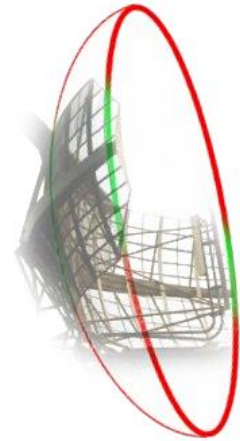


Abb. 10: Der Reflektor ist nur ein Ausschnitt eines Paraboloides

Diese Art von Antennen wird um 90° gedreht auch generell als Antennen für Höhenfinder verwendet. Da der Reflektor aber nun schmal in der horizontalen Ebene und breiter in der vertikalen Ebene ist, erzeugt er horizontal einen etwas breiteren (etwa $5...7^\circ$) und vertikal einen sehr schmalen (oft weniger als 1°) Öffnungswinkel.

In der Abbildung 12 ist die Antenne eines solchen Höhenfinders zu sehen. Der Hornstrahler befindet sich aber nicht in der Mitte des Parabol-Spiegelausschnittes, sondern wie bei einer Satellitenempfangsantenne leicht daneben. Diese Antennen werden Offsetantennen genannt.

Offsetantennen

Ein Problem bei Parabolantennen ist, dass wenn sich der Strahler direkt in der Hauptstrahlrichtung befindet, dieser die Antenne abschattet. Bei einer normalen Parabolantenne stellt der Hornstrahler der Antenne mit seinen Befestigungen also ein Hindernis für die vom Reflektor kommenden elektromagnetischen Wellen dar.

Bei einer Offsetantenne befindet sich der Strahler aber außerhalb der Strahlungsrichtung und kann somit das Antennendiagramm nicht mehr negativ beeinflussen. Der Hornstrahler strahlt nach oben in einen Parabolreflektorausschnitt und die untere Hälfte des Parabolspiegels wird nicht mehr verwendet. Im Endeffekt wird dadurch erreicht, dass der Parabolreflektor weniger gekrümmt ist und sein Brennpunkt weiter entfernt ist. Der Hornstrahler ist demzufolge auch weiter vom Reflektor entfernt und muss deshalb eine stärkere Bündelung der elektromagnetischen Strahlen ermöglichen, um den Parabolreflektorausschnitt vollständig auszuleuchten. Das erfordert längere Hornstrahler und im Allgemeinen auch eine aufwändigere Berechnung der Konstruktion. Bei der Gestaltung des Reflektors wird dann auch die Strahlungsverteilung des Hornstrahlers beachtet, so dass der Reflektor dann meist eine ovale Form hat.



Abb. 12: Typische Antennenform eines Höhenfinders mit einem liegenden Fächerdiagramm

Cosecans²- Antennen

Das sind Sonderformen von Parabolantennen, die besonders für Rundsuch- Radargeräte geeignet sind. Sie erlauben eine situationsangepasste Strahlungsverteilung und kommen den Vorstellungen einer idealen Raumabtastung näher.

Im Idealfall bewirkt eine cosec² - Charakteristik, dass ein Flugziel, welches sich mit gleichbleibender Höhe auf die Antenne zu- oder von ihr bewegt, ein Echo mit konstanter Amplitude am Empfängereingang liefert.

Eine Möglichkeit, eine cosec²- Charakteristik in der Praxis zu verwirklichen, besteht darin, den Parabolreflektor der Antenne in seiner Form zu verändern. Ein Parabolreflektor, in dessen Brennpunkt sich ein Primärstrahler befindet, erzeugt eine relativ scharf gebündelte Strahlungskeule, da die Strahlen im Idealfall den Reflektor parallel verlassen. Um die cosec²- Charakteristik zu erzeugen, muss ein Teil der Strahlen nach oben abgelenkt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, das Oberteil des Reflektors („Oberlippe“) weniger zu krümmen. Jetzt wird der Anteil der Strahlen, der in die weniger gekrümmte Fläche (Oberteil) fällt, nach oben reflektiert. Eine analog

dazu mögliche Methode ist, das untere Ende des Reflektors („Unterlippe“) stärker zu krümmen. Der Primärstrahler besitzt selber eine keulenförmige Richtcharakteristik, so dass die Ränder des Reflektors weniger ausgeleuchtet werden, als deren Zentrum. Dadurch ist gewährleistet, dass die nach oben abgelenkten Strahlen keine allzu große Leistungsdichte aufweisen und damit die Reichweite in der Höhe begrenzt bleibt.

