

FFI RAPPORT

RADAR I APS-SYSTEMER

Lars Kvifte

FFI/RAPPORT-2003/01336

FFIBM/798/044

Godkjent
Kjeller 28 november 2003

Stein Grinaker
Forskningsjef

RADAR I APS-SYSTEMER

Lars Kvifte

FFI/RAPPORT-2003/01336

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

FORSVARETS FORSKNING SINSTITUTT (FFI)
Norwegian Defence Research Establishment

UNCLASSIFIED

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2003/01336	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED	3) NUMBER OF PAGES 60
1a) PROJECT REFERENCE FFIBM/798/044	2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	
4) TITLE RADAR I APS-SYSTEMER RADAR IN APS-SYSTEMS		
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) Lars Kvifte		
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)		
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH:		
a) <u>Radar</u>		IN NORWEGIAN:
b) <u>APS-system</u>		a) <u>Radar</u>
c) <u>Precision</u>		b) <u>APS-system</u>
d) <u>Resolution</u>		c) <u>Presisjon</u>
e) <u>Range</u>		d) <u>Oppløsning</u>
		e) <u>Rekkevidde</u>
THESAURUS REFERENCE:		
8) ABSTRACT <p>FFI-project 798, "Anti-Armour Weapons beyond 2000" has performed a study on active protection systems (APS). As part of this work, this report discusses the performance of radars.</p> <p>First the report presents requirements for an APS-system to be effective against various threats. On the basis of simple radar theory, which is described in some detail, a comparison between requirements and potential radar performance has been carried out.</p> <p>We found that a reasonably cheap 5GHz radar can detect threats at a range of 3000 m, even under adverse weather conditions. The resolution is, however, poor, and the radar can not determine whether one or several objects are approaching. A more expensive radar, with frequency 30GHz or more, has to be used for tracking. All in all radar is under most conditions well suited for use in most APS-systems. Radars might, however, have problems when exposed to jamming. A stationary jammer blinded all investigated frequencies, with the exception of 60GHz. When the jammer was co-located with the threat, and hence approaching the radar, the results were even worse. For frequencies of 5, 30, 60 and 100GHz we then found, under our assumptions, a detection range of less than a meter. The simultaneous use of several different types of sensors might reduce the effect of such jamming.</p>		
9) DATE 28. November 2003	AUTHORIZED BY This page only Stein Grinaker	POSITION Director of Research

ISBN-82-464-0806-2

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	APS-SYSTEMERS MINSTEAVSTAND	8
3	MULIGE EFFEKTORER - KRAV TIL TREFFNØYAKTIGHET	10
3.1	Effektor: Styrt granat / missil som treffer trussel i front	10
3.2	Effektor: Horisontalt utskutt fragmenterende granat	11
3.3	Effektor: Fragmenterende granat skutt skrått	12
4	KORT OM RADAR	14
4.1	Radarligningen	14
4.1.1	Prinsipp for radar	14
4.1.2	Radarligningen	14
4.1.3	Sentrale parametre for radar	15
4.1.4	Atmosfære	16
4.1.5	Sentrale parametre for trussel	17
4.1.6	Oppsummering: Parameterne i radarligningen	19
4.2	Deteksjon	19
4.2.1	Støy	20
4.2.2	Signal-/støyforhold	20
4.2.3	Radarens rekkevidde uten jamming	22
4.2.4	Jamming	24
4.2.5	Radarens rekkevidde ved jamming	26
4.3	Entydighet	28
4.4	Oppløsning	29
4.4.1	Oppløsning i vinkel	29
4.4.2	Oppløsning i avstand	30
4.4.3	Oppløsning i hastighet	30
4.5	Presisjon	30
5	RADAR I APS-SYSTEM	33
5.1	APS-systemers minsteavstand	33
5.2	Radars rekkevidde	36
5.2.1	Radars rekkevidde uten jamming	37
5.2.2	Radars rekkevidde ved jamming	40
5.3	Radars entydighet	42
5.4	Radars oppløsning	43
5.5	Radars presisjon	45
6	OPPSUMMERING	52
6.1	Minsteavstand	52

6.2	Rekkevidde uten jamming	52
6.3	Rekkevidde ved jamming	53
6.4	Entydighet	53
6.5	Oppløsning	53
6.6	Presisjon	54
6.7	Eksempler på radarer	55
7	KONKLUSJON	57
	Litteratur	60

RADAR I APS-SYSTEMER

1 INNLEDNING

Prosjekt 798 "PB2000+" har som mål å skissere et taktisk konsept for panserbekjempelse (PB). Dagens konsept er ikke nødvendigvis tilpasset den teknologiske utviklingen som blant annet har gitt mulighet for panserbekjempelse i tre dimensjoner; med direkteskytende systemer, med krumbanevåpen og med minelignende systemer. Siden et nytt konsept for panserbekjempelse vil påvirkes av sårbarheten til de pansrede målene, er studier av aktive beskyttelsestiltak (APS¹) sentrale for prosjektet.

For at et APS-system skal bli effektivt, må APS-systemet ha en god sensor, en god regneenhet (algoritme) og et godt våpensystem (effektor). Hensikten med denne rapporten er å studere APS-systemets sensor. Spesielt ønsker vi svar på om rimelige radarer kan benyttes i denne sammenhengen.

Rapporten forsøker ikke å gå dypere i radarteorien enn det som er nødvendig for å studere radarers begrensninger i et APS-system. Når kapittel 4 gir en kort innføring i teorien rundt radarer, er hensikten derfor ikke å gi en lærebok i radarteori, men å trekke frem sider ved radar, vær og trussel, som er sentrale for at en radarsensor skal kunne fungere i denne sammenhengen.

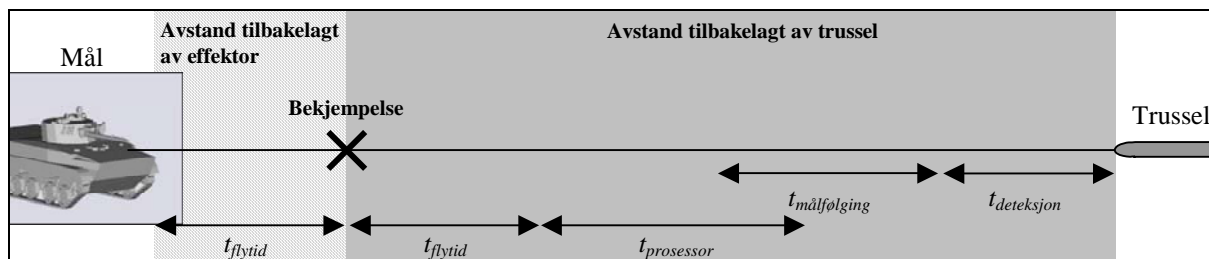
Rapporten består i all hovedsak av tre hoveddeler. I første del kommenteres vanlige begrensninger og krav som vil være typiske for mange APS-systemer. Mens kapittel 2 antyder hvilke begrensninger som typisk vil gjelde for APS-systemer mot nærtrusler, antyder kapittel 3 hvilke krav som må settes til presisjon for at APS-systemet skal oppnå akseptabel ytelse. Rapportens andre del, kapittel 4, gjengir enkel radarteori. I denne delen presenteres blant annet de vanligste formlene for rekkevidde, oppløsning og presisjon. Rapportens tredje og siste del består av kapitlene 5-7. I disse kapitlene ser vi på anvendelser av radarteorien. Eksempler og grafer for radarens rekkevidde, betydningen av jammestøy, raderers evne til å skille flere innkommende trusler og radarers presisjon blir presentert. En kort oppsummering av våre resultater er gitt i kapittel 6, og konklusjon følger i kapittel 7.

¹ APS=Active Protection System

2 APS-SYSTEMERS MINSTEAVSTAND

Siden et APS-system vil kreve en viss tid for å reagere på en trussel, vil trusler som avfyres på svært kort hold, treffe målet før APS-systemet reagerer. APS-systemer fungerer med andre ord bare mot trusler som avfyres fra avstander større enn en bestemt minsteavstand. Dersom APS-systemets minsteavstand er kort, kan APS-systemet benyttes i bebygde områder der stridsavstanden er liten. Dersom minsteavstanden er stor, sier det oss at systemet bør benyttes i terreng der fienden kan holdes på avstand. APS-systemets minsteavstand er dermed en svært interessant størrelse, og vi kommer derfor til å oppgi en enkel formel for denne. Formelen vil gjelde for alle APS-systemer som består av de tre komponentene: sensor, prosessor og effektor.

For å komme frem til en formel for APS-systemets minsteavstand, ser vi først på systemets tidsforbruk. Dette tidsforbruket er skissert i figur Figur 2-1:



Figur 2-1: Oversikt over tidsforbruket til et APS-system, samt hvor langt trusselen beveger seg i løpet av denne tiden

Vi ser at tidsforbruket er delt opp i følgende bidrag:

1. Tid som sensoren behøver for å detektere trusselen, $t_{deteksjon}$
2. Tid som sensoren behøver for å gi et presist anslag av trusselens posisjon og eventuelt hastighet, $t_{målfølgning}$
3. Tiden APS-systemet trenger for å prosessere data fra sensorer, til å rette våpendelen inn mot trusselen samt for å avfyre effektoren i trusselens retning, $t_{prosessor}$
4. Effektorens flyvetid ut til avstanden der trusselen skal bekjempes, $t_{flyvetid}$

Tidene som er angitt over, kan i enkelte tilfeller overlappe hverandre, og i Figur 2-1 har vi illustrert et tilfelle der våpendelen rettes inn mot trusselen samtidig som sensoren følger målet. Et enda mer ekstremt tilfelle fås med en styrt effektor som får måldata direkte fra radaren. Radaren benyttes da samtidig som effektoren flyr mot trusselen, og tidene $t_{målfølgning}$ og $t_{flyvetid}$ overlapper.

Fra Figur 2-1 ser vi at APS-systemet har tid til å reagere dersom trusselen skytes fra en avstand som gir effektoren tid til å fly i tiden $t_{flyvetid}$ og trusselen i tiden $t_{flyvetid} + t_{prosessor} + t_{målfølgning} + t_{deteksjon}$. APS-systemets minsteavstand R blir dermed:

$$R = t_{flytid} v_{effektor} + (t_{flytid} + t_{prosessor} + t_{målfølgning} + t_{deteksjon}) v_{trussel}, \quad (2-1)$$

I dette uttrykket angir $v_{trussel}$ og $v_{effektor}$ hastigheten til henholdsvis trusselen og til APS-systemets våpendel. Tiden $t_{flyvetid}$ velges av APS-systemet, slik at trussel og effektor skal kollidere i en bestemt avstand $L_{bekjempelse}$. Flyvetiden er altså gitt av:

$$t_{flytid} = \frac{L_{bekjempelse}}{v_{effektor}}, \quad (2-2)$$

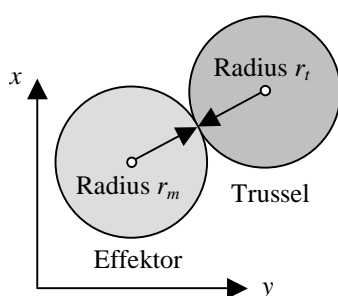
Når ligning (2-1) benyttes, må man være oppmerksom på at tidene gitt i formelen kan overlappe hverandre, og at de må reduseres for å ta hensyn til dette. Summen av alle bidragene, $t_{flyvetid} + t_{processor} + t_{målfølgning} + t_{deteksjon}$, skal til sammen utgjøre tiden fra sensoren begynner å søke etter trusselen og til trusselen treffes av APS-systemets effektor. Ligningen er generell og gir minsteavstand for et hvilket som helst APS-system. Trusler avfyrt fra avstander kortere enn R , vil komme så hurtig på APS-systemet at APS-systemet ikke vil kunne beskytte kjøretøyet det er plassert på.

3 MULIGE EFFEKTORER - KRAV TIL TREFFNØYAKTIGHET

Når en innkommende trussel skal bekjempes, kan et APS-system benytte seg av en rekke forskjellige effektorer. Vi beskriver her noen få av disse og antyder hvilken presisjon som vil kreves.

3.1 Effektor: Styrt granat / missil som treffer trussel i front

Dersom man baserer et APS-system på at effektoren skal kollidere med trusselen, vil det være mulig å forringe effekten til både pilammunisjon og missiltrussel.



Figur 3-1: Kollisjon mellom sylindrisk trussel og effektor krever at separasjonen er mindre enn $r_m + r_t$ (Ser da bort fra halefinner mm)

For å kunne antyde hvilken presisjon et slikt APS-system bør ha, gjør vi følgende antagelser:

- I snitt treffer effektoren i senter av trusselen
- Med gjentatte utskytninger sprer treffpunktene seg rundt middeltreffpunktet med en normalfordelt spredning, der standardavviket gis som σ_x og σ_y . Vi antar $\sigma_x = \sigma_y$
- Vi antar at en kollisjon mellom effektor og trussel er tilstrekkelig kraftig til å nøytralisere trusselen, dersom avviket fra siktepunktet er under 10cm (Dette betyr at trusselen kan være et 84mm missil, mens effektoren kan være basert på en 80mm bombekaster. Det er lagt til et par cm for å ta hensyn til halefinner og til at trussel og effektor normalt vil ha en liten innbyrdes vinkel idet de treffer hverandre)
- Vi krever at trusselen skal treffes i 90% av utskytningene

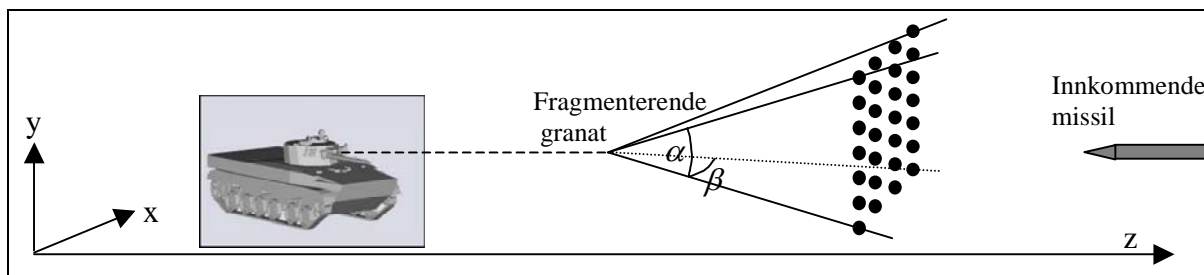
Med antagelsene over kan det vises at en spredning på ca 5 cm gir den ønskede treffsannsynligheten. Krav til treffnøyaktighet blir dermed:

$\sigma_x = 0.05 \text{ m}$	$\sigma_y = 0.05 \text{ m}$	(3-1)
-----------------------------	-----------------------------	-------

(Når man krever $\sigma_x = 5.0 \text{ cm}$ betyr dette at man i x -retningen skal være i stand til å treffe et område på $\pm 8.2 \text{ cm}$ med 90% sannsynlighet).

3.2 Effektor: Horisontalt utskutt fragmenterende granat

Effektoren i et APS-system kan være en fragmenterende granat som skytes rett mot den innkommende trusselen. Skuren av fragmenter som settes av like foran trusselen, kan skade / sette av missilets stridshode, ødelegge missilets styring eller ødelegge missilets tennmekanisme. Fragmentene vil imidlertid ikke ha virkning mot pilammunisjon. Prinsippet er skissert i Figur 3-2:



Figur 3-2: Mulig prinsipp for bekjempelse av missil med fragmenterende granat

Ved hjelp av simuleringer har vi fastsatt krav til systemets presisjon. Vi tok utgangspunkt i et relevant eksempel og gjorde noen forenklinger. Simuleringene antok at:

- Det er kun usikkerhet i trusselens posisjon og hastighet
- I snitt treffer missilet senter av fragmentskuren i en avstand på 10 meter fra kjøretøyet
- Fragmentskuren består av 400 fragmenter som sendes ut med åpningsvinkel på ca $15^\circ \times 15^\circ$, mens avstanden mellom fragmentene er konstant (ikke stokastisk fordelt)
- Trusselen har diameter på 84 mm og lengde på 0.5 m
- Trusselen skal i 90% av tilfellene treffes av minst 3 fragmenter (Kravet er satt ut fra de erfaringene vi har gjort med sårbarhetsberegninger i AVAL)
- Usikkerheten i x- og y-retning kan settes lik hverandre og antas normalfordelt med standardavvik σ_x og σ_y

For prinsippet illustrert i Figur 3-2 bør APS-sensoren måle x-, y- og z-komponent av trusselens posisjon og x-, y- og z-komponent av trusselens hastighet. Dersom vi antar at vi kjenner 5 av disse størrelsene eksakt, mens én er usikker, får vi en øvre grense for usikkerheten (Antar her at APS-systemets regnealgoritme og utskytning av effektor er uten feil og usikkerhet):

$\sigma_x = 0.19 \text{ m}$	$\sigma_y = 0.19 \text{ m}$	$\sigma_z = 1.5 \text{ m}$	(3-2)
$\sigma_{vx} = 5.3 \text{ m/s}$	$\sigma_{vy} = 5.3 \text{ m/s}$	$\sigma_{vz} = 41.5 \text{ m/s}$	

Mens usikkerheten normalt på trusselens fartsretning maksimalt kan være ca 20cm i posisjon og ca 5m/s i hastighet, kan den i trusselens fartsretning være ca 1.5m i avstand og ca 40m/s i hastighet.

Kravene blir strengere dersom vi fordeler usikkerheten på alle 6 parameterne og ikke bare på én som over. Et eksempel på hvordan usikkerhetsbudsjettet kan fordeles, er gitt av verdiene under (Vi antar nå, i motsetning til tidligere beregning, at APS-systemets regnealgoritme og effektor

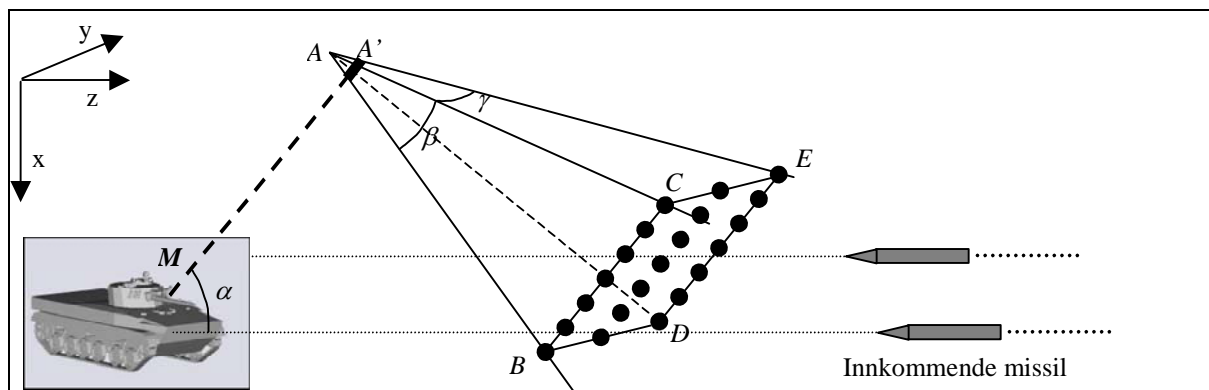
også bidrar til APS-systemets totale feilbudsjett. Nærmere bestemt har vi satt sensorens usikkerhet lik den totale feilen fra regnealgoritme og effektor):

$\sigma_x = 0.07 \text{ m}$	$\sigma_y = 0.07 \text{ m}$	$\sigma_z = 0.40 \text{ m}$	(3-3)
$\sigma_{vx} = 1.9 \text{ m/s}$	$\sigma_{vy} = 1.9 \text{ m/s}$	$\sigma_{vz} = 10.0 \text{ m/s}$	

Mens usikkerheten normalt på trusselens fartsretning nå maksimalt kan være ca 7cm i posisjon og ca 2m/s i hastighet, kan den i trusselens fartsretning være ca 40cm i avstand og ca 10m/s i hastighet. Kravet til usikkerhet i posisjon henger imidlertid sammen med kravet til usikkerhet i hastighet. Ved å stramme inn på det ene kravet, kan man derfor slakke av på det andre. Feilmarginene kan imidlertid ikke overstige den øvre skranken gitt av ligning (3-2).

3.3 Effektor: Fragmenterende granat skutt skrått

Med det fragmenterende motmiddelet som er beskrevet i avsnitt 3.2, skytes fragmentene horisontalt ut fra et kjøretøy. Dette prinsippet gjør at egne soldater og sivile nær kjøretøyet kan komme til skade. For å minske den farlige sonen rundt APS-systemet, kan man skyte fragmentene skrått nedover slik at fragmentskuren treffer bakken nær kjøretøyet. Sikkerheten for egne styrker blir dermed forbedret. Prinsippet har imidlertid en del ulemper. Blant annet vil det bli noe vanskeligere å sette av en presis fragmentskur, fragmentskurens masse må reduseres i forhold til en fragmentskur som skytes horisontalt, og kravene til avfiringstidspunkt vil bli strenge. Som for andre fragmentbaserte systemer, vil systemet ha effekt mot missiler, men ikke mot pilammunisjon. Prinsippet er skissert i Figur 3-3:



Figur 3-3: Et innkommende missil bekjempes med en fragmenterende kassett. Antall fragmenter som treffer missilet, avhenger av missilets høyde over bakken

Ved hjelp av simuleringer har vi fastsatt krav til systemets presisjon. Vi tok utgangspunkt i et relevant eksempel og gjorde enkelte forenklinger. Simuleringene antok at:

- Det er kun usikkerhet i trusselens posisjon og hastighet
- I snitt treffer missilet senter av fragmentskuren
- Fragmentskuren består av 200 fragmenter som sendes ut med åpningsvinkel på mellom 12° og 15° . Avstanden mellom fragmentene er konstant (ikke stokastisk fordelt)
- Trusselen har diameter 84 mm og lengde 0.5 m

- APS-systemet skal håndtere horisontalt innkommende trusler som har en høyde fra 0.5 til 3m over bakken
- Trusselen skal i 90% av tilfellene treffes av minst 3 fragmenter (Kravet er satt ut fra de erfaringene vi har gjort med sårbarhetsberegninger i AVAL)
- Usikkerheten i x- og y-retning kan settes lik hverandre og antas normalfordelt med standardavvik σ_x og σ_y

For prinsippet illustrert i Figur 3-3 bør APS-sensoren, på samme måte som i avsnitt 3.2, måle seks størrelser som alle vil ha usikkerhet. Dersom vi også nå antar at vi kjenner fem av disse størrelsene eksakt, mens én er usikker, får vi en øvre grense på usikkerheten (Antar her at APS-systemets regnealgoritme og utskytning av effektor er uten feil og usikkerhet):

$\sigma_x = 0.12 \text{ m}$	$\sigma_y = 0.13 \text{ m}$	$\sigma_z = 0.44 \text{ m}$	(3-4)
$\sigma_{vx} = 7 \text{ m/s}$	$\sigma_{vy} = 7 \text{ m/s}$	$\sigma_{vz} = 26 \text{ m/s}$	

Usikkerheten normalt på trusselens fartsretning kan maksimalt være ca 12cm for posisjonen og ca 7m/s for hastigheten. I trusselens fartsretning kan usikkerheten maksimalt være ca 40cm i avstand og ca 30m/s i hastighet.

