

Frequenzmoduliertes Dauerstrichradar (FMCW Radar)

Frequenzmoduliertes Dauerstrichradar (**Frequency-Modulated Continuous Wave radar = FMCW radar**) ist ein spezieller Typ von Radarsensor, der wie ein einfaches Dauerstrichradar (CW-Radar) ein kontinuierliches Sendesignal abstrahlt. Im Gegensatz zu diesem CW-Radar kann ein FMCW-Radar seine Arbeitsfrequenz während der Messung ändern: das heißt, das Sendesignal wird in der Frequenz moduliert. Durch diese Änderungen in der Frequenz werden zusätzliche Messmöglichkeiten durch Laufzeitmessungen erst technisch möglich.

Einfache Dauerstrichradargeräte (CW-Radar) haben den Nachteil, dass sie wegen fehlenden Zeitbezuges keine Entfernung messen können. Ein solcher Zeitbezug zur Messung der Entfernung unbewegter Objekte kann aber mit Hilfe der Frequenzmodulation des Sendesignals erzeugt werden. Bei dieser Methode wird ein Signal ausgesendet, welches sich periodisch in der Frequenz ändert. Wird ein Echosignal empfangen, dann hat diese Frequenzänderung eine Laufzeitverschiebung Δt wie bei einem Pulsradar.

Messprinzip

Kennzeichnend für ein FMCW-Radar ist:

- die Entfernungsmessung geschieht durch Frequenzvergleich des empfangenen Signals zu einer Referenz (meist direkt das Sendesignal)
- die Dauer der Modulationsperiode T ist wesentlich größer als die benötigte Zeit (Laufzeit) für den installierten Entfernungsmessbereich Δt

Die Entfernung R zum reflektierenden Objekt kann nach folgenden Beziehungen ermittelt werden:

$$R = \frac{c_0 \cdot |\Delta t|}{2} = \frac{c_0 \cdot |\Delta f|}{2 \cdot \frac{\delta(f)}{\delta(t)}}$$

c_0 = Lichtgeschwindigkeit = $3 \cdot 10^8$ m/s

Δt = Laufzeit [s]

Δf = gemessene Frequenzdifferenz [Hz]

R = Entfernung Antenne - Objekt (Boden) [m]

$\delta(f)/\delta(t)$ = Frequenzhub pro Zeiteinheit

(1)

Wenn die Frequenzänderung über einen weiten Bereich linear ist, so kann innerhalb dieses Bereiches durch einen einfachen *Frequenzvergleich* Δf die Entfernung ermittelt werden. Dadurch, dass nur der Betrag der Differenzfrequenz messbar ist, sind bei einem statischen Szenario die Ergebnisse bei einer linear ansteigenden Frequenzänderung gleich einer abfallenden Frequenzänderung.

Wenn das reflektierende Objekt eine Radialgeschwindigkeit im Bezug zur Sende-/Empfangsantenne hat, so wird dem Echosignal zusätzlich zur Differenzfrequenz Δf zur derzeitigen Sendefrequenz (verursacht durch die Laufzeit) eine Dopplerfrequenz f_D (verursacht durch die Geschwindigkeit) auferlegt. Das Radar misst dann je nach Bewegungsrichtung und der Richtung der linearen Modulation nur die Summe oder die Differenz zwischen der Differenzfrequenz als Träger der Entfernungsinformation und der Dopplerfrequenz als Träger der Geschwindigkeitsinformation. Wenn sich das reflektierende Objekt vom Radar weg bewegt, dann verringert sich die Frequenz des Echosignals durch die Dopplerfrequenz. Wenn jetzt die Messung mit einem Sägezahn gemäß Bild 1 erfolgt, dann ist das Empfangssignal nicht nur durch die Laufzeit nach rechts, sondern auch durch die Dopplerfrequenz nach unten verschoben. Die gemessene Differenzfrequenz Δf ist um die Dopplerfrequenz f_D größer als es gemäß der Laufzeit sein müsste. Erfolgt die Messung mit einer fallenden Flanke eines Sägezahnes (siehe Bild 3), dann ist die Dopplerfrequenz f_D von der Frequenzänderung durch die Laufzeit subtrahiert.