Invertiertes Cosecans²- Antennendiagramm

Flugfeldüberwachungsradargeräte und VTS- Systeme der Marine nutzen Antennen mit einem invertierten Cosecans²- Antennendiagramm um den Hauptanteil der gesendeten Energie direkt an die Erd- oder Seeoberfläche anzuschmiegen. Das bewirkt dass ein Ziel an der Oberfläche (also auch mit konstanter Höhe) bei der Annäherung an das Radar eine möglichst gleichbleibende Amplitude hat.

Das nebenstehende Diagramm zeigt das Antennendiagramm eines Schiffsradars mit einem invertierten Cosecans²-Antennendiagramm. Die Antenne ist so gebaut, dass sie den Hauptanteil der Energie in einem Winkel unterhalb von 0° abstrahlt.

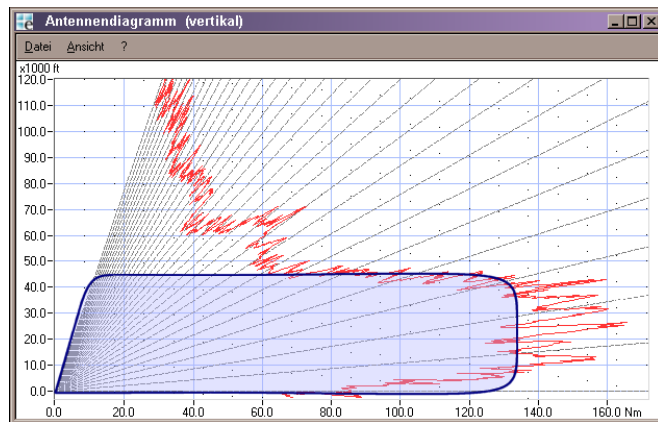


Abb. 13: vertikales Antennendiagramm einer Cosecans²- Antenne, in blau die Theorie, in rot die Praxis

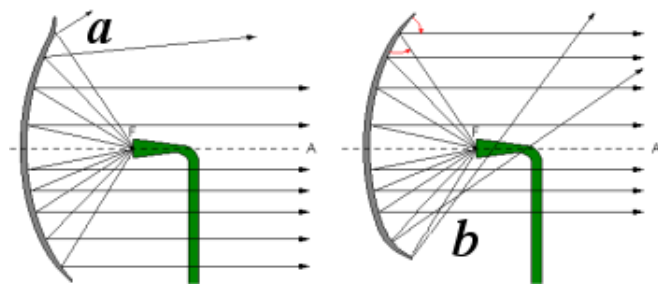


Abb. 14: Parabolreflektoren mit a) Oberlippe und b) Unterlippe

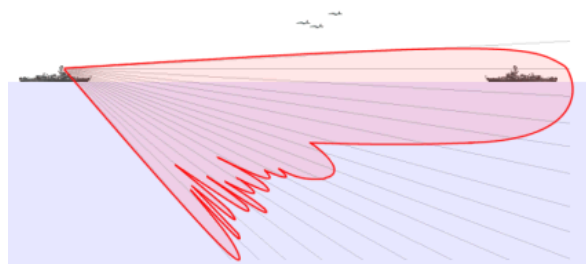


Abb. 15: invertiertes Cosecans²- Antennendiagramm eines „Vessel Traffic System“ Radargerätes

Stacked Beam Cosecans²- Antennen

Bei einer Stacked Beam Cosecans² - Antenne wird ein Reflektor durch mehrere übereinander angebrachte Primärstrahler angestrahlt.

Jeder Primärstrahler strahlt schon gerichtet ab. Verteilt man die Sendeleistung ungleichmäßig auf die einzelnen Strahler, so nähert sich das Antennendiagramm der Cosecans²- Charakteristik. Bei dem Flugsicherungsradargerät ASR-910 wird das Antennendiagramm durch 12 einzelne Beams geformt.