Kravene blir strengere dersom vi fordeler usikkerheten på alle 6 parameterne og ikke bare på én som over. Et eksempel på hvordan usikkerhetsbudsjettet kan fordeles, er gitt av verdiene under (Vi antar nå at APS-systemets regnealgoritme og effektor også bidrar til APS-systemets totale feilbudsjett. Nærmere bestemt har vi satt sensorens usikkerhet lik den totale feilen fra regnealgoritme og effektor):

$\sigma_x = 0.05 \text{ m}$	$\sigma_y = 0.05 \text{ m}$	$\sigma_z = 0.15 \text{ m}$	(3-5)
$\sigma_{vx} = 3 \text{ m/s}$	$\sigma_{vy} = 3 \text{ m/s}$	$\sigma_{vz} = 10 \text{ m/s}$	

Mens usikkerheten normalt på trusselens fartsretning maksimalt kan være 5cm i posisjon og ca 3m/s i hastighet, kan den i trusselens fartsretning være ca 15cm i avstand og ca 10m/s i hastighet. Vi gjør oppmerksomme på at kravene til de forskjellige usikkerhetene nå er koblet, slik at vi kan slakke av på et krav dersom et annet krav strammes inn. Feilmarginen kan imidlertid ikke overstige den øvre skranken gitt av ligning (3-4).

4 KORT OM RADAR

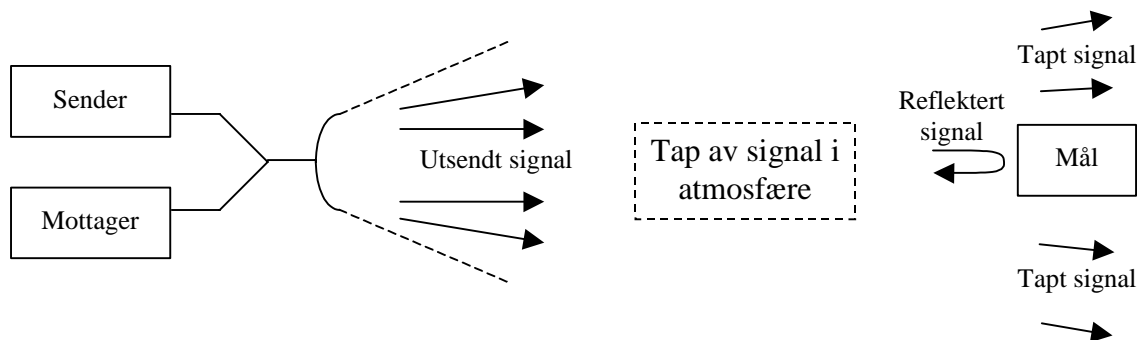
Vi ønsker i dette kapitlet å gi en kort innføring i radarteori. For å begrense lengden på denne teoridelen, gjøres forenklinger der dette er mulig. Vår intensjon med kapitlet er kun å gi en bakgrunn som er god nok til å forstå begrensningene en radar vil ha i et APS-system.

4.1 Radarligningen

For at en radar skal kunne observere objekter, er den avhengig av at objektene som skal observeres, reflekterer eller sender ut signaler /stråling. For at de reflekterte signalene skal bli sterke, lager aktive radarer sterke radarsignaler som gir gode reflekser. Sammenhengen mellom signalet radaren sender ut, og signalet radaren får tilbake, er gitt av radarligningen, som presenteres i dette avsnittet.

4.1.1 Prinsipp for radar

Når et kjøretøy utrustes med en radar, vil det være naturlig å plassere både sender og mottager på vogna. Det fysiske prinsippet for radaren er da gitt av figuren under:



Figur 4-1: Fysisk prinsipp for radar. Signal sendes ut, treffer mål og reflekteres tilbake til radaren. Radaren fanger opp ekkoet og tolker det

Figuren viser at radaren sender ut et signal. Dette signalet treffer målet og reflekteres tilbake til radaren. Ved å tolke ekkoet kan man få informasjon om retning, avstand og radiell hastighet til målet.

4.1.2 Radarligningen

For at en radar skal kunne detektere eller følge et mål, må ekkoet som radaren registrerer være tilstrekkelig sterkt. Effekten P_r til dette ekkoet er gitt av radarligningen:

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L(\lambda, 2R)} \quad (4-1)$$

Her er:

- P_t Radarens utsendte effekt
- R Avstand til objekt som observeres
- G_t Senderantennens gain (forklares i avsnitt 4.1.3)
- G_r Mottagerantennens gain (forklares i avsnitt 4.1.3)
- σ Det observerte objektets radartverrsnitt (forklares i avsnitt 4.1.5)
- λ Radarens bølgelengde
- L Dempning av signalet i atmosfæren (Signalet går frem og tilbake til objektet som observeres, slik at vi må beregne dempning for avstanden $2R$)

I radarligningen har vi ikke inkludert den såkalte propagasjonsfaktoren. Dette er en faktor som tar hensyn til at radaren ikke befinner seg i fritt rom. Blant annet tar den hensyn til at noe signal vil reflekteres fra bakken og at noe signal vil bøyes i atmosfæren. Så lenge vi arbeider med APS-systemer, virker imidlertid radaren på kort hold, og vi kan sette denne faktoren til 1.

Ligning (4-1) viser at det signalet som radaren mottar, er bestemt av selve radaren, av atmosfæren som signalet sendes gjennom, og av målet som observeres. I de følgende tre avsnittene 4.1.3-4.1.5 kommenterer vi kort disse tre bidragene.

4.1.3 Sentrale parametre for radar

Fra ligning (4-1) ser vi at radarens ytelse påvirkes av radarens effekt P_t , radarens bølgelengde λ , den effektive størrelsen på radarens mottagerantenne $\eta_r A_r$, avstanden til objektet som observeres R , samt radarens gain G_r og G_t . Vi vil i dette avsnittet kort kommentere disse størrelsene i forbindelse med et APS-system som er utplassert på en stridsvogn.

En stridsvogn er i utgangspunktet fullastet med våpen- og kommunikasjonssystemer slik at plassen til et APS-system i utgangspunktet er liten. Et APS-system bør derfor, i størst mulig grad, integreres med allerede eksisterende utstyr. I prinsippet bør strømforsyningen komme fra allerede eksisterende strømforsyning og datakraften fra stridsvognens egen datasentral. Det er dermed APS-systemets antenner og effektorer (APS-systemets våpendel), som vil kreve ekstra plass. Siden antenner og effektorer plasseres på utsiden av stridsvognen, vil størrelsen være med på å bestemme APS-systemets sårbarhet samt størrelsen på stridsvognens silhuett. For et APS-system på en stridsvogn antyder vi, med denne bakgrunnen, følgende begrensninger for de forskjellige radarparameterne:

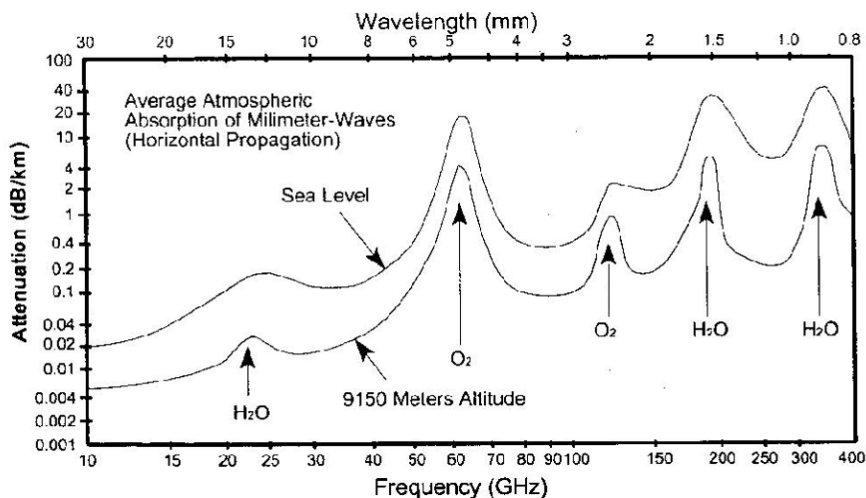
- Radarens effekt kan i prinsippet gjøres høy, siden stridsvognen allerede har en generator med høy effekt (stridsvognens motor). Noe av motorens effekt kan i perioder benyttes til radaren.
- Radarantennene må være små på grunn av kravet om et kompakt APS-system. I denne rapporten har vi satt radarens fysiske størrelse til å være 30x30cm (På grunn av designkrav til pansring vil det være vanskelig å designe stridsvognen slik at skroget kan benyttes som antenne).
- Antennens størrelse setter krav til radarens bølgelengde. For at en antenne skal fange opp et radarsignal, bør signalets bølgelengde grovt sagt være mindre enn antennens dimensjoner. Med en 30cm lang antenne krever vi derfor at radaren har en bølgelengde under 30cm, det vil si en frekvens over 1GHz. Siden vi bare studerer frekvenser over

3GHz, vil dette kravet automatisk være oppfylt.

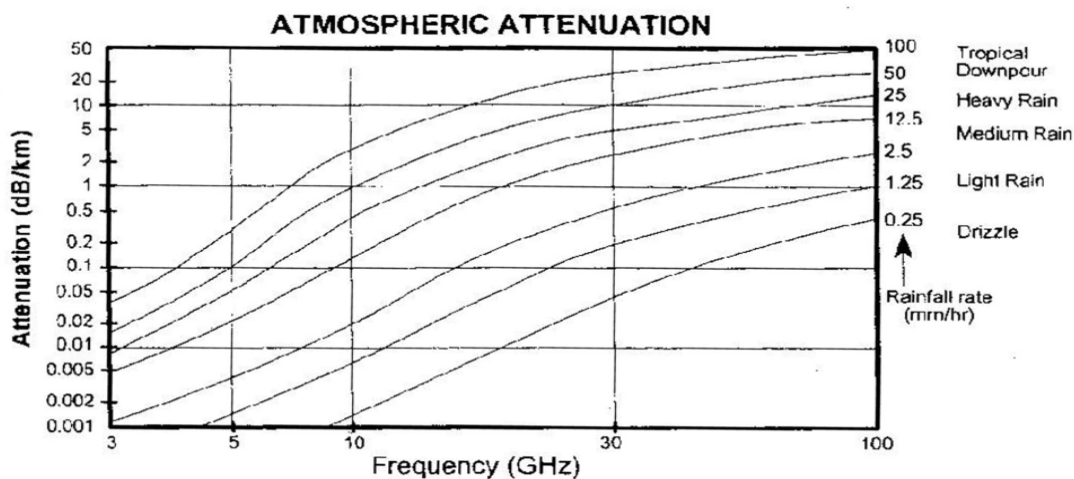
- Avstanden fra radaren til trusselen kan ikke manipuleres, siden radaren må befinne seg på stridsvognen og trusselen stadig vil nærme seg. Radarens rekkevidde kan imidlertid velges relativt fritt. Hvilket valg som bør gjøres, avhenger av radarens bruksområde. Dersom radaren utelukkende skal benyttes i et aktivt beskyttelsessystem, kan rekkevidden være kort (typisk 50-500m). Dersom radaren skal gi varsel slik at stridsvognen skal ha tid til å manøvrere, bør rekkevidden være like lang som truslenes rekkevidde (typisk 2-5km). Dersom radaren skal inngå i et nettverk som skal overvåke stridsområdet, kan ytterligere rekkevidde være av interesse.
- Radarens gain beskriver hvor fokusert radarantennen sender eller mottar et signal. Et eksempel vil klargjøre begrepet: En antenne sender et signal som dekker en sektor på $1^\circ \times 1^\circ$. For å overvåke hele volumet i en kule, vil vi trenge omtrent 41 000 slike sektorer. Ved å samle radarens energi i en eneste stråle og ikke spre den i alle retninger, økes derfor energitettheten med en faktor på ca 41 000. Vi sier da at antennen har et gain på 41 000, noe som tilsvarer 46dB ($10\log 41000=46$).
Fra betydningen av gain ser vi at gain vil avhenge av antennens bruksområde. Dersom radaren skal detektere trusler som kommer inn i halvkulen som dekker stridsvognen, da må radaren overvåke hele halvkulen og gain blir lik 2 (3dB). Dersom radaren skal følge et bestemt mål, da kan radarens observasjonssektor være smal slik at antennens gain blir stor (en svært smal observasjonssektor er bare mulig for svært høye radarfrekvenser).

4.1.4 Atmosfære

Atmosfæredempningen svekker signalet som sendes ut fra radar, reflekteres tilbake fra trussel og til slutt mottas. Dette skyldes at radarsignalet vekselvirker med molekylene/partiklene i atmosfæren, slik at noe av strålingen blir absorbert og spredt. Hvordan atmosfæredempningen varierer med bølgelengde/frekvens, er gitt i Figur 4-2. Hvordan atmosfæredempningen varierer med nedbør, følger i Figur 4-3:



Figur 4-2: Demping av elektromagnetisk stråling som funksjon av strålingens frekvens (3). Hvilke bølglengder som kan absorberes, varierer fra molekyltype til molekyltype



Figur 4-3: Dempning av elektromagnetisk stråling som funksjon av strålingens frekvens og av værforhold (3)

Figurene inneholder mye informasjon. Det er verdt å merke seg:

- Atmosfæredempningen målt i dB er proporsjonal med avstanden som radarsignalet tilbakelegger
- Atmosfæredempningen er liten for lave frekvenser. Under 10GHz er sikten nærmest ubegrenset
- Atmosfæredempningen øker generelt med frekvensen. Unntak fra denne trenden finnes imidlertid, og et eksempel på et slikt unntak er synlig lys. For synlig lys er dempningen normalt svært lav
- Nedbør påvirker radarsignalene og dempningen blir stadig tydeligere med økende frekvens. For rekkevidder som er aktuelle for APS-systemer, bidrar nedbøren bare vesentlig når radarfrekvensen er høy og nedbøren kraftig

4.1.5 Sentrale parametre for trussel

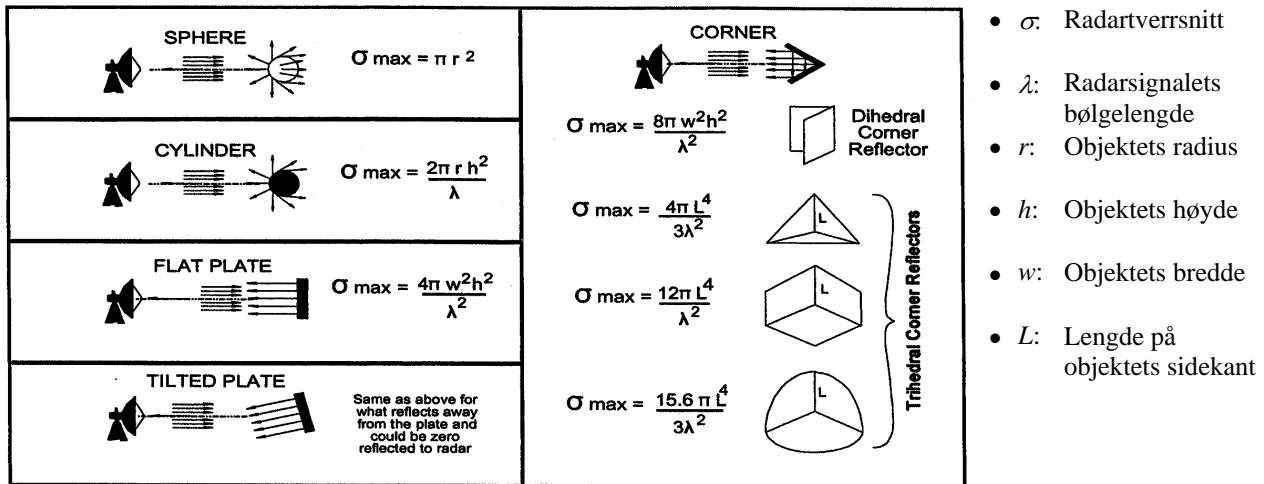
Den eneste størrelsen i radarligningen som karakteriserer målet, er det såkalte radartverrsnittet σ . Trusselens hastighet er imidlertid også en sentral størrelse, siden også denne påvirker radarens ytelse. Dersom radaren må måle i lang tid for å få et tydelig signal tilbake, vil hurtige trusler bevege seg langt i løpet av måletiden, og posisjonsestimater blir usikkert.

Når en trussel konstrueres, vil den bli laget slik at den er vanskeligst mulig å stoppe. Blant annet vil det være gunstig med høy hastighet, siden fienden da får liten tid til å reagere. Friheten til å velge hastighet er imidlertid sterkt begrenset av krav til trusselens størrelse og rekkevidde. Det er derfor gunstig å også gjøre det vanskeligst mulig å detektere trusselen. Når sensoren er en radar, betyr dette at radartverrsnittet σ må gjøres lite. For å klargjøre hva som menes med radartverrsnitt, gir vi i det videre en svært kort innføring i begrepet.

Kort fortalt angir radartverrsnittet i hvilken grad et objekt reflekterer radarsignalene tilbake mot radaren. For å måle radartverrsnittet kan man sammenligne det reflekterte signalet med et signal som reflekteres fra en ledende kule. Når man har funnet en kule som gir like sterk refleks som

det virkelige objektet, oppgis radartverrsnittet som det fysiske tverrsnittsarealet til denne kula CC (Radartverrsnitt har en mer formell definisjon, men tolkningen gitt her er gyldig så lenge radarens bølgelengde er klart mindre enn kulens radius). Radartverrsnittet oppgis altså som et areal, men skiller seg normalt mye fra objektets fysiske tverrsnittsareal.

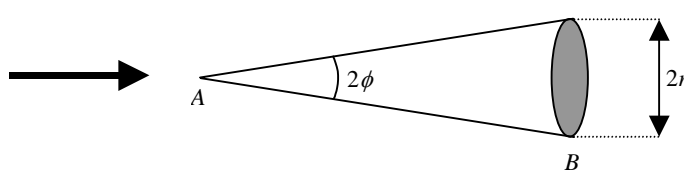
Radartverrsnittet varierer med radarens bølgelengde og objektets størrelse, form og materiale. I Figur 5-2 og Figur 5-3 under, angis radartverrsnittet til en ledende kule, sylinder, plate og et par reflektorer.



Figur 4-4: Radartverrsnitt for noen utvalgte, enkle objekter (5)

Eksemplene viser at radartverrsnittet for en kule er lik det fysiske tverrsnittsarealet. For alle andre eksempler er forskjellen som regel stor. Fra eksemplene ser vi at reflekser fra kantede objekter, kan bli svært sterke.

For virkelige objekter vil radartverrsnittet variere mye med vinkelen mellom radar og objekt. Spesielt vil et missil eller fly ha vesentlig høyere radartverrsnitt fra side enn i front. Dette blir tydelig dersom vi modellerer et missil som en sylinder med en spiss nese. Modellen er da så enkel at radartverrsnittet kan beregnes. Fra (2) har vi:



$$\sigma = \frac{\lambda^2}{16\pi} \tan^4 \phi \quad (4-2)$$

$$\sigma = \frac{4\pi^3 r^2}{(3\pi + 2\phi)^2 \sin^2 \left[\frac{4\pi^2}{3\pi + 2\phi} \right]} \quad (4-3)$$

Figur 4-5: Radartverrsnitt for en spiss kon / kjegle (modell av den fremre delen til et missil). Ligning (4-2) angir bidraget fra kjeglens spiss (punkt A på figur), mens ligning (4-3) angir bidraget fra kjeglens slutt (punkt B på figur)

Det fås at radartverrsnittet sett fra front, får to bidrag. Bidragene, som begge har opphav fra missilets nese, kommer fra henholdsvis konens spiss og konens bakkant (Vi ser altså bort fra bidrag fra missilets avgasser). Et typisk radartverrsnitt kan vi få ved å sette vinkelen ϕ til 15° , missilets radius til 8cm, missilets lengde til 2.0m og radarens bølgelengde til 1cm:

	Kommentar	Radartverrsnitt
Missil sett fra front	Bidrag fra kjeglens spiss	$1.0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$
	Bidrag fra kjeglens bakre del (punkt B i Figur 4-5)	0.012 m^2
	Totalt	0.01 m^2
Missil sett fra side	Antar at missilet ser ut som en 2 meter lang sylinder	200 m^2

Tabell 4-1: Anslag av et missils radartverrsnitt. Det er her sett bort fra bidrag fra hale og avgasser

Som hevdet, ser vi at det er vesentlig vanskeligere å detektere et missil fra front enn fra siden.