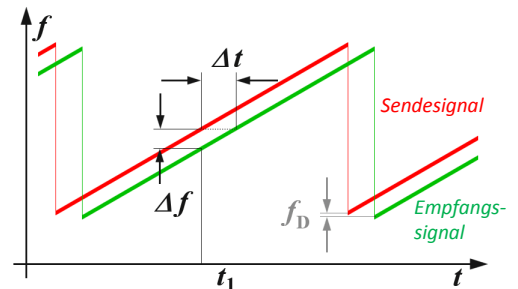


Bild 1: Entfernungsbestimmung mit einem FMCW-Radar

Inhaltsverzeichnis « FMCW-Radar »

1. [Messprinzip](#)
2. [Auflösungsvermögen](#)
3. [Modulationsmuster](#)
 - [Sägezahnförmige lineare Frequenzänderung](#)
 - [Dreieckförmige Frequenzänderung](#)
 - [Rechteckförmige Frequenzänderung](#)
 - [Treppenförmige Frequenzänderung](#)
4. [Blockschaltbild](#)
5. [Bildgebendes FMCW-Radar](#)
6. [Nicht bildgebendes FMCW-Radar](#)

Reichweite und Auflösungsvermögen

Durch geeignete Wahl des Frequenzhubs pro Zeiteinheit kann das Auflösungsvermögen und durch die Dauer des Frequenzanstiegs der maximal mögliche Messbereich bestimmt werden. Die Dauer des linearen Frequenzanstiegs bestimmt die maximal mögliche eindeutige Messentfernung. Die Steilheit des linearen Anstiegs bestimmt das Auflösungsvermögen und die Genauigkeit der Entfernungsmessung. Der maximale Frequenzhub und die Steilheit können je nach den Möglichkeiten der technisch realisierten Schaltung variiert werden.

Die maximal mögliche Reichweite wird bestimmt durch die notwendige zeitliche Überlappung des Empfangssignals mit dem Sendesignal. Das ist meist sehr viel größer als die energetische Reichweite, also die Begrenzung durch die Freiraumdämpfung.

Für das Entfernungsauflösungsvermögen eines FMCW Radars ist (wie beim sogenannten Chirpradar) die Bandbreite BW des gesendeten Signals entscheidend. Diese ist einfach die Differenz zwischen oberer und unterer Grenzfrequenz des gesendeten Signals. Die Möglichkeiten der Fast Fourier Transformation werden aber durch zeitliche Limits (also durch die Dauer des Sägezahns T) begrenzt. Das Auflösungsvermögen wird beim FMCW Radar also bestimmt durch die Frequenzänderung, die innerhalb dieses zeitlichen Limits erfolgt.

$$\Delta f_{FFT} = \frac{1}{T} = \frac{\delta(f)}{\delta(t) \cdot (f_{UP} - f_{DWN})}$$

$$\begin{aligned} \Delta f_{FFT} &= \text{kleinster messbarer Frequenzunterschied} \\ \delta(f)/\delta(t) &= \text{Steilheit des Frequenzhubs} \\ f_{up} &= \text{obere Grenzfrequenz} \\ f_{dwn} &= \text{untere Grenzfrequenz} \end{aligned}$$

(2)

Der Kehrwert der Dauer des Sägezahnimpulses ergibt somit eine kleinstmöglich erkennbare Frequenz. Diese kann in die Formel (1) als $|\Delta f|$ eingesetzt werden und führt zu einem Entfernungsauflösungsvermögen des FMCW Radars.

Zum Beispiel hat ein Radar mit einem linearen Frequenzanstieg über 1 ms Dauer theoretisch einen zeitlich maximal möglichen eindeutigen Messbereich von weniger als 150 km. Das resultiert aus der notwendigerweise verbleibenden Überlappung des Sendesignals mit dem Echosignal (siehe Bild 1) um eine Differenzfrequenz zu messen. Meist kann dieser Messbereich auch energetisch nie erreicht werden. Somit verbleibt genügend Zeit für eine Messung der Differenzfrequenz.

Wenn der maximale Frequenzhub bei der Sendermodulation 250 MHz beträgt, ergibt das bei diesem Frequenzanstieg 4 ns Laufzeitdifferenz für 1 kHz Frequenzdifferenz. Das entspricht dann einer Entfernungsauflösung von 0,6 m.

Dieses Beispiel zeigt eindrucksvoll den Vorteil des FMCW-Radars: Ein Impulsradar muss diese 4 ns Laufzeitunterschied messen, was einen erheblichen technischen Aufwand bedeutet. Ein Frequenzunterschied von 1 kHz ist dagegen im Audibereich wesentlich einfacher zu messen.