Bei Verwendung mehrerer Empfangskanäle könnte auch eine Höhenzuordnung erfolgen, da dann die Echosignale der Flugziele auch einzelnen Beams zugeordnet werden können.

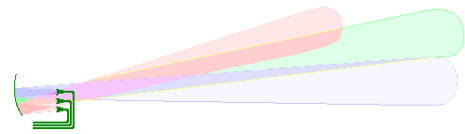


Abb. 16: Prinzip einer Stacked Beam Cosecans²-Antenne



Abb. 17: die Stacked Beam Cosecans²- Antenne des Flugsicherungsradargerätes ASR-910

Der Begriff „Cosecans²“

Der Begriff „Cosecans“ klingt schon sehr nach einer mathematischen Winkelfunktion, dem ist auch so. Der Cosecans eines Winkels ist der Kehrwert der Sinusfunktion dieses Winkels. Aber was hat dieser Begriff mit unserer Antenne zu tun?

Die Höhe H und die Entfernung R definieren den Höhenwinkel ϵ ...

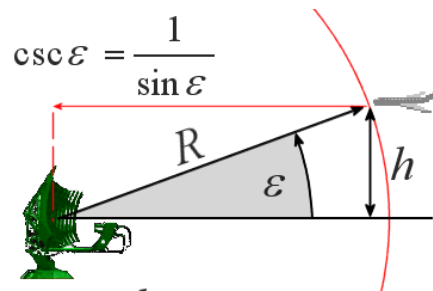
Erinnern wir uns, was da auf der vorigen Seite stand:

„Im Idealfall bewirkt eine cosecans²- Charakteristik, dass ein Flugziel, welches sich mit gleichbleibender Höhe auf die Antenne zu- oder von ihr wegbewegt, ein Echo mit konstanter Amplitude am Empfängereingang liefert.“

Wenn wir die Formel nach der Entfernung umstellen und die ganz oben genannte Winkelbeziehung einsetzen erscheint schon erst einmal der Begriff „Cosecans“ - aber es geht noch weiter...

Da war noch was mit dem „...Echo mit konstanter Amplitude...“

Aus der Radargleichung kennen wir diesen Zusammenhang: Da das Echo eine konstante Amplitude haben soll, ist die Entfernung in der vierten Potenz linear abhängig von dem Quadrat des Antennengewinns. (Die Potenzen können wir kürzen...) Nun ersetzen wir die Entfernung durch die Formel mit der Cosecans- Funktion. Da ja laut Definition auch die Höhe konstant sein sollte, können wir auch diese Größe kürzen und erhalten somit die mathematische Beschreibung der gesuchten Antenne.



$$R = \frac{h}{\sin \epsilon} = h \cdot \text{csc } \epsilon$$

$$P_E \sim \frac{G^2}{R^4}$$

$$P_E = \text{const}$$

$$G^2 \sim R^4$$

$$G \sim R^2$$

$$G \sim (h \cdot \text{csc } \epsilon)^2$$

$$h = \text{const}$$

$$G \sim \text{csc}^2 \epsilon$$

Phased Array Antennen

Arbeitsprinzip

Wichtig für das Prinzip dieser Antenne ist die Interferenz, das heißt, eine phasenabhängige Überlagerung von zwei oder (meist) mehreren Strahlern. Dabei ist zu beobachten, dass sich gleichphasige Signale (in der Abbildung 18 gleichfarbig) verstärken und gegenphasige Signale gegenseitig auslöschen. Wenn also zwei Strahler im gleichen Takt ein Signal aussenden, so wird eine Überlagerung erzielt - das Signal wird in der Hauptrichtung verstärkt und in den Nebenrichtungen abgeschwächt. Hier werden beide Strahler mit der gleichen Phase gespeist. Das Signal verstärkt sich in der Hauptrichtung.

In der zweiten Grafik der Abbildung 18 wird das Signal vom unteren Strahler um 10° phasenverschoben (hier also früher) gesendet, als vom oberen Strahler. Deswegen wird die Hauptrichtung des gemeinsam abgestrahlten Signals nach oben verschoben. (In der Graphik sind Strahler ohne Reflektor verwendet worden. Deswegen ist die Rückkeule des Antennendiagramms in dieser Darstellung genauso groß wie die Hauptkeule.)

