



APPLIKATIONSSCHRIFT I

***Radarsensorik zur Erfassung bewegter
und stationärer Objekte***

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung
 - 1.1 Aufgabenstellung
 - 1.2 Radar-Frequenzbereiche und Regularien
 - 1.3 Radartechnik im Vergleich zu anderen Techniken
2. Radarverfahren
 - 2.1 Physikalische Grundlagen – Radargleichung
 - 2.1.1 Rückstreuung – Reflexion
 - 2.1.2 Durchstrahlung von Materie
 - 2.2 Auswahl geeigneter Verfahren
 - 2.2.1 Erfassung bewegter Objekte: das CW-Radar – Dopplerprinzip
 - 2.2.1.1 Grundlagen
 - 2.2.1.2 Erkennen der Bewegungsrichtung
 - 2.2.2 Erfassung von ruhenden Objekten
 - 2.2.2.1 Das Pulsradar
 - 2.2.2.2 Das FMCW-Radar zur reinen Entfernungsmessung
 - 2.2.3 Gleichzeitige Erfassung von Entfernung und Geschwindigkeit
 - 2.2.3.1 Das FSK-Radar
 - 2.2.3.2 Das FMCW-Radar mit Dreiecksmodulation
3. Lösungsvorschläge mit kommerziell verfügbaren Radarmodulen
 - 3.1 Prinzipieller Aufbau eines Radarsensors
 - 3.2 Detektion bewegter Objekte
 - 3.2.1 Bewegungsmelder zur Personendetektion
 - 3.2.2 Fahrzeugdetektion
 - 3.2.3 Beschaltung eines Detektors
 - 3.3 Detektion stationärer Ziele
 - 3.3.1 Betrieb geeigneter Module
 - 3.3.2 Beschaltung und Auswertung
4. Handhabung und Einbau von Radarmodulen
 - 4.1 Vorsichtsmaßnahmen
 - 4.2 Radommaterialien
5. Zusammenfassung und Anwendungsmöglichkeiten

Die Vervielfältigung/Veröffentlichung dieser Schrift oder von Auszügen davon ist nur mit der Zustimmung des Verfassers erlaubt.

Radarsensorik zur Erfassung bewegter und stationärer Objekte

- Applikationsschrift 01 -

1. Einführung

1.1 Aufgabenstellung

Die Radartechnik findet immer mehr Anwendung zur Erfassung sowohl bewegter als auch ruhender, stationärer Ziele. In der Zwischenzeit hat die Radartechnik ihren Ruf, gut, aber teuer zu sein, verloren, da Radarsensoren heute in großen Stückzahlen kostengünstig hergestellt und angeboten werden. Diese Applikationsschrift soll den Einstieg in diese Technik erleichtern und dem Leser eine Anleitung vermitteln, schnell zu einer für ihn brauchbaren Radarlösung zu kommen und trotzdem auf anschauliche Weise die Grundlagen für die Auslegung eines solchen Systems zu verstehen.

Das Kunstwort **RADAR** steht für **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging, was soviel wie „Zielerfassung und –Ortung durch Funk bzw. elektromagnetische Wellen“ bedeutet. Aus der ursprünglich militärisch ausgerichteten Aufgabenstellung hat sich in der Zwischenzeit eine Vielfalt von kommerziellen und industriellen Anwendungen entwickelt.

Es geht also darum,

- ein Objekt an sich zu detektieren, d.h. seine Präsenz festzustellen
- falls das Objekt ruht, seine augenblickliche Position (Entfernung, Ablagewinkel) zu bestimmen
- falls das Objekt sich bewegt,
 - seine Bewegung zu vermessen (Geschwindigkeit, Richtung der Bewegung) und
 - die sich ständig ändernde augenblickliche Position zu bestimmen.

Dafür bietet sich aus den verschiedensten Gründen die Verwendung von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen, die sog. Mikrowellen, an, da

- die zu detektierenden Objekte (Menschen, Tiere, Fahrzeuge, Maschinenteile, Papierbahnen, etc. etc.) in ihren Abmessungen so liegen, dass die Wellenlänge der Radarwelle zumindest in annähernd gleicher Größenordnung oder wesentlich darunter liegt, um eine gewisse Auflösung zu ermöglichen.
- diese Frequenzbereiche sich hervorragend dazu eignen, Richtantennen zu bauen, die zur näheren Eingrenzung des Aufenthaltsbereichs eines Objekts notwendig sind.

1.2 Radar-Frequenzbereiche und Regularien

Es ist selbstverständlich, dass ein Anwender im bereits dicht belegten Gesamtspektrum der elektromagnetischen Wellen nicht irgendwo auf eigene Faust Wellen aussenden darf. Deshalb sind für solche Anwendungen bestimmte Frequenzbereiche dafür reserviert.

Die Situation der zugelassenen Frequenzen und vor allem der zur Verfügung gestellten Bandbreiten ist allerdings gerade zurzeit sehr in Bewegung geraten. So gibt es sowohl internationale Empfehlungen (nach CEPT) als auch nationale Vorschriften, wie zum Beispiel in Deutschland herausgegeben von der RegTP in Mainz.

Die in Deutschland festgelegten Frequenzen sind:

2.400 ... 2483,5 MHz	9.200 ... 9.500 GHz
13.40 ... 14,00 GHz	24,00 ... 24,25 GHz
61,00 ... 61,50 GHz	122 ... 123 GHz
244 ... 246 GHz	

Weiterhin ist der Bereich 77 GHz für rein automotiv Anwendungen nahezu europaweit reserviert.

Neben den Frequenzen sind auch die ausgesendeten **Leistungen** festgelegt. So darf die maximale abgestrahlte Spitzenleistung im Bereich

- größer 10 GHz höchstens 100 mW oder +20 dBm
- unter 10 GHz höchstens 25 mW oder +13 dBm

betragen.

⇒ Kurz zur Umrechnung mW in dBm:

$$P \text{ in dBm} = 10 \log P \text{ in mW}$$

<i>Beispiele:</i>	1 mW	entspricht	0 dBm
	2 mW		+3 dBm
	5 mW		+7 dBm
	10 mW		+10 dBm
	100 mW		+20 dBm
	0,1 mW		-10 dBm
	usw.		

Dabei kommt es wohlgerne auf die **Spitzenleistung** und die sog. **EIRP** an!

Was ist **EIRP**?

EIRP steht für **E**quivalent **I**sotropic **R**adiated **P**ower und bedeutet, dass dies der äquivalenten Leistung eines Rundumstrahlers entspricht.

Anders ausgedrückt: Es genügt nicht, lediglich die Leistung eines Senders an seiner Antennenbuchse zu messen, es muss der Antennengewinn einer eventuell bündelnden Antenne hinzugerechnet werden.

Beispiel:

Ist ein Sender bei 24 GHz in der Lage, 5 mW (+7 dBm) Leistung an der Antenne zu erzeugen, so darf der maximale Antennengewinn durch Bündelung 13 dB betragen (+7 dBm +13 dB = +20 dBm), um die geforderten +20 dBm nicht zu überschreiten.

Nun zur **Spitzenleistung**:

In vielen Bereichen unseres Lebens werden immer wieder neue Spitzenleistungen gefordert. Nicht so in der Mikrowellentechnik!

Entgegen der Auslegung mancher Benutzer interessiert sich die Regulierungsbehörde tatsächlich für die Spitzenleistung. Dies bedeutet, dass diese Behörde zum Beispiel nicht durch zeitweises Tasten des Senders irreführt werden kann. So interessiert sich die Behörde dafür, ob der Sender tastbar ist und wenn ja, mit welchem „duty cycle“ (Puls/Pausenverhältnis). Daraus rechnet die Behörde von der gemessenen mittleren Leistung auf die Spitzenleistung zurück.