Dersom trusselen skal gis et lavt radartverrsnitt, må objektets størrelse, form og materiale velges deretter. Dette betyr at objektet bør gjøres så kompakt som mulig (krav til ytelse må naturligvis tilfredsstilles), objektet bør bygges med materialer som reflekterer radarsignalet i minst mulig grad, og formen bør velges slik at refleksene i minst mulig grad sendes tilbake mot radaren. Siden buede flater sender refleks i alle retninger, også i radarens retning, er det vanlig å benytte små rette flater. Med skarpe refleks kan man sørge for at den reflekterte strålingen har liten sannsynlighet for å treffe radaren, noe som gjør radartverrsnittet lite. Siden et missil beveger seg med fronten mot målet, vil man designe missilets flater slik at refleksene fremover blir små.

4.1.6 Oppsummering: Parameterne i radarligningen

Vi har i de tre foregående avsnittene antydning av begrensninger som ligger på parameterne i radarligningen, når radaren skal benyttes i et APS-system. I Tabell 4-2 har vi samlet våre antagelser:

	Parameter	Kommentar
Radar	Radarens effekt	P_t Stridsvognmotoren som generator kan ha stor effekt. Vurderer senere i rapporten effekt opp mot 50kW
	Radarens bølgelengde	λ Alle frekvenser over 3GHz er aktuelle. Disse frekvensene tilsvarer bølgelengder kortere enn 10cm
	Radarantennenes areal	A_r Antennene bør være små. Vi setter senere i rapporten at arealet er 30x30cm
	Radarantennenes effektivitet	η_r Den rektangulære antennens effektivitet settes til 70%
	Avstand fra radar til trussel	R For en missiltrussel med hastighet 600m/s, en effektor med hastighet 200m/s, en trussel som skal bekjempes på 10 m hold, ønsker vi at radaren minimum skal observere avstander opp til 50m For pilammunisjon med hastighet opp til 2000m/s, en effektor med hastighet 200m/s, en trussel som skal bekjempes på 30 m hold ønsker vi at radaren minimum skal observere avstander opp til 400m Når radaren skal benyttes som en generell varslingsradar mot pansertrusler, krever vi en radarrekkevidde på 3000m
	Gain for radarens sender- og mottagerantenne	G_r, G_t For en deteksjonsradar setter vi gain til 3dB. For en målfølgingsradar gjøres gain så høy som radarfrekvensen tillater
Atmosfære	Atmosfærens dempning	L Atmosfæredempningen er gitt i Figur 4-3. Vi benytter senere i rapporten dempningen i godt vær, samt dempningen i kraftig regnvær (25mm/time)
Trussel	Trusselens radartverrsnitt	σ Radaren kommer til å observere missilets front. Vi antar at fremtidige missiler sett fra denne vinkelen, vil ha et radartverrsnitt på 0.01 m^2

Tabell 4-2: Antydning av mulige verdier for parameterne i radarligningen når radaren skal benyttes i et APS-system på en stridsvogn

4.2 Deteksjon

For at en radar skal kunne detektere et mål, må den være i stand til å skille det reflekterte

radarsignalet fra den alltid tilstedeværende bakgrunnsstøyen. Nivået på bakgrunnsstøyen varierer med temperaturen og avhenger blant annet av sola, atmosfæren, bakken, radarens konstruksjon, samt menneskelig aktivitet. Støy som er forårsaket av menneskelig aktivitet, kan deles i to kategorier. Støy som følger av at menneskelig aktivitet genererer varme, og støy som mennesker bevisst lager for å forstyrre en radar (jamming). Jamming vil bli behandlet i avsnitt 4.2.4.

4.2.1 Støy

Den midlere effekten til støy som påvirker en reell radar er i (5) gitt som:

$$N = k_B F B T_0, \quad T_0 = 290K \quad (4-4)$$

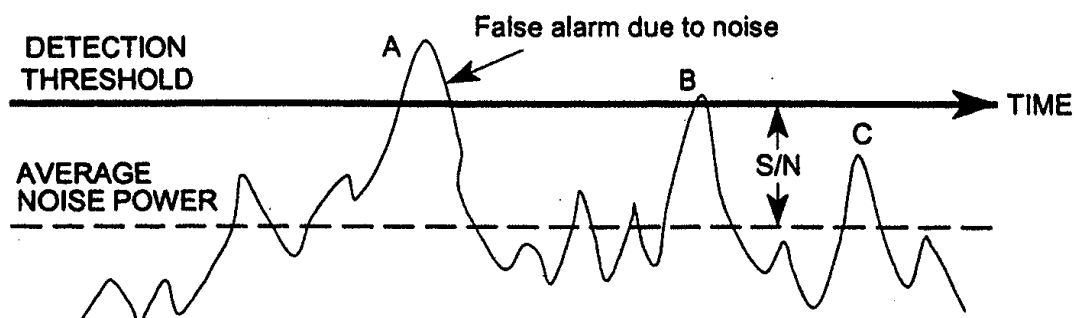
Her er:

- N Støyens midlere effekt
- k_B Boltzmanns konstant
- F Støyfaktor karakteristisk for radaren
- B Radarens effektive båndbredde (Båndbredden angir størrelsen på frekvensområdet som radaren observerer)
- T_0 Valgt standardtemperatur for radar, som pr definisjon er lik 290K

Ligning (4-4) inkluderer alle støybidrag, unntatt såkalt jamstøy. Det er verdt å merke seg at ligning (4-4) ikke inneholder radarens frekvens f . Det betyr at støy fordeler seg tilnærmet likt på alle frekvenser.

4.2.2 Signal-/støyforhold

For at en radar skal være i stand til å skille det reflekterte radarsignalet fra bakgrunnsstøyen, må det mottatte radarsignalet være en god del sterkere enn støyen. Hvor mye sterkere signalet må være, avhenger av hvor strengt kravet til antall falske alarmer er satt.



Figur 4-6: Støy har varierende effekt. For å unngå at støysignalet skal forveksles med det reflekterte signalet, må man kreve at signalets midlere effekt er en del høyere enn støyens midlere effekt.

Fra krav til falske alarmer fås et minste signal-/støyforholdet, $(S/N)_{\min}$, der radaren er i stand til å detektere objekter.

Det observerte signal-/støyforholdet fås ved å kombinere ligning (4-1) og (4-4):

$$\frac{S}{N} = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 F k_B T_0 B L(\lambda, 2R)} = \frac{P_t \tau G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 F k_B T_0 L(\lambda, 2R)}, \quad (4-5)$$

Vi har her innført τ for radarpulsens varighet. Signal-/støyforholdet som er gitt av ligning (4-5), er det signal-/støyforholdet som fås når radaren sender ut én radarpuls. Vanligvis belyses imidlertid målet i lengre tid, slik at mange pulser benyttes. Dette vil forbedre signal-/støyforholdet. I hvilken grad signalet forbedres, vil avhenge av radarens bølgeform. Med en bølgeform som gjør det mulig å ha kontroll med signalets fase både ved sending og mottaking, vil M pulser, ifølge (3), faktisk øke signal-/støyforholdet med en faktor M . Ligning (4-5) kan da omformes til:

$$\frac{S}{N} = \frac{\bar{P}_t t_0 G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 F k_B T_0 L(\lambda, 2R)}, \quad (4-6)$$

der vi nå har innført \bar{P}_t for radarens gjennomsnittlige effekt og t_0 for tidsrommet der radaren sender signal. Sammenhengen mellom pulsens effekt og gjennomsnittlig effekt fikk vi ved følgende argument: M pulser har hver varigheten τ og tilsvarer en energi på $P_t \cdot \tau \cdot M$. Siden denne energien sendes ut i løpet av tiden t_0 , blir gjennomsnittlig effekt $P_t \cdot \tau \cdot M / t_0$. Ved å benytte den omtrentlige sammenhengen mellom signalets båndbredde B og pulsens varighet τ , fås:

$$\bar{P}_t = \frac{P_t \tau M}{t_0} = \frac{P_t M}{B t_0} \quad (4-7)$$

Når ligning (4-5) multipliseres med M og vi benytter \bar{P}_t fra ligning (4-7), fås ligning (4-6).

Så lenge vi har et enkelt radarsignal med liten båndbredde, kan vi benytte ligning (4-6).

Uttrykket gjelder både for én puls med varighet t_0 , for et kontinuerlig signal (CW) med varighet t_0 og for et tog av pulser som sendes ut i løpet av tiden t_0 . Effekten som inngår i uttrykket, er den gjennomsnittlige effekten målt over tiden t_0 .

Fra ligning (4-6) er det verdt å merke seg at signal-/støyforholdet som oppnås med en høyeffekts pulsradar, også kan oppnås med en laveffekts kontinuerlig sendende radar. Siden en pulsradar typisk bare sender signal i en tusendel av den tilgjengelige tiden, kan en kontinuerlig sendende radar klare seg med en maksimaleffekt på en tusendedel av pulsradarens.

Videre i denne rapporten kommer vi til å benytte ligning (4-6) når vi regner på eksempler. Vi kommer ikke til å komplisere resultatene ved å ta hensyn til at radarsignaler generelt er ikke-koherente (signalet har et spenn av frekvenser), at signalet får varierende fase når det reflekteres fra målet og at signalet påvirkes av atmosfæren. Vi nevner imidlertid at Lavanon i (3) regner på slike eksempler. Med et såkalt ikke-fluktuerende mål, fås et signal-/støyforhold som forbedrer seg med kvadratroten av antall pulser. Forbedringen ble altså dårligere enn for ligning (4-6), der forbedringen var proporsjonal med antall pulser.

4.2.3 Radarens rekkevidde uten jamming

Signal-/støy-forholdet blir lavere desto lengre vekk målet befinner seg. Ved radarens maksimale rekkevidde vil signal-/støyforholdet ha sunket til $(S/N)_{\min}$, det minste signal-støyforhold radaren kan tolke med tilfredsstillende falsk-alarm-rate. Radarens rekkevidde, R_{\max} , kan vi altså finne ved å sette verdien $(S/N)_{\min}$ inn i ligning (4-6):

$$R_{\max} = \left(\frac{\bar{P}_{t_0} G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 F k_B T_0 L(\lambda, 2R_{\max}) \left(\frac{S}{N} \right)_{\min}} \right)^{1/4}, \quad (4-8)$$

For ”korte” avstander der vi kan se bort fra atmosfæredempningen, det vil si der $L(\lambda, 2R_{\max}) \approx 1$, ser vi at rekkevidden øker med fjerderoten av radarens utstrålte energi.

Dersom vi kjenner antennesenes størrelse og form, kjenner vi også antennesenes gain. Vi antar nå at sender- og mottagerantenne har et areal på henholdsvis A_t og A_r og en form som gir antennene en effektivitet på henholdsvis η_t og η_r . Da gjelder ifølge (5):

$$G_r = \frac{4\pi\eta_r A_r}{\lambda^2}, \quad G_t = \frac{4\pi\eta_t A_t}{\lambda^2} \quad (4-9)$$

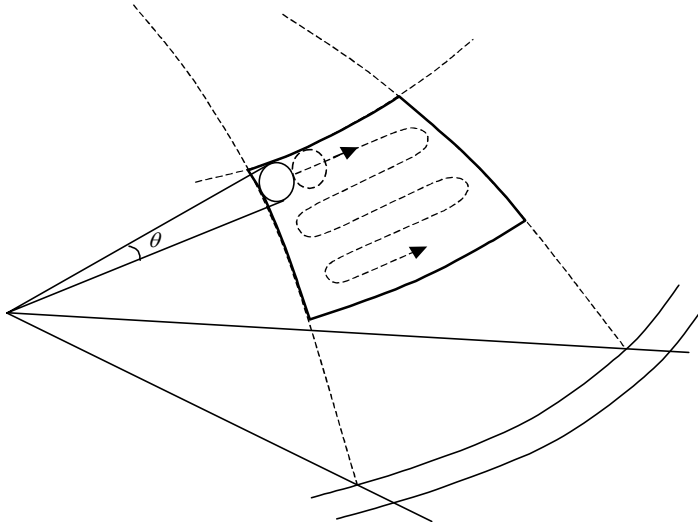
og uttrykket for rekkevidden kan omformes til:

$$R_{\max} = \left(\frac{\bar{P}_{t_0} \eta_t A_t \eta_r A_r \sigma}{4\pi\lambda^2 F k_B T_0 L(\lambda, 2R_{\max}) \left(\frac{S}{N} \right)_{\min}} \right)^{1/4}, \quad (4-10)$$

Vi ser at rekkevidden blant annet øker med størrelsen på antennene.

Søkeradar - målfølgingsradar

Radarens rekkevidde vil ikke være den samme for en søkeradar og en målfølgingsradar. Mens en målfølgingsradar vet hvor trusselen befinner seg og konsentrerer energien i denne retningen, av søkeradaren et større observasjonsområde etter nye trusler. Hvordan en søkeradar kan sveipe systematisk gjennom et volum, er illustrert i Figur 4-7:



Figur 4-7: Figuren viser et eksempel på hvordan en radar kan overvåke et område som har form som en halvkule

Siden deteksjonsradaren flytter antennens fokus og sprer energien over et stort område, vil andelen av utsendt energi som reflekteres tilbake fra målet bli mindre enn for en målfølgingsradar. Deteksjonsradaren får dermed et dårligere signal-/støyforhold enn målfølgingsradaren og dermed også kortere rekkevidde.

Vi ønsker nå å gi ligninger for målfølgings- og deteksjonsradarens rekkevidde.

Rekkevidden til en målfølgingsradar blir identisk med ligning (4-10). Dette følger av at en målfølgingsradar kun benytter én antennelebe og at ligning (4-10) nettopp gir rekkevidden for en antennelebe som observerer i tiden t_0 .

Deteksjonsradaren vil ha antenner med de samme fysiske målene som målfølgingsradaren, og ligning (4-10) vil derfor fremdeles være gyldig. For at radaren nå skal dekke et stort område, må imidlertid radarens antennelebe stadig flyttes, og dette betyr at radarens totale observasjonstid t_0 , nå må deles på et stort antall observasjonssektorer. Dersom vi antar at deteksjonsradaren skal overvåke en vinkel på α i asimut (horisontalt), samt vinkler fra 0° til θ i elevasjon (vertikalt), og at vi har en antennelebe som dekker en sektor på $(\alpha_{antennelebe} \times \theta_{antennelebe})$, så må tiden, t_0 , deles på N sektorer tilnærmet gitt av:

$$N = \frac{\text{Areal til området som overvåkes}}{\text{Areal til den delen av kuleskallet som overvåkes av én antennelebe}} \approx \quad (4-11)$$

$$\approx \frac{\alpha \cdot \sin \theta}{\alpha_{antennelebe} \cdot \theta_{antennelebe}}, \text{ for små } \theta_{antennelebe}$$

Dette uttrykket kan omformes til:

$$N \approx \frac{\alpha \cdot \sin \theta}{\lambda^2} \eta A \quad (4-12)$$

Deteksjonsradarens antenne observerer i en bestemt retning i tiden t_0/N . Deteksjonsradarens rekkevidde får vi nå fra ligning (4-10) ved å erstatte målfølgingsradarens observasjonstid t_0 med deteksjonsradarens observasjonstid t_0/N . Dersom vi i tillegg antar at samme antenne benyttes til sending og mottaging, slik at vi kan sette $\eta_r = \eta_t = \eta$ og $A_r = A_t = A$, får vi for deteksjonsradarens rekkevidde:

$$R_{\max} = \left(\frac{\bar{P}_t t_0 \eta A \sigma}{4\pi\alpha \cdot \sin\theta F k_B T_0 L(\lambda, 2R_{\max}) \left(\frac{S}{N}\right)_{\min}} \right)^{1/4} \quad (4-13)$$

Det antas her at deteksjonsradaren bare behøver å søke gjennom hver observasjonssektor én gang.

Deteksjonsrekkevidden for en deteksjonsradar kan fremdeles avhenge av radarens frekvens. Avhengigheten kommer da inn via atmosfæredempningen L og via radartverrsnittet σ .

4.2.4 Jamming

Formålet med jamming er å narre eller forstyrre radaren slik at radaren ikke oppdager et bestemt mål. Generelt kan man si at det finnes to metoder for jamming:

1. Manipulasjon av radarsignalet som gjør at radaren måler feilaktig/unøyaktig posisjon eller finner falske mål.
2. Det innkommende objektet kamufleres i støy, slik at radaren ikke kjenner igjen radarsignalet som reflekteres tilbake.

Siden en analyse av jammesignaler som skal narre en radar ville bli svært omfattende og ville kreve tilgang til hemmelige algoritmer, begrenser vi oss her til tre korte og generelle kommentarer:

Den største fordelen med en jammer som manipulerer radarsignalene, er at slike intelligente jammere generelt er svært effektive mot de radarene de er designet til å virke mot. Risikoen for at APS-radaren får dårlig presisjon eller detekterer falske mål blir høy, og effekten av APS-systemet tilsvarende dårlig (APS-systemet er spesielt sårbart for falske alarmer på grunn av systemets lave antall effektorer).

Den største ulempen med intelligente jammere er den lange tiden det tar å utvikle gode algoritmer til jammeren, og at disse algoritmene i en viss grad må vedlikeholdes. Hver gang en radar oppdateres, kan det bli nødvendig å også oppdatere jammeren. Med en tidkrevende utvikling blir intelligente jammere raskt kostbare, og ut fra kostnadshensyn kan det derfor bli vanskelig å plassere slike jammere på et missil som forbrukes.

En videre ulempe med intelligente jammere er at slike jammere er designet til å fungere mot bestemte radarer. Når nye radarer tas i bruk, har man ingen garanti for at jammeren fremdeles har samme gode virkning.

Støyjamming er en primitiv, men effektiv, form for jamming. Jammeren forsøker da å skjule radarsignalet i støy. Selv om en god radar vil kunne oppdage at den jammes, og selv om en radar kan benytte spesialutviklede algoritmer til å filtrere vekk jammestøy, vil ikke radaren kunne skille radarsignal og støy dersom støyen er tilstrekkelig kraftig. Uten informasjon om hvor lang tid signalet har brukt frem og tilbake til målet, og uten informasjon om hvordan signalets frekvens har endret seg, vil radaren ikke kunne gi avstanden ut til målet eller målets hastighet. Et grovt estimat av retningen ut til målet kan imidlertid oppnås ved å peile jammesignalet. Presisjonen vil da være sammenlignbar med antennelobens vinkelåpning.

Når vi skal avgjøre om støyjamming skaper problemer for en radar, sammenligner vi jammesignalets og radarsignalets effekt. Mens ligning (4-1) angir radarsignalets effekt S , har vi ennå ikke et uttrykk for jammesignalets effekt J . Nå er det imidlertid slik at en jammer og en radar i prinsippet fungerer på samme vis (begge sender ut elektromagnetiske signal med en gitt effekt). Jammesignalets effekt får vi av den grunn også fra radarligningen. Siden jammesignalet bare beveger seg én vei (fra jammer til radar, uten refleksjon), må radarligningen for et én-veis-signal benyttes:

$$J = \frac{P_{ja} G_{ja} G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 R_{ja}^2 L(\lambda, R_{ja})} \quad (4-14)$$

Her er:

- J Jammesignalets effekt
- P_{ja} Jammerens utsendte effekt
- R_{ja} Avstand mellom jammer og radar
- G_{ja} Jammeantennens gain
- G_r Gain til radarens mottagerantenne
- L Dempning av signalet i atmosfæren
- λ Radarsignalets bølgelengde

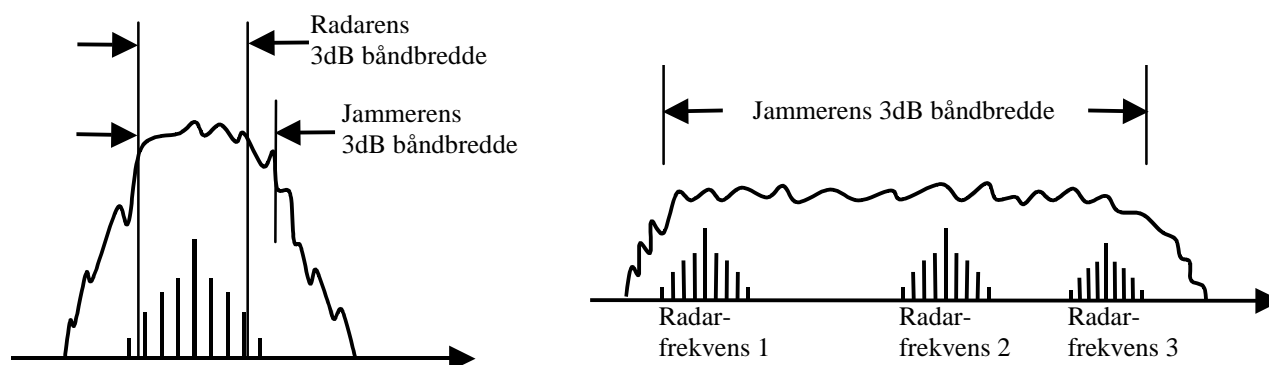
Ved å benytte ligning (4-1) og (4-14), blir forholdet mellom jammesignal og signalstyrke som gitt av ligning (4-15) under.

$$\frac{J}{S} = \frac{\frac{P_{ja} G_{ja} G_r}{(4\pi)^2 R_{ja}^2 L(\lambda, R_{ja})}}{\frac{P_t G_t G_r \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L(\lambda, 2R)}} = \frac{4\pi R^4 P_{ja} G_{ja} L(\lambda, 2R)}{R_{ja}^2 P_t G_t \sigma L(\lambda, R_{ja})} \quad (4-15)$$

Ligning (4-15) angir forholdet mellom jammesignal og radarsignal for en radarpuls. Vanligvis belyses imidlertid målet i lengre tid, slik at mange pulser benyttes. For signal-/støyforholdet kunne bidragene fra de enkelte pulsene integreres opp slik at signal-/støyforholdet ble forbedret. For forholdet mellom jammesignal og radarsignal er det imidlertid ikke alltid slik. Når radaren, på grunn av jammeren, får en puls som ikke er mulig å skille fra vanlig støy, hjelper det ikke om radaren prosesserer dette signalet én eller flere ganger, og forholdet mellom jammesignal og radarsignal blir fremdeles gitt av ligning (4-15). Dersom radaren imidlertid skulle klare å

filtrere ut så mye av jammerens sterke støybidrag at radaren får et grovt signal, da kan en økning av antall målinger/pulser brukes til å minske usikkerheten/støyen i dette signalet. Forholdet mellom jammesignal og radarsignal ville da forbedres, og ligning (4-15) må i så fall endres til å ta hensyn også til radarens integrasjonstid.