Wenn nun das auszustrahlende Signal durch eine die Phase regelnde Baugruppe geleitet wird, kann also die Abstrahlrichtung elektronisch gesteuert werden. Das ist aber nicht unbegrenzt möglich, weil die Effektivität dieser Antennenanordnung in einer senkrecht zum Antennenfeld liegenden Hauptrichtung am größten ist, während bei einer extremen Schwenkung der Hauptrichtung die Anzahl und die Größe der unerwünschten Nebenkeulen steigt, während gleichzeitig die effektive Antennenfläche verkleinert wird.

Es können beliebige Antennenkonstruktionen als Strahler in einem Antennenfeld verwendet werden. Für eine Phased Array Antenne ist entscheidend, dass die einzelnen Strahler mit einer geregelten Phasenverschiebung angesteuert werden und somit die Hauptrichtung der Abstrahlung verändert wird. Um eine Bündelung sowohl horizontal als auch vertikal zu erreichen, werden sehr viele Strahler in einem Antennenfeld verwendet. Die Antenne des RRP-117 besteht z.B. aus 1584 Strahlern.

Lineare Arrays

Als Lineare Arrays bezeichnete Phased Array Antennen bestehen aus Zeilen, die gemeinsam über einen Phasenschieber gesteuert werden. Eine Vielzahl senkrecht übereinander angeordneter linearer Arrays bilden eine ebene Antenne. Eine Strahlschwenkung nur in einer Ebene möglich

Beispiele:

- PAR-80 (horizontale Strahlschwenkung) und
- RRP-117 (vertikale Strahlschwenkung)
- Large Vertical Aperture (LVA) Antenne (fixe Strahlform)

Diese Art der Phased Array Antenne wird meist eingesetzt, wenn die Schwenkung nur in einer Ebene erforderlich ist, weil beispielsweise ohnehin eine Drehung der gesamten Antenne (RRP-117) üblich ist.

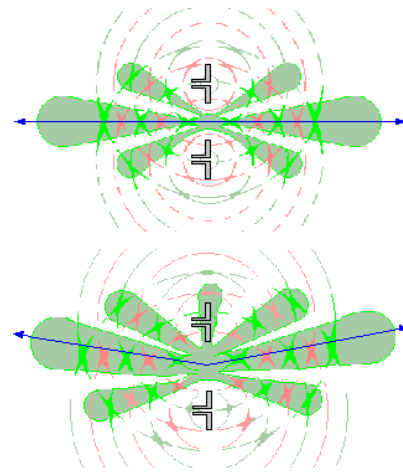


Abb. 18: je zwei Strahler mit (oben) gleichphasiger und (unten) ungleichphasiger Speisung

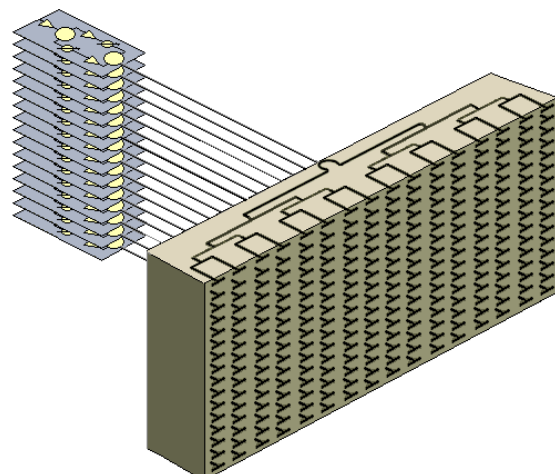


Abb. 19: Phased Array Antenne als lineares Array

Planare Arrays

Diese Phased Array Antennen bestehen vollständig aus Einzel-elementen mit jeweils einem Phasenschieber pro Element. Die Elemente werden wie in einer Matrizе angeordnet, die ebene Anordnung aller Elemente bildet die gesamte Antenne. Somit ist eine Strahlschwenkung in zwei Ebenen möglich. Mit vier solcher Antennen kann die gesamte Hemisphäre abgedeckt werden ohne dass sich in der Antenne mechanisch bewegte Teile befinden.

