

19



Bureau voor de Industriële Eigendom Nederland

11 1020287

12 C OCTROOI²⁰

21 Aanvraag om octrooi: 1020287

51 Int.Cl.7
G01S7/292, G01S13/42, G01S13/72

22 Ingediend: 02.04.2002

41 Ingeschreven:
03.10.2003 I.E.

73 Octrooihouder(s):
THALES NEDERLAND B.V. te Hengelo.

47 Dagtekening:
03.10.2003

72 Uitvinder(s):
Hans Driessen te Goor
Wietze Meijer te Enschede
Jitse Zwaga te Hengelo

45 Uitgegeven:
01.12.2003 I.E. 2003/12

74 Gemachtigde:
Geen

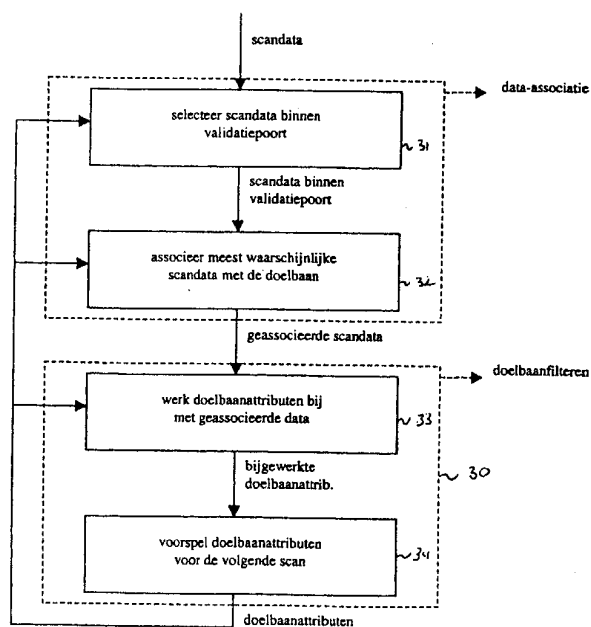
54 Werkwijze voor meerdoelendetectie, met name voor toepassing in rondzoekradars met meerbundelvorming in elevatie.

57 Een werkwijze voor het detecteren van radar-doelen, waarbij de radar over zendmiddelen beschikt voor het genereren van bursts van radar-pulsen en elke radarscan bestaat een aantal (N_b) bursts, omvattende voor elke scan k :

- een eerste stap, waarin een radarcel wordt gepreselecteerd door een detectieproces;
- een tweede stap, waarin een Track-Before-Detect (TBD) proces wordt geïnitieerd voor de gepreselecteerde cellen, dat gebruik maakt van een doelbaanfilter om de met de volgende scan $k+1$ geassocieerde validatiepoort te construeren;
- een derde stap, waarin de data in de validatiepoort van scan $k+1$ gebruikt wordt om het TBD proces te updaten en om de met de volgende scan $k+2$ geassocieerde validatiepoort te construeren;

waarbij de derde stap voor elke scan wordt herhaald.

De uitvinding kan worden toegepast in rondzoekradars, bijvoorbeeld rondzoekradars met meerbundelvorming in elevatie en in het algemeen in alle typen radars.



NL C 1020287

De inhoud van dit octrooi komt overeen met de oorspronkelijk ingediende beschrijving met conclusie(s) en eventuele tekeningen.

**Werkwijze voor meerdoelendetectie,
met name voor toepassing in rondzoekradars
met meerbundelvorming in elevatie**

5

De uitvinding heeft betrekking op een werkwijze voor het detecteren van radardoelen. De werkwijze kan worden toegepast in rondzoekradars, bijvoorbeeld rondzoekradars met meerbundelvorming in elevatie en in het algemeen in alle typen radars.

10

In het hier behandelde voorbeeld, bestaat een rondzoekradar uit een meerbundelradar met een roterende antenne, die tot taak heeft ver verwijderde doelen te detecteren. Gewoonlijk worden doelbanen gevormd door het combineren van doelplots (plot: doeldetectie in een scan), die uit het
15 in afzonderlijke scans ontvangen signaal geëxtraheerd worden met gebruikmaking van een doelbaanfilter en doelbaaninitiatie logica.

Vervolgens omvat de traditionele doeldetectie het drempelen (uitvoeren van een drempelbewerking) in drie fasen: signaalsterktedrempelen op hit- (doeldetectie) niveau, drempelen na binaire integratie op plotniveau
20 en drempelen na binaire integratie op doelbaanniveau. Detectie van een doel tijdens een enkele scan van een rondzoekradar geschiedt door binaire integratie van hits, in opeenvolgende bursts (coherente processingintervallen) van de scan. Elke scan van een rondzoekradar bestaat uit een groot aantal bursts, waarbij elke burst een bearing- (peiling,
25 richting) interval beslaat. Aangezien de radarbundelbreedte in bearing gewoonlijk enkele malen de afmeting heeft van een door een burst bestreken bearinginterval, zal het doelsignaal aanwezig zijn in een aantal opeenvolgende bursts van een scan, de N_b bursts op een doel. In het geval van een pulsdoppler rondzoekradar, wordt het in een range- (afstand)
30 dopplerframe ontvangen signaal verkregen uit elke burst na geëigende rangesampling en inschakeling van een dopplerfilterbank. Bij een bepaalde range en dopplersnelheid in dit frame, wordt een hitdetectie vastgesteld indien het ontvangen signaal de drempel te boven gaat, hetgeen een van te voren bepaalde constante loosalarmwaarschijnlijkheid op hitniveau
35 garandeert.

Een plot wordt vastgesteld indien bij dezelfde range en dopplersnelheid N_h hits voorkomen in N_b opeenvolgende bursts. In het geval dat het signaal wordt ontvangen bij gebruikmaking van gelijktijdige elektronische meerbundelvorming in elevatie, dient tevens aan de voorwaarde te worden voldaan dat de hits gevonden worden in het in
 5 dezelfde elevatiebundel ontvangen signaal. De parameters N_h en N_b en de drempel op hitniveau worden zodanig gekozen dat een bepaalde loosalarmwaarschijnlijkheid op plotniveau gegarandeerd wordt.

Vervolgens wordt een doelplot gebruikt om een doelbaanfilter te
 10 initialiseren. De doelbaanfilterpredictie voor daarop volgende scans wordt gebruikt om mogelijke doelplots te identificeren die met de doelbaan kunnen worden geassocieerd. Na N_s scans (inclusief de scan die de initiële plot opleverde), wordt een geconfirmeerde doelbaandetectie vastgesteld, indien er N_p plots worden gevonden uit de met de doelbaan geassocieerde
 15 mogelijke N_s plots. De parameters N_p en N_s , en de loosalarmwaarschijnlijkheid op plotniveau worden zodanig gekozen dat een bepaalde loosalarmwaarschijnlijkheid op doelbaanniveau gegarandeerd wordt.

Een andere oplossing voor het detecteren van doelen omvat het
 20 vervangen van het conventionele driefasen doelbaandetectiesysteem door het enkelfase Track-Before-Detect (TBD) systeem, waarbij alleen signaalsterktedrempelen op doelbaanniveau wordt toegepast. In het TBD systeem is het de bedoeling om het geïntegreerde doelsignaal te drempelen, dat aanwezig is bij de elevatie, range en doppler van het doel in de N_b bursts
 25 op het doel uit de N_s scans waarmee geïntegreerd wordt. Bekend is dat door het drempelen uit te stellen en daardoor het doelsignaal gelegenheid te geven zich op te bouwen, een grote verbetering in detectiewaarschijnlijkheid bereikt kan worden ten opzichte van de traditionele meerfasen
 doelbaandetectiesystemen bij gelijke loosalarmwaarschijnlijkheid. Het TBD
 30 systeem wordt bijvoorbeeld beschreven in Blackman, S.S. en Popoli, R. « Design and Analysis of Modern Tracking Systems », Norwood, MA: Artech House, 1999.

Een vierdimensionale meetruimte kan worden gedefinieerd als een ruimte, gepartitioneerd in range-bearing-elevatie-dopplercellen, of
 35 radarcellen. De afmeting van een radarcel is gelijk aan die van de range-

doppler bin in range en doppler, het bearinginterval van een burst in bearing en de elevatiebundelbreedte in elevatie. De radarcelcentra vallen in range en doppler samen met de centra van de range-doppler bins van het range-doppler frame en in elevatie met de elevatiebundelcentra. In het geval van een oneven aantal bursts N_b op het doel, vallen de radarcelcentra in bearing samen met die van de bearingintervallen van de bursts. In het geval van een even aantal bursts op het doel, worden de radarcelcentra echter gecentreerd op de grenzen van de bearingintervallen van de bursts. Hierdoor kan het in een radarcel gemeten signaal gedefinieerd worden als de somming van de N_b vermogensmetingen uit de N_b bursts die het dichtst liggen bij de bearing van de radarcel in de range-doppler bin en de elevatiebundel die correspondeert met de range, doppler en elevatie van de radarcel. Zodoende kan het geïntegreerde signaal uit de bursts op het doel in de radarcellen worden geprojecteerd.

15 Terugkomend op het TBD systeem voor rondzoekradars: het in de praktijk ondervonden probleem is in de eerste plaats, dat elke radarcel van een scan de oorsprong van een nieuwe doelbaan kan zijn die, na het processen van N_s scans tot een doelbaandetectie zou kunnen leiden. Afhankelijk van de rondzoekradarparameters, zoals de range coverage en de afmeting van de rangegate en het aantal bursts per scan, kan het aantal radarcellen in een scan en diens volgorde het aantal potentiële startpunten oplopen tot 10^9 . Uitgaande van een radarcel kan de vierdimensionale ruimte waarnaar het doel zich kan hebben verplaatst, heel goed enkele honderden radarcellen in de volgende scan omvatten, welk aantal exponentieel toeneemt met elke volgende scan in de integratieperiode. Behalve het probleem van het onhanteerbaar grote aantal potentiële startpunten in elke scan, is er dus de moeilijkheid om het doelsignaal te vinden in de volgende scans van de integratieperiode.