Die Senderbandbreite, also der Bereich des Frequenzanstiegs $|\Delta f|$ kann zwischen 1 MHz und etwa 390 MHz variieren. Die obere Grenze ist meist durch administrative Vorgaben begrenzt. Zum Beispiel hat das Europäische ISM-Band (24 GHz – 24,25 GHz) nur eine Bandbreite von 250 MHz. Mit ansteigender Bandbreite verbessert sich auch die Entfernungsauflösung und die Anzeige auf dem Bildschirm wird kontrastreicher. Gleichzeitig verringert sich damit aber die maximal mögliche Reichweite, da das FMCW-Radar meist nur 256 oder 512 verschiedene Frequenzen erkennen kann. Der Zusammenhang ist in der folgenden Tabelle beschrieben:

Bandbreite	Range Resolution	Maximale Reichweite	annähernd erforderliche Sendeleistung	Beispiele
400 kHz	4 000 m	120 km	1,4 kW	76N6 ("Clam Shell")
50 ... 500 kHz	1 500 ... 100 m	15 ... 250 km	30 W	OTH oceanography radar WERA
1 MHz	150 m	75 km	1,4 ... 4 kW	kleines Schiffsradar mit Magnetron
2 MHz	75 m	37,5 km		
10 MHz	5 m	7,500 m		
50 MHz	3 m	500 m	4 mW	DPR-886
65 MHz	2.5 m	1 200 m	100 mW	Broadband Radar™
250 MHz	0.6 m	500 m	4 mW	Skyradar Basic II
8 GHz	3.5 cm	9 m	4 mW	Skyradar PRO

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Senderbandbreite und anderen Parametern.

Wie generell bei jedem Radar ist auch bei FMCW-Radar die Winkelauflösung von der Richtwirkung (Halbwertsbreite) der verwendeten Antenne abhängig.

Modulationsmuster

Es sind mehrere Modulationsmuster möglich, die zu unterschiedlichen Messzwecken eingesetzt werden können:

- Sägezahnförmige Modulation**
 Diese Modulation wird genutzt bei relativ großem Messbereich (maximale Entfernung) bei gleichzeitig vernachlässigbarem Einfluss einer Dopplerfrequenz (zum Beispiel bei einem maritimen Navigationsradar)
- Dreieckförmige Modulation**
 Diese Modulation ermöglicht eine einfache Trennung der Differenzfrequenz Δf von der Dopplerfrequenz f_D
- Rechteckförmige Modulation** (einfache Frequenzumtastung, FSK)
 Diese Modulation wird genutzt für eine sehr genaue Entfernungsmessung im Nahbereich durch Phasenvergleich beider Echosignal- Frequenzen. Sie hat den Nachteil, dass die Echosignale mehrerer Ziele nicht voneinander getrennt werden können und dass dieses Verfahren nur eine geringe eindeutige Messentfernung ermöglicht.
- Treppenförmige Modulation**
 Interferometrische Messungen erweitern den eindeutigen Messbereich.
- Sinusförmige Modulation**
 In der Vergangenheit wurden auch sinusförmige Modulationsformen genutzt. Diese konnten einfach realisiert werden, indem ein Motor eine Kondensatorplatte im Resonanzraum des Senderoszillators drehte. Von der Sinusfunktion f_D wurde dann nur der relativ lineare Teil in der Nähe des Nulldurchgangs benutzt.

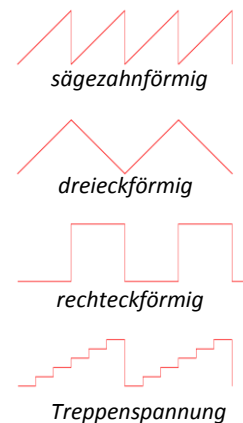


Bild 2: Gängige Modulationsmuster für ein FMCW- Radar

Sägezahnförmige lineare Frequenzänderung

Bei einer sägezahnförmigen linearen Frequenzänderung (siehe Bild 1) wird durch die Laufzeit des Echosignals zeitlich (im Bild also nach rechts) verschoben. Dadurch ergibt sich ein Frequenzunterschied zwischen aktueller Sendefrequenz und dem verzögerten Echosignal, der als Maß für die Entfernung des reflektierenden Objektes gilt. Eine auftretende Dopplerfrequenz würde jetzt das gesamte Echosignal in der Frequenz entweder nach oben (Bewegung in Richtung Radar) oder nach unten (Bewegung vom Radar weg) verschieben.