Jammeren bruker ikke all sin effekt på å påvirke radaren, og ligning (4-15) må endres noe. Blant annet vil en radar bare være følsom for ett eller flere bestemte frekvensområder. Dette er illustrert i Figur 4-8:



Figur 4-8: Heltrukken kurve angir jammerens frekvensfordeling. De vertikale linjestykkene angir radarens frekvenser. Tegningen til venstre illustrerer såkalt spot-jamming, mens tegningen til høyre illustrerer såkalt barrage-jamming

Fra figuren ser vi at jammeren vil dekke et større frekvensområde enn radaren, og at en andel av jammerens energi dermed ikke påvirker radaren. Hvor mye av jammerens energi som tapes på dette viset, avhenger av hvor mye større båndbredde, B , jammeren har i forhold til radaren. I ligning (4-16) under tas det hensyn til denne forskjellen i båndbredde:

$$\frac{J}{S} = \frac{4\pi R^4 P_{ja} \frac{B_t}{B_{ja}} G_{ja} L(\lambda, 2R)}{R_{ja}^2 P_t G_t \sigma L(\lambda, R_{ja})} \quad (4-16)$$

I ligning (4-16) angir B_t og B_{ja} henholdsvis radarens og jammerens båndbredde. Vi ser at forholdet mellom jammesignal og radarsignal nå er proporsjonalt med forholdet mellom radarens og jammerens båndbredde. Dersom radaren ved hjelp av varierende radarfrekvens, bruk av flere frekvenser, frekvenshopping etc, klarer å tvinge jammeren til å benytte en stor båndbredde, vil mindre av jammerens energi påvirke radaren, og radaren vil ha bedret sin ytelse.

Ligning (4-16) tar fremdeles ikke hensyn til at jammesignal og radarsignal kan ha forskjellig polarisasjon. Dette gjør at jammerens virksomme effekt reduseres ytterligere. Dersom trusselen skulle være et missil som sender stråling med sirkulær polarisasjon, og radarantennen er vertikal, vil bare halvparten av jammesignalet påvirke radaren, og verdien vi velger for P_{ja} må ta hensyn til dette.

4.2.5 Radarens rekkevidde ved jamming

For at en radar skal detektere en trussel, må radaren kunne skille radarsignalet fra jammestøyen.

For en gitt radar og en gitt jammer vil radaren klare dette så lenge forholdet mellom jammestøy og radarsignal ikke overstiger en bestemt grense. Denne grensen angir vi som $(J/S)_{\max}$. Ifølge (4) varierer denne grensen i stor grad med radartype og jammertype, og kan ligge på alt fra 0dB til 40dB eller mer.

Forholdet mellom jammestøy og radarsignal som radaren håndterer, $(J/S)_{\max}$, bestemmer radarens rekkevidde ved jamming, R_{bt} . Et uttrykk for denne rekkevidde får vi ved å sette $(J/S)_{\max}$ inn i ligning (4-16). For avstander mindre enn R_{bt} dominerer radarsignalet, og for avstander over R_{bt} dominerer jammestøyen. Siden avstanden R_{bt} kan ses på som avstanden der radarsignalet for første gang ”brenner” seg gjennom jammestøyen, kalles avstanden R_{bt} oftest for radarens ”burn through”-avstand.

I det videre ønsker vi å se på radarens ”burn through”-avstand for følgende vanlige jammervalg:

1. En jammer er plassert i fast avstand fra radaren, og den sender med konstant effekt
2. En jammer er plassert på trusselen, og den sender med konstant effekt
3. En jammer er plassert på trusselen, og den kan sende med variabel effekt

Når en jammer er plassert i fast avstand fra radaren og den sender med konstant effekt, er forholdet mellom jammesignal og radarsignal gitt av ligning (4-16). Radarens rekkevidde eller ”burn-through” avstand fås når forholdet mellom jamme og radarsignal er lik $(J/S)_{\max}$ og jammerens effekt maksimal:

$$\left(\frac{J}{S}\right)_{\max} = \frac{4\pi R_{bt}^4 P_{ja} \frac{B_t}{B_{ja}} G_{ja} L(\lambda, 2R_{bt})}{R_{ja}^2 P_t G_t \sigma L(\lambda, R_{ja})} \quad (4-17)$$

Siden rekkevidden, R_{bt} også inngår i uttrykket for atmosfæredempningen, kan vi ikke oppgi et eksplisitt uttrykk for R_{bt} . Når vi ønsker verdier for rekkevidden, R_{bt} , må vi isteden sette alle kjente verdier inn i ligning (4-17) for så å løse ligningen numerisk.

Når en jammer med konstant effekt er plassert på trusselen, kan vi fremdeles benytte ligning (4-17). Nå er imidlertid avstanden fra radar til trussel R_{bt} lik avstanden fra radar til jammer R_{ja} , og vi får:

$$\left(\frac{J}{S}\right)_{\max} = \frac{4\pi R_{bt}^2 P_{ja} \frac{B_t}{B_{ja}} G_{ja} L(\lambda, 2R_{bt})}{P_t G_t \sigma L(\lambda, R_{bt})} \quad (4-18)$$

Også i ligning (4-18) inngår rekkevidden R_{bt} i uttrykket for atmosfæredempningen, slik at vi heller ikke nå kan oppgi R_{bt} eksplisitt. Når vi ønsker verdier for rekkevidden, R_{bt} , må vi igjen sette alle kjente verdier inn i ligning (4-18) for så å løse ligningen numerisk.

Når en jammer som er plassert på trusselen kan variere effekten som sendes ut, kan effekten velges slik at forholdet mellom jammestøy og radarsignal hele tiden blir konstant. I praksis gjøres dette ved at jammeren har en mottagerantenne som fanger opp radarsignalet, en forsterker

som gir signalet en fast forsterkning og en sender som sender det nye signalet tilbake. Forsterkningen gjøres slik at det returnerte signalet oppfattes som støy. Også i dette tilfellet kan ligning (4-18) anvendes. Verdien P_{ja} må nå imidlertid settes lik jammerens maksimale effekt, siden det er denne effekten som bestemmer hvor lenge jammeren vil være i stand til å skjule radarsignalet i støy. Selv om vi benytter samme ligning som tidligere, vil jammere med variabel effekt antagelig gi en redusert "burn-through"-avstand. Dette skyldes at forskjellen på radar- og jammesignal for de fleste avstander er redusert, og at det derfor kan bli vanskeligere å oppdage at radaren faktisk utsettes for jamming. Dersom dette er tilfellet, kan $(J/S)_{max}$ og dermed også "burn-through"-avstanden minke.

For at en jammer skal være effektiv, ønsker man å gjøre "burn through"-avstanden, R_{bt} , minst mulig. Fra ligning (4-17) og (4-18) ses det at man:

1. bør sørge for at jammeren har stor effekt og liten båndbredde. Den minste ønskelige båndbredden fås når jammeren bare sender de frekvensene som radaren faktisk opererer på. For å kunne benytte en slik båndbredde må man enten kjenne radaren som skal jammes, eller ha en jammer som observerer radarens frekvens og justerer sitt frekvensområde deretter.
2. bør sørge for at jammeren hovedsakelig sender i radarens retning, slik at G_{ja} blir stor.
3. bør sørge for at $(J/S)_{max}$ blir minst mulig. Siden $(J/S)_{max}$ avhenger av både radar og jammer, vil parameterne for den "ideelle" jammer variere noe. Generelt kan vi imidlertid si at jammeren vil gjøre det vanskelig for radaren dersom jammestøyen har små avvik fra såkalt gaussisk støy, dersom jammestøyen unngår store tidsvariasjoner og dersom jammestøyens intensitet er høyere enn radarsignalet intensitet og samtidig skiller seg lite fra naturlige støykilder.

Uavhengig av hvor sofistikert en jammer gjøres, gjelder det at signalet fra en trussel som nærmer seg, vil øke sterkt med avstanden. Dersom jammeren hele tiden skal kamuflere signalet, betyr dette at støyen enten må være på et konstant høyt nivå, eller den må øke i samme takt som signalet. Dersom radaren sammenligner støy i forskjellige retninger, vil den registrere at støyen er uvanlig høy i jammerens retning og dermed få et grovt anslag av retningen ut til støykilden.

4.3 Entydighet

En pulsradar sender radarsignalet i pulser. Hvert enkelt radarsignal er kortvarig, men gjentas etter en kort pause. Hvor hyppig pulsene sendes ut, angis av pulsfrekvensen kalt f_p . Pulsefrekvensen må ikke forveksles med radarfrekvensen som angir frekvensen til det kortvarige signalet som kalles en puls.

En pulsradar vil ifølge (2) gi entydig avstands- og hastighetsmåling for avstander kortere enn R_{max} og hastigheter lavere enn v_{max} , dersom følgende krav på pulsfrekvensen f_p oppfylles:

$$f_p < \frac{c}{2R_{max}}, \quad (4-19)$$

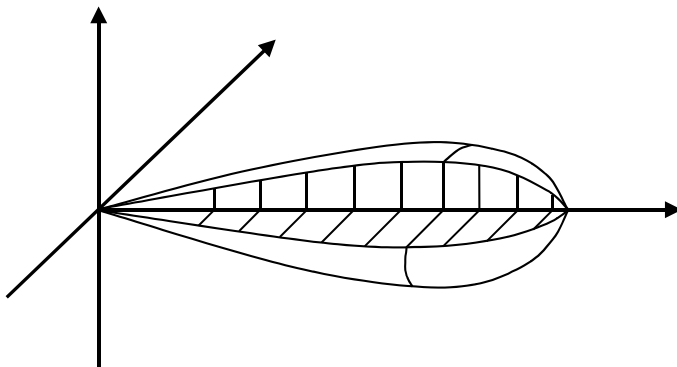
$$f_p > \frac{4v_{\max}}{\lambda} = \frac{4v_{\max} f}{c}, \quad (4-20)$$

I uttrykket over angir c lysets hastighet, λ radarsignalets bølgelengde og f radarfrekvensen.

4.4 Oppløsning

Radarantennens oppløsning angir hvor tett to objekter kan befinne seg før signalene fra de to objektene ”smelter sammen”, slik at radarsignalet fra to objekter med lav refleksjon vil ligne signalet fra *ett* objekt med høy refleksjon.

Årsaken til at radarer ikke klarer å skille to objekter som ligger tett, kan ses fra Figur 4-9:



Figur 4-9: Eksempel på hvordan en antenne kan forsterke et signal som funksjon av vinkel, det vil si illustrasjon av en antennelebe

Radarantennen samler opp (integrerer opp) energien i et snevert vinkelområde. Dersom energien ligger over en bestemt grenseverdi, vil radaren gi alarm. Dersom to objekter ligger tett, kan de befinne seg innenfor dekningsområdet til samme antennelebe og gi opphav til *ett* felles signal. Uten ytterligere informasjon vet radaren bare at den har mottatt en sterk refleksjon, og ikke at refleksjonen skyldes to objekter.

Radaren har en gitt oppløsning i hver koordinat den måler. Det betyr at den har en oppløsning i vinkel ($\Delta\phi$ og $\Delta\theta$), avstand (Δz) og hastighet (Δv). Oppløsningen i disse størrelsene er bestemt av henholdsvis antennens lobebredde, antennens båndbredde og antennens dopplerfilter. Man kan si at radaren deler området den overvåker inn i celler av størrelse $\Delta\phi \otimes \Delta\theta \otimes \Delta z \otimes \Delta v$. Dersom to objekter befinner seg i forskjellige celler, klarer radaren å skille objektene.

4.4.1 Oppløsning i vinkel

Ifølge (1) er det vanligvis mulig å skille to objekter når objektene er lengre fra hverandre enn bredden på antenneleoben. Oppløsningen i asimut (vinkel horisontalt) og i elevasjon (vinkel vertikalt) er dermed gitt av:

$$BW_{\phi(az)} \approx \lambda / L_{az,eff}, \quad (4-21)$$

$$BW_{\phi(el)} \approx \lambda / L_{el,eff} \quad (4-22)$$

Her er λ radarsignalets bølgelengde og L antennens effektive størrelse i enten asimut- eller elevasjon. For sirkulære antenner settes L lik antennens diameter. Tilnærmelsen i uttrykket gjelder for små vinkler.

4.4.2 Oppløsning i avstand

Oppløsningen i avstand er bestemt av pulsbredden ΔT eller båndbredden B og er omtrentlig gitt av (1):

$$\Delta z = \frac{c\Delta T}{2} \approx \frac{c}{2B}, \quad (4-23)$$

I denne ligningen angir c lysets hastighet.

4.4.3 Oppløsning i hastighet

Hastigheten kan enten finnes ved gjentatte posisjonsmålinger eller ved måling av radarsignalets dopplereffekt. Når dopplereffekten benyttes, gjør man bruk av at et radarsignal endrer frekvens når det reflekteres fra et objekt i bevegelse, og at sammenhengen mellom endring i frekvens, f_d , og radiell hastighet, v_r , er gitt av:

$$v_r = f_d \lambda / 2 \quad (4-24)$$

Dette betyr at oppløsning i frekvens bestemmer oppløsning i hastighet. I (2) er oppløsningen i hastighet gitt som

$$\Delta v_r = \Delta f \frac{\lambda}{2} \approx \frac{\lambda}{2\tau} \quad (4-25)$$

Her er λ bølgelengden til radarsignalet, og τ er signalets varighet.

4.5 Presisjon

Radarens presisjon angir hvor nøyaktig radaren kan måle posisjon og hastighet. Mens radarens oppløsningen sier noe om radarens evne til å skille mellom forskjellige mål, angir radarens presisjon hvilken målenøyaktighet vi kan forvente. Som regel er radarens presisjon bedre enn radarens oppløsning. Mens oppløsningen er begrenset av bredden på antenneloben, kan man ved å sammenligne signaler fra forskjellige antenneloben, anslå hvor i antenneloben et mål befinner seg.

Teoretiske uttrykk for hvilken nøyaktighet som kan oppnås i vinkel, avstand og frekvens er utledet i (1):

$$\sigma_{asimut} = \frac{1}{2} \frac{\lambda\sqrt{2}}{L_{asimut}\sqrt{S/N}} \quad (4-26)$$

$$\sigma_{elevasjon} = \frac{1}{2} \frac{\lambda\sqrt{2}}{L_{elevasjon}\sqrt{S/N}} \quad (4-27)$$

$$\sigma_{avstand} = \frac{1}{4} \frac{c\sqrt{2}}{B\sqrt{S/N}} \quad (4-28)$$

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2}}{t_0\sqrt{S/N}} \quad (4-29)$$

Fra uttrykket for dopplerskift, fås følgende uttrykk for hastighetens presisjon:

$$\left. \begin{array}{l} v_r = f_d \frac{\lambda}{2} \\ \sigma_f = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2}}{t_0\sqrt{S/N}} \end{array} \right\} \text{ gir } \sigma_{v_r} = \frac{1}{4} \frac{\lambda\sqrt{2}}{t_0\sqrt{S/N}} \quad (4-30)$$

Symbolene i ligningene over står for:

- σ_{asimut} Usikkerhet i asimutvinkel (vinkel i horisontalplanet)
- $\sigma_{elevasjon}$ Usikkerhet i elevasjonsvinkel (vinkel i vertikalplanet)
- $\sigma_{avstand}$ Usikkerhet i avstand
- $\sigma_{frekvens}$ Usikkerhet i frekvensmåling
- σ_{v_r} Usikkerhet i radiell hastighet
- λ Signalets bølgelengde
- f_d Signalets dopplerforskyvning
- S/N Radarens signal-/støyforhold
- c Lysets hastighet
- v_r Trusselens radielle hastighet
- t_0 Observasjonstid (rms-verdi²)
- B Radarens båndbredde (rms-verdi²)
- L_{asimut} Antennens utstrekning i asimut / i horisontalplanet (rms-verdi²)
- $L_{elevasjon}$ Antennens utstrekning i elevasjon / i vertikalplanet (rms-verdi²)

Usikkerhetsbidragene gitt over oppstår som følge av signalstøy og avhenger, via de såkalte rms-verdiene for observasjonstid, båndbredde og antennessørrelse, av radarens bølgeform. Det er

² rms står for "root mean square". For båndbredden B fås rms-verdien fra følgende uttrykk:

$$B^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (2\pi f)^2 |A(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |A(f)|^2 df}$$

Her angir f radarens frekvens og $A(f)$ signalets amplitude

imidlertid ikke bare den termiske støyen som reduserer radarens presisjon. De vanligste usikkerhetskildene er:

1. Usikkerhet som følge av termisk støy i radaren. Dette bidraget er nettopp beskrevet.
2. Øvrige usikkerhetskilder fra radaren. Et eksempel kan være usikkerhet som følger fra ustabil opphenging av antenne.
3. Usikkerhet som oppstår på grunn av atmosfæren.
4. Usikkerhet som følger av at virkelige mål ikke er punktmål, men består av mange kanter og flater som reflekterer radarsignalet forskjellig. Denne usikkerhetskilden, såkalt "glint-error" ligger ifølge (3) ofte mellom en tredjedel og en sjettedel av den vinkelen målet dekker. Det skal være vanlig å sette:

$$\sigma_{glint} = 0.35 \frac{L}{R} \quad (4-31)$$

Usikkerheten er proporsjonal med målets bredde og omvendt proporsjonal med avstanden mellom radar og mål.

For å finne den totale usikkerhet i posisjonsestimatene, må vi slå sammen bidragene over. Når vi har n uavhengige kilder med usikkerhet $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ fås:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad (4-32)$$

For små avstander er glint-usikkerheten (refleksjonsusikkerheten) dominerende, mens for store avstander dominerer usikkerheten fra den termiske støyen.

5 RADAR I APS-SYSTEM

Vi har i forrige kapittel gitt en kort presentasjon av formler som angir en radars rekkevidde, entydighet, oppløsning og presisjon. Vi ønsker nå å anvende disse formlene. Ved å sette krav som kan være aktuelle for et APS-system, ønsker vi å avdekke begrensninger en radar vil ha i et slikt system. Vi starter med å diskutere det vi har kalt APS-systemers minsteavstand, den minste skyteavstanden der trusselen har en flyvetid som er lang nok til at et APS-system kan reagere.

5.1 APS-systemers minsteavstand

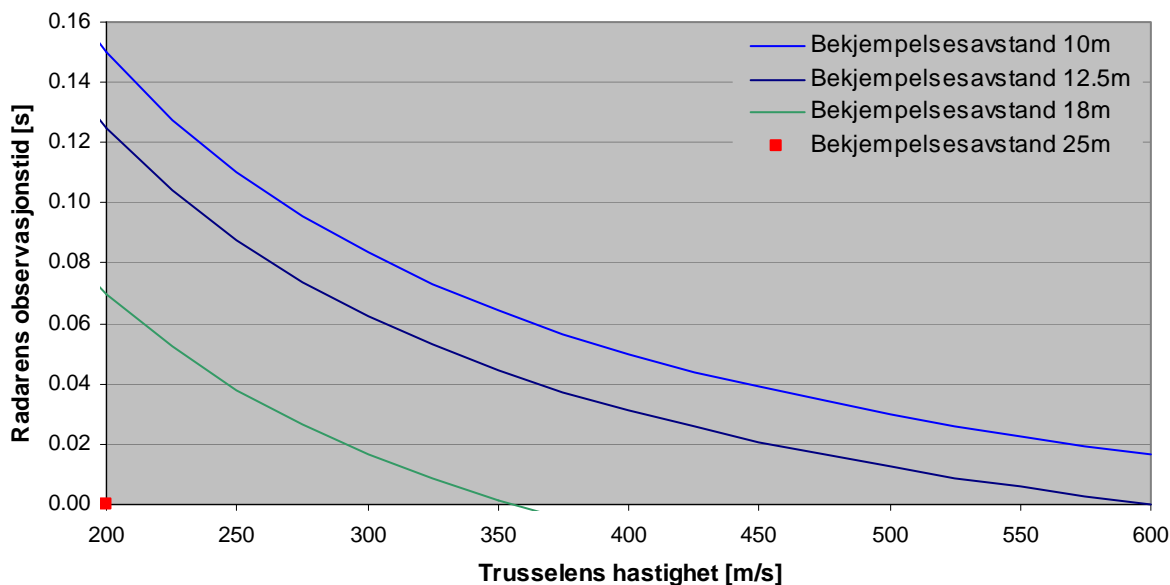
Et APS-system trenger en viss tid for å reagere og vil derfor ikke beskytte mot trusler som avfyres på kort hold. Den minste skyteavstanden der APS-systemet fungerer, kalles APS-systemets minsteavstand. Minsteavstanden, R , er gitt av ligning (2-1) og (2-2), som vi her forenkler til:

$$R = L_{bekjempelse} + \left(\frac{L_{bekjempelse}}{v_{effektor}} + t \right) v_{trussel} , \quad (5-1)$$

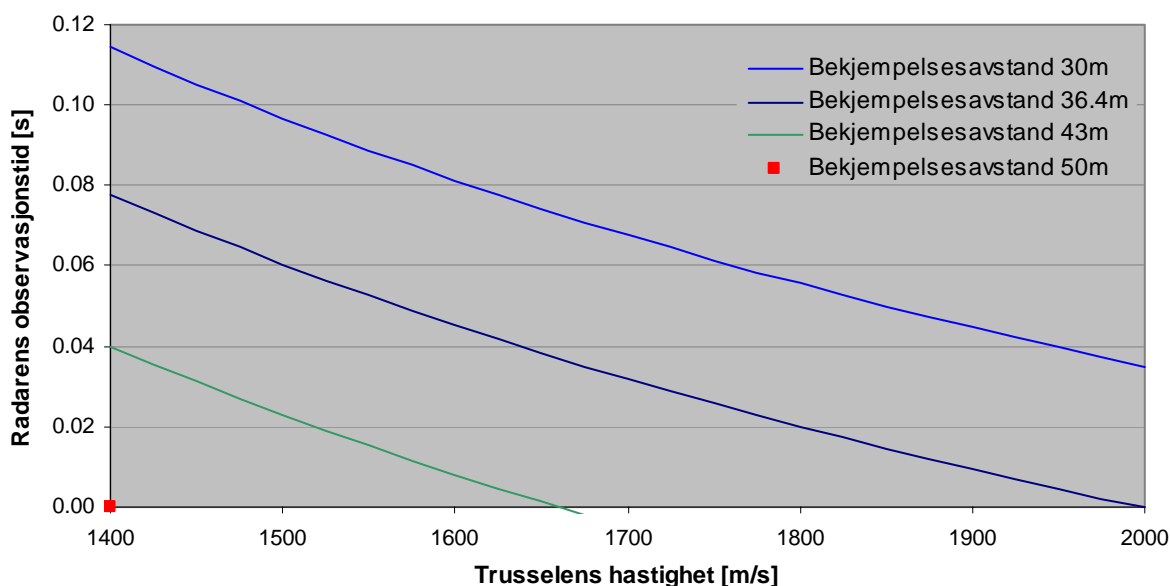
Vi har her slått sammen tidene $t_{processor}$, $t_{målfølging}$ og $t_{deteksjon}$ til en tid t som vi kaller sensorens observasjonstid. Ved hjelp av ligning (5-1) kommer vi til å antyde hvilken tid APS-systemets sensor vil ha til rådighet og hvilke bekjempelsesavstander som kan benyttes.