All dies bedeutet aber nicht, dass ein Anwender davon ausgehen darf, überall einheitlich in Europa dieselben Verhältnisse vorzufinden. So ist z.B. in England der 24 GHz-Bereich auf 24.150 ... 24.250 GHz eingeschränkt. Wieder andere Regulierungen gelten für USA und Japan bezüglich zugelassener Leistungen.

Damit soll nur ausgedrückt werden, dass ein Anwender gut daran tut, sich im vornherein klar zu werden, in welchen Ländern seine Geräte betrieben werden sollen, um die dortigen Regulierungen zu beachten.

Fest steht, dass die beiden Bereiche 2,4 GHz und 24 GHz weltweit zugelassen sind (einzige Ausnahme Japan). Da aber der 2,4 GHz-Bereich in Zukunft noch mehr als bisher benützt und geradezu überschwemmt werden wird (Mikrowellenherde, Bluetooth, usw.) und die tiefe Frequenz (12 cm Wellenlänge) den Bau hochbündelnder Antennengruppen erschwert, genießt der 24 GHz-Bereich eine gewisse Art von Exklusivität, da er die Vorteile einer hohen Frequenz (kleine Antennenabmessungen, höhere zugelassene EIRP) besitzt. Dafür muss man schlechtere Ausbreitungseigenschaften (größere Funkfelddämpfung) als bei niedrigen Frequenzen in Kauf nehmen.

Zur Zulassung in Deutschland:

Es ist erstrebenswert, eine sog. „allgemeine Zulassung“ eines Radarmoduls zu erhalten, da damit der kostenfreie Betrieb dieses Gerätes durch Jedermann möglich ist. Ein Anwender kann sich entscheiden, entweder ein allgemein zugelassenes Radarmodul eines Radarherstellers zu verwenden oder sein gesamtes Gerät zu einer Überprüfung zur Erlangung einer allgemeinen Zulassung vorzustellen.

InnoSenT hat große Erfahrung bei der Erlangung der allgemeinen Zulassung und bietet dem Anwender sowohl zugelassene Module an als auch den Service der Hilfestellung zur Erlangung der Zulassung für mit InnoSenT-Komponenten bestückte Geräte.

Eine in Deutschland erlangte Zulassung erleichtert die Zulassung in anderen europäischen Ländern erheblich.

1.3 Radartechnik im Vergleich zu anderen Techniken

Die wesentlichen, mit der **Radartechnik** konkurrierenden Techniken sind die **Infrarot-** und die **Ultraschalltechnik**.

Grundsätzlich unterscheidet sich der **Infrarotsensor** vom Radarsensor dadurch, dass er vornehmlich seitliche Bewegungen registriert, da diese das Wärmebild verändern. Dagegen ist er relativ unempfindlich gegenüber Bewegungen direkt in radialer Richtung zum Sensor, während der Radarsensor blind ist für orthogonale Bewegungen, aber hochempfindlich auf radiale Bewegungen reagiert.

Die **Ultraschalltechnik** ist auf sehr kurze Entfernungen beschränkt (<1,5 m) und leidet unter der Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen und insbesondere unter der Notwendigkeit, dass der Transducer direkten Kontakt zum Ausbreitungsmedium Luft benötigt und damit immer sichtbar sein wird.

Daraus und aus der Physik der Ausbreitungsmechanismen ergeben sich für die jeweilige Technologien Vor- und Nachteile, die in der folgenden Tabelle aufgezeigt werden.

Technologie	Vorteile	Nachteile
<i>Infrarot-Sensorik</i>	<ul style="list-style-type: none"> • erfasst orthogonale bzw. tangentielle Bewegungen optimal • grosse Erfassungswinkel in horizontaler und vertikaler Richtung • in einfachster Ausführung sehr preisgünstig 	<ul style="list-style-type: none"> • erfasst radiale Bewegungen schlecht oder ist blind • empfindlich gegen Umwelteinflüsse wie Regen, Wind, Staub, schnelle Temperaturwechsel • unsichtbare Sensoren unmöglich, bei Abdeckung hochqualitative und komplizierte Radome (Formgebung und Material) notwendig • keine Information über Bewegungsrichtung und/oder Entfernung

Technologie (Fortsetzung)	Vorteile	Nachteile
<i>Ultraschall-Sensorik</i>	<ul style="list-style-type: none"> • kostengünstig • Möglichkeit der Triangulation • hohe Genauigkeit im Nahbereich 	<ul style="list-style-type: none"> • sehr begrenzte Reichweite (ca. 1,5m) • empfindlich gegen Umwelteinflüsse (Geräusche, schnelle Temperaturänderungen) • Sensor immer sichtbar • keine Information über Bewegungsrichtung
<i>Radar-Sensorik</i>	<ul style="list-style-type: none"> • erfasst radiale Bewegungen optimal • unempfindlich gegen Umwelteinflüsse (Regen, Schnee, Staub, schnelle Temperaturwechsel), allwettertauglich • durchstrahlt nicht-metallische Materialien • daher preisgünstige und einfache Radom-Materialien • sehr flexibel bezüglich Antennendiagramm • Identifizierung der Bewegungsrichtung • Entfernungsmessung möglich oder Eingrenzung des Entfernungsbereichs bzw. relativ einfache grobe Entfernungsinformation 	<ul style="list-style-type: none"> • begrenzte Erfassungswinkel • erfasst orthogonale bzw. tangentielle Bewegungen schlecht oder gar nicht • höhere Kosten • Vorurteile von Anwendern gegen „Radarstrahlung“

Aus dieser Zusammenfassung geht hervor, dass die Radartechnik trotz eines eventuell höheren Kostenaufwands eindeutige Vorteile gegenüber den anderen Techniken hinsichtlich Funktionalität besitzt.

2. Radarverfahren

2.1 Physikalische Grundlagen – Radargleichung

2.1.1 Rückstreuung – Reflexion

Mikrowellen verhalten sich aufgrund ihrer kleinen Wellenlänge (z.B. 12mm bei 24 GHz) ähnlich wie Licht, das heißt, es gibt Effekte wie Beugung, Totalreflexion, Wegspiegeln, Interferenz usw. Nur unter dieser Berücksichtigung sind viele Eigenschaften von Radars überhaupt zu verstehen.

Im Falle einer Radaranwendung wird darauf spekuliert, dass eine ausgesendete Welle an einem Objekt derart diffus gestreut wird, dass zumindest ein gewisser Teil der Welle wieder zurück in den Sendepunkt reflektiert wird. Selbstverständlich hängt die „Stärke“ dieser Reflexion sehr von der Beschaffenheit und dem Material des Objekts ab.

Betrachten wir nun die empfangene Signalleistung nach diffuser Reflexion an einem Objekt, so berechnet sich diese nach der sog. „Radargleichung“.

$$\frac{P_E}{P_S} = \frac{g^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot D^4} \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

- P_e Leistung des empfangenen Signals
- P_s Sendeleistung
- λ Wellenlänge des Sendesignals (z.B. 12 mm bei 24 GHz)
- σ Rückstreuquerschnitt eines Objekts
- D Abstand Radarsensor zum Objekt

Ohne weiter ins Detail zu gehen, sind 2 Erkenntnisse wichtig:

⇒ Die Empfangsleistung ist

- umgekehrt proportional zur 4. Potenz des Abstandes oder umgekehrt, die Reichweite eines Radars ändert sich nur mit der 4. Wurzel der Sendeleistung
- direkt proportional zum Rückstreuquerschnitt eines Objekts.