An die Rechenleistung des die Strahlschwenkung steuernden Prozessors werden hohe Anforderungen gestellt. Zusätzlich zur vorgesehenen Strahlschwenkung muss die durch Seegang verursachte Bewegung des Schiffes (pitch and roll) berücksichtigt werden. Jeder der einzelnen Strahler hat einen eigenen Phasenschieber und ein eigenes Dämpfungsglied zur Leistungssteuerung.



Abb. 20: Planares Array des Multifunktionsradars APAR (auf der Fregatte „Sachsen“)

Phasenschieber

Phasenschieber lassen sich besser (vor allem: schneller) schalten als regeln. Gezeigt wird ein 4-Bit-geschalteter Phasenschieber aus einem Radargerät, der verschiedene Umwegleitungen in den Signalweg schaltet und somit in 22,5° Schritten 16 verschiedene Phasenwinkel von 0° bis 337,5° realisieren kann.

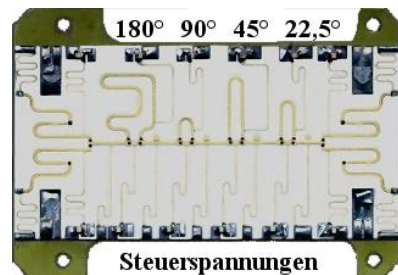


Abb. 21: Keramikplatte mit einem 4-Bit Phasenschieber

Die zusätzlichen Leitungslängen verzögern das HF-Signal um definierte Phasenlagen. Als Beispiel werden in der nebenstehenden Grafik drei Phasenschieberketten mit je drei Bit gezeigt. Die Umschalter sind schnelle PIN-Dioden-Schalter, die mit einer Steuerspannung das HF-Signal auf die jeweiligen Umwegleitungen schalten. Das Anlegen eines Datenwortes steuert die notwendige Phasenverschiebung für jedes Strahlerelement und schaltet verschiedene Kombinationen von Umwegleitungen in den Signalweg.

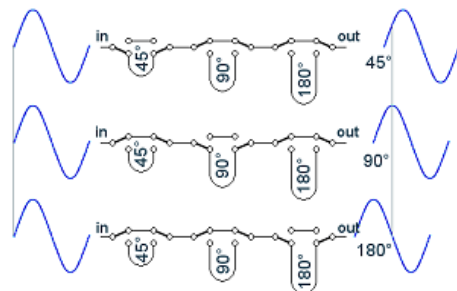


Abb. 22: Prinzip eines 3-Bit Phasenschiebers auf drei Leitungen

Digitale Formung des Antennendiagramms

Bisher wurde nur eine analoge Bildung des Antennendiagramms betrachtet. Analog heißt hier, dass die Summen- und Differenzbildung der Signale einzelner Antennenelemente noch vor dem Empfänger (also mit den hochfrequenten Signalen) geschieht.

Bei einer digitalen Formung des Antennendiagramms (engl.: Digital Beamforming DBF) hat jeder Einzelstrahler (oder kleinere Gruppen von Strahlern) einen eigenen Empfänger bis hin zu eigenem Analog/Digital Wandler. Eine Phasenverschiebung und die Wichtung der Amplitude geschehen in einem digitalen Prozessor.

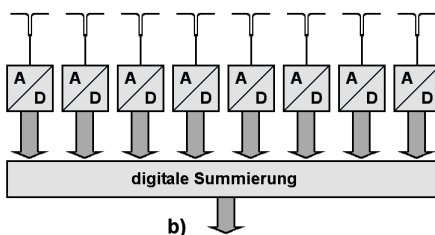
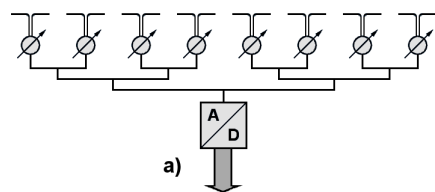


Abb. 23: a) analoges und b) digitales Beamforming

Jetzt kann bei einer Phased-Array-Antenne aus jedem Sendeimpuls gleichzeitig eine Vielzahl von Empfangsdiagrammen mit Hauptkeulen, die in verschiedene Richtungen zeigen, gebildet werden. Weitere Vorteile einer digitalen Formung des Antennendiagramms sind:

- verbesserte Empfängerdynamik;
- schnelle Empfangsdiagrammänderungen;
- schnellere und bessere Steuerung von Signalamplituden und Phasenlagen.