Der Empfänger hat bei dieser Modulationsform keine Möglichkeit, beide Frequenzen zu trennen. Die Dopplerfrequenz wird also lediglich als Messfehler bei der Entfernungsberechnung auftreten. Bei der Wahl eines optimalen Frequenzhubs kann von vornherein berücksichtigt werden, dass die zu erwartenden Dopplerfrequenzen möglichst kleiner sind, als das Auflösungsvermögen oder zumindest, dass der Messfehler möglichst klein bleibt.

Das wird zum Beispiel bei maritimen Navigationsradargeräte der Fall sein: Die Wasserfahrzeuge bewegen sich im Küstenbereich mit einer begrenzten Geschwindigkeit, relativ zueinander vielleicht maximal mit 10 Meter pro Sekunde. Im Frequenzband dieser Radargeräte (meist das X-Band) beträgt also die maximal zu erwartende Dopplerfrequenz 666 Hz. Wenn die Radarsignalverarbeitung eine Auflösung im Kilohertzbereich pro Meter verwendet, dann ist diese Dopplerfrequenz vernachlässigbar. Ein maritimes FMCW Navigationsradar auf einem Flugplatz hätte bei den dort auftretenden Start- und Landegeschwindigkeiten von bis zu 200 m/s Schwierigkeiten, diese Flugzeuge überhaupt zu sehen, da bei einem Anflug der Messfehler durch die Dopplerfrequenz größer sein kann, als die zu messende Entfernung. Das Zielzeichen müsste dann theoretisch in einer negativen Entfernung, also noch vor Beginn der Auslenkung auf dem Bildschirm erscheinen.

Dreieckförmige Frequenzänderung

Bei einer dreieckförmigen Frequenzänderung kann eine Entfernungsmessung sowohl auf der steigenden als auch auf der fallenden Flanke erfolgen. Ein Echosignal wird laufzeitmäßig bedingt im Bild gegenüber dem aktuellen Sendesignal nach rechts verschoben. Ohne eine Dopplerfrequenz ist der Betrag der Frequenzdifferenz Δf auf der steigenden Flanke gleich zu der Messung auf der fallenden Flanke.

Eine Dopplerfrequenz verschiebt das Echosignal im Bild in der Höhe. Auf der steigenden Flanke erscheint die Summe aus der Frequenzdifferenz Δf und der Dopplerfrequenz f_D , auf der fallenden Flanke dagegen die Differenz beider Frequenzen. Das eröffnet die Möglichkeit, trotz der Frequenzverschiebung durch die Dopplerfrequenz eine genaue Entfernungsbestimmung vorzunehmen, die dann aus dem arithmetischen Mittel beider Messungen besteht. Gleichzeitig kann auch die genaue Dopplerfrequenz aus beiden Messungen bestimmt werden. Die Differenz beider Differenzfrequenzen ergibt die doppelte Dopplerfrequenz. Da beide Differenzfrequenzen jedoch nicht gleichzeitig zur Verfügung stehen, erfordert dieser Vergleich eine digitale Signalverarbeitung. Die Dopplerfrequenz-bereinigte Frequenz für die Entfernungsbestimmung sowie die Dopplerfrequenz eines bewegten Zieles wird berechnet nach:

$$f(R) = \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2}$$

$$f_D = \frac{|\Delta f_1 - \Delta f_2|}{2}$$

$f(R)$ = Frequenz als Maß für Entfernungsmessung
 f_D = Dopplerfrequenz als Maß für die Geschwindigkeitsmessung
 Δf_1 = Frequenzdifferenz auf der steigenden Flanke
 Δf_2 = Frequenzdifferenz auf der fallenden Flanke

(3), (4)

