

MILLIMETER-WAVE RADAR FOR HOSTILE FIRE INDICATION

MILLIMETERWELLEN-RADAR ZUR DETEKTION VON FEINDLICHEM BESCHUSS

AXEL HÜLSMANN
 axel.huelsmann@iaf.fraunhofer.de

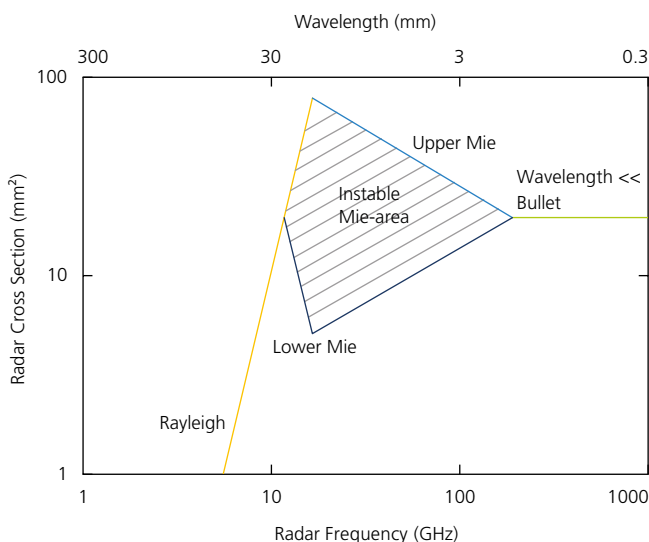
Small and fast objects, for example bullets of caliber 5 to 10 mm, fired from guns like G36 (caliber 5.56 x 45 mm) or AK-47 (caliber 7.62 x 39 mm), can cause serious problems to aircrafts in asymmetric warfare. Especially slow and big aircrafts, like heavy transport helicopters are an easy target for small caliber weapons. These aircrafts produce so much noise, that the crew is not able to recognize an attack unless serious problems occur and important systems of the aircraft fail.

Detection of bullets in warfare, often denoted as hostile fire indication (HFI) in military jargon, is a very challenging task. To counteract this problem, short-wavelength infrared (SWIR) techniques or acoustic sensors have been investigated. However, these methods have the drawback that they are insufficient, as they can detect the muzzle and the detonation

but not the bullet. Artefacts coming from other flashes and noise increase the false alarm rate. In contrast, the recent development of compact radar systems operating at frequencies of 100 GHz and higher is very promising for reliable HFI.