⇒ Der Rückstreuquerschnitt ist frequenzabhängig und beträgt bei 24 GHz für

einen Menschen	ca.	0,5 m ²
eine zerknautschte Cola-Dose		0,5 m ²
ein Auto je nach Ausrichtung		1 – 5 m ²
eine Metallplatte von 1m ²		einige 100 m ²

Anders ausgedrückt, der Mensch stellt vergleichsweise zu einem Stück Metall ein schlechtes Radarziel dar. Die Eigenschaften anderer Radarziele werden verständlicher, wenn im folgenden die Durchdringung von Materie behandelt wird.

2.1.2 Durchstrahlung von Materie

Die Tatsache, dass die Mikrowelle Materie mehr oder weniger durchstrahlt, ist erfreulich, wenn ein Radarsender hinter einer Abdeckung (Radom) „versteckt“ werden soll, um das Radar unsichtbar zu machen oder vor Umwelteinflüssen zu schützen. Sie ist weniger erfreulich, wenn Objekte detektiert werden sollen, die aus diesen Materialien bestehen.

Mikrowelle durchstrahlt:

Metall	nicht, volle Reflexion
Wasser	nicht, volle Absorption
Schaumstoff	hervorragend, nicht-meßbare Dämpfung
Kleidung	trocken – gut nass - Verluste bis 20 dB
Regen	gut – bis 6 dB Dämpfung
Kunststoffe	sehr gut - 0,5 bis 3 dB Verlust bei geeigneter Dicke und richtigem Abstand
Menschen	nicht, eher Beugung, Absorption und Reflexion
Holz	trocken – gut nass – Verluste bis 10 dB
Eis	schlecht – 10 dB Dämpfung

Daraus geht klar hervor, dass alle absorbierenden Materialien schlechte Radarziele darstellen, da sie zwar trotzdem wegen des „Materiesprungs“ eine gewisse Reflexion erzeugen, das meiste aber absorbiert wird.

Als Beispiel sei genannt, dass Mikrowellen unter Wasser z.B. weder nach dem Radarprinzip zum Orten von U-Booten noch zur Kommunikation geeignet sind, da Wasser als idealer Absorber wirkt. Dort werden zur Kommunikation Langwellen und zur Ortung das Sonarprinzip (Reflexion von Schallwellen) verwendet.

2.2 Auswahl geeigneter Verfahren

Radarverfahren sind in zwei große Untergruppen einteilbar:

- Dauerstrich-Radars oder CW (continuous wave) Radars
- Puls-Radars.

Die Entscheidung für ein Radarverfahren hängt natürlich vom Anwendungsfall ab. Entscheidend ist, welche Größe vorrangig gemessen werden soll:

- die Präsenz und Bewegung
oder
- die Entfernung

eines Objekts.

2.2.1 Erfassung bewegter Objekte: das CW-Radar – Dopplerprinzip

2.2.1.1 Grundlagen

Steht die Erfassung bewegter Objekte im Vordergrund, ist das CW-Doppler-Radar die einfachste und wirkungsvollste Lösung. Sie nützt den Dopplereffekt aus, der für alle Arten von Wellenaussendungen gilt und folgendes beinhaltet:

Die von einem Sender ausgesandten Wellenfronten treffen auf ein bewegtes Objekt. Dabei erfahren die Wellenfronten des Sendesignals je nach Bewegungsrichtung eine „Stauchung“ oder „Ausdünnung“, was sich als Frequenzverschiebung äußert. Das somit in der Frequenz verschobene reflektierte Signal wird in einem relativ einfachen (für den Experten „homodyn“) Mischer im Sensor durch (subtrahierende) Mischung mit dem unverfälschten Sendesignal als sinusähnliches Zwischenfrequenzsignal ausgewertet. Dabei ist egal, ob sich der Sensor relativ zum Objekt oder das Objekt relativ zum Sensor bewegt.

Tatsächlich ist die Geschwindigkeitskomponente des Objekts in Richtung direkte Verbindung Sensor-Objekt berechenbar. Die mathematische Formel dafür lautet:

$$f_D = 2f_0 \cdot \frac{v}{c_0} \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

Dabei bedeuten:

f_D	Doppler- oder auch Differenzfrequenz
f_0	Sendefrequenz des Radars
v	Betrag der Geschwindigkeit des bewegten Objekts
c_0	Lichtgeschwindigkeit
α	Winkel zwischen tatsächlicher Bewegungsrichtung des Objekts und der Verbindungslinie Sensor-Objekt

Setzt man für die Sendefrequenz 24 GHz ein, ergibt sich als Faustformel:

$$f_D = 44 \frac{\text{Hz}}{\text{km/h}} \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

Damit können einfach und informativ die zu erwartende Dopplerfrequenz und der Durchlassbereich eines nachfolgenden Verstärkers bestimmt werden.

So hat es z.B. sicher keinen Sinn, bei Personendetektion für Türöffner die obere Frequenzgrenze der Auswerteschaltung höher als 300 Hz zu wählen, da dies einer Geschwindigkeit von 6,8 km/h eines (sehr flotten) Fußgängers entspricht. Sollen dagegen zur Verkehrszählung auf (deutschen!) Autobahnen Radarsensoren eingesetzt werden, müssen sie auf jeden Fall eine obere Frequenzgrenze von mindestens 10 kHz (220 km/h) aufweisen.

Zusammenfassend kann also die Geschwindigkeit eines Objekts über die Messung der Dopplerfrequenz (analog durch Zählen von Nulldurchgängen oder digital durch FFT-Analyse) direkt ermittelt werden, wobei der Winkel der Bewegung mit eingerechnet werden muss.

Achtung!

Bei einer exakt kreisförmigen Bewegung des Objekts um den Sensor beträgt der Winkel α 90° , was den \cos und damit die Dopplerfrequenz zu Null werden lässt. Derartige Bewegungen sind mit diesem Radar leider nicht erfassbar! Dazu müsste sich allerdings dieses Objekt millimetergenau auf einer Kreisbahn bewegen, was wiederum für endlich ausgedehnte Objekte als unwahrscheinlich erscheint.

Bekanntestes, aber unangenehmstes Beispiel für solche Anwendungen ist das Polizeiradar, das deshalb immer unter einem konstanten Winkel zur Fahrbahn und damit zur Bewegungsrichtung eines ankommenden Fahrzeugs ausgerichtet werden muß.

2.2.1.2 Erkennen der Bewegungsrichtung

Ein großer Vorteil beim Radarsensor ist, dass durch die Verwendung zweier, um 90° oder eine viertel Wellenlänge gegeneinander versetzter Mischer, ein sog. **I(n phase) / Q(uadrature phase)**-Mischer die zusätzliche Information über die Bewegungsrichtung (relatives Annähern oder Entfernen) sehr einfach zu erhalten ist. In vielen Fällen sollen bei Bewegungsmeldern zuerst vorhersagbare Bewegungen ablaufen, bevor der Sensor selbst eine Funktion auslöst wie z.B. beim Türöffner nur Öffnen bei Annähern an die Türe oder im Sanitärbereich nur beim Entfernen vom Waschtisch oder Urinal. Je nachdem, welches der beiden Signale, I oder Q, voreilt, liegt Annähern oder Entfernen vor.

2.2.2 Erfassung von ruhenden Objekten

2.2.2.1 Das Pulsradar

Steht die Messung der Entfernung eines ruhenden oder auch bewegten Objektes im Vordergrund, bietet sich das Pulsradar an.