30 Wanneer toegepast op elektro-optische sensoren, waarbij TBD tweedimensionale dataframes als input krijgt bij een betrekkelijke hoge updatesnelheid, kan het probleem van het vinden van het doelsignaal uit meervoudige frames worden aangepakt door brute krachttechnieken toe te passen. Uitgaande van alle pixels in het eerste frame van de integratieperiode, worden met deze technieken de pixelintensiteiten simpelweg in de volgende frames geïntegreerd voor alle dynamisch

mogelijke doelbanen. Dankzij de hoge updatesnelheid, is de integratietijd
 betrekkelijk kort, waardoor het mogelijk is de dynamisch mogelijke doelbanen
 te beperken tot constante-snelheidsbanen. Aangezien in de meeste gevallen
 het maximum aantal pixels klein is dat door een doel kan worden verplaatst
 5 gedurende de integratietijd, zal het aantal discrete snelheden die tot een
 unieke pixelintensiteitssom leiden beperkt zijn, waardoor een poging kan
 worden gedaan om tot een verdere beperking van het aantal mogelijke
 doelbanen te komen. Voorbeelden van deze brutekrachttechnieken zijn de
 Hough transformatie (zoals beschreven in Smith, M.C. « Feature Space
 10 Transform for Multitarget Detection » Proc. IEEE Conf. On Decision and
 Control, Albuquerque, NM, December 1980, pp. 835-836),
 snelheidsfilterbanken (zoals beschreven in Stocker, A.D. en Jansen, P.
 « Algorithms and Architectures for Implementing Large Velocity Filter
 Banks » Proc. SPIE Conf. On Signal and Data Processing of Small Targets,
 15 1991, pp. 140-155) en dynamische programmeeralgoritmen (zoals
 bijvoorbeeld beschreven in Arnold J. et al « Efficient Target Tracking Using
 Dynamic Programming » IEEE Trans. On Aerospace and Electronics
 Systems, vol. 29, no 1, January 1993, pp. 44-56).

Zoals hiervoor opgemerkt, zijn de toegepaste TBD technieken
 20 echter brutekrachttechnieken, waarmee alle mogelijke doelbanen worden
 onderzocht gedurende de integratietijd. Dit is uitvoerbaar bij elektro-optische
 sensoren, omdat deze sensoren tweedimensionaal zijn en met hoge
 updatesnelheden werken.

In de literatuur komen enkele gevallen voor waarin deze
 25 brutekrachttechnieken zijn toegepast op radarsystemen, zoals bijvoorbeeld
 beschreven in Urkowitz, H en Allen, M.R. « Long Term Noncoherent
 Integration Across Resolvable Sea Clutter Areas » Proc. National Radar
 Conf., 1989, pp. 67-71. Om bij brutekrachttechnieken praktisch uitvoerbare
 processingeisen te realiseren, is het noodzakelijk om het probleem terug te
 30 brengen tot twee dimensies, door alleen radiale doelbanen in beschouwing te
 nemen. Wanneer de toepassing een volg- of multifunctieradar betreft,
 verkleint de verhoogde updatesnelheid, vergeleken met die van een
 rondzoekradar, de groei van het potentiële doelgebied gedurende de
 integratieperiode. Ook de hoeveelheid te processen data wordt in de meeste
 35 gevallen aanmerkelijk gereduceerd door als input voor de eigenlijke TBD

processing niet de ruwe gemeten data te gebruiken, maar alleen de datapunten die een predetectiedrempel te boven gaan.

Wanneer toegepast op radarsystemen, worden de brutekrachttechnieken geconfronteerd met een veel grotere hoeveelheid data per scan en een veel groter aantal mogelijke doelbanen gedurende de integratietijd. Aan de daaruit resulterende eisen ten aanzien van de processingcapaciteit kan hier niet worden voldaan.

De uitvinding beoogt onder andere dit probleem van te hoge processingcapaciteitseisen te elimineren. Daartoe is een doel van de uitvinding een werkwijze voor het detecteren van radardoelen, waarbij de radar over zendmiddelen beschikt voor het genereren van bursts van radarpulsen en elke radarscan k bestaat uit een aantal ($N_b(k)$) bursts, met de kenmerken dat, voor elke scan k :

- in een eerste stap, een radarcel wordt gepreselecteerd door een detectieproces;
- in een tweede stap, een TBD proces wordt geïnitieerd voor de gepreselecteerde cellen, dat gebruik maakt van een doelbaanfilter om de met de volgende scan $k+1$ geassocieerde validatiepoort te construeren;
- in een derde stap, de data in de validatiepoort van scan $k+1$ gebruikt wordt om het TBD proces te updaten en om de met de volgende scan $k+2$ geassocieerde validatiepoort te construeren;

waarbij de derde stap voor elke scan wordt herhaald.

In de preselectiestap wordt de ruwe data van de validatiepoort door het TBD proces geprocessed voor een beperkt aantal scans terug en vooruit. Door het TBD proces worden bijvoorbeeld $N_{sb} - 1$ scans terug en vervolgens $N_s - 1$ scans vooruit geprocessed.

Een gunstige eigenschap van de werkwijze volgens de uitvinding is dat de ruwe data in een validatiepoort getransformeerd wordt tot een virtuele plot, die gekenmerkt wordt door een rangepositie, een

dopplersnelheid, een elevatiepositie, een bearing positie en een geïntegreerd-signaalsterkte, welke range, doppler, elevatie en bearing informatie gebruikt wordt als input voor het doelbaanfilter, waarbij de sterkte van het geïntegreerde signaal samen met de geïntegreerd-signaalsterkten van andere scans gebruikt worden voor op doelbaanniveau.

Indien bijvoorbeeld de integratie plaats vindt voor N_s scans met $N_b(k)$ bursts op het doel per scan, is de drempel, tot een doelbaandetectie leidende integratiesom $SumE$, gelijk aan een som van onafhankelijke Rayleigh gedistribueerde vermogensmetingen $x(k,b)$:

$$SumE = \sum_{k=1}^{N_s} \left[\sum_{b=1}^{N_b(k)} x(k,b) \right]$$

De voornaamste voordelen van de uitvinding zijn, dat de detectieprestatie, vergeleken met een zuivere TBD techniek, er niet door wordt verminderd, dat de uitvinding kan worden gebruikt om de detectieprestatie te verhogen van elk sensorsysteem waarin beperkingen van het processingvermogen brutekracht TBD architecturen praktisch onbruikbaar maken en tenslotte dat de uitvinding eenvoudig te implementeren is.

Verdere kenmerken en gunstige eigenschappen van de uitvinding worden uiteengezet in de volgende beschrijving, onder verwijzing naar de bijgevoegde diagrammen, waarvan:

- afbeelding 1 de theoretische detectiewaarschijnlijkheid weergeeft van TBD voor een rondzoekradar;
- afbeelding 2 de theoretische detectiewaarschijnlijkheid weergeeft van TBD voor een rondzoekradar met en zonder preselectie en de detectiewaarschijnlijkheid op doelbaanniveau wanneer gebruik gemaakt wordt van een conventioneel detectiesysteem;
- afbeelding 3 een blokschema weergeeft van de basisbenadering van een op recursief filteren gebaseerd TBD algoritme;

- afbeelding 4 de detectiewaarschijnlijkheid weergeeft van de voorgestelde TBD processing volgens de uitvinding en de geïdealiseerde conventionele en TBD processing voor de toepassing in een pulsdoppler rondzoekradar met
5 meerbundelvorming in elevatie voor het detecteren van doelen.

Volgens de uitvinding wordt in een eerste stap een preselectiemechanisme gebruikt. Dit preselectiemechanisme identificeert uitsluitend radarcellen in een scan, waarvoor het initiëren van een TBD
10 processingactie lonend zou kunnen zijn. Na een preselectie wordt dus het TBD algoritme geïntialiseerd en wordt de ruwe radarvideo geprocessed voor een beperkt aantal scans terug en vooruit (backward and forward). Op deze wijze wordt, beginnend met een preselectie, ruwe gemeten data geprocessed en vindt alleen geïntegreerd signaalsterktedrempelen op
15 doelbaanniveau plaats, zoals bedoeld in een zuiver TBD systeem.

Afbeelding 1 toont een theoretische detectiewaarschijnlijkheid van TBD voor rondzoekradar versus de Signal-to-Noise Ratio (SNR, signaal/ruisverhouding). De theoretische detectiewaarschijnlijkheid P_d van
20 TBD voor een rondzoekradar is uitgezet tegen de SNR voor een reeks geïntegreerde scans $N_s = \{1, \dots, 8\}$. Het aantal bursts op het doel per scan is bijvoorbeeld ingesteld op $N_b = 4$.

In afbeelding 1 wordt in alle gevallen een drempel op doelbaanniveau aangehouden van λ_t , overeenkomend met een
25 loosalarmwaarschijnlijkheid op doelbaanniveau van $P_{FA}^t = 10^{-10}$, hetgeen ook resulteert uit de gebruikelijke conventionele doelbaaninitiatiecriteria van 2 plots uit 2 scans met een loosalarmwaarschijnlijkheid op plotniveau van 10^{-5} .

Uit afbeelding 1 blijkt dat de toename in detectiewaarschijnlijkheid vermindert met elke nog verder aan het integratie-interval toegevoegde scan,
30 waarbij de grootste toename duidelijk afkomstig is van de eerste paar toegevoegde scans. Rekening houdend met het feit dat een verlenging van de integratieperiode ook de reactietijd verlengt, is het aantal scans in de integratieperiode beperkt tot $N_s=4$ in onderstaande getalsvoorbeelden.

In de werkwijze volgens de uitvinding wordt de theoretische detectieprestatie voor een TBD algoritme benaderd. De preselectiestap maakt het mogelijk om het aantal per scan in beschouwing te nemen radarcellen aanzienlijk te verminderen, ten koste van slechts een minimale prestatiereductie. Om de theoretische detectieprestatie van TBD voor een
 5 rondzoekradar af te leiden, worden de statistieken van het geïntegreerde doelsignaal, bijvoorbeeld de waarschijnlijkheidsdichtheidfunctie, in aanmerking genomen die het product zouden zijn van een ideale TBD processingactie. Aannemende dat de integratie plaats vindt over N_s scans met N_b bursts op
 10 het doel per scan, is de te drempelen integratiesom $SumE$ gelijk aan een som van $N_s N_b$ onafhankelijke Rayleigh gedistribueerde vermogensmetingen x_i :

$$SumE = \sum_{i=1}^{N_s N_b} x_i \quad (1)$$

15

Verder aannemende dat de x_i genormaliseerd zijn in verhouding tot het niveau van de Rayleigh gedistribueerde achtergrondruis en een lineaire SNR hebben, weergegeven als ρ , dan is de pdf (probability density function, waarschijnlijkheidsdichtheidfunctie), weergegeven als $p_1(x)$ voor alle
 20 x_i gelijk aan:

$$p_1(x) = \frac{1}{1+\rho} \exp\left(-\frac{x}{1+\rho}\right) \quad (2)$$

Indien een drempel gelijk aan λ_h wordt toegepast op een
 25 vermogensmeting x , corresponderend met de eerder besproken hitdetectie, wordt de detectiewaarschijnlijkheid P_D^h uitgedrukt door:

$$P_D^h = \Gamma\left(\frac{\lambda_h}{1+\rho}, 1\right) \quad (3)$$

30 waarin Γ de incomplete gammafunctie is die gedefinieerd wordt als $\Gamma(\lambda, N) = \int_{\lambda}^{\infty} t^{N-1} \exp(-t) dt$.