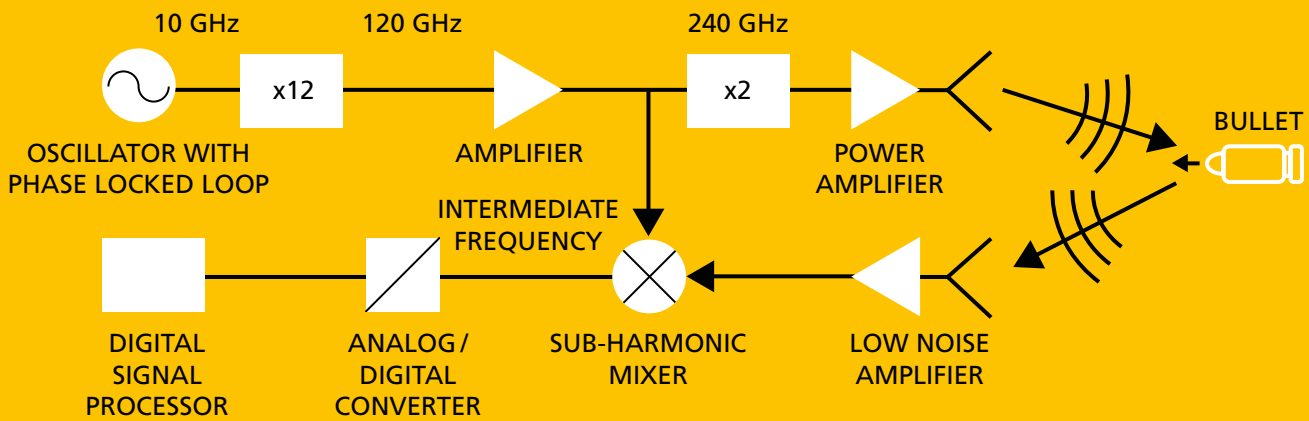
Frequency and radar cross section

If the wavelength λ of the electromagnetic wave is much larger than the radius r of the bullet sphere ($\lambda \gg r$), the radar cross section (RCS) decreases with increasing wavelength with the power of 4, which is known as »Rayleigh-Scattering«. In the high-frequency region, as the radar wavelength λ is less than the bullet diameter, the RCS of a sphere is no longer a function of frequency, the RCS of a sphere becomes πr^2 . A simplified illustration of estimated RCS for a sphere with 5 mm diameter versus radar frequency is plotted in Fig. 1. If the radar frequency is increased beyond 16 GHz, the RCS enters the so called Mie-region, where the RCS is hard to predict due to interference effects. With further frequency increasing the Mie-effect decreases and, at frequencies of more than 190 GHz, the instable Mie-region is left and a stable RCS of $\pi r^2 = 19.6 \text{ mm}^2$ (-47 dBsm) can be predicted.



1 Calculated radar cross section (RCS) of a 5 mm diameter sphere. Rayleigh-scattering at low frequencies ($\lambda \gg r$), instable Mie-area (shaded region) at $\lambda \approx r$, stable RCS at high frequencies ($\lambda \ll r$). Berechneter Radarquerschnitt einer Kugel mit 5 mm Durchmesser. Rayleigh-Streuung bei niedrigen Frequenzen ($\lambda \gg r$), instabiler Mie-Bereich (schraffiert) bei $\lambda \approx r$, stabiler Radarquerschnitt bei hohen Frequenzen ($\lambda \ll r$).

A bullet fired from a small arm typically has a range of a few kilometers. The atmosphere offers a huge frequency window at H-band (220 – 325 GHz) of up to 90 % transmission for one kilometer distance. To detect small bullets, a radar system should therefore favorably operate in this frequency range with a center frequency of 240 GHz. Using the electro-magnetic simulation tool High Frequency Structure Simulator (HFSS) from Ansys Inc., we calculated the RCS of a bullet for one sight angle as shown in Fig. 3. This is sufficient since the problem is invariant under rotation. In order to point out the influence of Mie-scattering, two different frequencies have been investigated. At 94 GHz, the Mie-effect is modest, but still significant. At 240 GHz we can expect to be outside the Mie-region and within the low-attenuation



2

2 Block diagram of a Doppler radar for hostile fire indication of small arms weapons.

Block-Diagramm eines Doppler-Radars zur Detektion von feindlichem Beschuss durch Kleinwaffen.

Kleine, schnell fliegende Geschosse mit Kalibern von 5 bis 10 mm, die zum Beispiel von Schusswaffen wie dem G36 oder dem AK-47 abgefeuert werden, können in der asymmetrischen Kriegsführung ernsthafte Probleme für Luftfahrzeuge hervorrufen. Besonders langsam fliegende und große Luftfahrzeuge, wie die Transporthubschrauber der Bundeswehr, sind ein leichtes Ziel für kleinkalibrige Handfeuerwaffen. Diese Luftfahrzeuge sind so laut, dass die Besatzung einen Angriff erst dann erkennt, wenn Probleme auftreten und wichtige Systeme des Luftfahrzeugs ausfallen.

Die Detektion von feindlichen Geschossen (eng. hostile fire indication, HFI) ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Bisher wurden dazu Verfahren mit kurzweiliger Infrarotstrahlung oder akustischen Sensoren evaluiert. Der Nachteil dieser Methoden liegt darin, dass sie zwar die Gewehrmündung oder die Detonation erkennen, nicht jedoch das Geschoss selbst. Die durch fremde Blitze oder Geräusche hervorgerufenen Artefakte erhöhen die Falschalarmrate. Im Gegensatz dazu sind neue kompakte Radarsysteme mit Arbeitsfrequenzen von 100 GHz und darüber für die Detektion von feindlichem Beschuss sehr gut geeignet.