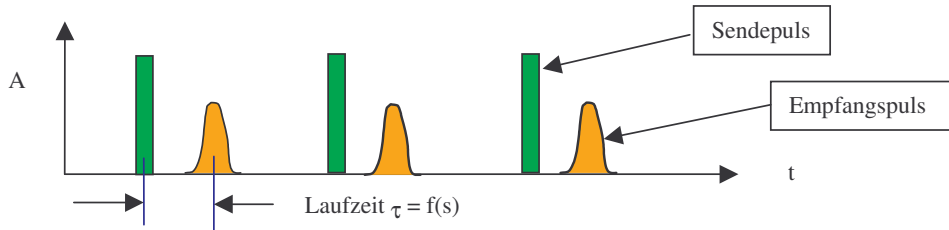


Bild 1: Zeitlicher Verlauf von Sende- und Empfangsimpuls bei einem Pulsradar

Hier wird ganz einfach die verstreichende Zeit zwischen dem Aussenden eines kurzen Sendepulses und dem Eintreffen des reflektierten Pulses gemessen. Da der Puls sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt und die Distanz Sensor-Objekt zweimal durchläuft, erfährt ein Puls zum Beispiel eine Verzögerung von 6 nsec bei einem Abstand von einem Meter. Daraus ist sofort die Problematik dieser Pulstechnik zu erkennen:

Um Objekte im Nahbereich auflösen zu können, müssen die Pulse sehr kurz sein, was hohe Bandbreite erfordert, was wiederum bei Regulierungsbehörden gar nicht gerne gesehen wird, bzw. nicht erlaubt ist.

Grundsätzlich ist dies ein Verfahren, das zu allererst die Entfernung eines Objektes ermittelt. Die Geschwindigkeit muss hier durch Bildung der zeitlichen Ableitung ds/dt aus einer Vielzahl ermittelter Abstandswerte errechnet werden.

2.2.2.2 Das FMCW-Radar zur reinen Entfernungsmessung

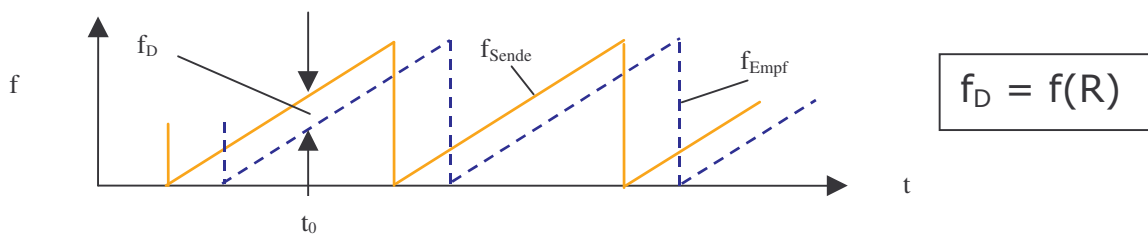


Bild 2: Zeitabhängiger Verlauf der Sende- und Empfangsfrequenzen beim FMCW-Radar mit Sägezahnmodulation

Ein anderes Radarverfahren zur Detektion stationärer Ziele stellt das **FMCW**-(**F**requency-**M**odulated-**C**ontinuous-**W**ave) Radar dar. Dabei wird im Gegensatz zum Pulsverfahren kontinuierlich eine elektromagnetische Welle abgestrahlt, deren Frequenz allerdings zeitabhängig verändert wird. Auch erfährt das ausgesandte Signal durch die Laufzeit eine Verzögerung, sodass das reflektierte und empfangene Signal und das damit verglichene Sendesignal verschiedene Augenblicksfrequenzen aufweisen, da das Sendesignal sich zwischenzeitlich in der Frequenz verändert hat. Die einfachste zeitliche Frequenzveränderung des Sendesignals ist die Sägezahn-Funktion, wie im Bild dargestellt.

Es besteht folgender Zusammenhang:

$$R = \frac{c_0}{2} \cdot T \cdot \frac{f_D}{\Delta f} \quad (4)$$

Dabei bedeuten:

f_D	Differenz-Frequenz
Δf	Frequenzhub
T	Sägezahn-Wiederholdauer
R	Entfernung eines reflektierenden Objekts
c_0	Lichtgeschwindigkeit

Wiederum auf 24 GHz bezogen, wo im Gesamten bestenfalls 250 MHz Frequenzhub erlaubt sind, zeigt sich, dass eine einfache Auswertung nur eine minimale Entfernungsmessung bis herunter auf 2 bis 3 m zuläßt. Will man näher heranzumessen, werden sehr aufwendige Rechenverfahren notwendig (schnelle DSP!). Dafür besitzt dieses Radar einen großen Entfernungseindeutigkeitsbereich, da prinzipiell T sehr hoch gewählt werden kann.

2.2.3 Gleichzeitige Erfassung von Entfernung und Geschwindigkeit

2.2.3.1 Das FSK-Radar

Anstatt die Frequenz wie beim FMCW-Radar kontinuierlich zu verändern ist es möglich, zwischen zwei Werten im Abstand von z.B. einigen MHz bis zig-MHz zu springen. Durch den Phasenvergleich der zwei niederfrequenten Spannungen vor und nach dem Umschalten kann auf die augenblickliche Entfernung des Objekts geschlossen werden, während die (Doppler)-Frequenz die Geschwindigkeitsinformation (wie unter 2.1.1.1) enthält. Dazu ist es nötig, entweder die jeweilige Kurvenformen zeitgenau zu speichern und miteinander zu vergleichen oder sie durch einen Umschalter an den beiden Eingängen eines Phasendetektors einzuspeisen.

Die Entfernung ergibt sich aus der Beziehung:

$$R = \frac{(\phi_1 - \phi_2) \cdot c_0}{2 \cdot (F_1 - F_2)} \quad (5)$$

Dabei bedeuten:

F_1 und F_2	die 2 diskreten Sendefrequenzen
c_0	Lichtgeschwindigkeit
ϕ_1 und ϕ_2	die Phasendifferenz der empfangenen ZF-Signale an den Mischerausgängen (in Radian)
R	Entfernung eines reflektierenden Objekts

2.2.3.2 Das FMCW-Radar mit Dreiecksmodulation

Rein mathematisch gesehen ist die Bestimmung von Geschwindigkeit und Entfernung eines Objekts gleichzusetzen mit der Lösung eines Gleichungssystems mit zwei Unbekannten. Um eindeutige Lösungen zu erhalten, werden damit auch zwei Gleichungen benötigt.

Wir haben bisher gesehen, dass eine Bewegung eines Zieles eine Verschiebung der Empfangsfrequenz auf der Frequenzachse nach oben oder unten bedeutet, während die Entfernung des Zieles aufgrund der Laufzeit des Signals eine Verschiebung dieser Flanke

auf der Zeitachse verursacht. Es liegt nahe, diese Effekte zu kombinieren, indem man zeitliche Verläufe der Sendefrequenz wählt, aus denen im Empfangsfall eindeutig Entfernung und Geschwindigkeit des Objekts zwar nicht primär direkt gemessen, doch aber durch einfache mathematische Operationen gewonnen werden können.

Eine solche Möglichkeit bietet die Dreiecksmodulation.