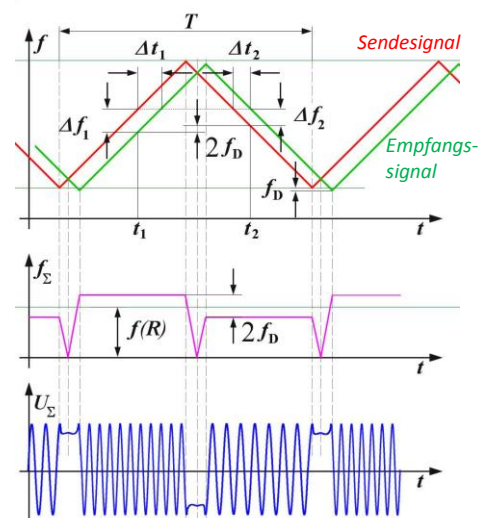


Bild 3: Zusammenhänge bei dreieckförmiger Modulation

Die Frequenz $f(R)$ kann dann als $|\Delta f|$ in die Formel (1) eingesetzt werden, um die exakte Entfernung zu berechnen.

Dieses Verfahren hat jedoch den Nachteil, dass bei mehreren reflektierenden Objekten die gemessenen Dopplerfrequenzen nicht eindeutig einem Ziel zugeordnet werden können. Die Zuordnung der falschen Dopplerfrequenz zu einem Ziel in der falschen Entfernung kann zu Geisterzielen führen. Im Bild 4 wird eine grafische Lösung gezeigt. Die Position eines ersten Zieles ergibt sich aus den Funktionen $[-\delta f_1]_1 + f_D$ sowie $[+\delta f_2]_1 - f_D$.

Der Schnittpunkt der beiden Geraden ist die Position für das Ziel 1. Wenn ein zweites Ziel hinzukommt ($[+\dots]_2$) so ergeben beide Geradenpaare insgesamt vier Schnittpunkte, von denen zwei die Geisterziele sind. Die Position dieser Geisterziele hängt auch von der Flankensteilheit der Modulationsform ab. Damit lässt sich das Problem durch Messzyklen mit unterschiedlichen Flankensteilheiten beheben: dargestellt werden dann nur diejenigen Ziele, deren Koordinaten in beiden Messzyklen auf die gleiche Position zeigen.

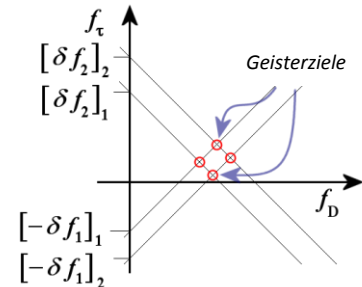


Bild 4: Geisterziele, grafische Lösung

Rechteckförmige Frequenzänderung

Dieses Verfahren wird auch **Frequency Shift Keying (FSK) FMCW** Radar genannt. Der Transceiver wird einfach mit einer rechteckförmigen Spannung zyklisch zwischen zwei Sendefrequenzen hin- und hergeschaltet. Es gibt zwei prinzipielle Möglichkeiten, das Ausgangssignal des Transceivers zu verarbeiten. Die erste Möglichkeit ist, die Laufzeit der Frequenzänderung zu messen. Am Ausgang des Transceivers erscheint ein Signal, dessen Hüllkurve ein Impuls ist, mit einer Impulsdauer als Maß für die Entfernung. Diese Messung ist jedoch eine reine Zeitmessung wie beim Impulsradar und ist dementsprechend entweder ungenau oder technologisch sehr aufwändig.

Eine zweite Möglichkeit ist der Vergleich der Phasenlage der Echosignale beider Frequenzen. Innerhalb des Impulsdaches arbeitet das Radar mit der 1. Sendefrequenz, innerhalb der Impulspause mit der 2. Sendefrequenz. Während dieser Zeiten im Millisekundenbereich arbeitet das Radar wie beim CW-Radarverfahren. Am Ausgang des Abwärtsmischers (siehe Blockschaltbild) erscheint eine Gleichspannung als Maß des Phasenunterschiedes zwischen dem einen Empfangssignal und seinem Sendesignal. Die Phasendifferenz zwischen *beiden* Echosignalen der verschiedenen Sendefrequenzen (technisch: der Spannungsunterschied am Ausgang des Mischers) ist ein Maß für die Entfernung. Auch hier liegen beide Echosignale nicht gleichzeitig an, die Spannungswerte müssen digital gespeichert werden.