Frequenz und Radar-Streuquerschnitt

Für elektromagnetische Strahlung, deren Wellenlänge λ viel größer als der Radius r einer Geschoss-Kugel ($\lambda \gg r$) ist, fällt der Radarquerschnitt (eng. radar cross section, RCS) mit der vierten Potenz der Wellenlänge. Dieses Phänomen ist als »Rayleigh-Streuung« bekannt. Wenn jedoch die Radarwellenlänge kleiner als der Geschossdurchmesser ist, wird der RCS einer Kugel frequenzunabhängig und beträgt konstant πr^2 . Eine vereinfachte Darstellung des abgeschätzten Radarquerschnitts einer Kugel mit 5 mm Durchmesser als Funktion der Radarfrequenz ist in Abb. 1 gezeigt. Bei Radarfrequenzen oberhalb von 16 GHz tritt der Radarquerschnitt in den sogenannten Mie-Bereich ein, in dem aufgrund von Interferenzeffekten der RCS schwer voraussagbar ist. Mit weiterer Frequenzerhöhung verringert sich der Mie-Effekt wieder und oberhalb von 190 GHz verlässt der RCS den instabilen Bereich und erreicht einen Wert von $\pi r^2 = 19,6 \text{ mm}^2$ (-47 dBsm).

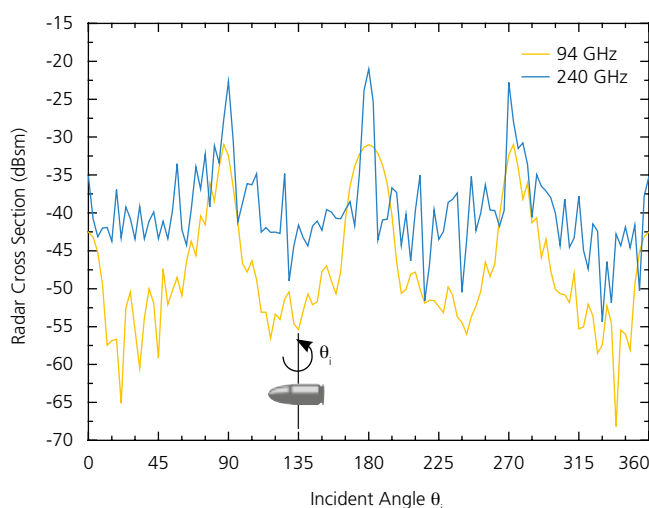
Geschosse aus Handfeuerwaffen haben eine typische Reichweite von einigen Kilometern. Im H-Band (220 – 325 GHz) hat die Atmosphäre ein breites transparentes Frequenzfenster mit einer Transmission von 90 % bei 1 km Entfernung. Um kleine Geschosse zu detektieren, sollte ein Radarsystem daher vorzugsweise in diesem Frequenzbereich und bei einer Mittenfrequenz um 240 GHz arbeiten.

Mithilfe des elektromagnetischen Simulationswerkzeugs »High Frequency Structure Simulator« (HFSS) von Ansys Inc. haben wir den Radarquerschnitt eines Geschosses als Funktion des Winkels, unter dem das Geschoss gesehen wird, berechnet (Abb. 3). Um den Einfluss der Mie-

window of the atmosphere. The simulated RCS for a bullet of a common caliber 5.56 x 45 mm at 94 and 240 GHz is presented in Fig. 3. The 240 GHz radar system provides about 10 dB more average RCS with respect to a 94 GHz radar system which is a substantial improvement.

State of technology

A compact 94 GHz frequency modulating continuous wave (FMCW) radar system has already been developed at Fraunhofer IAF, but the frequency of 94 GHz is still in the Mie-region of handgun calibers. We believe that the 240 GHz frequency range is considerably more suitable for HFI radar applications. The challenge is to build a compact 240 GHz radar system which meets all specifications needed for HFI. A possible block diagram of such a radar is shown in Fig. 2.