De pdf van alleen-ruis vermogensmonsters $p_0(x)$ en de
 loosalarmwaarschijnlijkheid P_{FA}^h voor een drempel van λ_h worden verkregen
 door een SNR van $\rho=0$ in (2) en (3) te substitueren, waarna $p_0(x) = \exp(-x)$
 5 en $P_{FA}^h = \Gamma(\lambda_h, 1)$.

In het TBD systeem wordt de integratiesom $sumE$ gegeven door
 (1) gedrempeld, hetgeen leidt tot een doelbaandetectie. Voor de theoretische
 detectiewaarschijnlijkheid P_D^t en loosalarmwaarschijnlijkheid P_{FA}^t van TBD bij
 toepassing van een drempel λ_t , dient alleen rekening gehouden te worden
 10 met het feit dat nu een som van volgens (2) gedistribueerde $N_s N_b$
 vermogensmetingen wordt gedrempeld, in plaats van één enkele meting :

$$P_D^t = \Gamma\left(\frac{\lambda_t}{1+\rho}, N_s N_b\right) \quad (4)$$

15 en

$$P_{FA}^t = \Gamma(\lambda_t, N_s N_b). \quad (5)$$

Volgens de uitvinding wordt een preselectiesysteem gebruikt, ter
 20 eliminatie van het probleem dat voor elke radarcel in elke scan een in
 rekenkundig opzicht duur TBD algoritme moet worden gestart. In het
 preselectiesysteem initialiseert een preselectie een TBD algoritme, dat
 recursief $N_s - 1$ scans terug processt en daarna $N_s - 1$ scans vooruit. De
 preselectie leidt al tot N_s unieke gecorreleerde integratieperiodes: van de
 25 eerste integratieperiode is de scan waaruit de preselectie ontstond de laatste
 en van de laatste integratieperiode is deze de eerste. Ook is het nodig terug
 te werken, door vorige scans te processen, om tot een aanvaardbaar
 detectieverlies tengevolge van de preselectie te komen op doelbaanniveau.
 Vereist is echter, dat de radarvideo van de laatste N_s scans beschikbaar is,
 30 d.w.z. dat deze in een geheugen wordt bewaard. Om de theoretische
 detectiewaarschijnlijkheid van TBD met gebruikmaking van dit
 preselectiesysteem te berekenen, wordt in vergelijkingen (4) en (5) rekening
 gehouden met de beperking, dat in ten minste één van de scans de

integratiesom van de N_b bursts op het doel de preselektiedrempel λ_p moet hebben overschreden:

$$P_D = \sum_{n_s=1}^{N_s} \left[(-1)^{n_s+1} \binom{N_s}{n_s} \exp\left(-\frac{\lambda_p}{1+\rho} n_s\right) \sum_{n_b^1=1}^{N_b-1} \sum_{n_b^2=1}^{N_b-1} \dots \sum_{n_b^{n_s}=1}^{N_b-1} \left\{ \Gamma\left(\frac{\lambda_p}{1+\rho}, N_s N_b - n_s(N_b-1) + \sum_{i=1}^{n_s} n_b^i\right) \frac{\left(\frac{\lambda_p}{1+\rho}\right)^{N_s(N_b-1) - \sum_{i=1}^{n_s} n_b^i}}{\prod_{i=1}^{n_s} (N_b-1-n_b^i)} \right\} \right] \quad (6)$$

5

en

$$P_{FA} = \sum_{n_b=1}^{N_b} \left[(-1)^{n_b+1} \binom{N_b}{n_b} \exp(-\lambda_p n_b) \sum_{n_b^1=1}^{N_b-1} \sum_{n_b^2=1}^{N_b-1} \dots \sum_{n_b^{n_b}=1}^{N_b-1} \left\{ \Gamma\left(\lambda_p, N_s N_b - n_b(N_b-1) + \sum_{i=1}^{n_b} n_b^i\right) \frac{\lambda_p^{N_s(N_b-1) - \sum_{i=1}^{n_b} n_b^i}}{\prod_{i=1}^{n_b} (N_b-1-n_b^i)} \right\} \right] \quad (7)$$

$$n_b^i = n_b^1 + n_b^2 + \dots + n_b^{n_b}$$

10

In afbeelding 2 is de theoretische detectiewaarschijnlijkheid van TBD uitgezet tegen de SNR, met en zonder preselectie. De loosalarmwaarschijnlijkheid op doelbaanniveau is ook hier ingesteld op, bijvoorbeeld, $P_{FA}^l = 10^{-10}$ en het aantal geïntegreerde scans N_s is bijvoorbeeld

15 gelijk aan 4. Gebruik wordt bijvoorbeeld gemaakt van een preselektiedrempel λ_p , overeenkomend met een loosalarmwaarschijnlijkheid van $P_{FA}^p = 2,5 \cdot 10^{-4}$, waarmee een reductie van 99,975 % wordt bereikt in het aantal TBD

algoritmen dat met elke scan wordt gestart. Ook wordt de detectiewaarschijnlijkheid uitgezet voor een conventioneel driefasen

20 doelbaandetectiesysteem over vier scans, weergegeven door een kromme 21. In het conventionele detectiesysteem wordt bijvoorbeeld een 3-uit-4 scans binair detectiecriterium op doelbaanniveau toegepast en een drempel op hitniveau λ_h , corresponderend met een loosalarmwaarschijnlijkheid van $P_{FA}^h = 4,2266 \cdot 10^{-2}$. De loosalarmwaarschijnlijkheid op doelbaanniveau voor

25 het conventionele detectiesysteem als zodanig is eveneens gelijk aan 10^{-10} .

Uit afbeelding 2 blijkt dat de potentiële gain (antenneversterking) in de detectieprestatie, bij gebruikmaking van een TBD detectiesysteem in plaats van een conventioneel detectiesysteem, aanzienlijk is. De zuivere TBD detectie wordt weergegeven door een kromme 22. Met het TBD

TBD detectie wordt weergegeven door een kromme 22. Met het TBD algoritme wordt een detectiewaarschijnlijkheid van $P_D^t = 0,9$ bereikt, bij een 6dB lagere SNR dan bij gebruikmaking van een conventioneel detectiesysteem. Dit betekent dat, door een TBD systeem toe te passen, de detectierange wordt uitgebreid met meer dan 40%. Verder laat afbeelding 2 zien dat, bij gebruikmaking van het voorgestelde preselectiesysteem, corresponderend met een kromme 23, een verwaarloosbaar verlies in detectieprestatie optreedt.

In een volgende stap, volgens de uitvinding, gebruikt het door een preselectie geïntialiseerde TBD algoritme de range, doppler, bearing en elevatie van de corresponderende radarcel om een recursief doelbaanfilter te initialiseren. In elke scan worden de radarcellen in de validatiepoorten van het doelbaanfilter onderzocht op de aanwezigheid van een doel, gebaseerd op de doelbaanfilterpredictie en de eerder gemeten SNR en wordt een radarcel geselecteerd om daarmee het doelbaanfilter te updaten. Door het updaten van het doelbaanfilter, wordt het door het TBD algoritme te doorzoeken gebied - de validatiepoort - minimaal gehouden. Zonder updaten zou het gebied, waar het doel zich naartoe kan hebben verplaatst, exponentieel groeien met elke aanvullende scan in de integratieperiode. Tenslotte wordt het geïntegreerde signaal van de geselecteerde radarcellen gedrempeld.

Om de hiervoor weergegeven detectiewaarschijnlijkheden te bereiken, is het noodzakelijk om het doelsignaal te integreren over meerdere scans. In een TBD benadering gebaseerd op recursief filteren, is de predictie vereist van de doelpositie in de volgende scan, gebruikmakend van de doelposities van de voorgaande scans in een doelbaanfilter, of alleen van de door de preselectieplot aangegeven doelpositie. Drie foutbronnen, die het predictieproces hinderen, kunnen worden geïdentificeerd:

- Meetfouten: zowel met doelposities in het verleden geassocieerde fouten, die in het doelbaanfilter zijn ontstaan, als de meetfouten geassocieerd met de doelpositie die op het punt staat gedetecteerd te worden;
- Doelmanoeuvres: gedurende de tijd tussen twee scans, de scantijd, kan het doel een manoeuvre initiëren. Aangezien de scantijd in de orde van seconden is, kan een doelmanoeuvre

oorzaak zijn dat de doelpositie in een scan aanzienlijk afwijkt van de predictie;

- Verkeerde associaties: door het associëren van clutter, ruispieken of een signaal van een ander doel met de doelbaan, zal de uitkomst van het doelbaanfilter afwijken van de werkelijke doelbaan.

5
De gebruikelijke tegenmaatregel tegen de door deze foutbronnen veroorzaakte gecombineerde onzekerheid is, dat niet alleen het exacte predictiepunt voor associatie in aanmerking wordt genomen, maar tevens
10 een gebied daaromheen: de validatiepoort. Bij het construeren van de validatiepoort wordt enerzijds getracht te bewerkstelligen dat de werkelijke doelpositie naar alle waarschijnlijkheid daar binnen ligt. Anderzijds wordt geprobeerd om de validatiepoort zo klein mogelijk te houden, om het aantal plots dat beoordeeld moet worden voor associatie met de doelbaan te
15 beperken. Een andere reden om de afmeting van de validatiepoort te beperken is, dat bij een plot ver van het predictiepunt de kans groter is dat deze afkomstig is van een ander doel, van clutter of van ruis.

Terwijl conventionele processingacties de validatiepoort gebruiken om te selecteren welke van de plots in aanmerking komen voor associatie
20 met de doelbaan, gebruikt de werkwijze volgens de uitvinding deze validatiepoort, om te selecteren welke data van een scan in aanmerking komt voor associatie. Zodoende wordt niet alleen data dat tot een plot zou moeten leiden geselecteerd, maar alle data binnen de validatiepoort, zoals bedoeld in de zuivere TBD processing.

25

Het blokschema van afbeelding 3 is een samenvatting van de basisbenadering van het op recursief filteren gebaseerde TBD algoritme. Indien gegeven is hoe de validatiepoort moet worden geconstrueerd, wordt in een eerste stap 31 uit elke scan de voor associatie in aanmerking komende
30 data geselecteerd. In de volgende stap 32 wordt uit de data binnen de validatiepoort de data geselecteerd dat met de grootste waarschijnlijkheid afkomstig is van het doel in de doelbaan. Het is mogelijk om deze selectie bijvoorbeeld te baseren op de afstand tot het predictiepunt en de waargenomen signaalsterkte, gebruikmakend van elke beschikbare
35 informatie omtrent de beweeglijkheid van het doel en de doelsignaalsterkte.