Den sterke avhengigheten mellom observasjonstid, trusselens hastighet og bekjempelsesavstand er illustrert i Figur 5-1 og Figur 5-2. Mens Figur 5-1 illustrerer missiltrusler med hastigheter fra 200 til 600m/s, illustrerer Figur 5-2 trusselen fra HVM³/pilammunisjon med hastighet fra 1400 til 2000m/s:

³ HVM=hyper velocity missile



Figur 5-1: Sammenheng mellom hvilken tid APS-systemets sensor har til observasjon, APS-systemets bekjempelsesavstand og missiltrusselens hastighet. Det antas at motmiddelet har hastighet 200m/s og at APS-systemet skal fungere mot trusler avfyrt på avstander over 50m



Figur 5-2: Sammenheng mellom hvilken tid APS-systemets sensor har til observasjon, APS-systemets bekjempelsesavstand og missiltrusselens hastighet. Det antas her at motmiddelet har hastighet 200m/s og at APS-systemet skal fungere mot trusler avfyrt på avstander over 400m

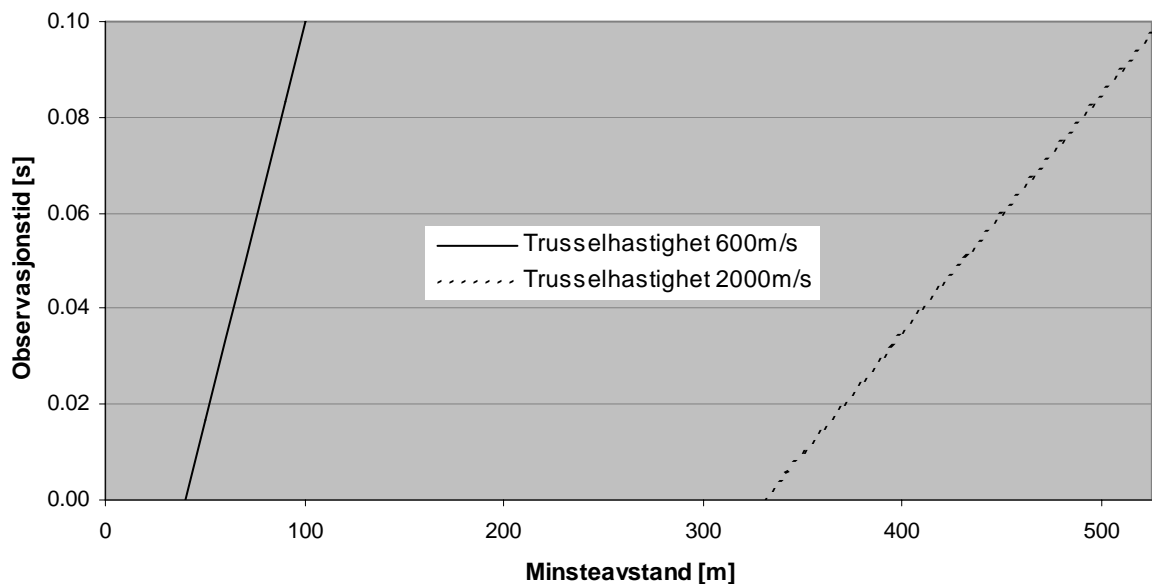
Figurene illustrerer begge at APS-systemets observasjonstid minsker når enten trusselens hastighet eller bekjempelsesavstanden gjøres større.

Mer detaljert ser vi fra Figur 5-1 at et APS-system som skal fungere mot alle missiltrusler avfyrt på avstander større enn 50m, må bekjempe truslene på en avstand kortere enn 12.5m. Dersom man ønsker en større bekjempelsesavstand, må APS-systemets minsteavstand økes utover 50m. Dersom missiltruslene er langsommere enn 600m/s, kan imidlertid kravene gjøres mildere, siden

APS-systemet da får mer tid til disposisjon. For å illustrere hvor mye kravene kan reduseres, senker vi missilets hastighet fra 600 til 300m/s. En bekjempelsesavstand på 10m kan da økes til 18m, dersom observasjonstiden holdes fast på 0.017s. En observasjonstid på 0.017s kan økes til 0.083s, dersom bekjempelsesavstanden holdes fast på 10m.

Fra Figur 5-2 ser vi videre at et APS-system som skal fungere mot HVM/pilammunisjon avfyrt på avstander større enn 400m, må bekjempe truslene på en avstand kortere enn 36.4m. Dersom man ønsker en større bekjempelsesavstand, må APS-systemets minsteavstand økes utover 400m. Dersom trusslene er langsommere enn 2000m/s, kan imidlertid kravene gjøres mildere. Hvis vi senker trusselens hastighet fra 2000 til 1500m/s, kan en bekjempelsesavstand på 30m økes til 41m, dersom observasjonstiden holdes fast på 0.035s. En observasjonstid på 0.035s kan økes til 0.097s, dersom bekjempelsesavstanden holdes fast på 30m.

I Figur 5-1 og Figur 5-2 låste vi APS-systemets minsteavstand til 50 og 400m når truslene var henholdsvis missil og pilammunisjon. Disse verdiene kan virke relativt vilkårlige, og i Figur 5-3 illustrerer vi derfor betydningen av valget. Figuren forutsetter at missiler kan ha hastighet opp til 600m/s, og at de bekjempes på 10 meters avstand. For HVM/pilammunisjon kan hastigheten være opp til 2000m/s, mens trusselen bekjempes på 30 meters avstand. APS-systemets effektor antas å ha en snitthastighet på 200m/s:



Figur 5-3: Sammenheng mellom APS-systemets minste virksomme avstand og hvilken tid APS-systemets sensor har til rådighet

Figuren illustrerer to vesentlige poeng. Først og fremst ser vi at radaren kan gis en hvilken som helst observasjonstid, men at dette vil gå på bekostning av APS-systemets minsteavstand. Dernest ser vi at et APS-system designet for trusler med hastighet opp til 600m/s, vil ha en minsteavstand som må overstige 40 meter, og at systemet designet for hastigheter opp til 2000m/s, vil ha en minsteavstand som overstiger 330m. For å redusere disse nedre grensene for minsteavstand, må man enten redusere bekjempelsesavstanden eller øke effektorens hastighet.

5.2 Radars rekkevidde

I dette avsnittet ønsker vi å antyde hva rekkeviddekrav vil ha å si for en radars effekt og observasjonstid. For å gjøre diskusjonen konkret, har vi valgt å ta utgangspunkt i eksempelet gitt av Tabell 5-1. Beregningene vil ikke, siden de ikke er generelle, gi svar på hva som er den ideelle radaren for et APS-system.

	Størrelse	Symbol	Enhet	Verdi	Kommentar
Trussel	Trusselens radartverrsnitt	σ	m ²	0.01	Antatt radartverrsnitt til et fremtidig missil observert i front
	Avstand til trussel	R	m		Vi studerer tre tilfeller: 1: Trussel har hastighet opp til 600m/s. Vi krever at radaren skal beherske skuddavstander opp til 50 m (avsnitt 5.1) 2: Trussel har hastighet opp til 2000m/s. Vi krever at radaren skal beherske skuddavstander opp til 400 m (avsnitt 5.1) 3: Radaren skal detektere trussel helt fra utskytning. Vi krever at radaren skal beherske avstander opp til 3000 m
Radar	Mottakerantennens areal	A_r	cm ²	30x30	Antydning av hva vi mener er maksimal akseptabel størrelse på en antenne som vil øke et kjøretøys silhuett
	Mottakerantennens effektivitet	η_r	-	0.7	Vi antar at effektiviteten til vår kvadratiske antenne er 0.7
	Senderantennens areal	A_t	cm ²	30x30	Antydning av hva vi mener er maksimal akseptabel størrelse på en antenne som vil øke et kjøretøys silhuett
	Senderantennens effektivitet	η_t	-	0.7	Vi antar at effektiviteten til vår kvadratiske antenne er 0.7
	Radarfrekvens	f	Hz		For å forenkle beregningene ser vi ikke på alle mulige frekvenser, men begrenser oss til: 5, 30, 60, 100GHz
	Radarens støyfaktor	F	dB	6.0	Definert som $F = \frac{\text{Støy fra forsterker}}{\text{Støy fra ideell forsterker}}$
	Radarens minste signal-støyforhold	$(S/N)_{min}$	dB	12.0	En manuell operatør kan skille signal fra støy for $S/N \approx 3\text{dB}$. En primitiv radar kan trenge $(S/N)_{min} \approx 20\text{dB}$ for deteksjon. En relativt god radar med automatisk deteksjon av trussel kan trenge $(S/N)_{min} = 12\text{dB}$ for deteksjon, (5)
	Radarens maksimale jamme-/signalforhold	$(J/S)_{max}$	dB	6.0	Ifølge (4) ligger den øvre grensen $(J/S)_{max}$ der radarer kan skille signal fra jammestøy i området fra 0 til 40dB. Grensen avhenger av radartype og jammertype. Når vi skal vurdere radarens ytelse under jamming, er vi konservative og antar en god jammer
Radarens integrasjonstid	t	s	0-0.1	En høy observasjonstid gir stor minsteavstand. Vi vurderer tider opp til 0.1s (Se evt Figur 5-1-Figur 5-3)	
jammer	Antennens areal	A_{ja}	m ²	$\frac{\pi}{4} \cdot 0.13^2$	Vi antar at jammerens antenne har samme form som trusselens sirkulære tverrsnitt
	Antennens effektivitet	η_{ja}	-	0.55	Vi antar at effektiviteten til den sirkulære antennen er 0.55
	Avstand til jammer	R_m	m		I situasjon 1 er avstanden mellom jammer og trussel 2000 m. I situasjon 2 befinner jammeren seg på trusselen og $R_m = R$
	Forhold mellom jammers og radars båndbredde	(B_{ja}/B)	-	2, 200	Faktor som tar hensyn til at ikke hele jammerens effekt påvirker radaren, se avsnitt 4.2.4. Verdiene 2 og 200 angir faktoren for henholdsvis en god og en primitive jammer. Faktoren inkluderer også tap pga radarens og jammerens forskjellige polarisasjon
Annet	Termisk støy	$k_b T_0$	J		Energi til termisk støy ved $T_0 = 290\text{K}$ er lik $4.002\text{E-}21\text{J}$
	Atmosfære-dempning pr km	L	dB/km		Gitt av Figur 4-2 og Figur 4-3

Tabell 5-1: Eksempel på verdier som kan være aktuelle for en radar. Disse verdiene er benyttet i senere beregninger

Hvilke krav som skal settes til radarens rekkevidde bestemmes naturligvis av radarens bruksområde. I et APS-system ser vi for oss tre forskjellige behov der radar kan være aktuelt:

1. Deteksjon og målfølging av et missil som skal bekjempes
2. Deteksjon og målfølging av pilammunisjon som skal bekjempes

3. Deteksjon og målfølging av trussel fra den skytes ut til den når målet

Rekkevidden som kreves i disse situasjonene, avhenger av hvordan trusselen bekjempes. Når vi i dette kapitlet vurderer missiler som bekjempes på 10 meters avstand, pilammunisjon som bekjempes på 30 meters avstand og missiler som følges fra utskytningen, har vi satt kravet til rekkevidde til henholdsvis 50, 400 og 3000m.

Selv om følsomheten til deteksjons- og målfølgingsradarer generelt er forskjellig, har vi i Tabell 5-1 satt $(S/N)_{min}$ til 12dB i begge tilfeller. Forenklingen gjør at vi kan begrense antall utregninger og at vi med rekkevidde hele tiden mener avstanden som gir radaren et signal-/støyforhold på 12dB.

Rekkevidde når radaren jammes, er bestemt av den øvre grensen $(J/S)_{max}$ der radarer kan skille signal fra jammestøy. Siden vi i Tabell 5-1 satte denne grensen til 6dB, får vi rekkevidden som avstanden der forholdet mellom jammesignal og radarsignal er nettopp 6dB.

5.2.1 Radars rekkevidde uten jamming

Hvor mye energi en radar må sende ut når radaren har følsomhet $(S/N)_{min}$ og skal ha rekkevidde R_{max} , er gitt av ligning (4-10) og (4-13). Når disse ligningene omformes til et uttrykk som angir den energien radaren sender ut, får vi:

$$\bar{P}_t = \frac{4\pi R_{max}^4 \lambda^2 F k_B T_0 L(\lambda, 2R_{max}) \left(\frac{S}{N}\right)_{min}}{\eta_i A_i \eta_r A_r \sigma} \quad \text{Målfølgingsradar} \quad (5-2)$$

$$\bar{P}_t = \frac{4\pi R_{max}^4 \alpha \cdot \sin \theta F k_B T_0 L(\lambda, 2R_{max}) \left(\frac{S}{N}\right)_{min}}{\eta A \sigma} \quad \text{Deteksjonsradar} \quad (5-3)$$

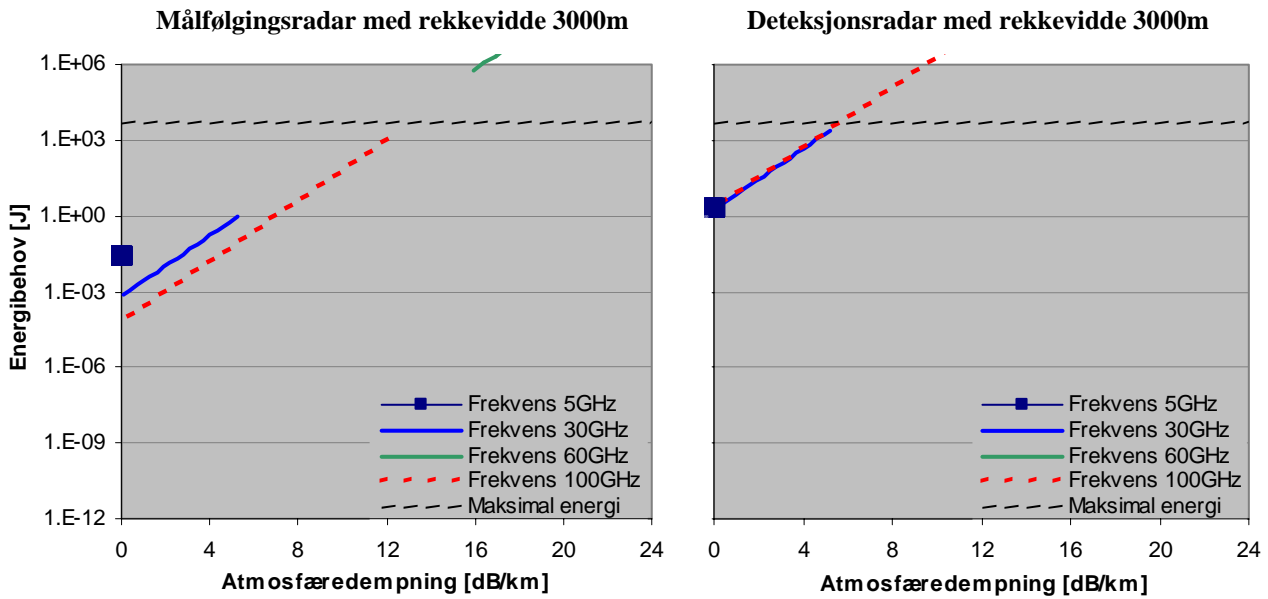
Symbolene ble forklart i kapittel 4.

Atmosfæredempningen, L , avhenger av radarens frekvens og er tidligere gitt av Figur 4-2 og Figur 4-3. I Tabell 5-2 gjengir vi dempningen for de fire frekvensene vi har valgt å studere:

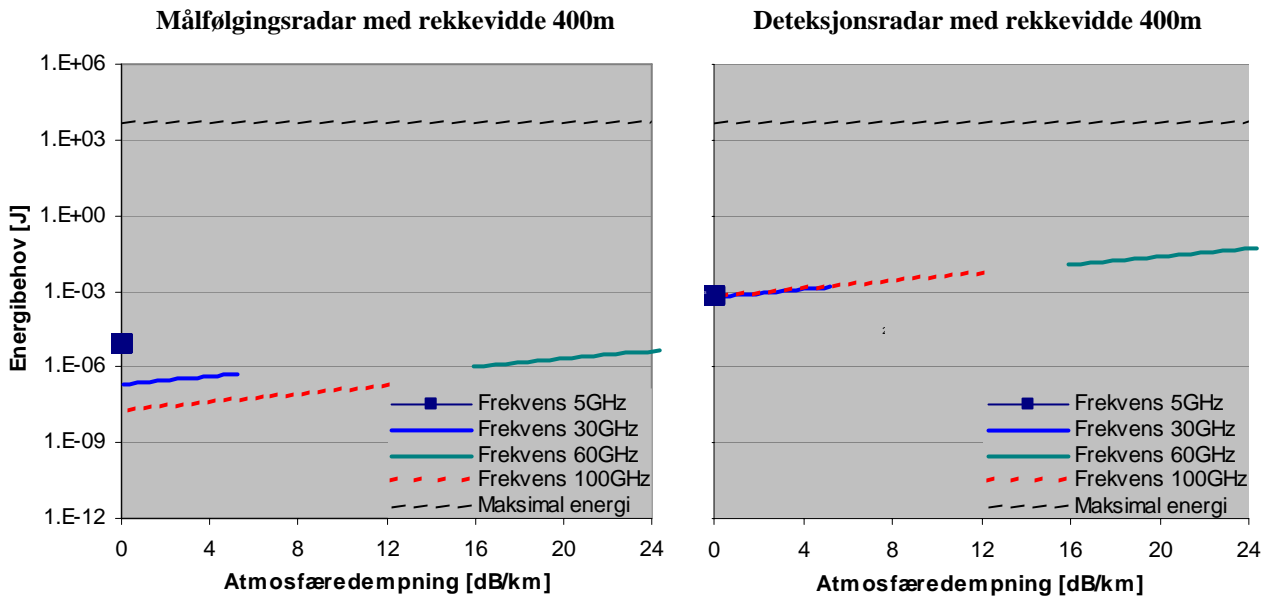
Frekvens [GHz]	Atmosfæredempning [dB/km] godt vær	Atmosfæredempning [dB/km] Regn: 25mm pr time	
		Ekstra bidrag fra nedbør	Totalt
5	0.00	0.04	0.0
30	0.1	5.1	5
60	15.9	8.4	24
100	0.3	12.1	12

Tabell 5-2: Atmosfæredempning pr km for 4 forskjellige frekvenser

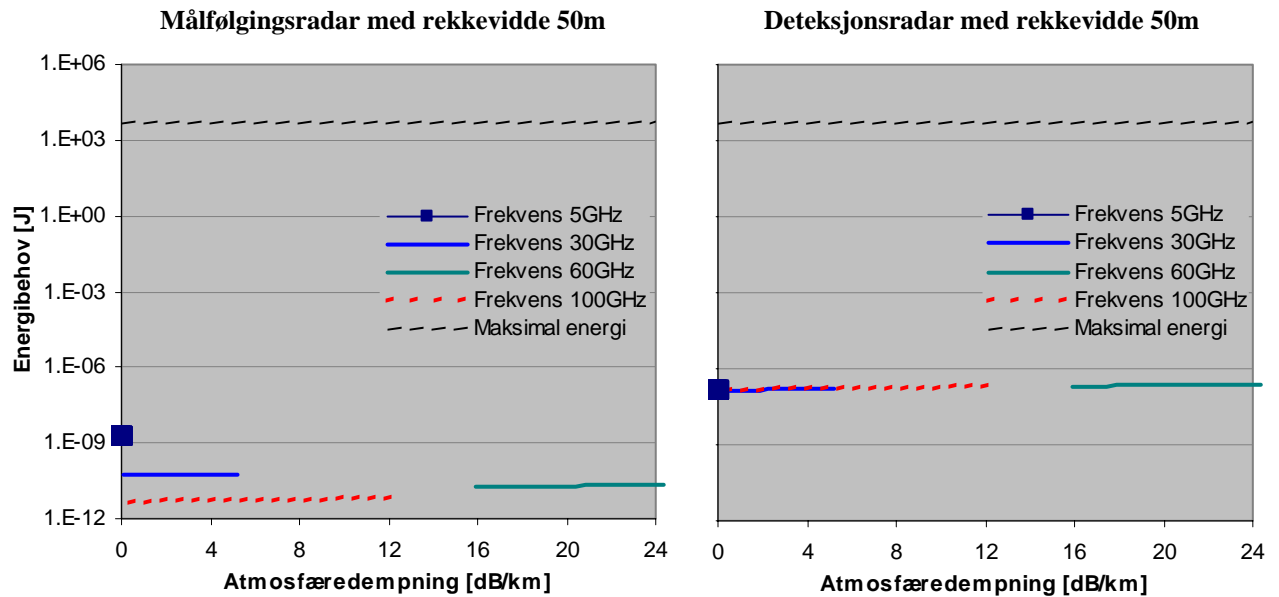
Vi ønsker nå å plote radarens energibehov. Dette energibehovet vil avhenge av om radaren skal detektere eller følge trusselen og av kravet som er satt til radarens rekkevidde. I Figur 5-4 - Figur 5-6 gis energibehovet for rekkeviddene 50, 400 og 3000m.