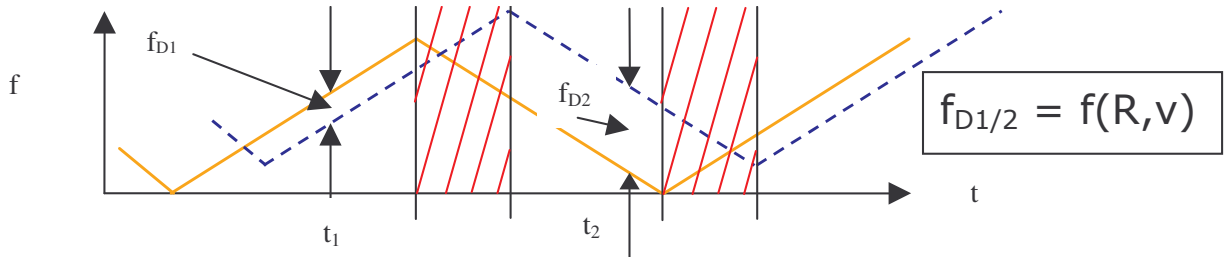


Bild 3: Zeitlicher Verlauf von Sende- und Empfangsfrequenzen beim FMCW-Radar mit Dreiecksmodulation

Im Bereich der ansteigenden Flanke subtrahieren sich der Dopplereffekt als Frequenzverschiebung infolge einer Bewegung und der entfernungsabhängige Laufzeiteffekt. Bei der abfallenden Flanke addieren sich diese beiden Effekte.

$$f_{D1} = f_{Doppler} - f_{Laufzeit} \quad (6)$$

$$f_{D2} = f_{Doppler} + f_{Laufzeit} \quad (7)$$

Dabei bedeuten:

- f_{D1} Differenzfrequenz am Mischerausgang im aufsteigenden Kurvenast, Messwert
- f_{D2} Differenzfrequenz am Mischerausgang im absteigenden Kurvenast, Messwert
- $f_{Doppler}$ Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt, entstanden durch die Bewegung des Objekts siehe (2)

(zur Erinnerung: $f_D = 2f_0 \cdot \frac{v}{c_0} \cdot \cos \alpha$ (2))

$f_{Laufzeit}$ Frequenzverschiebung durch den Laufzeiteffekt des Sendesignals, entstanden durch die Entfernung des Objekts vom Sender nach (4)

$$f_{Laufzeit} = 2R \cdot \frac{\Delta f}{(c_0 \cdot T)} \quad (5)$$

Unter der idealen Annahme einer vollkommen linearen Frequenzveränderung in Dreiecksform ergibt sich jeweils für den ansteigenden und den abfallenden Ast der Dreiecksfunktion eine über eine gewisse Zeit konstante Differenzfrequenz, was die Auswertung sehr erleichtert. So ist im Bereich des aufsteigenden und des abfallenden Astes jeweils die entstehende Differenzfrequenz zu bestimmen. Durch geeignete Multiplikation und Subtraktion bzw. Addition der Gleichungen (6) und (7) lassen sich v und R berechnen.

Bei der Auswertung der Differenzfrequenzen am Mischerausgang ist zu beachten, dass der rot-schraffierte Bereich wegen Unstetigkeit der Signalformen nicht auswertbar ist.

3. Lösungsvorschläge mit kommerziell verfügbaren Radarsensoren

3.1 Prinzipieller Aufbau eines Radarsensors

Alle hier besprochenen Radarprinzipien sind mit einem relativ einfachen Radarfrontend-Aufbau zu bewerkstelligen. Dabei wird im Empfänger einfachheitshalber in den Zwischenfrequenzbereich „Null“ oder zumindest sehr nahe bei „Null“ umgesetzt. Ein gezielte Umsetzung in eine vom Träger abgesetzten Zwischenfrequenz von z.B. einigen 10 MHz, wie dies bei hochempfindlichen Überlagerungsempfängern geschieht, wird hier nicht vorgenommen. Dies limitiert zweifellos den Dynamikbereich solcher Radarsensoren (wegen relativ hohem trägernahen 1/f-Rauschen), muss aber als Kompromiss zu einer aufwendigen technischen Lösung gesehen werden.

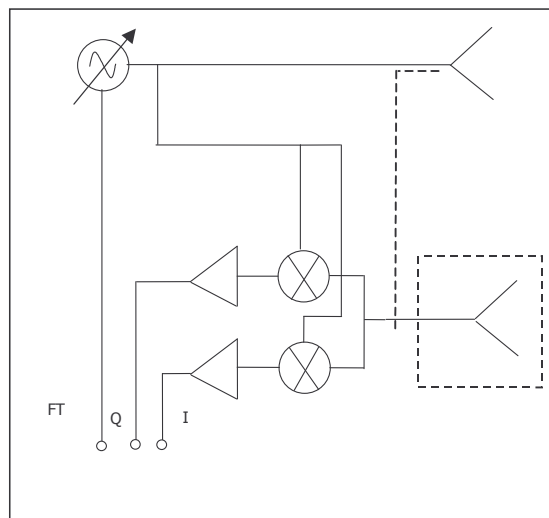


Bild 4: Prinzipschaltbild eines InnoSenT-Radarfrontends mit getrennten Sende/Empfangsantennen.

Der Aufbau mit getrennten Sende/Empfangsantennen ist anzuraten, da er die höchste Empfindlichkeit und verbesserte Mischerisolation (besonders beim FMCW-Radar benötigt) aufzuweisen hat. Ist aus Platzgründen nur eine gemeinsame Sende/Empfangsantenne möglich (z.B. wegen großer Antennenfläche für hohe benötigte Bündelung), so entfällt, wie schraffiert dargestellt die Empfangsantenne, wobei das Empfangssignal aus der gemeinsamen Sende/Empfangsleitung ausgekoppelt werden muss. Damit ergibt sich logischerweise ein Empfindlichkeitsverlust, da das Empfangssignal nicht nur in den Mischerteil, sondern auch auf den Sendepfad eingespeist wird und damit verloren geht.

Die von InnoSenT angebotenen **Antennenlösungen** sind stets planare Anordnungen, die durch ihre geringe benötigte Tiefe oder Dicke beeindruckend sind. Die einzelnen Strahler sind rechteckförmig ausgebildet und werden als Patch(es) bezeichnet. Durch geeignete Zusammenschaltung werden gezielt Antennendiagramme erzeugt. Die benötigte Fläche zur Formung eines bestimmten Antennendiagramms ist in etwa gleichzusetzen mit den Abmessungen von Hornantennen, die aber ein Vielfaches an Tiefe benötigen (mehr darüber in Abschnitt 4).

Sinnvollerweise sind an den Empfangsmischerausgängen direkt **Niederfrequenz-Vorverstärker** integriert.

Dies bringt 3 wesentliche Vorteile:

Entkopplung der MischerAusgänge und damit Unempfindlichkeit des Sensors gegenüber statischer Aufladung von Personen oder Vorrichtungen in der Endmontage des Komplettsensors – ein wesentliches Problem bei Sensoren älterer Technologie,

wo meistens ein direkter Zugriff auf die hochempfindlichen Mischerdioden möglich war hervorragende Schirmung gegen äußere Störeinstrahlung (EMV) optimale Anpassung von Verstärkung, Bandbreite und NF-Verstärker-Qualität, damit Erzielung der geringst möglichen Systemrauschzahl

3.2 Detektion bewegter Objekte

3.2.1 Bewegungsmelder zur Personendetektion

InnoSenT bietet für den Anwender sowohl Standardkomponenten als auch kundenspezifisch zusammengestellte Frontends an.

So beinhaltet das Standardbauteil IPS24-2-4-2-154 ein Frontend gemäß dem oben gezeigten Prinzipschaltbild mit folgenden Eigenschaften:

- typischer Bewegungsmelder zur Erfassung von (sich bewegenden) Menschen bis zu Entfernungen von 10 bis 12m
- integrierte Sende/Empfangsantennen mit 4 x 2 Patchanordnung und einem Erfassungsbereich von 40 x 28°
- Festfrequenzoszillator im 24 GHz-ISM-Band
- 2-kanaliger Schottkydioden-Empfangsmischer mit sog. I/Q-Ausgang zur Erkennung der Bewegungsrichtung
- integrierte NF-Vorverstärker mit 20 dB Verstärkung und einigen kHz Bandbreite
- ENABLE-Eingang, um den Sensor z.B. zur Stromersparnis zu tasten oder mit Amplitudenmodulation zu betreiben.

Wird der Sensor mit +5V versorgt, der ENABLE-Eingang auf Masse gelegt und werden die beiden Ausgänge an ein 2-Kanal-Scope angeschlossen, können bei Bewegungen der Hand vor dem Sensor sinusförmige Signale im zig-mV-Bereich am Scope verfolgt werden. Bei gleichförmiger Bewegung in einer Richtung kann das eindeutige Vor- oder Nacheilen eines Ausgangskanals erkannt werden.