Wegen der Periodizität der Sinusspannung hat dieses Verfahren jedoch nur eine sehr begrenzte eindeutige Messentfernung, die sich aus der halben Wellenlänge der Frequenzdifferenz beider Sendefrequenzen ergibt. Ein Frequenzunterschied von 20 MHz ergibt eine eindeutige Messentfernung von nur 15 m. Mehrere Ziele im Nahbereich können nicht getrennt werden, da am Ausgang des Abwärtsmischers nur eine einzige Phasenlage gemessen werden kann, die sich im Falle mehrerer Ziele zu nur einer einzigen Ausgangsspannung überlagern, bei der bestenfalls das stärkste Ziel dominiert.

Wenn beide Auswertungsverfahren (zeitlich und phasenmäßig) gleichzeitig angewendet werden, so kann mittels der zeitlichen Auswertung eine grobe Entfernungsbestimmung vorgenommen werden. Dem genauen Ergebnis der Phasenauswertung kann dann so oft die volle Wellenlänge hinzugefügt werden, bis das Ergebnis nahe genug der Entfernung aus der Zeitmessung liegt. Die schlechte eindeutige Messentfernung der Phasemessung wird somit umgangen.

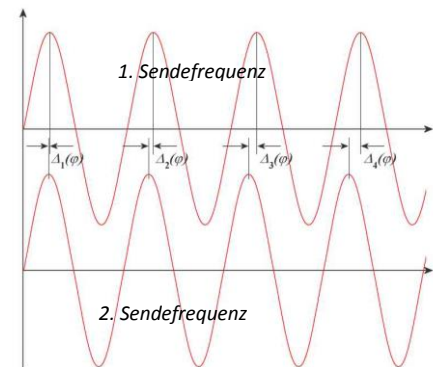


Bild 5: Der Phasenunterschied $\Delta_n(\varphi)$ ist ein Maß dafür, das Wievielfache von Wellenlängen die doppelte Entfernung (Hin- und Rückweg) beträgt

Treppenförmige Frequenzänderung

Generell gelten hier die gleichen Vor- und Nachteile wie beim Verfahren mit einer rechteckförmigen Modulation. Das FMCW-Radar arbeitet jetzt jedoch mit mehreren aufeinanderfolgenden Frequenzen. In jeder dieser Einzelfrequenz wird eine Phasenlage gemessen. Die eindeutige Messentfernung erweitert sich jedoch erheblich, da jetzt die Phasenverhältnisse zwischen mehreren Frequenzen sich wiederholen müssen, um Mehrdeutigkeiten zu erzeugen.

Sehr interessant wird dieses Verfahren, wenn an Unebenheiten des reflektierenden Objektes Resonanzen für einzelne Teilfrequenzen beobachtet werden können. Dieses Messverfahren ist dann ein Bereich der *Interferometrie*.

Blockschaltbild

Ein FMCW-Radar besteht im Wesentlichen aus dem Transceiver und einer Steuereinrichtung mit einem Mikroprozessor. Der Transceiver ist eine kompakte Baugruppe und enthält meist auch die als Patchantenne ausgeführte Sende- und Empfangsantenne. Die Hochfrequenzzeugung erfolgt mit einem spannungsgesteuerten Oszillator, der entweder direkt die Sendeantenne speist, oder dessen Leistung zusätzlich

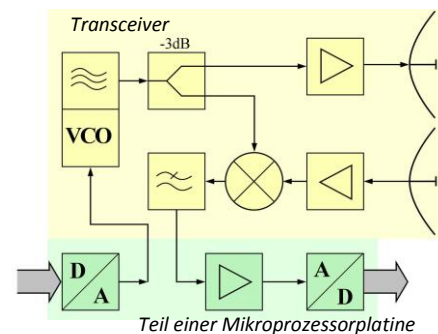


Bild 6: Blockschaltbild eines FMCW-Radars

verstärkt wird. Ein Teil der Hochfrequenz wird ausgekoppelt und einem Mischer zugeführt, der das empfangene und verstärkte Echosignal in das Basisband heruntermischt.