Figur 5-4: Radars energibehov som funksjon av atmosfæredempning. Kurvene som er gitt for hver frekvens, dekker nedbør fra 0-25mm/t. Den horisontale, stiplede linjen angir radarens antatt maksimale energiutsendelse; effekt 50kW og varighet 0.1s. Frekvensen 60GHz krever mer enn 1MJ slik at denne kurven ligger utenfor det plottede området



Figur 5-5: Radars energibehov som funksjon av atmosfæredempning. Kurvene som er gitt for hver frekvens, dekker nedbør fra 0-25mm/t. Den horisontale, stiplede linjen angir radarens antatt maksimale energiutsendelse; effekt 50kW og varighet 0.1s



Figur 5-6: Radars energibehov som funksjon av atmosfæredempning. Kurvene som er gitt for hver frekvens, dekker nedbør fra 0-25mm/t. Den horisontale, stiplede linjen angir radarens antatt maksimale energiutsendelse; effekt 50kW og varighet 0.1s

Dempningen som er angitt i figurene, tilsvarer alt fra godt vær til og med nedbør på 25 mm/time. Eksempelvis betyr dette at kurven som illustrerer energibehovet for frekvensen 60GHz, bare er gitt for en dempning i området fra 16 til 24dB/km.

Fra Figur 5-4 - Figur 5-6 ser vi at:

- En målfølgingsradar trenger mindre energi enn en deteksjonsradar for å oppnå en bestemt rekkevidde. Forskjellen avhenger av hvor stor forskjell det er på området som overvåkes av de to radarene og er i vårt regneeksempel lik $3.1f^2$ (f = radarens frekvens i GHz).
- Energibehovet øker med atmosfæredempningen. For korte avstander er denne økningen svært svak, mens den for lengre avstander blir sterk.
- For avstander opp til 400m er energibehovet til frekvensene 5, 30, 60 og 100GHz akseptabelt både for målfølgning og deteksjon (1W i tiden 0.05s er tilstrekkelig).
- For en avstand på 3000m kan 5, 30 og 100GHz brukes til målfølgning, mens 5 og 30GHz kan benyttes til deteksjon. Radaren må imidlertid ha svært høy effekt dersom 100GHz benyttes til målfølgning eller 30GHz til deteksjon.

Vi avslutter dette avsnittet ved å oppgi hvilken rekkevidde vi kan vente for de fire frekvensene vi har sett på. Resultatene i Tabell 5-3 er funnet ved å benytte ligning (5-2) og (5-3):

	Energi	Vær	Frekvens [GHz]			
			5	30	60	100
Målfølgingsradar	0.01J	Godt vær	2400	5500	1100	7600
		Regn	2 400	1 900	800	1 400
	5kJ	Godt vær	58200	68200	2500	41900
		Regn	46 800	5 600	1 700	3 100
Deteksjonsradar	0.01J	Godt vær	800	800	400	800
		Regn	800	600	300	400
	5kJ	Godt vær	20 900	17 500	1 500	12 300
		Regn	19000	3200	1100	1700

Tabell 5-3: Beregnet rekkevidde i meter for fire forskjellige frekvenser. Beregningene er gjort for to værforhold, godt vær og nedbørsintensitet på 25mm/time

Fra tabellen er det verdt å merke seg at ytelsen til frekvensen 5GHz påvirkes lite av nedbør. Konklusjonene blir imidlertid som tidligere. Så lenge avstanden er under 400m kan frekvensen velges fritt. Dersom radaren skal ha rekkevidde på minst 3000m, er det bare frekvensen på 5GHz som har et energibehov godt under 5kJ.

5.2.2 Radars rekkevidde ved jamming

I dette avsnittet skal vi studere hvordan radarens rekkevidde minker når radaren jammes. Vi begrenser oss til å se på virkningen av jammestøy. Betydningen av intelligente narretiltak, slik som generering av falske mål, betraktes ikke. Vi kommer heller ikke til å studere når det er mulig å peile jammesignalet eller ved hvilken avstand radaren antagelig vil oppdage at den faktisk utsettes for jamming.

Virkningen av jammestøy vil bli vurdert i to situasjoner:

1. Vi har to kjøretøyer. Det ene er utrustet med radar, mens det andre er utrustet med jammer. Avstanden mellom kjøretøyene er 2km. Radarens oppgave er her å følge en innkommende trussel, mens fiendtlig kjøretøy sender jammestøy med konstant effekt.
2. Vi har et kjøretøy med radar. Radaren skal som tidligere følge innkommende trussel. Trusselen har denne gangen påmontert en jammer som sender jammestøy med konstant effekt.

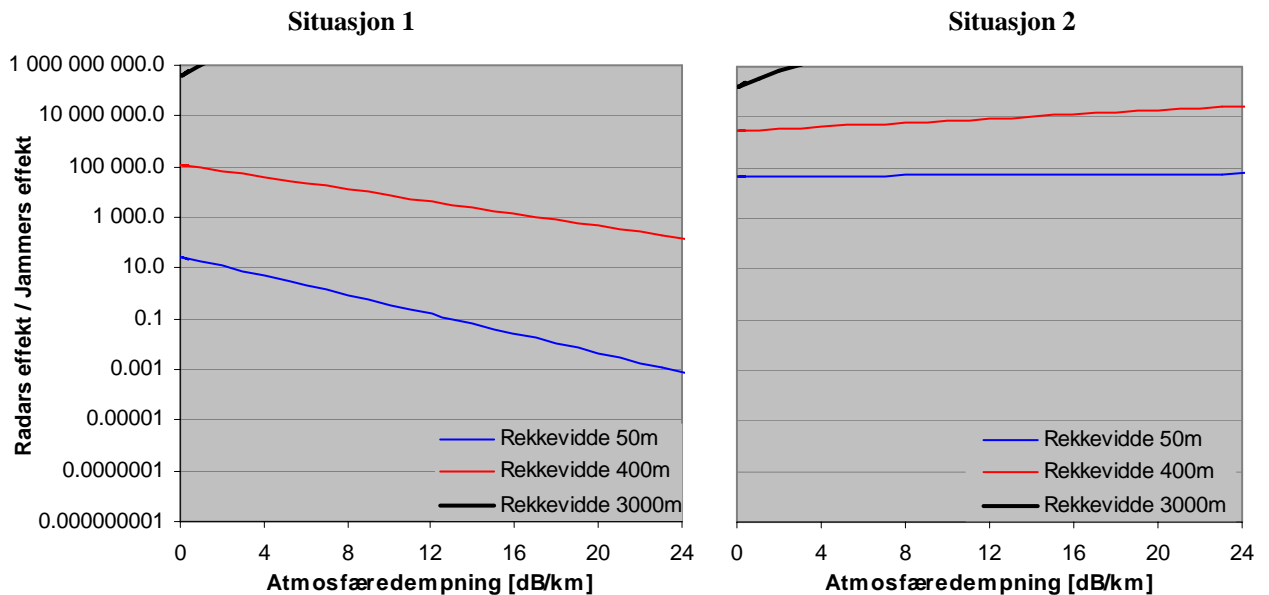
For å antyde radarens rekkevidde i disse to situasjonen, baserer vi oss på ligning (4-17). Når vi setter inn for jammerens og radarens gain, får vi følgende uttrykk:

$$\frac{P_t}{P_{ja}} = \frac{4\pi}{\sigma} \frac{B_t}{B_{ja}} \frac{\eta_{ja} A_{ja}}{\eta_t A_t} \frac{R_{bt}^4 L(\lambda, 2R_{bt})}{R_{ja}^2 L(\lambda, R_{ja})} \frac{1}{\left(\frac{J}{S}\right)_{\max}} \quad (5-4)$$

Vi ser at jammerens rekkevidde ved jamming, ”burn through”-avstanden R_{bt} , nå avhenger av jammeantennens og radarantennens effektive areal, $\eta_{ja} A_{ja}$ og $\eta_t A_t$. Siden ligningen avhenger av størrelsen på radarens og jammerens antenner og ikke på antennens bruksområde, kommer vi i dette avsnittet ikke til å skille mellom deteksjons- og målfølgingsradarer.

Figurene som følger, illustrerer løsningen av ligning (5-4) når vi har satt inn verdiene gitt i Tabell 5-1. For situasjon 1 er avstanden fra radar til jammer, R_{ja} , satt til 2000m, mens den i

situasjon 2 er satt lik avstanden ut til objektet som observeres, R_{bt} . Figurene illustrerer hvor mye sterkere effekt en radar må ha i forhold til en jammer, for at radaren skal ha en rekkevidde på 50, 400 eller 3000m:



Figur 5-7: Forholdet mellom effekten til radar og jammer som funksjon av atmosfæredempning. Figuren forutsetter en god jammer som treffer radaren med halvparten av sin energi, $B_{jd}/B_i=2$. Figur for $B_{jd}/B_i=200$ fås ved å dividere verdiene på y-aksen med 100

For situasjon 1, der jammeren står 2000m fra radaren, ser vi at radaren får bedret motstandsdyktighet mot jamming når atmosfæredempningen øker. I vår situasjon gjelder dette så lenge trusslene er nærmere enn 1000m. Siden høy atmosfæredempning her er fordelaktig, vil frekvensen 60 GHz komme bedre ut enn de andre frekvensene vi har valgt: 5, 30, 100GHz (Se Tabell 5-2 for dempningen til disse frekvensene).

Når radaren i situasjon 1 utsettes for jamming, vil radaren fremdeles ha en viss rekkevidde. Dersom vi antar at jammer og radar har tilnærmet samme effekt, ser vi at radaren har 50m rekkevidde dersom atmosfæredempningen er over 7.7dB/km. En såpass høy atmosfæredempning vil man ikke ha for frekvensene 5 og 30GHz. I godt vær vil heller ikke frekvensen 100GHz ha denne dempningen, og av de frekvensene vi har studert, er det bare frekvensen 60GHz som vil strekke til. For å oppnå en rekkevidde på 400m, må radaren ha en effekt som er 120 000 ganger så høy som jammerens ved bruk av frekvensen 5GHz, og 1400 ganger så høy ved bruk av frekvensen 60GHz.

For situasjon 2, der jammeren befinner seg på trusselen, vil radarsignalet bevege seg dobbelt så langt som jammesignalet. Dette betyr at høy atmosfæredempning vil være uheldig for radaren. Så lenge avstanden er under 400m, dempes signalet imidlertid lite av atmosfæren, og kravet til radarens effekt varierer lite med hvilken frekvens som benyttes.

For situasjon 2 vil jammeren antagelig være effektiv for alle rekkevidder vi studerer. Selv i tilfeller der en mindre andel av jammerens energi påvirker radaren (en tohundredel), må radaren ha en effekt som er mye høyere enn jammerens (460 ganger så høy) dersom vi ønsker en

rekkevidde på 50 m. Dersom det blir vanlig å utruste et missil med jammer, bør man vurdere en mer avansert sensor enn den som er skissert her. Sensoren bør være i stand til å tolke signaler i jammestøy sterkere enn $J/S=6\text{dB}$. En mulighet kan være å kombinere radar med andre sensortyper.

Vi avslutter avsnittet om jamming med en tabell som angir radarens rekkevidde dersom jammeren enten har samme effekt som jammeren eller en effekt som er 100 ganger jammerens.

	Radarens effekt P_t i forhold til jammerens effekt P_{ja}	Vær	Frekvens [GHz]			
			5	30	60	100
Situasjon 1	$P_t = P_{ja}$	Godt vær	22	22	110	23
		Regn	22	39	202	81
	$P_t = 100 P_{ja}$	Godt vær	68	69	264	71
		Regn	69	116	384	213
Situasjon 2	$P_t = P_{ja}$	Godt vær	0.2	0.2	0.2	0.2
		Regn	0.2	0.2	0.2	0.2
	$P_t = 100 P_{ja}$	Godt vær	2	2	2	2
		Regn	2	2	2	2

Tabell 5-4: Radarens rekkevidde i meter når den utsettes for jamming. Det antas at halvparten av jammerens energi påvirker radaren

Tabellen viser at radarens rekkevidde er kort når jammeren befinner seg på 2000m hold, og at rekkevidden varierer lite med værforhold. Når radar og jammer har lik effekt, er det bare en radar med frekvensen 60GHz som har rekkevidde utover 50m. Dersom radaren har en del høyere effekt enn jammeren, eller dersom det bare er en liten andel av jammerens energi som treffer radarens frekvenser, får også de andre frekvensene rekkevidde utover 50m.

Dersom jammeren er plassert på missilet, blir radarens rekkevidde tilnærmet null. Resultatet blir det samme for alle frekvenser og værforhold. Selv når vi tar hensyn til at en radar på et kjøretøy vil ha større effekt enn en jammer som befinner seg på et lite missil, ser vi at rekkevidden blir forsvinnende liten.

Konklusjonene blir altså som tidligere. Rekkevidde på 50m er mulig når jammeren er på 2000 meters hold, men blir ytterst utfordrende når jammeren følger trusselen.

5.3 Radars entydighet

Dersom man ønsker entydighet når radaren måler avstand og hastighet til en innkommende trussel, fås en begrensning på hvor hyppig radaren kan sende pulser. I avsnitt 4.3 oppga vi følgende krav på pulsfrekvensen f_p :

$$f_p < \frac{c}{2R_{\max}}, \quad \text{Entydig avstandsmåling} \quad (5-5)$$

$$f_p > \frac{4v_{\max}}{\lambda} \quad \text{Entydig hastighetsmåling} \quad (5-6)$$

I uttrykkene angir R_{\max} radarens rekkevidde, v_{\max} trusselens maksimale hastighet, λ radarens

bølgelengde og c lysets hastighet.

Fra kravet til entydig avstandsmåling får vi:

Radarens rekkevidde [m]	50	400	3000
Krav til pulsfrekvens	$f < 3$ MHz	$f < 0.375$ MHz	$f < 0.05$ MHz

Tabell 5-5: Krav på radarens pulsfrekvens som følger fra krav til entydig avstandsmåling. Resultatene følger fra ligning (5-5)

Fra krav til entydig hastighetsmåling får vi:

Radarens frekvens [GHz]	5	30	60	100
Krav til pulsfrekvens (Trusselens hastighet under 600m/s)	$f > 0.040$ MHz	$f > 0.24$ MHz	$f > 0.48$ MHz	$f > 0.80$ MHz
Krav til pulsfrekvens (Trusselens hastighet under 2000m/s)	$f > 0.13$ MHz	$f > 0.80$ MHz	$f > 1.60$ MHz	$f > 2.67$ MHz

Tabell 5-6: Krav på radarens pulsfrekvens som følger fra krav til entydig hastighetsmåling. Resultatene følger fra ligning (5-6)

Vi ser fra tabellene at måling av entydig hastighet krever hyppige pulser, mens måling av entydig avstand krever sjeldne pulser. De to kravene kan derfor være vanskelig å oppfylle samtidig. Det finnes imidlertid teknikker som kan løse ut flertydigheter i avstands- og hastighetsmålinger. Når slike teknikker benyttes, kan vi slakke litt på kravene i Tabell 5-5 og Tabell 5-6, og det kan bli mulig å få samtidige, entydige målinger.

5.4 Radars oppløsning

Et APS-system kan av og til bli utsatt for mer enn én trussel, og systemet må dimensjoneres deretter. Siden det imidlertid ikke er mulig å konstruere et tilstrekkelig effektivt våpen uten å la det få en viss størrelse, må man godta at antall våpendeler (effektorer) blir lavt. Vanligvis begrenser man seg derfor til å kreve at APS-systemer skal kunne håndtere 2 relativt samtidige trusler. APS-systemets sensor må med et slikt krav kunne skille to objekter som ligger tett, og som har tilnærmet samme hastighet. For å konkretisere dette, setter vi i dette avsnittet følgende krav til sensoren:

- Sensoren skal klare å skille to objekter som sideveis befinner seg mer enn 1 meter fra hverandre (Målt normalt på trusselens fartsretning)
- Sensoren skal klare å skille to objekter som følger etter hverandre med mer enn 10 meters avstand
- Sensoren skal klare å skille to objekter som har en hastighetsforskjell på mer enn 10m/s

En nedre grense for kravet over, er naturligvis den minste avstanden som kan skille to missiler, og som er slik at turbulens etc ikke umuliggjør missilenes flukt.

Med kravene på oppløsning i side, dybde og hastighet, kan vi beregne krav til radarens frekvens, båndbredde og signalets varighet.

Oppløsning sideveis

Sensorens oppløsning normalt på trusselens fartsretning er gitt av ligning (4-21). Denne

ligningen angir imidlertid oppløsning i vinkel og ikke i antall meter. Når trusselen befinner seg i avstanden R fra sensoren, er sammenhengen mellom vinkeloppløsning $\Delta\alpha$ og oppløsning i meter Δx gitt av:

$$\Delta\alpha = 2\arctan(\Delta x/2R) \quad (5-7)$$

Når ligning (5-7) kombineres med ligning (4-21) får vi:

$$\Delta x_{krav} > \Delta x = 2R \tan \frac{c}{2fL_{eff}} \quad \left| \begin{array}{l} L_{eff}, \Delta x_{krav} > 0 \\ \Rightarrow \end{array} \right. \quad f > \frac{c}{2L_{eff} \operatorname{atan} \frac{\Delta x_{krav}}{2R}} \quad (5-8)$$

Kravet til oppløsning sideveis Δx_{krav} , kan nå benyttes til å gi krav til radarens frekvens f . For verdiene gitt av eksempelet i Tabell 5-1 fås:

Verdier benyttet	Missil	Pilammunisjon
Maksimal hastighet [m/s]	600	2000
Bekjempelsesavstand [m]	10	30
Effektors hastighet [m/s]	200	200
Avstand til trussel når effektor skytes ut [m]	$R = 40$	$R = 330$
Senderantennens effektive lengde [m]	$L_{eff} = 0.25$	$L_{eff} = 0.25$
Lysets hastighet [m/s]	$c = 3 \cdot 10^8$	$c = 3 \cdot 10^8$
Krav til sideveis oppløsning [m]	$\Delta x_{krav} = 1$	$\Delta x_{krav} = 1$
Krav til frekvens [GHz]	$f > 50$	$f > 400$

Tabell 5-7: *Krav til frekvens for APS-systemets radar når radaren skal detektere et missil eller en pil*

For å få den ønskede oppløsningen, ser vi at frekvensen bør velges over ca 50GHz for missiltrusselen og over ca 400GHz når trussel er pilammunisjon eller HVM.

Tidligere i kapitlet har vi studert frekvensene 5, 30, 60 og 100GHz. Oppløsningen til disse frekvensene blir:

Frekvens [GHz]	Oppløsning		
	Vinkel	Missil (Avstand 40m)	Pilammunisjon (Avstand 330m)
5	14°	9.6m	80 m
30	2.3°	1.6 m	13 m
60	1.1°	0.8 m	6.6 m
100	0.7°	0.5 m	4.0 m

Tabell 5-8: *Radarens oppløsning normalt på trusselens fartsretning*

Oppløsningen reduseres tydelig når enten radarfrekvensen minker eller observasjonsavstanden øker.

Oppløsning avstand

Når vi krever en oppløsning i avstand på 10 meter, gir ligning (4-23):

$$B > \frac{c}{20} = 15\text{MHz} \quad (5-9)$$

Vi ser altså at kravet til oppløsning i avstand innebærer at radarens båndbredde må være større enn 15MHz.

Oppløsning hastighet

Når vi krever en oppløsning i hastighet på Δv_{krav} , gir ligning (4-25):

$$\tau > \frac{c}{2f\Delta v_{krav}} \quad (5-10)$$

Kravet til oppløsningen i hastighet gir altså et krav til signalets varighet (observasjonstid). Vi får for noen utvalgte frekvenser:

Frekvens [GHz]	5	30	50	60	100	400
Krav til pulsens varighet [ms]	3.00	0.50	0.30	0.25	0.15	0.04

Tabell 5-9: *Krav til radarsignalets varighet når oppløsning i hastighet skal være bedre enn 10m/s*

Når en radar høyner frekvensen, er det lettere å få en god oppløsning i hastighetsmålingen. Siden radaren vi studerer i et APS-system har opp til 0.1s til disposisjon, vil imidlertid alle frekvensene i Tabell 5-9 være egnet til målfølgning. En deteksjonsradar vil imidlertid få knapt med tid. Dette kan ses fra Tabell 5-10:

Frekvens [GHz]	5	30	50	60	100	394
Krav til målingens varighet [ms]	3.00	0.50	0.30	0.25	0.15	0.04
Antall målinger mulig i løpet av 0.1s	33	200	333	400	666	2666
Antall målinger nødvendig for å dekke et observasjonsområde på 360°x45°	80	3000	7000	11000	31000	480 000

Tabell 5-10: *Sammenligning av antall målinger radaren kan utføre i løpet av 0.1s og antall ganger antennelobene må flyttes for å dekke 360° i asimut og 45° i elevasjon. Det kreves at radaren skal ha en hastighetsoppløsning på 10m/s*

Med 0.1s til disposisjon og et krav til hastighetsoppløsning på 10m/s vil en deteksjonsradar ha for liten tid til å kunne dekke et område på 360° i asimut og 45° i elevasjon.