Een doelbaanfilteralgoritme 30 krijgt de uitkomst van het associatie-algoritme 31, 32 als input. In een eerste stap 33, worden door het doelbaanfilteralgoritme de doelbaanattributen met de geassocieerde data bijgewerkt. De term "doelbaanattributen" omvat met name de kinematische aspecten van een doelbaan, zoals de positie en de snelheid en de energetische aspecten, zoals de SNR en de integratiesom. In een volgende stap 34 voorspelt het algoritme vanuit de updated doelbaanattributen de doelbaanattributen van de volgende scan. De voorspelde doelbaanattributen die de uitkomst zijn van deze laatste stap 34 zijn tevens inputs van de voorgaande stappen 31, 32, 33.

Het blokschema van afbeelding 3 vertegenwoordigt de doelbaanonderhoudsfase. Wanneer een doelbaan wordt geïnitieerd, worden in de werkwijze volgens de uitvinding de updated doelbaanattributen gebaseerd op de attributen van de preselectieplot. Het proces van afbeelding 3 wordt dan eerst terug in de tijd toegepast - retrodictie in plaats van predictie - op de voorgaande te processen scans. Nadat deze scans zijn geprocessed, is de eerste integratieperiode beschikbaar waarin geprobeerd moet worden een doelbaan te initiëren. Vervolgens gaat de processing vooruit in de tijd, vanaf de scan waarvan de preselectie afkomstig was en wordt het geïntegreerde signaal van opeenvolgende integratieperioden gedrempeld. Indien geen van de eerste N_s integratieperioden tot een detectie leidt, wordt de doelbaaninitiatie gestopt. In het andere geval wordt overgegaan naar de doelbaanonderhoudsfase. Een doelbaan wordt gewist, wanneer de integratiesom onder de drempel valt gedurende een aantal opeenvolgende scans (dit aantal kan een ontwerpparameter zijn). Zoals eerder aangegeven, wordt de uitkomst van het doelbaanfilteren, de voorspelde doelbaanattributen, gebruikt in de data-associatie, om de validatiepoort te construeren en de te associëren data daaruit te selecteren.

Een voor de hand liggende kandidaat voor het volgen van de kinematische attributen is bijvoorbeeld het Kalman filter, aangezien dit recursief is, schattingfoutkarakteristieken levert waarop de data-associatie kan worden gebaseerd en goedkoop is in termen van processingbelasting. Verder worden in de literatuur verschillende doelbaanfilters besproken, die geschikt zijn om te werken met meervoudige en/of zwakke plots en gebruikt kunnen worden als basis voor mogelijke TBD doelbaanfilters, zoals

bijvoorbeeld beschreven in Lerro, D and Bar-Shalom, Y "Automated Tracking with Target Amplitude Information" Proc. American Control Conference, San Diego, CA, 1990, pp. 2875-2880, of in Zwaga, J.H. en Driessen, H. "An Efficient One-Scan-Back PDAF for Target Tracking in Clutter", Proc. SPIE Conf. On Signal and Data Processing of Small Targets, 2001, pp. 393-404.

De doel SNR kan op eenvoudige wijze worden gevolgd door gebruik te maken van het, eventueel gewogen, gemiddelde van de laatste scans. Afhankelijk van de relatieve naderingssnelheid (range rate) van het doel tijdens de middelingperiode, moet gecorrigeerd worden voor een $1/r^4$ verandering in SNR bij een veranderende afstand r . Om de lengte van de middelingperiode te kunnen gebruiken is het noodzakelijk dat er een compromis wordt gevonden tussen het middelen van de Radar Cross Section (RCS, equivalent radar terugstraalvlak) fluctuaties (bijvoorbeeld gemodelleerd als Rayleigh gedistribueerd) en het vermogen temporele veranderingen in de RCS, bijvoorbeeld tengevolge van veranderingen in de aspecthoek, te volgen. Het middelen van RCS fluctuaties pleit voor een lange middelingperiode, terwijl het vermogen tot het volgen van temporele veranderingen in de RCS voor een korte middelingperiode pleit.

Aannemende dat een schatting van de doel SNR, of liever de ongenormaliseerde doelamplitude \bar{A} , beschikbaar is voor de volgende scan, kan een uitdrukking worden afgeleid voor de waarschijnlijkheidsratio L_{ST} dat de met een radarcel geassocieerde integratiesom (uit N_b bursts) van een doel afkomstig is. De waarschijnlijkheid p_{st} dat de gemeten amplitudes A_{k+1}^i die bijdragen tot de integratiesom van een range-doppler cel in scan $k+1$ afkomstig zijn van het doel wordt gegeven door

$$p_{\text{st}} = \prod_{i=1}^{N_b} \frac{2A_{k+1}^i}{\bar{A}_{k|k,\dots,k-(N_s-1)}^2} \exp\left[-\frac{(A_{k+1}^i)^2}{\bar{A}_{k|k,\dots,k-(N_s-1)}^2}\right] \quad (8)$$

waarin $\bar{A}_{k|k,\dots,k-(N_s-1)}$ wordt geschat door de kwadratisch gemiddelde amplitude te nemen van de laatste N_s scans, zoals aangegeven.

De waarschijnlijkheid p_{sn} dat de gemeten amplitudes door ruis gegenereerd zijn wordt gegeven door

$$p_{s|n} = \prod_{i=1}^{N_b} \frac{A_{k+1}^i}{\sigma^2} \exp \left[-\frac{(A_{k+1}^i)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (9)$$

waarbij $2\sigma^2$ het niveau van de achtergrondruis aangeeft.

Dientengevolge wordt de op de gemeten signaalsterkte

5 gebaseerde waarschijnlijkheidsratio $L_{S|T}$ gegeven door

$$L_{S|T} = \frac{p_{s|t}}{p_{s|n}} = \frac{\prod_{i=1}^{N_b} \frac{2A_{k+1}^i}{\bar{A}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)}^2} \exp \left[-\frac{(A_{k+1}^i)^2}{\bar{A}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)}^2} \right]}{\prod_{i=1}^{N_b} \frac{A_{k+1}^i}{\sigma^2} \exp \left[-\frac{(A_{k+1}^i)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (10)$$

dat vereenvoudigd kan worden tot

10

$$L_{S|T} = \left(\frac{2\sigma^2}{\bar{A}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)}^2} \right)^{N_b} \exp \left[\left(1 - \frac{2\sigma^2}{\bar{A}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)}^2} \right) \sum_{i=1}^{N_b} \frac{(A_{k+1}^i)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (11)$$

waarbij de sommering over $(A_{k+1}^i)^2 / (2\sigma^2)$ de integratiesom is van de met de radarcel geassocieerde N_b bursts.

15

Vervolgens, aannemende dat de voorspelde doeltoestandvector $s_{k+1|k}$ met de bijbehorende foutcovariantie $P_{k+1|k}$ beschikbaar is (zoals in het geval wanneer een Kalman filter gebruikt wordt voor doelbaanfilteren), wordt een uitdrukking afgeleid voor de waarschijnlijkheidsratio $L_{P|T}$ dat het doel in de doelbaan zich tijdens de volgende scan in een bepaalde radarcel bevindt.

20

De reststatistieken voor het vectorverschil \tilde{z} tussen een exacte positie in het vierdimensionale radarmeetdomein en de predictie $s_{k+1|k}$ voor scan $k+1$

worden gegeven door de pdf

$$f(\tilde{z}) = \frac{\exp \left(-\frac{1}{2} \tilde{z}^T (HP_{k+1|k}H^T)^{-1} \tilde{z} \right)}{\sqrt{|2\pi HP_{k+1|k}H^T|}} \quad (12)$$

waarin H de observatiematrix is als in standaard uitgebreid Kalman
doelbaanfilteren (zie bijvoorbeeld Blackman, S.S. and Popoli, R « Design and
Analysis of Modern Tracking Systems », Norwood, MA: Artech House, 1999).

- 5 Voor een radarcel in scan $k+1$ met het celcentrum in range, bearing, elevatie
en doppler $z_{\text{cell},k+1} = [r_{\text{cell},k+1} \quad b_{\text{cell},k+1} \quad e_{\text{cell},k+1} \quad v_{\text{cell},k+1}^d]^T$ kan de waarschijnlijkheid
 p_{plt} dat het doel daarin zal liggen worden berekend door de pdf $f(\tilde{z})$ van (12)
te integreren uit het vierdimensionale radarcelvolume

$$10 \quad p_{\text{plt}}(z_{\text{cell},k+1}) = \int_{r_{\text{cell},k+1} - \frac{\text{RBSize}}{2}}^{r_{\text{cell},k+1} + \frac{\text{RBSize}}{2}} \int_{v_{\text{cell},k+1}^d - \frac{\text{DBSize}}{2}}^{v_{\text{cell},k+1}^d + \frac{\text{DBSize}}{2}} \int_{b_{\text{cell},k+1} - \frac{\text{BISize}}{2}}^{b_{\text{cell},k+1} + \frac{\text{BISize}}{2}} \int_{e_{\text{cell},k+1} - \frac{\text{EBWidth}}{2}}^{e_{\text{cell},k+1} + \frac{\text{EBWidth}}{2}} f \left(\begin{bmatrix} r \\ b \\ e \\ v^d \end{bmatrix} - h(s_{k+1|k}) \right) de db dv_d dr \quad (13)$$

- waarin RBSize, DBSize, BISize, en EBWidth respectievelijk staan voor de afmeting
van de range bin, de afmeting van de doppler bin, de afmeting van het
15 bearinginterval van een burst en de elevatiebundelbreedte en h de
standaard (niet-lineaire) transformatiefunctie is van de toestandruimte tot
het radarmeetdomein (zie bijvoorbeeld de eerder genoemde Blackman, S.S.
and Popoli, R). In het eigenlijke TBD algoritme wordt deze integraal
benaderd door een Riemann som, waarbij voor het hier beschreven
20 voorbeeld het gebruik van twee punten per dimensie voldoende blijkt te zijn.

Voor een op ruismetingen gebaseerde doelbaan, is er geen
voorkeur voor een van de $N_{\text{RC},k+1}$ radarcellen in de validatiepoort van scan
 $k+1$. Alle radarcellen hebben derhalve een gelijke waarschijnlijkheid p_{pln} van
 $1/N_{\text{RC},k+1}$.

- 25 De op de positie van de radarcel gebaseerde
waarschijnlijkheidsratio $L_{\text{p|T}}$ wordt daarom uitgedrukt door

$$L_{\text{p|T}} = \frac{p_{\text{plt}}}{p_{\text{pln}}} = \frac{p_{\text{plt}}}{1/N_{\text{RC},k+1}} \quad (14)$$

waarin p_{plt} gegeven is door (13).