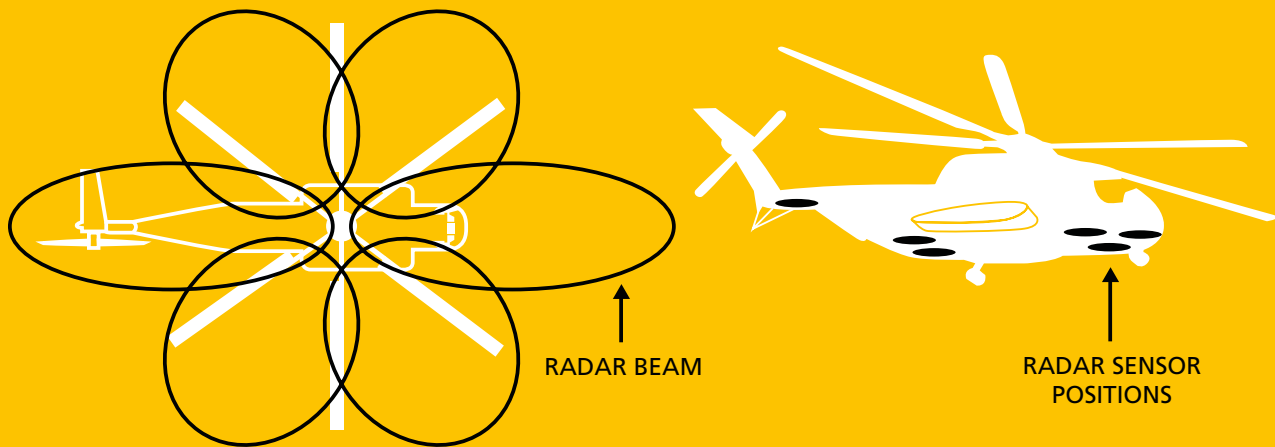
3 Simulation of a bullet RCS with caliber 5.56 x 45 mm (5.69 mm diameter, 18 mm length) at 94 and 240 GHz. θ_i is the incident angle between the radar beam directed at the bullet and the bullet axis. Simulation des Radarquerschnitts eines Geschosses vom Kaliber 5,56 x 45 mm (5,69 mm Durchmesser, 18 mm Länge) bei 94 und 240 GHz. θ_i ist der Winkel zwischen dem auf das Geschoss gerichteten Radarstrahl und der Geschossachse.

The transmitter part of this radar consists of a 10 GHz oscillator with a phase locked loop, two frequency multipliers x12 and x2 and an amplifier in between. A key component of the transmitter is a 240 GHz power amplifier having an output power of at least 17 dBm (50 mW). The receiver part consists of a 240 GHz low noise amplifier with a low noise figure of 5 dB and a gain of 20 dB, followed by a subharmonic mixer with 0 dB conversion gain and an intermediate frequency of 1.6 MHz. Transmitter and receiver chips should be monolithically integrated and an appropriate antenna must be developed. The radar system needs an analog/digital converter, a digital signal processor with field programmable gate array, and software for Doppler analysis. The first MMICs have been fabricated and characterized at 240 GHz.

At a bullet velocity of 1000 m/s the Doppler frequency shift is significant. Therefore cw-mode radar is preferable, as the distance of the bullet is not of interest. The high velocity of 1000 m/s causes a high intermediate frequency (IF) at the mixer of 1.6 MHz. All other radar echoes coming from clutter will cause much lower IF frequencies and can easily be high-pass filtered.

Conclusions

Assuming that a bullet can enter from all directions, the radar system has to cover the surrounding from all around. A helicopter HFI radar system mainly needs to detect bullets from the lower half space, as shown in Fig. 4, where possible positions of six HFI radar sensors on a helicopter and the corresponding radar beams are illustrated. The optimal antenna gain for a HFI radar system using six sensors can be estimated to be between 10 and 13 dBi. During landing such a system could also switch from CW to FMCW mode to operate as a fog, dust, and snow penetrating ground radar to measure the distance to the ground as well as the drift of the helicopter and therefore operate as a landing aid to handle brown-out or white-out effects.