Der Stromverbrauch eines derartigen Sensors mit modernem PHEMT-Oszillator ist mit ca. 40 mA (einschließlich den ersten Vorverstärkerstufen!) bereits sehr niedrig im Vergleich zu früher verwendeten Sensoren mit GUNN-Elementen. Soll dieser Stromverbrauch noch weiter verringert werden, kann der Sensor durch Anlegen eines TTL-Pegels am ENABLE-Eingang getastet werden. Der Stromverbrauch erniedrigt sich dann um das Puls/Pause-Verhältnis. Allerdings sind dann etwaige Einschwingvorgänge am Mischerausgang zu beachten, sodass bei schnellerem Tasten mit einer Sample&Hold-Schaltung am Empfängerenausgang gearbeitet werden muss (siehe dazu Kapitel 3.2.3).

Selbstverständlich kann der Tasteingang auch zur Amplitudenmodulation (100% Modulationstiefe) verwendet werden. Als höchste Modulations- oder Tastfrequenz sind ca. 20 kHz zu betrachten.

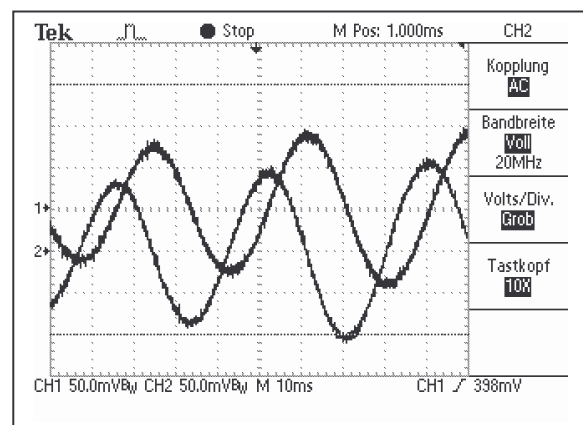


Bild 5: Typisches Scope-Bild der beiden I/Q-Ausgänge eines Radarsensors bei einem gleichförmig bewegten Ziel

3.2.2 Fahrzeugdetektion

Die Aufgabenstellung ist hier insofern verschieden, dass bei der Detektion von Fahrzeugen meistens

- höhere Geschwindigkeiten auftreten
- größere Radarquerschnitte vorhanden sind, was die Empfindlichkeit zwar erhöht, aber die Trennung von Objekten erschwert
- die Objekte in erwarteten Bereichen auftauchen.

Dies führt dazu, dass

- die auftretenden Dopplerfrequenzen höher liegen und Vorverstärker Bandbreiten bis ca. 20 kHz benötigen
- mit stärker bündelnden Antennen gearbeitet werden kann und muss
- größere Entfernungen überbrückt werden können und müssen.

Ein typisches Beispiel dafür ist der **InnoSenT Sensor IPS24-2-8-4-144**.

Gemäß dem auf Anfrage verfügbaren Datenblatt besitzt er eine 8 x 4 Patchantenne mit einem Diagramm von 13 x 25°, kann z.B. Autos in Entfernungen von 100m bereits detektieren und dies mit Geschwindigkeiten bis zu 250 km/h.

Auch dieser Sensor ist tastbar. Trotz hoher Bündelung und getrennter Sende- und Empfangsantenne nimmt der Sensor eine akzeptierbare Fläche ein. Durch den planaren Aufbau des Sensors ist das gesamte Modul lediglich 11 mm tief bzw. dick, was z.B. niemals mit einer Hornantenne erreichbar wäre.

3.2.3 Äußere Beschaltung eines Sensors

Nachverstärkung

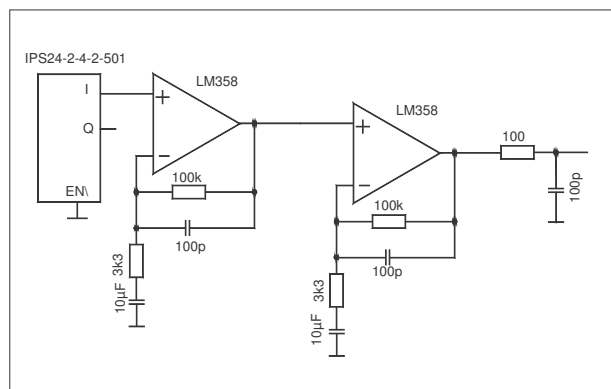


Bild 6: Vorschlag Nachverstärkerschaltung für einen Kanal, Verstärkung 60 dB, 30 kHz Bandbreite

Um das detektierte Signal auszuwerten, muss der Anwender weitere Verstärkerstufen außerhalb des Sensors hinzufügen. Dafür eignen sich Schaltungen mit Operationsverstärkern, die bandbegrenzt sind, um nicht unnötig das Rauschen zu erhöhen.

Als Faustregel gilt, dass eine gesamte Verstärkung (einschließlich der Vorverstärkung im Sensor) von **70 bis 80 dB** benötigt wird, um Signale gerade noch nicht zu begrenzen, es sei denn, das Objekt befindet sich sehr nahe vor dem Sensor (einige zig cm). Es können sowohl invertierende, als auch nicht-invertierende Verstärkerschaltungen gewählt werden. Um die EMV-Anfälligkeit zu minimieren, sind niederohmige Werte für die Widerstände zu wählen, die die Verstärkung festlegen.

Die Versorgungsspannung des Sensors (im allgemeinen +5V) soll geregelt und gefiltert sein, um nicht zusätzliches FM-Rauschen zu injizieren.

Richtungserkennung

Als weiteres Beispiel sei eine Auswerteschaltung zur Erkennung von Annäherung oder Entfernung angeführt.

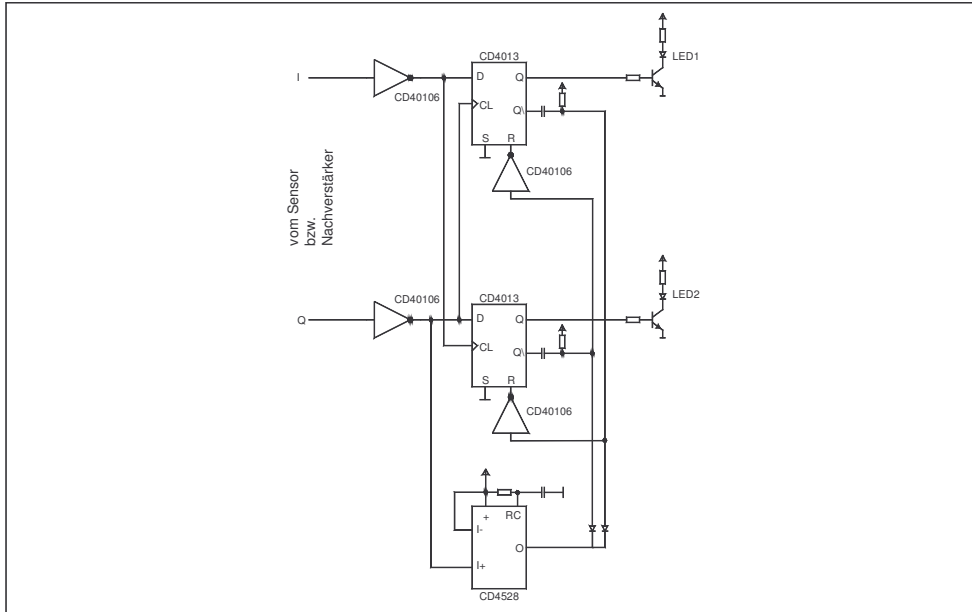


Bild 7: Schaltung zur Richtungserkennung (Annähern – Entfernen)

Das zuerst getriggerte D-Flip-Flop (CD4013) setzt das zweite zurück. LED1 zeigt Annäherung oder Entfernung an, LED2 logischerweise umgekehrt Entfernung oder Annäherung. Das Mono-Flop (CD4528) schaltet die LED nach einer voreingestellten Zeit nach Ausbleiben des Dopplersignals wieder ab.