Das Empfängereigenrauschen aller Einzelmodule ist nicht synchron und wird in der Summe dekorreliert.

Kernstück der digitalen Formung des Antennendiagramms sind kleine, standardisierte Module, die Elemente des Sendeleistungsverstärkers und des Empfangsweges beinhalten. Sie werden *Standardisierte Modulare Transmit-/Receive-Module* (SMTRM) genannt und in hoher Stückzahl produziert. Diese Module werden gleichzeitig als bidirektionale Signalverstärker sowie zur Phasen- und Amplitudensteuerung eingesetzt. Durch die kompakte Bauweise sind die Leitungsverluste während der Signalverarbeitung gering. Diese T/R-Module sind vielseitig und durch den digital gesteuerten Local-Oscillator flexibel einsetzbar, sodass sie unverändert nicht nur für einen Radargerätetyp verwendet werden, sondern in vielen Radargerätetypen, angefangen vom bodengestützten Raketenleitradar oder Boden-Überwachungsradar BÜR der Bundeswehr über alle Arten luftgestützter Radare bis hin zu dem TerraSAR-Weltraumradar zum Einsatz kommen können.



Abb. 24: Standardised Modular Transmit-/Receive-Module (SMTRM) (Mit freundlicher Genehmigung von [EADS Defence & Security Ulm](#))

Monopulsantennen

Unter diesem Begriff werden Antennen zusammengefasst, die als Antennengruppe aufgebaut sind und die eine Besonderheit in der Speisung aufweisen: Die Einzelantennen werden nicht immer summenbildend zusammenschaltet. Für verschiedenste Zwecke können auf dem Empfangsweg unterschiedliche Summen und Differenzen gebildet werden.

Bei einem Radargerät werden im Sendemoment alle Strahler zusammengefasst und nur in der Empfangszeit bestimmte Strahlergruppen getrennt, deren Summen oder Differenz eigene Verarbeitungskanäle speisen. Auf diese Weise werden mit nur einem Sendeimpuls alle Daten empfangen, die für eine Zielerkennung nötig sind. Deshalb ist bei einem Monopulsradar die notwendige Trefferzahl (1 bis 3) sehr gering.

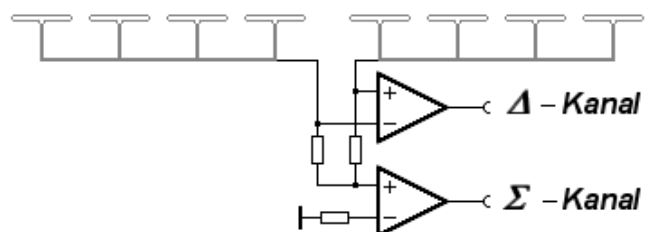


Abb. 25: Monopulsprinzip

Monopulsverfahren

Bei einer klassischen Radarantenne, die nicht für das Monopulsverfahren ausgelegt ist, erhalte ich auch dann Echos, wenn die Antenne noch nicht ganz genau in die Richtung des reflektierenden Objektes zeigt.

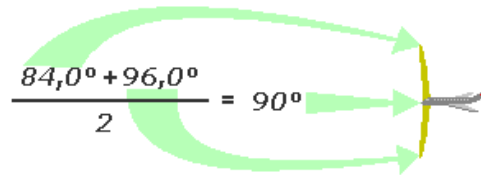


Abb. 26: Der Standort des Zieles ist in der Mitte des Targets!

Da der Öffnungswinkel aller Antennen einen endlich kleinen Wert hat, erhält man mehrere Antwortimpulse, die, da die Antenne sich ja ständig weiterdreht, eigentlich jeder zu einem anderen Seitenwinkel zugeordnet werden können. Der wahre Seitenwinkel muss dann aus einer Anzahl von Antworten korreliert werden. Bei älteren analogen Radargeräten geschieht das visuell durch den Operator am Bildschirm, bei weniger alten Radargeräten bei denen dieser Vorgang automatisiert abläuft, wird im Plotextraktor eine Art einfache Korrelation durchgeführt und aus den verschiedenen Seitenwinkelangaben ein Durchschnitt gebildet. Die Differenz zwischen dem Winkel, in den die Antenne gerichtet ist und dem tatsächlichen Seitenwinkel des Targets wird „Off-Boresight Angle“ (OBA) genannt.