4

4 Proposed HFI radar system for a transport helicopter with indicated possible positions of six radar sensors and their beam diagrams. Such a system can also be used as a landing aid radar to handle brown-out or white-out effects.

Geplantes Radarsystem zur Detektion von feindlichem Beschuss für Transporthubschrauber mit angedeuteten möglichen Positionen von sechs Radarsensoren und deren Strahlungsdiagrammen. Gleichzeitig kann das Radar als Hubschrauberlandehilfe bei so genannten Brown-out- oder White-out-Effekten genutzt werden.

Streuung zu verdeutlichen, wurden zwei unterschiedliche Frequenzen untersucht. Bei 94 GHz ist der Mie-Effekt noch vorhanden, aber moderat. Bei 240 GHz kann erwartet werden, dass der RCS außerhalb des Mie-Bereichs und innerhalb des Fensters mit niedriger Atmosphärendämpfung liegt. In Abb. 3 ist der simulierte RCS eines Geschosses mit Kaliber 5,56 x 45 mm bei 94 und 240 GHz dargestellt. Verglichen mit einem 94 GHz Radarsystem, liefert das 240 GHz Radarsystem einen um 10 dB höheren mittleren Radarquerschnitt.

Stand der Technik

Am Fraunhofer IAF wurde bereits ein kompaktes 94 GHz frequenzmoduliertes Dauerstrich-Radar (FMCW) entwickelt. Die Radarfrequenz von 240 GHz (Abb. 2) ist zur Detektion von feindlichem Beschuss jedoch wesentlich besser geeignet. Der Senderteil des Radars besteht aus einem 10 GHz Oszillator mit einem Phasenregelkreis, zwei Frequenzvervielfachern (x12 und x2) und einem Verstärker. Die Schlüsselkomponente ist ein noch zu entwickelnder 240 GHz Leistungsverstärker mit 17 dBm (50 mW) Ausgangsleistung. Der Empfänger besteht aus einem 240 GHz 20 dB Verstärker mit einer Rauschzahl von 5 dB, sowie einem subharmonischen Mischer mit 0 dB Konversionsgewinn und 1,6 MHz Zwischenfrequenz. Sender und Empfänger sind monolithisch integrierte Schaltungen. Das komplette Radarsystem benötigt außerdem schnelle Analog/Digital-Wandler, einen digitalen Signalprozessor mit frei programmierbarer Logikschaltung, sowie eine Doppler-Analyse-Software. Die ersten MMICs wurden am Fraunhofer IAF bereits hergestellt und bei 240 GHz charakterisiert.

Der Dopplereffekt von Geschossen mit Geschwindigkeiten um 1000 m/s erzeugt eine erhebliche Frequenzverschiebung. Ein einfaches Doppler-Radar muss nicht unbedingt im FMCW-Modus arbeiten sondern kann auch im Dauerstrich (CW) betrieben werden. Die Mischer-Zwischenfrequenz (IF), die so ein Geschoss erzeugt, liegt bei 1,6 GHz. Echos von allen anderen Objekten erzeugen wesentlich niedrigere Zwischenfrequenzen und können durch einfache Hochpassfilterung unterdrückt werden.

Schlussfolgerungen

Da Geschosse aus allen Richtungen eintreffen können, muss ein HFI-Radarsystem die Umgebung von allen Seiten beobachten. Ein HFI-Hubschrauber-Radarsystem muss dabei vorwiegend Geschosse detektieren, die aus dem unteren Halbraum kommen. In Abb. 4 sind mögliche Positionen von sechs Radarsensoren und deren Strahlungskeulen abgebildet. Der optimale Antennengewinn eines HFI-Radarsystems sollte somit zwischen 10 und 13 dBi liegen. Bei einer Landung könnte ein solches System dann auch vom CW- in den FMCW-Betrieb umschalten und somit als Bodenradar bei Nebel, Staub und Schnee zur Messung von Abstand und Drift verwendet werden, um den Brown-out- oder White-out-Effekt zu beherrschen.