Takten

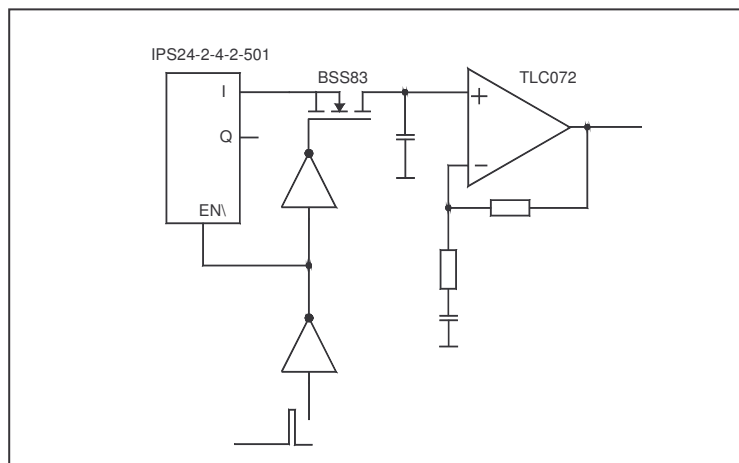


Bild 8: Getakteter Radarsensor mit Sample & Hold – Schaltung

Wird der Sensor getastet, ist es ratsam, das Empfangssignal durch eine Sample & Hold-Schaltung auszulesen (siehe Bild 8).

Wegen seiner geringen Feedback-Kapazität ist der N-Kanal MOSFET BSS83 sehr gut als Sampler geeignet. Zur Nachverstärkung und Pufferung wird ein OP mit geringem Eingangsstrom benötigt (FET-Eingang).

Aufgrund der Bandbegrenzung des internen Vorverstärkers des Radar-Moduls sollte die Pulsdauer nicht kleiner als 10µs gewählt werden. Eine typische Tastfrequenz ist 10kHz.

Je nachdem, ob der Detektor als **Präsenzdetektor** oder sozusagen als **Geschwindigkeitsmessgerät** verwendet wird, kann die Auswertung mehr oder weniger komplex ausgeführt sein.

Bei der reinen **Präsenzdetektion** genügt ein Verstärken/Begrenzen der Signale und Vergleichen mit einem Schwellwert, wobei erst eine genügende Anzahl von Schwingungszügen zu einer Auslösung einer Funktion führen soll, um kurzfristige Störungen z.B. im Hausbereich durch Kleintiere und Vögel auszuschließen.

Eine **Geschwindigkeitsmessung** kann mehr oder weniger aufwändig durchgeführt werden.

Handelt es sich stets um die Vermessung **einzelner Ziele**, kann eine Zählung von Nulldurchgängen des Dopplersignals genügen. Je länger dabei integriert werden kann, desto genauer wird die Messung.

Mehrfachziele sind nicht mehr trivial zu behandeln. Hier ist eine digitale Signalauswertung mit A/D-Wandlung und anschließender FFT unumgänglich, da eine Nullstellenzählung bei derart komplex überlagerten Signalen versagt bzw. vollkommen falsche Messwerte vortäuscht.

3.3 Detektion stationärer Ziele.

3.3.1 Betrieb geeigneter Module

Rein stationäre Ziele können mit CW-Radarmodulen nur über das FMCW-Verfahren detektiert werden. Dazu muss der Mikrowellenoszillator als VCO ausgebildet sein, der periodisch und monoton in seiner Frequenz verändert wird. Der einfachste Zeitverlauf ist die lineare Abstimmung, die auch als „Chirp“ bezeichnet wird.

Ein typischer Vertreter eines FMCW-fähigen Moduls ist der **InnoSenT-Sensor IVS24-2-8-4-148**.

Er besitzt

- einen varaktorabstimmbaren Sendeoszillator
- einen 2-kanaligen Schottkydioden-Empfangsmischer mit sog. I/Q-Ausgang zur Erkennung der Bewegungsrichtung
- integrierte NF-Vorverstärker mit 20 dB Verstärkung und 10 kHz Bandbreite
- integrierte getrennte Sende/Empfangsantennen mit 8x4 Patchanordnung (14x30° Öffnungswinkel)
- integrierte Mikrowellenvorverstärker zur Rauschminimierung

Hier sind getrennte Sende- und Empfangsantennen fast unerlässlich, da eine möglichst gute Mischerisolation erreicht werden muss (siehe auch folgendes Kapitel).

3.3.2 Beschaltung und Auswertung

Bei der Ansteuerung des Varaktors ist die interne Beschaltung des Varaktors zu beachten.

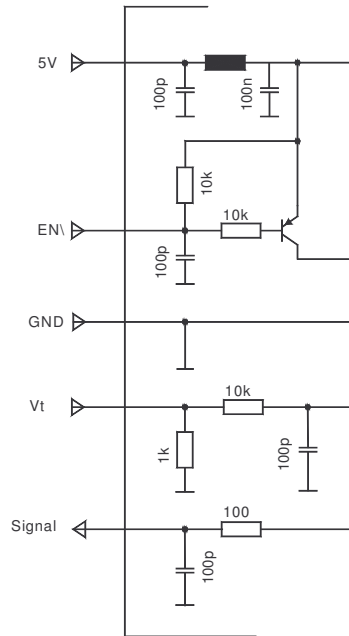


Bild 9: Interface und interne Beschaltung von InnoSenT Radarmodulen, insbesondere von IVS24-2-8-4-148

Der Vorwiderstand am Abstimmeeingang Vt dient als Strombegrenzung im Falle einer Störung oder Falschpolung, der Querwiderstand verringert die EMV-Empfindlichkeit des Steuereingangs. Diese Elemente bestimmen auch die maximale Modulationsfrequenz zusammen mit der internen Parallelkapazität.

Die Beschaltung der I/Q-Ausgänge ist ähnlich wie beim normalen Dopplerradar. Auch werden die messbaren Signalfrequenzen in ähnlichen Bereichen liegen wie beim Dopplerradar.

Durch Festhalten der Varaktorspannung ist das Modul als reiner CW-Dopplersensor zu betreiben, was dem Modul den Charakter eines Multimode-Sensors gibt. Es muß aber darauf hingewiesen werden, dass im FMCW-Betrieb am Empfängerausgang das Modulationssignal durchschlägt und z.B. auf einem Scope stets sichtbar ist. Nun ist verständlich, warum vorher auf gute Sende-/Empfangsisolation hingewiesen wurde. Je schlechter diese Isolation ist, desto stärker schlägt das Modulationssignal durch.

Um auch kleine Objekte detektieren zu können, muss das Nutzsignal vom durchschlagenden Modulationssignal getrennt werden, was durch Filterung geschieht. Daraus ist ersichtlich, dass die Messgrenze eines FMCW-Radars dann erreicht wird, wenn Modulationssignal und Nutzsignal die gleiche Größenordnung annehmen. Dies wiederum ist vor allem eine Funktion des Frequenzhubes des FM-Signales. Im ISM-Band 24 GHz ist dieser Hub bestenfalls 250 MHz (200 MHz ist realistischer, um einen gewissen Sicherheitsabstand zu den Bandgrenzen zu haben). Daraus lässt sich errechnen, dass FMCW-Radars in diesem Band keine bessere Auflösung und minimale Abstände als ca. 1,5m erreichen können. Nicht zu Verwechseln sind diese Größen mit der Messgenauigkeit, die durch langes Integrieren bis in den mm-Bereich getrieben werden kann.