5.5 Radars presisjon

Vi ønsker i dette avsnittet å se radarens presisjon opp mot de typiske kravene for APS-systemer. Vi repeterer først kravene vi antydte for de tre APS-systemene i kapittel 3:

Prinsipp	Presisjon		
	Normalt på trussel	Langs trussel	Radiell hastighet
Direktetreff	$\sigma_x = 0.04$ m	Ingen krav	Ingen krav
Fragmenterende granat skutt horisontalt	$\sigma_x = 0.07$ m	$\sigma_z = 0.40$ m	$\sigma_{vz} = 10$ m/s
Fragmenterende kassett skutt skrått nedover	$\sigma_x = 0.05$ m	$\sigma_z = 0.15$ m	$\sigma_{vz} = 10$ m/s

Tabell 5-11: *Antydning av presisjonskrav til APS-systemers sensor. Det er antatt at sensordelen bidrar like mye til APS-systemets totale usikkerhet som det totale bidraget fra systemets regnealgoritme og effektor*

Kravene til et APS-system som skal virke mot pilammunisjon, vil bli strengere enn kravene gitt i Tabell 5-11.

APS-systemets sensor har en rekke usikkerhetsbidrag. Feilbudsjettet (kravene) gitt i Tabell 5-11, må derfor fordeles på:

- Sensorens usikkerhet som skyldes termisk støy
- Sensorens usikkerhet som skyldes at målet er sammensatt av mange små reflektorer ("glint"-usikkerhet)
- Sensorens usikkerhet fra øvrige usikkerhetskilder som for eksempel atmosfære og ustabil/unøyaktig montering av antenne

Usikkerheten som skyldes termisk støy, skal vi studere nærmere. I de tre neste delkapitlene kommer vi til å studere hvordan signalstøy påvirker usikkerhet normalt på trusselens fartsretning, usikkerhet i avstand og usikkerhet i radiell hastighet.

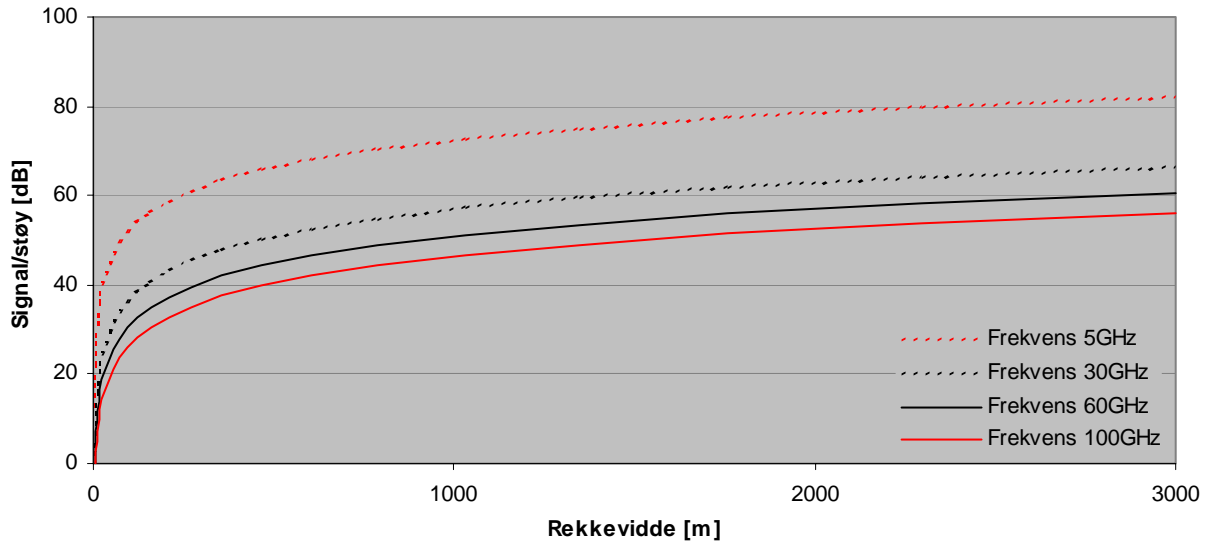
Usikkerhet i form av såkalt "glint"-usikkerhet og usikkerhet fra "andre kilder" kommer vi ikke til å behandle videre. Ifølge (3) ligger imidlertid "glint"-usikkerheten typisk på en tredjedel til en sjettedel av målets størrelse, og med en trusseldiameter på 13cm fås her et feilbidrag på mellom 2 og 4cm . Feil på grunn atmosfære kan ifølge (5) typisk komme opp i ca 3cm. Denne feilkilden vil imidlertid avhenge av avstanden, og problemet vil bli lite når avstanden er kort. "Glint"-usikkerhet og usikkerhet fra andre kilder gir altså betydelige bidrag til APS-systemets feilbudsjett.

5.5.1.1 Usikkerhet i posisjon som følge av signalstøy - normalt på trusselens fartsretning

Fra ligning (4-26) i kapittel 4.5 får vi for usikkerheten normalt på trusselens fartsretning:

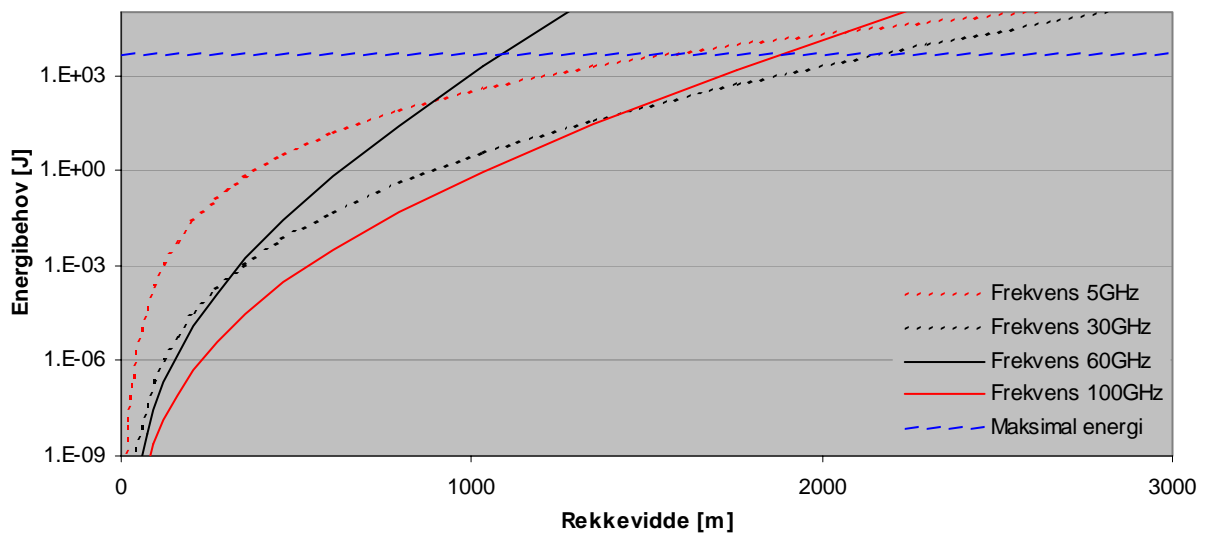
$$\sigma_x = R \tan \sigma_{asimut} = R \tan \left(\frac{1}{2} \frac{\lambda \sqrt{2}}{L_{asimut} \sqrt{S/N}} \right) \quad (5-11)$$

Fra ligning (5-11) ser vi at usikkerheten er bestemt av radarens bølgelengde (λ), avstanden ut til trusselen (R), antennens effektive lengde L_{asimut} og radarens signal-/støyforhold (S/N). Vi ser også at presisjonen forbedres med økende signal-/støyforhold. Med kjent krav til presisjon, kjent bølgelengde og kjent antenndimensjon, får vi fra ligning (5-11) et krav til signal-/støyforholdet som funksjon av radarens rekkevidde. Denne sammenhengen er plottet i Figur 5-8 under. I figuren har vi satt $\sigma_x=4\text{cm}$, $L_{asimut}=25\text{cm}$ og frekvens lik 5, 30, 60 eller 100GHz.



Figur 5-8: Signal-/støyforhold som gir at støy bidrar med en usikkerhet på 4cm normalt på trusselens fartsretning (Antennen har en effektiv diameter på 25cm)

Figuren angir altså krav til radarens signal-/støyforhold. Ved å benytte ligning (4-10) kan vi, for en målfølgingsradar, oversette et krav på signal-/støyforhold til et krav på radarens energibehov. I Figur 5-9 er dette gjort ved å benytte verdiene fra eksempelet i Tabell 5-1:



Figur 5-9: Radarens energibehov som gir at støy bidrar med en usikkerhet på 4cm normalt på trusselens fartsretning (Antennen har en effektiv diameter på 25cm)

Fra figuren ser vi at energibehovet for korte avstander er høyest for frekvensen 5GHz og lavest for frekvensen 100GHz. For avstander som er aktuelle for APS-systemer, ser vi at alle frekvenser gir akseptabel presisjon, selv for relativt lave energinivåer.

Mer presist får vi resultatene gitt i Tabell 5-12 og Tabell 5-13:

Avstand	Energi	Frekvens			
		5	30	60	100
50	0.01J	0.09	<0.01	<0.01	<0.01
	5kJ	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
400	0.01J	46	2.1	3	0.37
	5kJ	0.07	<0.01	<0.01	<0.01

Tabell 5-12: Usikkerhet i posisjon normalt på trusselens fartsretning som skyldes termisk støy. Usikkerheten er gitt i cm. Radaren sender ut en energi på enten 0.01J eller 5kJ

Energi	Frekvens			
	5	30	60	100
0.01J	180	480	420	680
5kJ	1600	2200	1100	1900

Tabell 5-13: Avstand i meter der radarens usikkerhet, som følge av termisk støy, er lik 4cm. Radaren sender ut en energi på enten 0.01J eller 5kJ

Vi har i tabellene utført beregningene for to energinivåer. Det lave energinivået tilsvarer en radar med effekt 1W og observasjonstid 0.01s, mens det høye energinivået tilsvarer en effekt på 50kW og en observasjonstid på 0.1s. Tabellene viser at:

- Ved en rekkevidde på 50m er alle usikkerhetsbidragene under 1cm. For de vurderte frekvensene vil det derfor være tilstrekkelig med en effekt på 1W og en integrasjonstid på 0.01s.
- Ved en rekkevidde på 400m holder usikkerhetsbidragene seg fremdeles under 4cm, dersom vi velger en effekt på 1W, en integrasjonstid på 0.01s og radarfrekvensen til enten 30, 60 eller 100GHz
- Ingen av frekvensene vil gi et usikkerhetsbidrag på mindre enn 4cm, dersom rekkevidden skal være 3000m. En slik presisjon vil enten kreve energi utover 5000J eller en større radarantenne.

5.5.1.2 Usikkerhet i avstand som følge av signalstøy

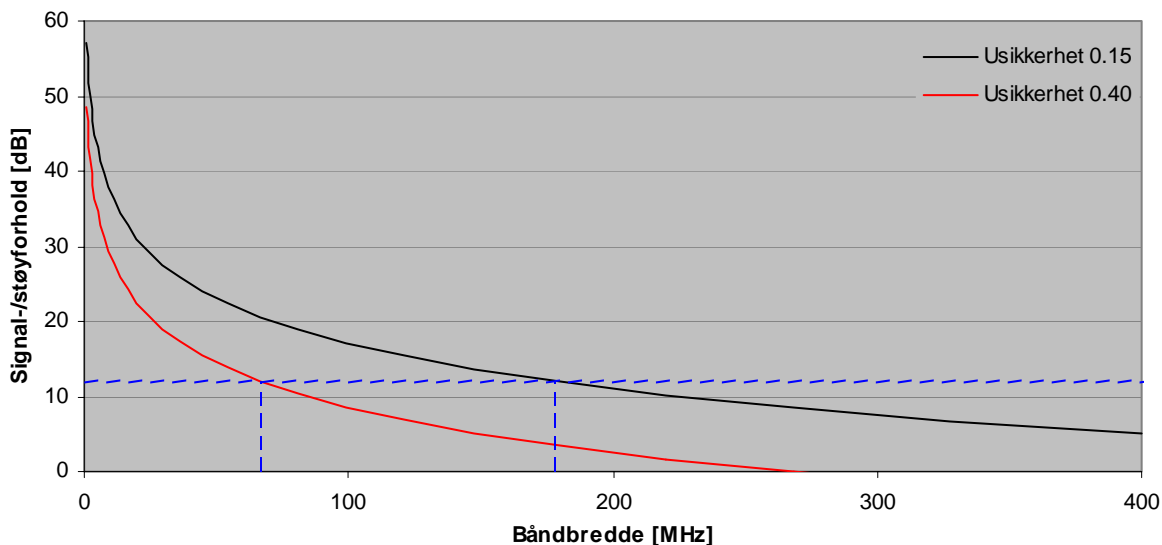
Usikkerheten i avstand er gitt av ligning (4-28) og gjengis her:

$$\sigma_{avstand} = \frac{1}{4} \frac{c\sqrt{2}}{B\sqrt{S/N}} \quad (5-12)$$

Vi ser at usikkerheten er bestemt av radarens båndbredde B og av radarens signal-/støyforhold S/N . Når vi løser ligning (5-12) med hensyn på signal-/støyforholdet, får vi:

$$S/N = \left(\frac{c}{2\sqrt{2}B\sigma_{avstand}} \right)^2 \quad (5-13)$$

Hvordan kravet til radarens signal-/støyforhold synker med radarens båndbredde er i Figur 5-10 illustrert for avstandsusikkerheter på 15cm og 40cm (se Tabell 5-11):



Figur 5-10: Signal-/støyforhold som funksjon av radarens båndbredde. De to kurvene angir krav til signal-/støyforhold når radarens usikkerhet i avstand (som følge av støy) ikke skal overstige henholdsvis 15 og 40cm. Den stiplede blå linjen angir et signal-/støyforhold på 12dB

Vi ser at kravet til signal-/støyforhold minker sterkt med radarens båndbredde og naturlig nok også med kravet til avstandssikkerhet.

Nå som vi har ligning (5-13), kan vi, ved å benytte verdiene i Tabell 5-1, oversette kravene til avstandssikkerhet og signal-/støyforhold (12dB) til et krav til båndbredde. Svaret som fås ved å lese av skjæringen mellom den stiplede blå linjen og de to kurvene i Figur 5-10, gir at 15 og 40cm i avstandssikkerhet tilsvarer et båndbreddekrav på henholdsvis 70 og 180MHz.

Siden en radar kan bedre sitt signal-/støyforhold ved å øke energien som sendes ut, er det mulig å få god presisjon også for båndbredder lavere enn 180MHz. Dette har vi illustrert i Tabell 5-14 og Tabell 5-15:

Avstand [m]	Båndbredde [MHz]	Frekvens [GHz]			
		5	30	60	100
50	5	2.3E-06	7.1E-08	2.8E-08	7.6E-09
	67	1.3E-08	4.0E-10	1.6E-10	4.3E-11
	178	1.8E-09	5.7E-11	2.2E-11	6.1E-12
400	5	9.4E-03	6.8E-04	5.7E-03	2.4E-04
	67	5.3E-05	3.8E-06	3.2E-05	1.3E-06
	178	7.6E-06	5.4E-07	4.6E-06	1.9E-07
3000	5	3.2E+01	1.1E+03	8.0E+13	2.5E+06
	67	1.8E-01	6.2E+00	4.5E+11	1.4E+04
	178	2.6E-02	8.8E-01	6.4E+10	2.0E+03

Tabell 5-14: Energi som kreves for at radarens avstandssikkerhet som følge av støy ikke skal overstige 15cm. Tall markert i rødt angir energinivåer som vanskelig lar seg realisere. (Vi har krevd at signal-/støyforholdet minimum skal være 12dB)

Avstand [m]	Båndbredde [MHz]	Frekvens [GHz]			
		5	30	60	100
50	5	3.2E-07	1.0E-08	3.9E-09	1.1E-09
	67	1.8E-09	5.7E-11	2.2E-11	6.1E-12
	178	1.8E-09	5.7E-11	2.2E-11	6.1E-12
400	5	1.3E-03	9.5E-05	8.0E-04	3.3E-05
	67	7.6E-06	5.4E-07	4.6E-06	1.9E-07
	178	7.6E-06	5.4E-07	4.6E-06	1.9E-07
3000	5	4.5E+00	1.6E+02	1.1E+13	3.5E+05
	67	2.6E-02	8.8E-01	6.4E+10	2.0E+03
	178	2.6E-02	8.8E-01	6.4E+10	2.0E+03

Tabell 5-15: Energi som kreves for at radarens avstandsusikkerhet som følge av støy ikke skal overstige 40cm. Tall markert i rødt angir energinivåer som vanskelig lar seg realisere (Vi har krevd at signal-/støyforholdet minimum skal være 12dB)

Verdiene i tabellen baserer seg på eksempelet beskrevet av Tabell 5-1.

Fra tabellene ser vi at:

- For en rekkevidde på 50m oppnås en avstandsusikkerhet på 15cm med en båndbredde på 5MHz. Radarfrekvensen kan velges fritt dersom radaren har en effekt på 1W og en integrasjonstid på 0.01s.
- For en rekkevidde på 400m oppnås en avstandsusikkerhet på 15cm med en båndbredde på 5MHz. Radarfrekvensen kan velges fritt dersom radaren har en effekt på 1W og en integrasjonstid på 0.01s.
- For en rekkevidde på 3000m oppnås en avstandsusikkerhet på 15cm enklest med en radarfrekvens på 5GHz. Med en slik frekvens kan det være tilstrekkelig med 5MHz båndbredde. En radarfrekvens på 30GHz kan også benyttes, men da må båndbredde eller energiforbruk økes.

5.5.1.3 Usikkerhet i hastighet som følge av radarstøy

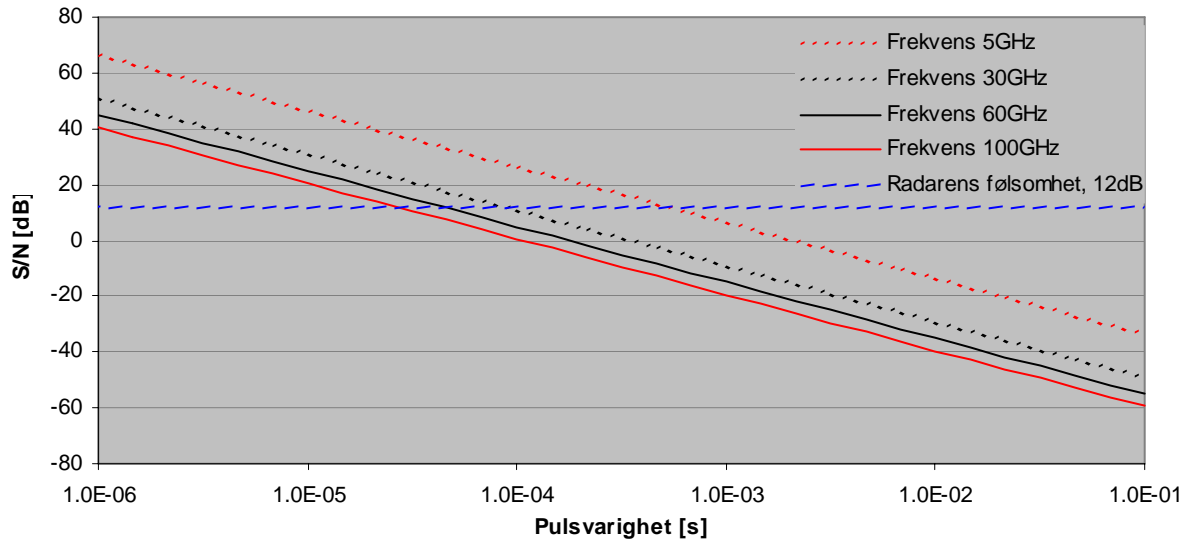
Usikkerheten i radiell hastighet er gitt av ligning (4-30) og gjengis her:

$$\sigma_{v_r} = \frac{1}{4} \frac{\lambda \sqrt{2}}{\tau \sqrt{S/N}} \quad (5-14)$$

Vi ser at usikkerheten er bestemt av radarens bølgelengde (λ), pulsens varighet (τ) og signal-/støyforholdet (S/N). Når vi løser ligning (5-14) med hensyn på signal-/støyforholdet, får vi:

$$S/N = \left(\frac{1}{4} \frac{c \sqrt{2}}{\tau f \sigma_{v_r}} \right)^2 \quad (5-15)$$

Vi ser at kravet til radarens signal-/støyforhold synker med pulsens varighet og radarens frekvens. I Figur 5-11 har vi illustrert sammenhengen for et eksempel der hastighetens usikkerhet er satt til 10m/s (se Tabell 5-11):



Figur 5-11: Signal-/støyforhold som funksjon av radarpulsens varighet. Den stiplede blå linjen angir radarens følsomhet, som er satt til 12dB. Det antas en usikkerhet i hastighet på 10m/s

I vårt regneeksempel (Tabell 5-1) har vi antatt at radaren trenger et signal-/støyforhold på 12dB for å få en akseptabel falsk-alarmerate. Denne nedre grensen på signal-/støyforholdet er tegnet inn i Figur 5-11. Fra skjæringen mellom den stiplede blå linjen og kurvene gitt av ligning (5-15), finner vi følgende krav på radarsignalet varighet:

Frekvens [GHz]	5	30	60	100
Radarsignalets varighet [ms]	0.5	0.088	0.044	0.027

Tabell 5-16: Krav til radarsignalet varighet slik at termisk støy skal gi et usikkerhetsbidrag på 10m/s

Dersom signalet varighet økes utover verdiene i Tabell 5-16 eller dersom radarens energiforbruk økes, vil dette gi en hastighetsusikkerhet, som følge av signalstøy, lavere enn 10m/s.