Die Steuerplatine enthält einen Mikroprozessor, der den Transceiver steuert, die Echosignale in ein digitales Format umsetzt sowie (meist über USB-Kabel) die Verbindung zu einem Computer sicherstellt. Mittels eines Digital- zu Analog Umsetzers wird die Steuerspannung zur Frequenzregelung bereitgestellt. Die Ausgangsspannung des Mixers wird digitalisiert. Bedingt durch das Verfahren (gleichzeitiges Senden und Empfangen) muss bei der Verwendung einer einzelnen Antenne ein Ferritzirkulator die Trennung von Sende- und Empfangsweg vornehmen. Bei den heute üblichen Patchantennen ist die Verwendung von getrennten Sende- und Empfangsantennen jedoch wesentlich billiger. Auf einem gemeinsamen Substrat sind Sendeantenne und Empfangsantenne als Antennenarrays direkt übereinander angebracht. Die Polarisationsrichtung ist gegeneinander um 180° gedreht. Oft wird durch ein zusätzliches Abschirmblech ein direktes „Übersprechen“ (d.h. eine direkte Mitkopplung beider Antennen) verringert. Da die Messung als Frequenzdifferenz zwischen Sende- und Empfangssignal durchgeführt wird, kann das Signal, das durch diese direkte Kopplung entsteht, aufgrund der gleichen Frequenz unterdrückt werden. Bei einer reinen CW-Radar Anwendung muss nur die Dopplerfrequenz verarbeitet werden. Diese enthält bei einem FMCW Radarsensor, der im K-Band arbeitet (etwa 24 GHz) nur Frequenzen bis maximal 16,5 KHz, wenn Geschwindigkeiten bis zu 360 km/h erfasst werden sollen. Als Mikroprozessor kann deswegen hier ein einfacher Stereo-Audioprozessor genutzt werden, der in hoher Stückzahl zum Beispiel in Soundkarten für Heimcomputer verwendet wird. Selbst im FSK-Verfahren (rechteckige Modulationsform) kann ein solcher Prozessor noch bedingt eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu muss bei einer FMCW-Radaranwendung für eine Entfernungsmessung fast der gesamte Frequenzhub des Senders auch im Empfänger verarbeitet werden können. Somit sind im Empfangssignal Frequenzen von bis zu 250 MHz zu erwarten. Das hat einen wesentlichen Einfluss auf die Bandbreite der nachfolgenden Verstärker und die notwendige Abtastfrequenz des Analog- zu Digital Umsetzers. Damit verteuert sich die Signalverarbeitungsplatine eines FMCW-Radars gegenüber der eines CW-Radars erheblich.

Es gibt derzeit auf dem Markt viele preiswerte FMCW-Radar Module oder FMCW Radar Sensoren, die einen kompletten Transceiver mit integriertem Patchantennenfeld als sogenanntes „Front-End“ eines Radargerätes enthalten. Diese Module enthalten als Kern meist den MMIC Baustein TRX_024_xx (siehe [Datenblatt](#)) der Firma [Silicon Radar](#) mit einer Ausgangsleistung von bis zu 6 dBm. Dieser Chip arbeitet im K-Band (24,0 ... 24,25 GHz) und kann als als Sensor für Geschwindigkeit und

für Entfernungsmessungen eingesetzt werden. Die Modulation bzw. eine Frequenzänderung ist abhängig von einer Steuerspannung und erfolgt mit einer externen Beschaltung, entweder eine feste Spannung (dann arbeitet der Baustein als CW-Radar) oder sie ist prozessorgesteuert und beruht auf der Ausgangsspannung eines Digital-Analog-Wandlers. Das Ausgangssignal des Direktmischers wird meist als I&Q-Signal bereitgestellt und muss vor der Analog-Digital-Umwandlung noch wesentlich verstärkt werden.

Bildgebendes FMCW-Radar

Dieses Radarverfahren wird im sogenannten *Broadband-Radar™* als Navigationsradar für maritime Anwendungen genutzt. Hier wird der Frequenzdurchlauf nach Erreichen der maximal möglichen Messentfernung jedoch gestoppt. Das Sendesignal sieht deshalb eher aus wie bei einem Pulsradar mit Intrapulsmodulation. Diese Pause hat hier keinen direkten Einfluss auf die maximal mögliche Messentfernung. Sie ist jedoch notwendig, um die vielen gemessenen Daten aus einem Zwischenspeicher zu lesen und durch eine schmalbandige Leitung verlustfrei zum Sichtgerät zu übermitteln.

Aufgrund seiner Arbeitsweise - dem Frequenzvergleich des empfangenen Echosignals mit dem Sendesignal, das über die gesamte Entfernungsauslenkung zur Verfügung steht - bleibt es ein FMCW-Radar; es wird nur zwischendurch für ein paar Millisekunden abgeschaltet, da noch mehr Daten einfach nicht benötigt werden.