- Door de op de gemeten signaalsterkte $L_{\text{S|T}}$ gebaseerde waarschijnlijkheidsratio en de op de radarcelpositie $L_{\text{P|T}}$ gebaseerde waarschijnlijkheidsratio te combineren, wordt de waarschijnlijkheidsratio $L_{\text{SP|T}}$ verkregen, dat een meting afkomstig is van een doel, zowel uitgaande van het gemeten signaal als van de positie in het predictievenster,

$$L_{\text{SP|T}} = L_{\text{S|T}} L_{\text{P|T}} = \left(\frac{2\sigma^2}{A_{k|k, \dots, k-(N_s-1)}^2} \right)^{N_b} \exp \left[\left(1 - \frac{2\sigma^2}{A_{k|k, \dots, k-(N_s-1)}^2} \right) \sum_{i=1}^{N_b} \frac{(A_{k+1}^i)^2}{2\sigma^2} \right] \frac{p_{\text{plt}}}{1/N_{\text{RC}, k+1}} \quad (15)$$

10

waarin ook hier p_{plt} gegeven is door (13). Het is deze waarschijnlijkheidsratio waarop in de werkwijze volgens de uitvinding de data-associatie is gebaseerd, ofwel de radarcelselectie in de basisbenadering van op een uitvoering van het TBD algoritme gebaseerd recursief filteren.

15

Het Recursive Filtering Based (RFB, op recursief filteren gebaseerd) TBD algoritme kan worden geïnitieerd met de preselectieplot \underline{p}_0 in scan $k=0$. De preselectieplot bestaat uit de meetpositie

$$\underline{z}_0^{\text{p}} = \begin{bmatrix} r_{\text{cell},0} & b_{\text{cell},0} & e_{\text{cell},0} & v_{\text{cell},0}^{\text{d}} \end{bmatrix}^{\text{T}} \quad (\text{d.w.z., is gelijk aan het}$$

- preselectieradarcelcentrum), waarbij de geassocieerde meetfoutcovariantie R gelijk is aan die van een Gaussiaanse benadering van een uniforme waarschijnlijkheidsdichtheid in het radarcelvolume

$$R = \text{diag} \left(\begin{bmatrix} \frac{\text{RBSize}^2}{12} & \frac{\text{BISize}^2}{12} & \frac{\text{EBWidth}^2}{12} & \frac{\text{DBSize}^2}{12} \end{bmatrix} \right) = \text{diag} \left(\begin{bmatrix} \sigma_{r,q}^2 & \sigma_{b,q}^2 & \sigma_{e,q}^2 & \sigma_{v^{\text{d}},q}^2 \end{bmatrix} \right) \quad (16)$$

25

Naast de meetpositie, bestaat de preselectieplot uit de gemeten amplitudes $\underline{A}_0 = \{A_0^1, \dots, A_0^{N_b}\}$ in de voor die radarcel beschouwde bursts. Door een juiste

$$s_{0|0,\dots,-n_s} = s_{0|0,\dots,-(n_s-1)} + \hat{p}_{-n_s}^t K \left[z_{-n_s}^{\text{ML}} - h(s_{0|0,\dots,-(n_s-1)}) \right] \quad (18)$$

$$P_{0|0,\dots,-n_s} = \left(I - \hat{p}_{-n_s}^t K H F_{-n_s} \right) P_{0|0,\dots,-(n_s-1)} \quad (19)$$

5

K is hier de Kalman gain en F_{-n} is de toestandsovergangsmatrix van n scans in terugwaartse richting. In het terugwerkende TBD processingdeel en bij het updaten met de resulterende meetposities, wordt de doeldynamiek gemodelleerd als het niet-ervaren van willekeurige storingen, d.w.z. de procesruis wordt gesteld op nul. Dit is in overeenstemming met conventionele volgsystemen, waarbij doelbaaninitialisering alleen wordt uitgevoerd voor exact rechte doelbanen, teneinde het aantal initialiseringen van loosalarmen te verminderen.

Deze vergelijkingen zijn in principe afgeleid van het standaard uitgebreide Kalman doelbaanfilter, maar als zogenaamde informatiereductiefactor (zie Li, X.R. en Bar-Shalom, Y "Tracking in clutter with Nearest Neighbor Filter: Analysis and Performance" IEEE Trans. On Aerospace and Electronics Systems, vol. 32, no. 3, July 1996, pp. 995-1009) kan ook toegepast worden de waarschijnlijkheid $\hat{p}_{-n_s}^t$ dat de geassocieerde radarcel met meetpositie $z_{-n_s}^{\text{ML}}$ afkomstig is van een doel. Op deze manier wordt rekening gehouden met de onzekerheid van verkeerde associaties door gewogen updaten met de waarschijnlijkheid $\hat{p}_{-n_s}^t$. Deze waarschijnlijkheid kan worden afgeleid uit de waarschijnlijkheidsratio $L_{\text{SP|T}}^{-n_s}$ van de geassocieerde radarcel van de n_s -de scan terug als $\hat{p}_{-n_s}^t = L_{\text{SP|T}}^{-n_s} / (1 + L_{\text{SP|T}}^{-n_s})$, aangezien de waarschijnlijkheidsratio gedefinieerd wordt als de waarschijnlijkheid dat de meting op een doel slaat gedeeld door de waarschijnlijkheid dat deze ruis bevat. De informatiereductiefactor zal op analoge wijze worden toegepast in het scan processingdeel van het RFB TBD algoritme.

Handwritten signature

Voor een beschrijving van het voorwaartse scan processingdeel van het RFB TBD algoritme, kan worden begonnen op het punt waarop de radarcel met maximum waarschijnlijkheidsratio $L_{\text{SP|T}}^k$ in scan k is gevonden. Dan wordt het updaten van de voorspelde toestandsvector $s_{k|k-1}$ en de bijbehorende

5 foutcovariantie $P_{k|k-1}$ met de meetpositie z_k^{ML} , gebruik makend van de waarschijnlijkheid $\hat{p}_k^{\dagger} = L_{\text{SP|T}}^k / (1 + L_{\text{SP|T}}^k)$ als informatiereductiefactor, gegeven door

$$K = P_{k|k-1} H^T [H P_{k|k-1} H^T + R]^{-1} \quad (20)$$

10

$$s_{k|k} = s_{k|k-1} + \hat{p}_k^{\dagger} K [z_k^{\text{ML}} - h(s_{k|k-1})] \quad (21)$$

$$P_{k|k} = (I - \hat{p}_k^{\dagger} K H) P_{k|k-1} \quad (22)$$

15 waar nu alleen het scannummer van de laatste scan wordt aangegeven waaruit data gebruikt is om een toestandsvector of foutcovariantie te schatten; de eerste scan waaruit data werd gebruikt is altijd scan $k = -(N_s - 1)$.

Voor de berekening van de gemiddelde amplitude $\bar{A}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)}$ van de laatste N_s scans (inclusief scan k), worden de gekwadraterde amplitudes

20 van elke radarcel in aanmerking genomen, gewogen met de doelwaarschijnlijkheid \hat{p}_k^{\dagger} en, gewogen met de ruiswaarschijnlijkheid

$\hat{p}_k^n = 1 - \hat{p}_k^{\dagger}$, een gekwadraterde amplitude overeenkomend met een lineaire SNR van nul

$$25 \quad \bar{A}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)} = \sqrt{\frac{\sum_{l=0}^{N_s-1} \left(\hat{p}_{k-l}^{\dagger} \sum_{i=1}^{N_b-1} (A_{k-l}^i)^2 + \hat{p}_{k-l}^n N_b 2\sigma^2 \right)}{N_s N_b}} \quad (23)$$

Op analoge wijze wordt de integratiesom berekend als

$$\text{SumE}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)} = \sum_{l=0}^{N_s-1} \left(\hat{p}_{k-l}^1 \sum_{i=1}^{N_b-1} \frac{(A_{k-l}^i)^2}{2\sigma^2} + \hat{p}_{k-l}^n N_b \right) \quad (24)$$

De integratiesom $\text{SumE}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)}$ is de geïntegreerde signaalsterkte die gedrempeld is om een doelbaandetectie te bevestigen in scan k .

- 5 De predictie van de kinematische en energetische doelbaanattributen voor scan $k+1$ wordt gegeven door

$$s_{k+1|k} = F s_{k|k} \quad (25)$$

10. $P_{k+1|k} = F P_{k|k} F^T + Q \quad (26)$

$$\bar{A}_{k+1|k, \dots, k-(N_s-1)} = \bar{A}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)} \quad (27)$$

waarin nu een niet-nul procesruis covariantie Q wordt gebruikt om de

- 15 willekeurige doeldynamiek te modelleren.

In scan $k+1$ wordt in de werkwijze volgens de uitvinding eerst het poortcriterium $d^2 = \tilde{z}^T (H P_{k+1|k} H^T)^{-1} \tilde{z} \leq G$ toegepast om de radarcellen in de validatiepoort te selecteren, waarbij een poort G wordt gekozen die een vaste waarschijnlijkheid garandeert dat het doel binnen de resulterende

20 validatiepoort zal liggen (zie bijvoorbeeld de eerder genoemde Blackman en Popoli). Gebruik makend van de voorspelde toestandsvector $s_{k+1|k}$ en bijbehorende foutcovariantie $P_{k+1|k}$ en de geschatte doelamplitude $\bar{A}_{k+1|k, \dots, k-(N_s-1)}$, wordt volgens (15) de waarschijnlijkheidsratio berekend dat het doel zich in alle radarcellen van de validatiepoort bevindt, gebaseerd op

25 de positie van elke radarcel en de erop geprojecteerde gemeten amplitudes. De laatste stap van het RFB TBD algoritme is het associëren met de doelbaan van de radarcel met de maximum waarschijnlijkheidsratio $L_{SP|T}^{k+1}$.

- Het op recursief filteren gebaseerde TBD algoritme kan
- 30 bijvoorbeeld worden geïmplementeerd voor toepassing in een pulsdoppler

rondzoekradar met meerbundelvorming in elevatie, met als opdracht het detecteren van meervoudige doelen. Dit algoritme is zeer geschikt voor het processen van meervoudige elevatiebundels.

De belangrijke radarparameters in dit verband zijn in het
 5 onderhavige voorbeeld: de radarrotatietijd is 5 sec, het bearinginterval van een burst is $BISize = 0.85^\circ$, de radarbundelbreedte in bearing is $2,2^\circ$, de radarbundelbreedte in elevatie is $EBWidth = 5.0^\circ$, de afmeting van de range bin is $RBSize = 80m$ en de afmeting van de doppler bin is $DBSize = 12m/s$. Uit de
 10 radarbundelbreedte in bearing en het bearinginterval van een burst, kan afgeleid worden dat ongeveer 2,6 bearingintervallen passen binnen de radarbundelbreedte. Om te zorgen dat, onafhankelijk van de relatieve posities van de bursts op het doel, een gebied in bearing gelijk aan de radarbundelbreedte gedekt wordt, is het aantal geïntegreerde bursts per scan gesteld op $N_b = 4$.