6 OPPSUMMERING

I kapittel 5 har vi vurdert radarer med rekkevidde 50, 400 og 3000m. Disse rekkeviddene skulle representere tre forskjellige behov:

1. Deteksjon og målfølging av et missil som skal bekjempes 10m fra radaren
2. Deteksjon og målfølging av pilammunisjon som skal bekjempes 30m fra radaren
3. Deteksjon og målfølging av trusler som er nærmere enn 3000m fra radaren

For hver av rekkeviddene har vi vurdert en rekke egenskaper ved radarer. De viktigste konklusjonene gjengis her i kortform.

6.1 Minsteavstand

Et APS-system trenger en viss tid for å reagere og vil derfor ikke beskytte mot trusler som avfyres på kort hold. Den minste avfyringsavstanden der APS-systemet fungerer, kalles APS-systemets minsteavstand. Grovt kan vi si at APS-systemets minsteavstand dannes av tre bidrag:

1. Avstanden ut til der trussel skal bekjempes
2. Avstanden trusselen flyr i løpet av den tiden APS-systemet observerer og forbereder utskytning av effektor⁴
3. Avstanden trusselen flyr i løpet av den tiden APS-systemets effektor bruker for å fly ut til bekjempelsesavstanden

Bidrag 1 og 3 blir raskt store. Med våre antagelser utgjorde disse bidragene opp til 40m når trusselen var et missil, og 330m når trusselen var HVM eller pilammunisjon.

Bidrag 2 bestemmes av hvilken sensortype som velges. Hurtige radarer som klarer seg med en observasjonstid ned mot 0.01s, påvirker minsteavstanden i liten grad. Med våre antagelser ble bidraget da på 6m for missiltrusselen og 20m for en HVM-liknende trussel. Langsommere radarer som behøver opp til 0.2s til deteksjon og målfølging, gir vesentlig større bidrag til minsteavstanden. Bidraget økte da til 120m for en missiltrussel og til 400m for HVM-trusselen.

Med litt varierende hastigheter på truslene og litt varierende observasjonstider for APS-systemets sensor, fant vi at et APS-system som skal bekjempe missiler 10m fra kjøretøyet, vil få en minsteavstand på mellom 30 og 100m. Et APS-system som skal bekjempe HVM-trusler 30m fra kjøretøyet, vil få en minsteavstand på mellom 250 og 600m.

6.2 Rekkevidde uten jamming

Vi har funnet at så vel en målfølgingsradar som en deteksjonsradar vil oppnå rekkevidder opp til 400m. Radarene vil nå ut til denne avstandene selv med lav effekt. Alle frekvensene vi har studert, 5, 30, 60 og 100GHz, kan benyttes.

⁴ Effektor = APS-systemets våpendel

Målfølging på 3000 meters hold var mulig med frekvensene 5, 30 og 100GHz. Signalstyrken til signalet på 100Hz, varierte imidlertid sterkt med nedbørsmengden. Deteksjon på 3000 meter var enklest med frekvensen 5GHz. Frekvensen 30GHz var velegnet i godt vær, men ble dempet vel mye i regn.

6.3 Rekkevidde ved jamming

Vi studerte et eksempel med en relativt god jammer. Dersom denne jammeren hadde samme effekt som radaren den skulle jamme, og avstanden mellom dem var konstant lik 2000m, ble jammingen effektiv mot alle frekvenser unntatt 60GHz. Med en frekvens på 60GHz hadde radaren en rekkevidde på ca 100m, og den var fremdeles egnet i et APS-systemet. Dersom jammeren ikke befant seg i fast avstand fra radaren, men ble plassert på trusselen, ble jammingen særdeles effektiv, og ingen av de vurderte frekvensene ga brukbar rekkevidde.

6.4 Entydighet

Dersom vi krever at radaren skal gi entydig måling av posisjon og hastighet, vil dette legge begrensninger på hvor ofte radaren kan sende radarpulser. Entydig måling av høye hastigheter krever hyppige radarpulser, mens entydig måling av store avstander krever sjeldne pulser.

Eksemplene vi har gitt i rapporten tyder på at pulsfrekvensen kan velges i et intervall fra 0.04 til 3MHz. En pulsfrekvens på 0.04MHz ga entydig avstandsmåling for avstander opp til 3800m. Entydig hastighetsmåling oppnådde vi da for missiler dersom radarfrekvensen var under 5Ghz, og for HVM-missiler dersom radarfrekvensen var under 1.5GHz. En pulsfrekvens på 3MHz ga entydig avstandsmåling for avstander opp til 50m. Entydig hastighetsmåling oppnådde vi da for missiler dersom radarfrekvensen var under 380Ghz, og for HVM-missiler dersom radarfrekvensen var under 110GHz.

Det finnes teknikker som kan løse ut flertydigheter, slik at kravene til pulsfrekvens kan gjøres noe mildere enn antydnet ovenfor. Vi mener derfor at APS-systemer som virker på korte avstander, ikke vil ha vesentlige problemer med å oppnå entydige målinger.

6.5 Oppløsning

To objekter som ligger svært tett, vil radaren detektere som ett. Grensen for hvor tett objekter kan ligge før radaren får problemer, angis av radarens oppløsning. Radaren har en gitt oppløsning i så vel vinkel, avstand som hastighet.

Når vi gir et krav til vinkeloppløsning, innebærer det et krav til radarens frekvens. I kapittel 5 fant vi at radarens frekvens burde ligge over 57GHz for en standard missiltrussel, og over 470GHz for et HVM-missil. Når disse kravene sammenlignes med kravene som fulgte fra entydighet, ser vi at det er utfordrende å designe en radar som skal observere et HVM-missil på 400 meters hold. En slik radar vil ha problemer med å måle entydig hastighet samtidig som den gir posisjonen med god oppløsning.

Når vi gir et krav til oppløsning i avstand, innebærer det et krav til båndbredden. Mer presist

fant vi i kapittel 5 at et krav til oppløsning på 10m, tilsvarte et krav til båndbredde på 15MHz. En båndbredde på 15MHz tilfredsstilles selv for relativt rimelige radarer.

Når vi gir et krav til oppløsning i hastighet, innebærer det et krav til radarpulsens varighet. Mer presist fant vi i kapittel 5 at et krav til oppløsning på 10m/s, tilsvarte en pulsvarighet på 3ms når radarens frekvens var 5GHz. Dersom vi krever minst 10 målepunkter for å kunne predicere trusselens videre bane, betyr dette at radaren trenger en tid på minimum 0.03s. For de to APS-systemene vi har vurdert i kapittel 5, er dette et realistisk krav. Radaren i APS-systemet designet for missiltrusselen hadde ca 0.02s tilgjengelig, slik at vi for dette systemet enten må øke systemets minsteavstanden, øke radarens frekvens utover 5GHz, øke motmiddelets hastighet, redusere antall målepunkter eller la systemet virke mot missiler langsommere enn 330m/s. Radaren i APS-systemet designet for HVM-trusselen hadde ca 0.04s til disposisjon og kravet på 0.03s er oppfylt.

6.6 Presisjon

Motmiddelet til et APS-system vil ikke treffe siktepunktet eksakt. Dette skyldes en rekke forskjellige usikkerhetsbidrag:

- 1 Sensorens usikkerhet
 - 1a. fra termisk støy
 - 1b. som skyldes at målet er sammensatt av mange små reflektorer ("glint"-usikkerhet)
 - 1c. Øvrige usikkerhetskilder som for eksempel atmosfære og ustabil/unøyaktig montering av antenne
- 2 Effektorens og prosessorens usikkerhet

Størrelsen på disse usikkerhetskildene er antydnet i Tabell 6-1:

Usikkerhetskilder		Anslag	Kommentar
1a	fra termisk støy	Varyerer med radarens signal-/støyforhold	Beregnet i kapittel 5.5, gjengitt i teksten under
1b	fra såkalt "glint"-usikkerhet	ca 2-4cm	Anslått fra grov formel hentet fra (3)
1c	fra atmosfære mm	centimeternivå (bidraget blir lite når avstanden er kort)	Påstand hentet fra (5)
2	fra APS-systemets effektor og prosessor	Avhenger bla.a. av type effektor. (Kan være utfordrende å oppnå 5cm, som kan være typisk krav)	

Tabell 6-1: Antydning av APS-systemets forskjellige feilkilder

I kapittel 5 har vi gjort detaljerte beregninger av usikkerhet som skyldes termisk støy. Vi fant der at posisjonsusikkerheten for små avstander, avstander aktuelle for APS-systemer, ble minst for høye frekvenser. Ettersom avstanden økte ble de lave frekvensene stadig gunstigere. Mer presist fant vi i kapittel 5 at frekvenser på 5 og 30GHz ble gunstigere enn 100GHz, når avstanden ble større enn ca 2km. Når vi i kapittel 5 krevde at støybidraget til posisjonsusikkerheten skulle være lavere enn 4cm, fant vi at alle de vurderte frekvensene 5, 30, 60 og 100GHz, kunne benyttes for avstander opp til 400m. Når rekkevidden ble økt til 3000m, var det

imidlertid ingen av frekvensene, som ga den ønskede presisjonen.

Den termiske støyen bidrar også til avstandsusikkerheten. Våre beregninger tyder imidlertid på at dette bidraget er akseptabelt for avstander opp til 400m. Selv med lav effekt, kort observasjonstid og en båndbredde på 5MHz lå bidraget under 15cm.

Bidraget fra termisk støy til hastighetsusikkerhet ble relativt lavt. Med en observasjonstid på 1ms ble bidraget på mindre enn 10m/s. Observasjonstiden på 1ms er akseptabel siden alle APS-systemene vi skisserte i kapittel 5, hadde observasjonstider vesentlig lengre enn dette.

Presisjonskravene som settes for et APS-system er utfordrende. Eksempelene vi har vurdert i rapporten tyder imidlertid likevel på at en radar kan klare sensorkravene. Presisjonskravene er imidlertid såpass strenge at det antagelig vil bli vanskelig å benytte en rimelig kommersiell radar.

6.7 Eksempler på radarer

Selv om rekkevidde, presisjon etc setter krav til radaren, finnes det fremdeles en viss grad av valgfrihet. Vi avslutter denne oppsummeringen med å presentere en tabell som gir eksempler på noen radarer som kan benyttes i et APS-system (Beregningene er utført ved hjelp av de enkle formlene i rapporten – en nøyaktig beregning krever kunnskap om radarens bølgeform mm):

			Deteksjonsradar		Målfølgingsradar				
			400m	3000m	50m	50m	50m	400m	3000m
Valgte størrelser	Frekvens	[GHz]	5	5	5	30	60	30	30
	Båndbredde	[MHz]	5	5	5	15	15	15	15
	Pulsfrekvens	[MHz]	0.05	0.05	0.1	0.5	1	0.3	0.1
	Deteksjonstid	[ms]	0.13	1.3	1.0	1.0	1.0	1.0	10
	Total observasjonstid	[s]	0.01	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1
	Effekt	[W]	1	20	1	1	1	100	50000
Beregnete størrelser	Rekkevidde	[m]	800	3000	2400	1900	800	3000	12500
	Rekkevidde når jammer er 2000m fra radar	[m]	-	-	20	20	110	20	20
	Rekkevidde når jammer er på trussel	[m]	-	-	<1	<1	<1	<1	<1
	Entydighet i avstand	[m]	3000	3000	1500	300	150	500	1500
	Entydighet i hastighet	[m/s]	750	750	1500	1250	1250	750	250
	Oppløsning på tvers av trussels fartsretning	[m]	100	700	12	2	1	16	120
	Oppløsning langs fartsretning	[m]	30	30	30	10	10	10	10
	Oppløsning hastighet	[m/s]	230	23	3	0.5	0.3	0.5	0.1
	Presisjon på tvers av trussels fartsretning	[m]	4	130	<0.01	<0.01	<0.01	0.2	0.3
	Presisjon i trussels fartsretning	[m]	1	5	<0.01	<0.01	<0.01	0.1	0.02
Presisjon i hastighet	[m/s]	10	4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	

Tabell 6-2: Eksempel på radarer som kan benyttes i et APS-system som skal virke mot en standard missiltrussel. Beregningene baserer seg på verdiene gitt av Tabell 5-1. Anslaget for presisjon inkluderer bare usikkerhet fra termisk støy.

Vi ser for vårt eksempel i Tabell 5-1 at en radar med begrenset effekt og frekvens 5GHz, vil være i stand til å detektere en trussel på opp til 3000 meters avstand. Posisjonsangivelsen vil bli grov, men antagelig akseptabel. Primitive jammere på stor avstand vil ødelegge radarens signal, men dersom radaren er i stand til å detektere jammesignalet, vil radaren likevel kunne gi alarm.

Deteksjonsradarens største problem er antagelig dens dårlige oppløsning, og det er først på relativt kort hold at radaren vil kunne avgjøre om det kommer én eller flere trusler inn mot radaren.

Når en missiltrussel skal bekjempes på 10 meters avstand, bør en målfølgingsradar være i stand til å følge hver enkelt trussel de siste 50-100 meterne inn mot radaren. Tabell 6-2 gir tre eksempler på radarer til dette formålet. Radarenes presisjon er ok for disse avstandene. En målfølgingsradars problem ser først og fremst ut til å være jammeresistens og dernest dens evne til å skille forskjellige mål. For at radaren skal kunne skille missilene, kreves god oppløsning. Eksemplene i Tabell 6-2 antyder at oppløsningen blir god nok for en båndbredde på 15MHz og en radarfrekvens på 30GHz. Jammeresistens ser derimot ut til å være et større problem. Dersom en jammer er stasjonær og befinner seg langt fra radaren, vil en radarfrekvens på 60GHz gi tilstrekkelig god ytelse. Dersom jammeren imidlertid befinner seg på trusselen, ser det ut som om radarens sikt forsvinner fullstendig, uavhengig av radarfrekvens.

Når en HVM-trussel skal bekjempes på 30m avstand, bør en målfølgingsradar være i stand til å følge truslene siste 300-500 meterne inn mot radaren. Tabell 6-2 gir ett eksempel på en radar til dette formålet. Radaren vi har antydnet har muligens noe svak oppløsning.

Målfølging på 3000m avstand med en 30x30cms antenne, er utfordrende. For å få en akseptabel oppløsning ønsker vi en høy radarfrekvens. Et godt signal-/støyforhold krever imidlertid lav atmosfæredempning og dermed en lav radarfrekvens. Vi tvinges altså til å inngå et kompromiss og har i Tabell 6-2 valgt en frekvens på 30GHz. Med denne frekvensen fant vi en oppløsning og en presisjon på tvers av trusselens fartsretning på henholdsvis 120m og 30cm. På radarens maksimale avstand er dermed oppløsningen for lav til å kunne avgjøre om det kommer én eller flere trusler inn mot radaren.

7 KONKLUSJON

Når en radar benyttes i et APS-system, stilles det strenge krav blant annet til radarens tidsforbruk, presisjon og oppløsning. For å få vurdert disse og andre egenskaper ved radarer, har vi gjennomført tre delstudier. Den første studien gikk ut på å studere APS-systemer slik at vi kunne formulere krav til systemets presisjon og tidsforbruk. Den neste gikk ut på å sammenfatte sentral radarteori, slik at vi ved hjelp av enkle formler ble i stand til å beregne radarers omtrentlige ytelse, mens den siste besto i å sammenligne kravene vi antydte for APS-systemene med radarytelsen som vi nå kunne beregne.

Vi har i rapporten begrenset oss til å beskrive tre forskjellige APS-systemer. Felles for systemene er at de består av en sensor, en regneenhet (algoritme) og et våpensystem (effektor), som må dele det totale feilbudsjettet. Når vi antok at sensoren kunne benytte halvparten av det totale feilbudsjettet, antydte vi følgende grove krav til sensorens usikkerhet:

- Et APS-system som ønsker å bekjempe trusselen ved å treffe trusselen i front, må ha en sensor som kan angi posisjonen med en usikkerhet på ca 4cm (1σ). Kravene til måling av avstand og hastighet vil ikke begrense systemet
- Et APS-system som ønsker å bekjempe en trussel ved å sette av en fragmentskur foran trusselen, må ha en sensor som kan angi posisjonen med en usikkerhet på omkring 5-7cm. Avstanden må måles med en presisjon på 15-40cm og hastigheten med en presisjon på ca 10m/s.

Kravene som vi har antydte, er bare eksempler på krav. Dersom man klarer å minske ett feilbidrag, kan andre bidrag gjøres større. Sammenhengen mellom de forskjellige bidragene er imidlertid komplisert.

Vår intensjon med den radarteorien som presenteres i rapporten, er å gi en bakgrunn som er god nok til å forstå en radars begrensninger i et APS-system. Blant annet har vi angitt formler som er sentrale for rekkevidde, presisjon, jamming, entydighet og oppløsning. Formlene viser at radarens frekvens, båndbredde, observasjonstid, fysiske størrelse og effekt er sentrale for radarens ytelse. Hvorvidt radaren detekterer et mål, er naturligvis også avhengig av avstanden til målet, og av hvor mye signalet dempes i atmosfæren. Hvordan målet reflekterer radarsignalet, spiller også inn.

Rapportens siste del vurderer om radarens parametre kan velges slik at APS-systemets presisjonskrav blir oppfylt. Vi har ikke forsøkt å finne optimale verdier for radarparameterne, men har undersøkt om det finnes minst én radar som oppfyller kravene. Av denne grunn har vi holdt de fleste parameterne fast. Hovedsakelig er det radarens frekvens, båndbredde, effekt og observasjonstid som er variert. Ved hjelp av våre eksempler har vi kommet frem til følgende konklusjoner:

- Det er mulig for en radar å få akseptabel reaksjonstid. Våre eksempler antyder at et APS-system vil fungere mot missilrusler avfyrt på avstander over ca 50m. Når radaren trenger en observasjonstid fra 0.01 til 0.1s, utgjør dette mellom 5 og 20m av denne

avstanden. Et APS-system vil også kunne fungere mot HVM-lignende trusler med hastighet opp mot 2000m/s, dersom truslene avfyres på avstander over ca 400m. Observasjonstider fra 0.01 til 0.1s forårsaker i så fall et bidrag på mellom 20 og 200m. De største bidragene til systemets minsteavstand skyldes effektorens flyvetid ut til bekjempelsesavstander på enten 10 eller 30m.

- Det er mulig å lage en rimelig deteksjonsradar med god rekkevidde under de fleste værforhold. Missiler kan da detekteres på et par kilometers avstand med en radar som har frekvens 5GHz, båndbredde 5MHz og en effekt på bare 20W. Radaren vil detektere målet, men gi svak presisjon og oppløsning på denne lange avstanden. Manglende presisjon behøver ikke her å være noe stort problem. Det kan imidlertid være uheldig at oppløsningen er lav, slik at radaren ikke kan avgjøre hvor mange trusler som flyr inn mot radaren.
- For en missiltrussel er det mulig å lage målfølgingsradarer som fungerer på avstandene som er aktuelle for et APS-system. Oppløsningen som fås med en radarfrekvens på 5GHz er imidlertid såpass svak at en radar med denne frekvensen ikke vil kunne skille trusler som flyr tett. Frekvenser på 30, 60 og 100GHz er imidlertid alle egnet. Oppløsningen blir akseptabel og presisjonen tilstrekkelig god selv for lav effekt, kort observasjonstid og en båndbredde på 15MHz.
- Dersom radaren skal følge et HVM-missil på avstander opp mot 400m, vil kravet til god oppløsning bli utfordrende. Siden god oppløsning krever enten en stor radarantenne eller en høy radarfrekvens, og siden stridsvognen bare har plass til en liten antenne, vil kravet til radarfrekvens bli strengt.
- Det virker som om en radar i et APS-system vil få vesentlige problemer ved jamming. Når jammesignalet er så sterkt at radaren ikke lenger kjenner igjen radarsignalet, mister radaren blant annet muligheten til å måle avstand. Retning ut til jammeren oppnås ved å peile jammesignalet. For frekvensene 5, 30, 60 og 100GHz vil imidlertid ikke denne metoden gi tilstrekkelig presisjon. Av de frekvensene vi har vurdert gir 60GHz best ytelse ved jamming. Med en stasjonær jammer, 2000meter fra målet, kan denne radaren fremdeles gjøre målinger på de avstandene som er aktuelle for missiltrusselen. Dersom jammeren imidlertid befinner seg på selve trusselen, blir sikten dårlig for alle våre frekvenser; 5, 30, 60 og 100GHz. Ved jamming ser det altså ut som om våre radarer kan gi alarm, men vil trenge støtte av andre sensortyper for å oppnå avstandsestimater og god presisjon.

En radar vil under visse forutsetninger altså være velegnet til bruk i APS-systemer. Et APS-system med radar vil være i stand til å observere under de fleste værforhold, og systemet vil observere med god rekkevidde. Det kan også være en fordel at et slikt APS-system, i hvert fall i teorien, kan klare seg med en eneste sensor, siden radaren måler så vel posisjon som avstand og hastighet. Noen mindre ulemper vil imidlertid løsningen ha. Blant annet er sensoren aktiv og kan detekteres på mer enn 1 kilometers hold. Videre er klassifikasjonsevnen relativt svak, og sammenlignet med andre sensortyper, er observasjonstiden lang. Siden presisjonskravene er relativt krevende, vil radaren også kunne bli relativt kostbar. Den viktigste ulempen er

imidlertid usikkerheten i ytelse når radaren utsettes for en jammer. Eksemplene i rapporten tyder på at en frekvens på 60GHz håndterer stasjonære jammere. Fremtidige jammere montert på missiler kan imidlertid skape problemer også for denne frekvensen. Det bør i denne sammenhengen imidlertid nevnes at høyfrekvensjammere muligens kan bli vel kostbare for forbruk på engangsmisser.

Litteratur

- (1) D Barton (1988): "Modern Radar System Analysis", Artech House, UK.
- (2) J Kjellgren (1996): "Krav på radar for aktivt skydd av stridsvagn", FOA, Vetenskaplig rapport.
- (3) N Levanon (1988): "Radar Principles", Wiley.
- (4) D Adamy (2001): "A First Course in Electronic Warfare", Artech House.
- (5) Naval Air Warfare Center (2000): "EW and Radar Systems Engineering Handbook", NAWC, Nettside.