4. Handhabung und Einbau von Radarmodulen

4.1 Vorsichtsmaßnahmen

Bereits in vorhergegangenen Kapiteln wurde darauf hingewiesen, dass der Umgang mit InnoSenT Radarmodulen unproblematisch ist. Eine besondere Empfindlichkeit gegenüber statischer Entladung (ESD) liegt nicht vor. Sowohl die Antennenseite als auch die Steckeranschlüsse können von einer nicht-geerdeten Person berührt werden.

4.2 Radom-Materialien und Dimensionierungsvorschläge

Im Endeffekt muss ein Radarfrontend harten Umgebungseinflüssen widerstehen. Daher ist es nahe liegend, es in ein Gehäuse einzubauen, wobei die Antennenfläche nicht durch metallische Teile abgedeckt werden darf. Dafür eignen sich am besten alle Arten von Kunststoffen und Schaumarten, sofern sie nicht kohlenstoffhaltig sind.

Nicht geeignet zum Schutz der Antennenfläche sind Maßnahmen wie

- Abdecken mit Metallfolien oder teilweises Abdecken mit Metallteilen
- Überspritzen der Antennenstrukturen mit jeglichen Arten von Farben und Lacken
- Abdecken mit CFK-Laminaten (leitfähig!)
- direktes An- und Aufbringen von Kunststoffen in Kontakt mit den geätzten Antennenstrukturen (Einfluss der Dielektrizitätskonstante auf die Resonanzfrequenz der Patches).

Sehr gut eignen sich

- das Abdecken mit Kunststoffen (ABS, PVC, Plexiglas, Acrylglas etc.), sofern sie nicht im direkten Kontakt mit den Antennenstrukturen sind, bei richtig abgestimmter Dicke und richtigem Abstand
- Schäume wie Styropor und ähnliche Materialien, deren relative Dielektrizitätszahl nahe bei 1 liegen, sie können sogar direkt im Kontakt aufgebracht werden.

Für 24 GHz gilt als Faustregel:

- Kunststoffplattendicke ca. 3 mm
- Abstand (Luftzwischenraum) von der Antennenoberfläche ebenfalls ca. 6 mm.

Wird zum Beispiel eine dickere Kunststoffplatte als vorgeschlagen verwendet, so weist diese sicherlich erhöhte Dämpfung auf und kann Auswirkungen auf ein Antennendiagramm haben. Eine Lackbeschichtung der Abdeckung mit schwarzer Farbe oder eine Einschwärzung des Abdeckmaterials durch Rußteilchen ist zu vermeiden.

In **automotiven Anwendungen** wird immer wieder die Anbringung hinter einem Stoßfänger und die damit notwendige Durchstrahlung des Stoßfängers, auch im Falle von Metallic-Lackierung, Verschmutzung und Eisansatz, gefordert.

Ganz allgemein kann gesagt werden, dass Metallic-Lacke weniger Dämpfung als erwartet erzeugen (2 bis 3 dB), während z.B. eine weiße Lackierung wegen des Titanoxidgehalts relativ stark dämpft (ca. 3 dB).

Bei Eisansatz und Verschmutzung muss mit Dämpfungen bis zu ca. 16 dB gerechnet werden, was den Fernbereich und die Detektion von Objekten mit kleinem Radarquerschnitt zwar einschränkt, das Radar aber im Gegensatz zu optischen Systemen nicht außer Betrieb setzt.

Abschließend sei zum **Diagramm einer Antenne** bemerkt, dass die Angabe der Strahlbreite lediglich aussagt, dass dort die Energie auf die Hälfte des Maximalwertes abgesunken ist. Dies bedeutet nicht, dass darüber hinaus keine Detektion mehr möglich ist. Ein Objekt mit großem Radarquerschnitt könnte z.B. den Signalabfall durch das Antennendiagramm wettmachen und ein durchaus bemerkenswertes Radarziel darstellen.

|| Daher ist es unmöglich, ohne Hinzuziehen der Entfernungsinformation rein aus der Signalamplitude auf die Größe und Mächtigkeit eines Radarzieles zu schließen.

5. Zusammenfassung und Anwendungsmöglichkeiten

Verfeinerte Radarprinzipien, fallende Preise von Radarmodulen und die „Allwettertauglichkeit“ ermuntern den Anwender immer mehr, für seine Problemlösung Radarsensoren zu verwenden.

Abschließend sei hier der Versuch unternommen, in der folgenden Liste möglichst viele Anwendungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sie soll vielmehr den Anwender zum Nachdenken anregen, was mit Radarsensorik möglich ist.

Anwendungsmöglichkeiten für Radarsensorik

- ⇒ Detektion von Menschen:
 - Türöffnern, auch mit der Option Zutrittsberechtigung
 - Sanitärbereich: Handwaschbecken, Urinalspülungen
 - Alarmbereich: als Innen- und Außenraumüberwachung, auch durch Roboter
 - Hausinstallation: Einschalten eines Lichtschalters, einer Videoüberwachung
 - Personenzählung: bei Veranstaltungen, in Supermärkten etc.

- ⇒ Detektion am Menschen:
 - Sportanwendungen: Joggen, Skifahren, Surfen etc.
 - medizinische Überwachung

- ⇒ Detektion von Fahrzeugen:
 - Radfahrzeuge:
 - Verkehrsmonitoring: Fahrzeugzählung, Messung der Verkehrsdichte, Klassifizierung von Fahrzeugen, Messung der Geschwindigkeit (Sonderfall: Polizeiradar)
 - Distanzradar: Einparkhilfe, Stop-and-Go-Radar, Toter-Winkel-Erkennung, Pre-Crash
 - Sicherheit am Auto: Crash-Tests
 - Schienenfahrzeuge:
 - Zugverkehr: Bahnschrankenüberwachung, Bahnsteigüberwachung, Rangierhilfen

- ⇒ Detektion an Fahrzeugen:
 - alle Arten von autonomer Geschwindigkeitsüberwachung „true speed over ground“ bei Anwendungen mit zu erwartendem Schlupf
 - Radfahrzeuge: Autos, Traktoren
 - Schienenfahrzeuge: Trägheitsnavigation
 - Distanzradar: Einparkhilfe, Stop-and-Go-Radar, Toter-Winkel-Erkennung, Pre-Crash
 - Keyless Entry/Go

- ⇒ Hausinstallation:
 - Lichttechnik: Lichttaster
 - Komfort-Funktionen: Einschalten von Videokameras

- ⇒ Steuerung und Regelung von Maschinen
 - Druckindustrie: Papiergeschwindigkeitsregelung, Papierrisserkennung
 - Steuerung von Förderbändern

- ⇒ Füllstandsmessung
 - in geschlossenen und/oder offenen Systemen
 - schäumende, aggressive Medien, Schmelzen

- ⇒ Durchflussmessung
 - Geschwindigkeit
 - Verschmutzungsgrad

Der Autor dankt Herrn Dipl. Ing. Thilo Lenhard und Herrn Dipl. Ing. Robert Mock, beide InnoSenT GmbH, für die Unterstützung bei der Verfassung dieser Schrift und für die Geduld bei der Beantwortung der unzähligen Fragen.

Die Datenblätter für die im Text genannten Module -154, -144 und -148 sind bei InnoSenT auf Anfrage per Email oder in Papierform erhältlich.

InnoSenT GmbH
Am Roedertor 30
97499 Donnersdorf
GERMANY
Tel. +49(0)9528-9518-0
Fax +49(0)9528-9518-99

info@InnoSenT.de
www.InnoSenT.de