15 Een doel RCS kan gemodelleerd worden met een middelwaarde van $5m^2$ en gedistribueerd als een χ^2 pdf met twee graden speling en onafhankelijkheid van burst tot burst. De initiële positie van het doel (bijvoorbeeld een gevechtsvliegtuig) en de snelheid ervan in het radardomein worden als volgt omschreven:

20 Afstand willekeurig tussen 150km en 500km.

Elevatie gelijk aan het centrum van de elevatiebundel ($2,66^\circ$).

Bearing van 0° .

Radiale snelheid van 300m/s plus een willekeurige compensatie tussen + en - van de halve doppler bin afmeting $DBSize$.

25 Tangentiële snelheid van 0m/s.

Er wordt van uitgegaan dat het doel niet accelereert, maar zich blijft verplaatsen volgens de uitgangsvoorwaarden, langs een constante-snelheidsbaan.

Als recursief doelbaanfilter kan een filter worden gebruikt dat de
 30 driedimensionale positie en de snelheid volgt met een stuksgewijs constant

uniform versnellingsmodel (zoals bijvoorbeeld beschreven in Blackman, S.S. en Popoli, R) voor de doeldynamiek, waarbij de standaarddeviatie van de willekeurige versnellingen gesteld is op 1 m/s^2 , overeenkomend met een maximum aangenomen versnelling van $0,2g$. De maximale aangenomen
 5 doelsnelheid dat in aanmerking komt in de doelbaanfilterinitialisatie is 1000 m/s .

In het onderhavige voorbeeld omvat een run 4 scans om de detectiewaarschijnlijkheid vast te stellen voor de $N_s - 1$ scans terug en vooruit volgens de RFB TBD initialisatiemethode na een preselectie. Naar analogie
 10 van de afleiding van de theoretische detectiewaarschijnlijkheid, wordt dit bewerkstelligd door elk van de 4 scans van een run een preselectie te laten genereren, waarop het RFB TBD algoritme wordt gestart. De initiële range wordt willekeurig gekozen, om de detectiewaarschijnlijkheid te verkrijgen van 500 km , waar deze nagenoeg 0 is voor TBD processing, tot 150 km , waar
 15 deze nagenoeg 1 is voor conventionele processing. Op een kleinere schaal introduceert het willekeurig kiezen van de initiële range een overbruggingsverlies (straddling loss), aangezien de doelrange varieert met betrekking tot de positie van de range bins. Om dezelfde reden wordt ook de initiële radiale snelheid willekeurig gekozen binnen een bracket die gelijk is
 20 aan de afmeting van de doppler bin rond een nominale snelheid.

Om de resultaten te vergelijken met die voor conventionele processing en met de maximaal mogelijke prestatie voor een TBD processingactie, kan dezelfde data worden geïdealiseerd door een geïdealiseerde conventionele en een TBD processingactie. Het
 25 "geïdealiseerde" karakter van deze processingacties bestaat hieruit, dat van elke scan de ontvangen signaalsterkte in de werkelijke bursts op het doel bij de werkelijke range, doppler en (natuurlijk) elevatie, toegevoerd worden aan de conventionele en TBD detectiesystemen. In elk van beide gevallen is een loosalarmwaarschijnlijkheid op doelbaanniveau gebruikt van $P_{FA}^t = 10^{-10}$. De
 30 resultaten worden met name weergegeven in afbeelding 4.

In afbeelding 4 is de detectiewaarschijnlijkheid voor de RFB TBD processing uitgezet tegen de range (kromme 41) en de geïdealiseerde conventionele en TBD processingacties (respectievelijk krommen 42 en 43). De resultaten zijn gebaseerd op 28.000 runs, wat neerkomt op een gemiddelde van 400 runs per 5km range bracket. Uit de runs is in elk van de 5 5km range brackets de waarschijnlijkheid van een detectie bepaald.

Uit afbeelding 4 blijkt dat de RFB TBD processing in werkelijkheid beter werkt dan de geïdealiseerde TBD processing. Dit is het resultaat van het vermogen van het RFB TBD algoritme om te profiteren van ruispieken in 10 radarcellen naast de radarcel waar het doel zich juist in bevindt. Zoals opgemerkt in, bijvoorbeeld, Kirilin, R.L. en Marama, B .H. « The Effect of Noise-Only Tracks on the Performance of a Combined Detection and Tracking Algorithm », IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, vol.33, no. 1, January 1997, pp. 329-333, moet voor het feit dat in een TBD 15 processingactie meervoudige doelbanen in aanmerking worden genomen, waarvan er slechts één tot een doelbaandetectie leidt, gecompenseerd worden. Het zoekgebied beperkende karakter van het RFB TBD algoritme duidt er echter op dat deze compensatie klein zal zijn. Wanneer de precieze doelpositie in de buurt ligt van de grens tussen twee radarcellen, is het 20 doelvermogen ongeveer gelijk voor beide radarcellen. De ruisrealisatie verschilt echter, hetgeen soms resulteert in een hogere amplitude in een radarcel naast de radarcel waarin het doel zich bevindt. Een conclusie is dat, tenminste in de initialiseringsfase, de op recursief filteren gebaseerde benadering, d.w.z. het beperken van het zoekgebied tot de validatiepoort van 25 een doelbaanfilter en het uitsluitend associëren van de radarcel die met de meeste waarschijnlijkheid het doel bevat, de detectieprestatie niet vermindert.

Ten aanzien van de conventionele processing, zoals afgeleid kan worden uit de 0,9 detectieranges, wordt een gain van 8,4dB bereikt voor een 30 detectiewaarschijnlijkheid van 0,9 - hetgeen zelfs meer is dan de theoretische detectiewaarschijnlijkheid. Dit kan worden verklaard uit het feit

dat in een scan het doelvermogen niet voor alle bursts op het doel gelijk is, zoals aangenomen wordt in de theoretische afleiding. Terwijl de radarbundel over het doel strijkt, zal het doelvermogenniveau de bundelvorm in bearing volgen. Voor TBD processing is het resultaat, dat de geïntegreerde

5 signaalsterkte correspondeert met een lager gemiddeld vermogensniveau dan dat in het centrum van de bundel. Voor conventionele processing betekent dit echter, dat voor de twee buitenste bursts van de vier op het doel, de hitdetectiewaarschijnlijkheid veel lager is dan voor de twee binnenste bursts. Dit heeft een veel sterker (negatief) effect op de

10 detectiewaarschijnlijkheid voor 3 van de 4 detectiecriteria op plotniveau van het conventionele detectiesysteem (en dus op de doelbaandetectiewaarschijnlijkheid), dan het verlaagde gemiddelde vermogen van de bursts op het doel heeft op de doelbaandetectiewaarschijnlijkheid van het TBD detectiesysteem.

15

Een op recursief filteren gebaseerde benadering van TBD kan worden gebruikt voor rondzoekradar. Direct afgeleid van deze benadering, is een initieel RFB TBD algoritme gegeven, dat in het onderhavige voorbeeld gebruik maakt van een Kalman doelbaanfilter als recursief filter, dat

20 bijgewerkt wordt met de radarcel die met de grootste waarschijnlijkheid het doel in elke scan bevat. Daarnaast is een preselectiesysteem geïntroduceerd waarin, uitsluitend voor de radarcellen in een scan die een preselectiedrempel hebben overschreden, een TBD processingactie wordt geïntialiseerd, die zich tevens uitstrekt tot een beperkt aantal scans terug.

25 Via een theoretische detectieprestatie-analyse is aangetoond, dat het gebruik van dit preselectiesysteem om een TBD processingactie te initiëren, de rekenkundige belasting aanzienlijk kan verminderen bij een verwaarloosbare teruggang in detectieprestatie. Resultaten van simulaties uitgevoerd door

30 uitvinder tonen aan, dat de theoretische TBD prestatie verwerkelijk kan worden door gebruik te maken van de voorgestelde RFC TBD processing voor doelbaaninitialisatie.

De uitvinding is beschreven voor een rondzoekradar, maar kan worden toegepast op alle typen radars, bijvoorbeeld zoek-, volg- en multifunctieradars.

In het algemeen kan de uitvinding worden toegepast om de
5 detectieprestatie voor sensorsystemen te verhogen, waar beperkingen in het processingvermogen brutekracht TBD architecturen in de praktijk nutteloos maken. Tenslotte is de uitvinding eenvoudig te implementeren.

CONCLUSIES

1. Een werkwijze voor het detecteren van radardoelen, waarbij de
5 radar over zendmiddelen beschikt voor het genereren van bursts van
radarpulsen en elke radarscan k bestaat uit een aantal
($N_b(k)$) bursts, met de kenmerken dat, voor elke scan k :

- 10 - in een eerste stap, een radarcel wordt gepreselecteerd door
een detectieproces;
- in een tweede stap, een Track-Before-Detect (TBD) proces
wordt geïntialiseerd voor de gepreselecteerde cellen, dat
gebruik maakt van een doelbaanfilter om de met de volgende
scan $k+1$ geassocieerde validatiepoort te construeren;
- 15 - in een derde stap, de data in de validatiepoort van scan $k+1$
gebruikt wordt om het TBD proces te updaten en om de met de
volgende scan $k+2$ geassocieerde validatiepoort te
construeren;

20 waarbij de derde stap voor elke scan wordt herhaald.

2. Werkwijze volgens conclusie 1, met het kenmerk dat in de
preselectiestap de ruwe data van de validatiepoort door het TBD proces
wordt geprocessed voor een beperkt aantal scans terug en vooruit.

25

3. Werkwijze volgens conclusie 2, met het kenmerk dat door het
TBD proces $N_{sb} - 1$ scans terug en vervolgens $N_s - 1$ scans vooruit worden
geprocessed.

30

4. Werkwijze volgens een van de conclusies 2 en 3, met het
kenmerk dat de ruwe data in een validatiepoort getransformeerd wordt tot
een virtuele plot, die gekenmerkt wordt door een rangepositie, een
dopplersnelheid, een elevatiepositie, een bearing positie en een
geïntegreerd-signaalsterkte, welke range, doppler, elevatie en bearing
35 informatie gebruikt wordt als input voor het doelbaanfilter, waarbij de sterkte

van het geïntegreerde signaal samen met de geïntegreerd-signaalsterkten van andere scans gebruikt worden voor drempelen (een drempelbewerking uitvoeren) op doelbaanniveau.