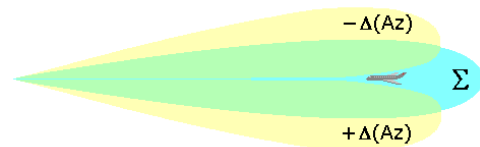


Abb. 27: gleichphasige Summen- und gegenphasige Differenzbildung ermöglichen eine Winkelbestimmung innerhalb des Diagramms

Ein Echo genügt!

In einer Monopulsantenne kann durch Vergleich von Summen- und verschiedenen Differenzkanälen eine Lokalisierung des reflektierenden Objektes innerhalb des Radarbeams erfolgen. Durch eine gegenphasige Kopplung der linken zu den rechten Antennengruppen wird ein Differenzkanal (ΔAz) (sprich: „Delta Azimut“) gebildet. Der Azimut wird nun dadurch bestimmt, dass in diesem Winkel bei einem Maximum des Summenkanals der Differenzkanal ein Minimum haben muss. Da der Summenkanal (Σ) und der Differenzkanal aus nur einem Echo gebildet werden können, genügt ein Impuls zur genauen Berechnung der Koordinaten. (Deshalb erhielt diese Antennengruppierung auch den Namen Monopulsantenne.)

Bei 3D- Radargeräten wird als dritte Koordinate auch noch der Höhenwinkel gemessen. Auch hier kann das Verfahren angewendet werden. Hier wird die Antenne in eine obere und eine untere Hälfte gruppiert. Der zweite Differenzkanal (ΔEI) heißt nun „Delta Elevation“.

Die Monopulsantenne ist nun also in vier Quadranten aufgeteilt und in den Antennenmodulen werden aus den Empfangssignalen dieser vier Quadranten folgende Signale gebildet:

- Summenkanal Σ (I + II + III + IV)
- Differenzkanal ΔAz (I + IV) - (II + III)
- Differenzkanal ΔEI (I + II) - (III + IV)

Der Vollständigkeit halber soll auch noch der

- Auxiliary Channel Ω

genannt werden, obwohl dieser nicht an die Monopulsantenne gebunden ist. Dieser Kanal zur Kompensation von Nebenkeulen hat praktisch immer seine eigene kleine Antenne, die mit ihrem gewollt breiten Antennendiagramm (oder Rundstrahlcharakteristik: siehe Omni-directional Antenna) auch zur Erkennung von aktiven Störungen dient.

Alle diese Signale benötigen einen eigenen Empfangsweg. Moderne 3D- Radargeräte haben also mindestens vier parallel arbeitende Empfangskanäle.

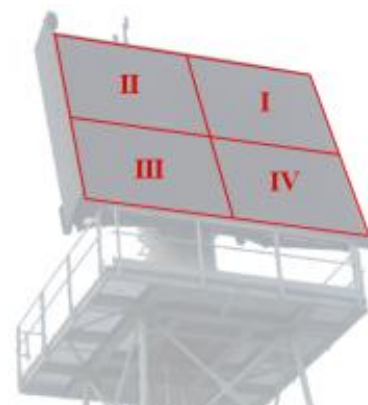


Abb. 28: die vier Quadranten einer 3D-Monopulsantenne

Minimumpeilung

In Zielverfolgungsradargeräten wird dieses Verfahren zur Steuerung der Antenne genutzt.



Abb 29: Bei der Minimumpeilung dreht sich das Antennendiagramm sehr schnell um eine zentrale Achse

Einige ältere Zielverfolgungsradargeräte nutzen die Minimumpeilung zur Bestimmung der Zielrichtung. Auf Englisch wird diese Art der Zielverfolgung „conical scan“ genannt.

Dieses Antennendiagramm wird durch eine schnelle Rotation des Strahlers in der Antenne erzeugt. Damit rotiert das Antennendiagramm um die geradlinige geometrische Achse der Antenne. In optischer Richtung der Antenne bildet sich nun ein trichterförmiges Signalminimum. Das Ziel befindet sich also immer an der Seitenflanke des Antennendiagramms, welches an dieser Stelle eine recht gute Steilheit hat, d.h. eine relativ große Signalpegeländerung findet schon bei kleinsten Winkeländerungen statt.