Ein bildgebendes Radarverfahren muss eine Entfernungsmessung für jeden einzelnen Punkt auf dem Sichtgerät durchführen. Eine Entfernungsauflösung hängt hier also eher von der Größe eines Pixels dieses Bildschirms ab und die Fähigkeit der Signalverarbeitung, die Daten in der geforderten Geschwindigkeit bereitzustellen. Es wird ein hochauflösender Bildschirm mit der notwendigen Pixelauflösung benötigt, bei der mindestens für jeden Entfernungsunterschied zwei Pixel zur Verfügung stehen müssen, damit auch wenn das Messsignal genau zwischen der Position von zwei Pixeln liegt, beide Pixel „aufleuchten“ und bei einer Bewegung des Zieles, die Anzahl der verwendeten Pixel und somit die relative Helligkeit des Zielzeichens gleich bleibt.

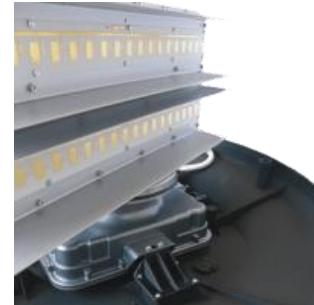


Bild 7: Patchantennengruppe eines FMCW-Navigationsradars im X-Band

Mit dem als Beispiel genannten *Broadband-Radar™* mit einem Frequenzhub von 65 MHz pro einer Millisekunde sind gute Werte möglich.

- Für eine eindeutige Laufzeitmessung sind damit nur maximal 500 μ s messbar, (siehe Bild 1) das entspricht einer möglichen Messentfernung von maximal 75 km.
- Der Frequenzhub 65 MHz pro Millisekunde entspricht einer Frequenzänderung von 65 Hertz pro Nanosekunde. Wenn die nachfolgenden Filter technisch in der Lage sind, Frequenzunterschiede von 1 KiloHertz aufzulösen, dann ist hiermit eine Messung von Laufzeitunterschieden von 15 Nanosekunden möglich, das entspricht einer Entfernungsauflösung von etwa 2 Metern.
- Wenn die durch die Auswerteschaltung maximal verarbeitbare Differenzfrequenz zwei Megahertz beträgt, was bereits einfachste Ein-Chip-Mikrorechner bewerkstelligen, dann können Entfernungen von bis zu 4000 Metern gemessen werden. (Ohne Mikrocontroller müssten dann 4000 verschiedene Einzelfilter parallel betrieben werden.)
- Durch das Messverfahren bedingt ist hier die Genauigkeit der Messung etwa gleich der Entfernungsauflösung und wird im Weiteren noch durch das Auflösungsvermögen des Bildschirmmaßstabes begrenzt.

Dieses FMCW-Radar kann also mit technischem geringem Aufwand eine hohe räumliche Auflösung erzielen. Damit ein Pulsradar die gleiche Auflösung erzielen kann, muss es Zeiten im Nanosekundenbereich messen können. Das würde bedeuten, dass die Senderbandbreite dieses Pulsradars mindestens 80 MHz betragen und bei der Digitalisierung des Echosignals eine Abtastrate von 166 MHz verwendet werden muss.

Nicht bildgebendes FMCW-Radar

Das Messergebnis dieses FMCW-Radars wird als numerischer Wert auf einem Zeigerinstrument oder digitalisiert als alpha-numerische Anzeige auf einem Bildschirm dargestellt. Es kann also nur ein einzelnes dominierendes Objekt vermessen werden, dieses allerdings mit einer sehr großen Genauigkeit bis hinab in den Zentimeterbereich. Diese Art der Entfernungsermittlung wird z.B. in Flugzeugen als Funkhöhenmesser (Radio- Altimeter) verwendet.

Selbst ein analoges Zeigerinstrument kann als Anzeige für die Radar-Altitude eines FMCW Radars dienen (siehe Bild 8). Dieses Drehspulinstrument hat für höhere Frequenzen eine höhere induktive Impedanz und zeigt deswegen einen von der Frequenz abhängigen Ausschlag, der dann allerdings nicht linear ist.



Bild 8: Analoge Anzeige eines Radar-Altimeters

Quelle: [http://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequenzmodulierte Dauerstrichradargeräte.de.html](http://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequenzmodulierte_Dauerstrichradargeräte.de.html)

Autor: Dipl.-Ing. (FH) Christian Wolff