- 5 5. Werkwijze volgens conclusie 4, met het kenmerk dat, aangezien integratie plaats vindt van N_s scans met $N_b(k)$ bursts op het doel per scan, de te drempelen, tot een doelbaandetectie leidende integratiesom $SumE$, gelijk is aan een som van onafhankelijke Rayleigh gedistribueerde vermogensmetingen $x(k,b)$:

10

$$SumE = \sum_{k=1}^{N_s} \left[\sum_{b=1}^{N_b(k)} x(k,b) \right]$$

6. Werkwijze volgens een van de conclusies 1 tot en met 5, met het kenmerk dat het doelbaanfilter een recursief filter is.

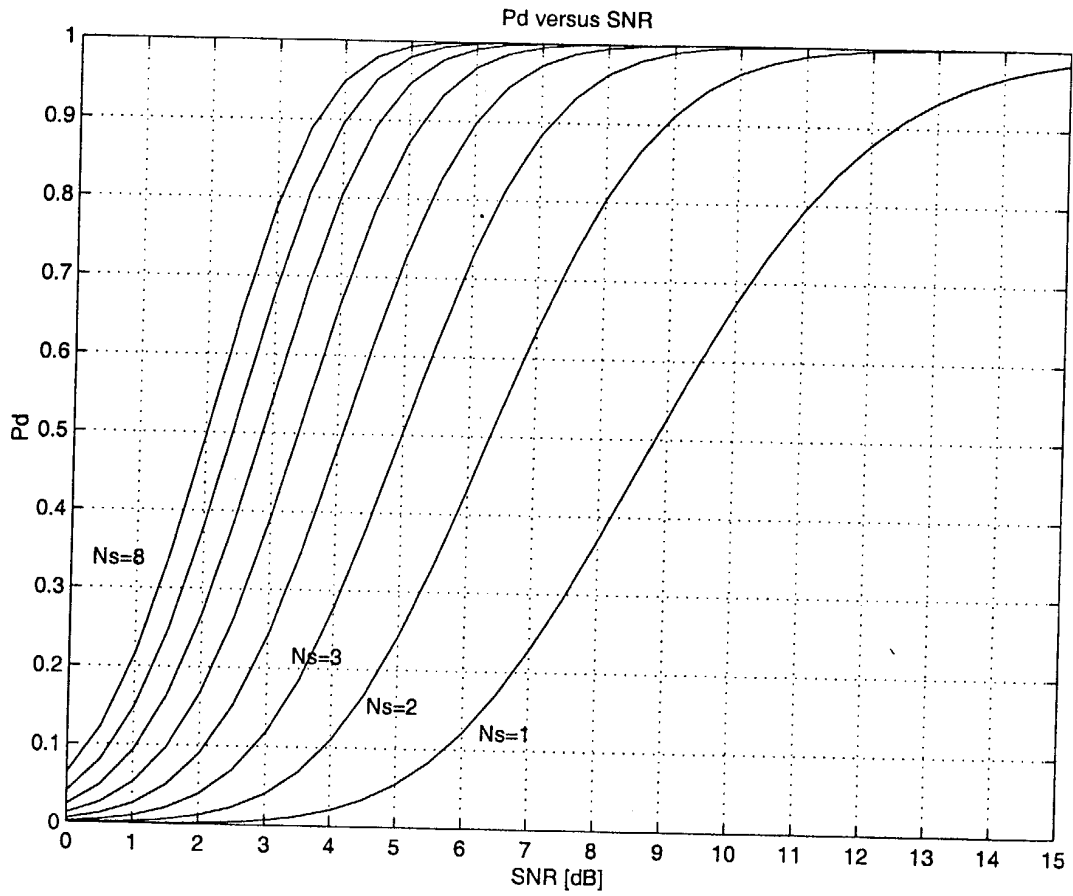
15

7. Werkwijze volgens een van de conclusies 1 tot en met 6, met de kenmerken dat het doelbaanfilter:

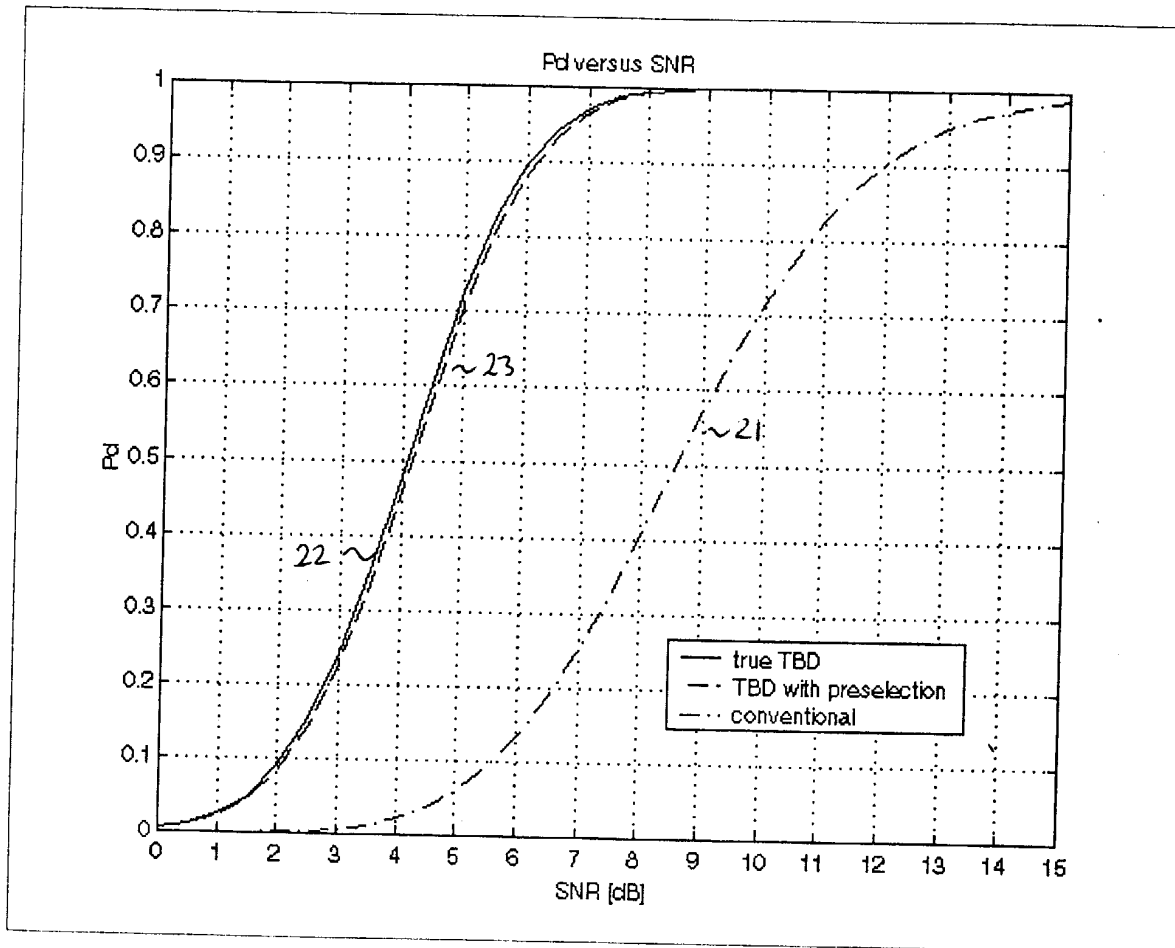
- uit elke scan de data selecteert (31) dat in aanmerking kan komen voor associatie;
- 20 - uit de data in de validatiepoort de data dat met de grootste waarschijnlijkheid afkomstig is van het doel in de doelbaan selecteert voor associatie (32);
- de doelbaanattributen bijwerkt (33) met de geassocieerde data;
- doelbaanattributen voorspelt (34) in de volgende scan uit de
- 25 bijgewerkte doelbaanattributen.

8. Werkwijze volgens conclusie 7, met de kenmerken dat de uitkomst van het doelbaanfilteren, de voorspelde doelbaanattributen, gebruikt wordt om de validatiepoort te construeren en dat deze validatiepoort gebruikt

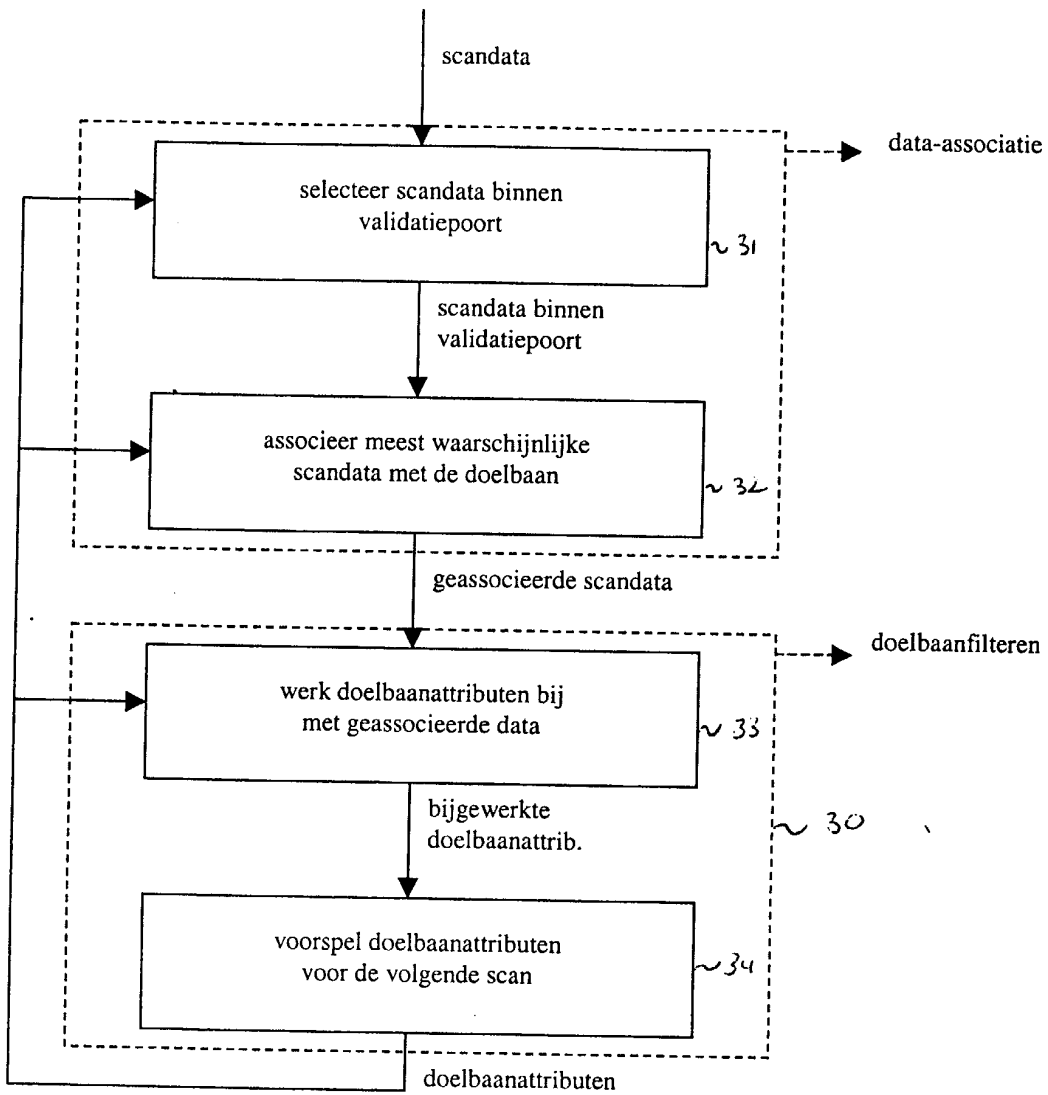
30 wordt om de voor de volgende doelbaanupdate te gebruiken ruwe data te selecteren.