Nehmen wir mal an, die Minimumpeilung wird bei einer Zielverfolgung verwendet. Befindet sich das Ziel genau auf der zentralen Achse, dann wird immer ein relativ konstantes, aber sehr geringes Echo empfangen. Aber wenn sich das Ziel auch nur wenig von dieser Achse entfernt, dann ändern sich die Pegel während einer Antennenstrahldrehung. Befindet sich das Ziel z.B. zu weit links, dann wird das Echosignal ein Maximum zeigen, wenn der Drehmotor der Antennenspeisung nach links zeigt und wenn er nach rechts zeigt, dann wird ein Minimum empfangen. Wenn sich also das Ziel aus dem Minimum etwas nach links bewegt, dann wertet ein Rechner diese Informationen aus und erzeugt Steuersignale für den Servomechanismus der Antenne, die sich nun ebenfalls etwas nach links bewegt, bis wieder ein konstanter Pegel des Echosignals empfangen wird. Auf diese Weise wird die Richtung zum Ziel in Seiten- und Höhenwinkel immer automatisch und sehr exakt bestimmt.

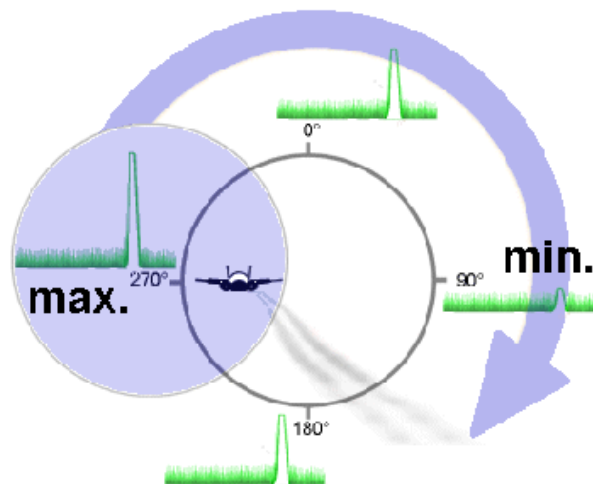


Abb. 30: Conical Scan: Das Maximum wird empfangen, wenn die Antenne bei 270° ihres Schwenkkreises ist. Deshalb muss der Antennendreh Tisch solange in Richtung 270° gedreht werden, bis beide Signale gleich groß sind.

Wissenstest

1. Wenn bei einer Stacked- Beam- Cosecans²- Antenne der oberste Strahler defekt ist, werden dann in der Folge davon
 - hochfliegende Ziele schlechter aufgefasst, oder*
 - tieffliegende Ziele schlechter aufgefasst?*

2. Ein lineares Array einer Phased- Array- Antenne besteht aus 44 Zeilen mit je 36 Strahlerelementen. Wie viele gesteuerte Phasenschieber werden für diese Antenne benötigt:
 - 36 Phasenschieber,*
 - 44 Phasenschieber oder*
 - 1584 Phasenschieber?*

3. Bei einer Monopulsantenne wird im Summenkanal für ein Ziel eine sehr große Zielamplitude gemessen. Im Differenzkanal kann für dieses Ziel allerdings kein Echo beobachtet werden. Das kann heißen:
 - der Off- Boresight Angle ist gleich Null Grad*
 - das Ziel befindet sich genau in der Mitte des Antennendiagramms*
 - der Summenkanal ist defekt oder übersteuert.*

4. Bei einer Monopulsantenne wurden bei Wartungsarbeiten versehentlich die Antennenzuleitungen für die Differenzkanäle ΔAz (Delta Azimut) und ΔEl (Delta Elevation) vertauscht. Wie wirkt sich das auf das Radar aus?
 - Die Reichweite des Radargerätes sinkt, weil die Sendeleistung falsch (gegenphasig) verteilt wird.*
 - Dieser Fehler wirkt sich nur auf den Empfang aus, da diese Signale erst nach den Duplexern auf dem Empfangsweg gebildet werden.*