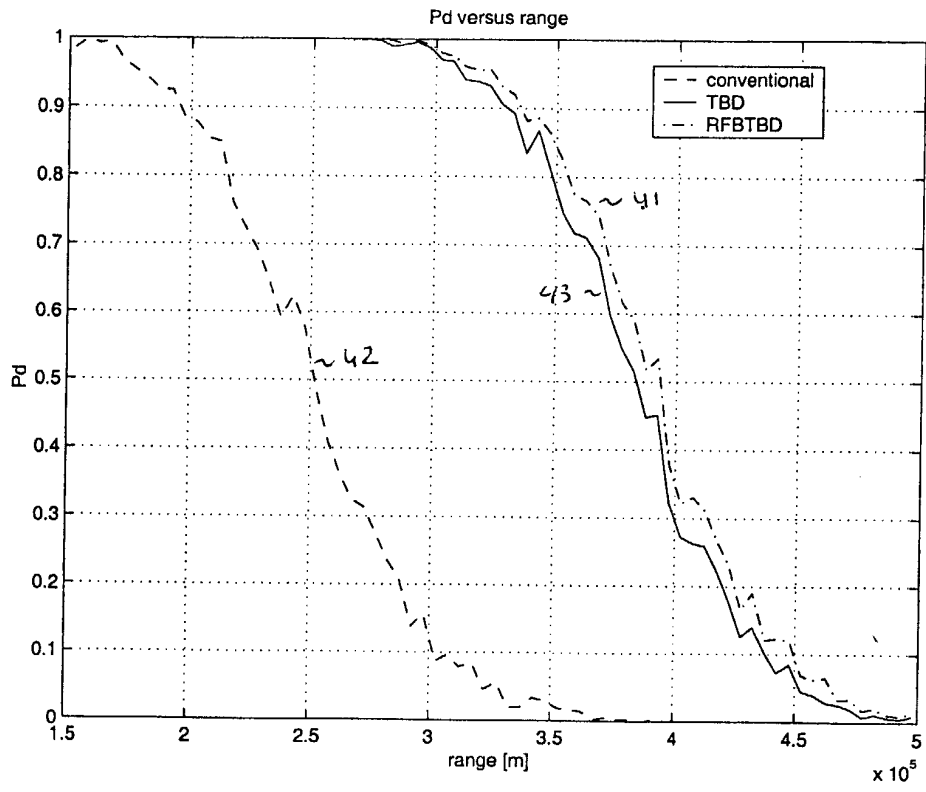
Afbeelding 1



Afbeelding 2



Afbeelding 3



Afbeelding 4

SAMENWERKINGSVERDRAG (PCT)

RAPPORT BETREFFENDE NIEUWHEIDSONDERZOEK VAN INTERNATIONAAL TYPE

IDENTIFICATIE VAN DE NATIONALE AANVRAGE	KENMERK VAN DE AANVRAGER OF VAN DE GEMACHTIGDE 62789
Nederlands aanvraag nr. 1020287	Indieningsdatum 02 april 2002
	Ingeroepen voorrangsdatum
Aanvrager (Naam) Thales Nederland B.V.	
Datum van het verzoek voor een onderzoek van internationaal type	Door de Instantie voor Internationaal Onderzoek (ISA) aan het verzoek voor een onderzoek van internationaal type toegekend nr. SN 38811 NL
I. CLASSIFICATIE VAN HET ONDERWERP (bij toepassing van verschillende classificaties, alle classificatiesymbolen opgeven)	
Volgens de internationale classificatie (IPC) Int.Cl.7: G01S7/292 G01S13/42 G01S13/72	
II. ONDERZOCHE GEBIEDEN VAN DE TECHNIEK	
Onderzochte minimum documentatie	
Classificatiesysteem	Classificatiesymbolen
Int.Cl.7:	G01S
Onderzochte andere documentatie dan de minimum documentatie, voor zover dergelijke documenten in de onderzochte gebieden zijn opgenomen	
III. <input type="checkbox"/> GEEN ONDERZOEK MOGELIJK VOOR BEPAALDE CONCLUSIES (opmerkingen op aanvullingsblad)	
IV. <input type="checkbox"/> GEBREK AAN EENHEID VAN UITVINDING (opmerkingen op aanvullingsblad)	

**VERSLAG VAN HET NIEUWHEIDSONDERZOEK VAN
INTERNATIONAAL TYPE**

Nummer van het verzoek om een nieuwheidsonderzoek
NL 1020287

A. CLASSIFICATIE VAN HET ONDERWERP
IPC 7 G01S7/292 G01S13/42 G01S13/72

Volgens de Internationale Classificatie van octrooien (IPC) of zowel volgens de nationale classificatie als volgens de IPC.

B. ONDERZOCHE GEBIEDEN VAN DE TECHNIEK

Onderzochte minimum documentatie (classificatie gevolgd door classificatiesymbolen)
IPC 7 G01S

Onderzochte andere documentatie dan de minimum documentatie, voor dergelijke documenten, voor zover dergelijke documenten in de onderzochte gebieden zijn opgenomen

Tijdens het internationaal nieuwheidsonderzoek geraadpleegde elektronische gegevensbestanden (naam van de gegevensbestanden en, waar uitvoerbaar, gebruikte trefwoorden)
EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX

C. VAN BELANG GEACHTE DOCUMENTEN

Categorie °	Geciteerde documenten, eventueel met aanduiding van speciaal van belang zijnde passages	Van belang voor conclusie nr.
A	KRAMER J D R JR ET AL: "Track-before-detect processing for a range-ambiguous radar" RADAR CONFERENCE, 1993., RECORD OF THE 1993 IEEE NATIONAL LYNNFIELD, MA, USA 20-22 APRIL 1993, NEW YORK, NY, USA, IEEE, US, 20 April 1993 (1993-04-20), bladzijden 113-116, XP010067895 ISBN: 0-7803-0934-0 het gehele document	1
A	EP 0 709 694 A (HOLLANDSE SIGNAALAPPARATEN BV) 1 Mei 1996 (1996-05-01) samenvatting kolom 1, regel 3 - regel 13 kolom 2, regel 32 - kolom 3, regel 28 kolom 4, regel 20 - kolom 5, regel 41	1

Verdere documenten worden vermeld in het vervolg van vak C.

Leden van dezelfde octroofamilie zijn vermeld in een bijlage

° Speciale categorieën van aangehaalde documenten

A document dat de algemene stand van de techniek weergeeft, maar niet beschouwd wordt als zijnde van bijzonder belang

E eerder document, maar gepubliceerd op de datum van indiening of daarna

L document dat het beroep op een recht van voorrang aan twijfel onderhevig maakt of dat aangehaald wordt om de publicatiedatum van een andere aanhaling vast te stellen of om een andere reden zoals aangegeven

O document dat betrekking heeft op een mondelinge uiteenzetting, een gebruik, een tentoonstelling of een ander middel

P document gepubliceerd voor de datum van indiening maar na de ingeroepen datum van voorrang

T later document, gepubliceerd na de datum van indiening of datum van voorrang en niet in strijd met de aanvraag, maar aangehaald ter verduidelijking van het principe of de theorie die aan de uitvinding ten grondslag ligt

X document van bijzonder belang; de uitvinding waarvoor uitsluitende rechten worden aangevraagd kan niet als nieuw worden beschouwd of kan niet worden beschouwd op inventiviteit te berusten

Y document van bijzonder belang; de uitvinding waarvoor uitsluitende rechten worden aangevraagd kan niet worden beschouwd als inventief wanneer het document beschouwd wordt in combinatie met één of meerdere soortgelijke documenten, en deze combinatie voor een deskundige voor de hand ligt

Z document dat deel uitmaakt van dezelfde octroofamilie

Datum waarop het nieuwheidsonderzoek van internationaal type werd voltooid

4 December 2002

Verzenddatum van het rapport van het nieuwheidsonderzoek van internationaal type

Naam en adres van de instantie

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

De bevoegde ambtenaar

Roost, J

VERSLAG VAN HET NIEUWHEIDSONDERZOEK VAN
INTERNATIONAAL TYPE

Nummer van het verzoek om een nieuwheidsonderzoek

NL 1020287

C.(Vervolg). VAN BELANG GEACHTE DOCUMENTEN

Categorie °	Geciteerde documenten, eventueel metaanduiding van speciaal van belang zijnde passages	Van belang voor conclusie nr.
A	<p>HARMON J L: "Track-before-detect performance for a high PRF search mode" PROCEEDINGS OF THE NATIONAL RADAR CONFERENCE. LOS ANGELES, MAR. 12 - 13, 1991, NEW YORK, IEEE, US, deel CONF. 5, 12 Maart 1991 (1991-03-12), bladzijden 11-15, XP010038683 ISBN: 0-87942-629-2 samenvatting</p> <p style="text-align: center;">----</p>	1
A	<p>US 3 731 304 A (CASPER J ET AL) 1 Mei 1973 (1973-05-01) samenvatting</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1

VERSLAG VAN HET NIEUWHEIDSONDERZOEK VAN

INTERNATIONAAL TYPE

Informatie over leden van dezelfde octrooifamilie

Nummer van het verzoek om een nieuwheidsonderzoek

NL 1020287

In het rapport genoemd octrooigeschrift	Datum van publicatie	Overeenkomend(e) geschrift(en)	Datum van publicatie
EP 0709694	A	01-05-1996	NL 9401767 A 03-06-1996
			AU 695841 B2 27-08-1998
			AU 3420695 A 09-05-1996
			CA 2161073 A1 26-04-1996
			EP 0709694 A1 01-05-1996
			US 5627545 A 06-05-1997

US 3731304	A	01-05-1973	GEEN
