

Een eenvoudig Transmissometer-Radiometer Systeem voor Evaluatie van Rookschermen

Ir. A.N. de Jong
FEL-TNO Postbus 96864 2509 JG Den Haag

1. Inleiding

Het gebruik van optische en infrarode waarnemings- en richtmiddelen in militaire toepassingen, is de laatste decennia gestaag toegenomen. Het is daarom logisch, dat ook de aandacht voor tegenmaatregelen zoals rookschermen is toegenomen. Verwacht mag worden dat in moderne gevechtsvelden aanzienlijke concentraties rook zullen voorkomen.

Bij de beoordeling van de waarnemingsprestaties van de sensoren zowel als van de effectiviteit van de afschermdende rook heeft het fysisch en elektronisch laboratorium FEL-TNO een belangrijke rol gespeeld. Door eigen ontwikkelingen, door metingen en door modelstudies is veel ervaring opgedaan, zodat een goed inzicht is verkregen welke sensor-, doel-, omgevings-, en rookparameters een rol spelen bij waarnemingen in een terrein met geobserveerde doelen.

Een van de methoden om de eigenschappen van rookschermen te meten zal in dit artikel worden beschreven. Het betreft een transmissometer-radiometer systeem, dat simultaan in een groot aantal gezichtsveldlijnen en in 6 spectrale banden de transmissie en de radiantie kan meten. Het systeem, waarvan er een voor de US-Army is gebouwd heeft bij diverse proefnemingen bewezen op snelle wijze aan de rookschermgebruiker en -ontwikkelaar gegevens over de effectiviteit te verschaffen.

2. Het rookscherm

Een rookscherm bestaat in het algemeen uit een kunstmatig geproduceerde verza-

meling deeltjes welke door de sensor ontvangen straling in principe op 3 manieren kunnen beïnvloeden: verzwakking (absorptie) van de straling van het doel, verstrooiing van zon-, hemel- of terreinstraling en eigen emissie. In de meeste gevallen treedt bij obscuratie van doelen een combinatie van deze drie verschijnselen op. In figuur 1 is een typisch voorbeeld van een rookscherm gegeven.

Een rookscherm heeft een aantal evidente eigenschappen, welke voor de gebruiker van belang zijn:

- afmetingen; lengte, breedte en hoogte
- obscuratietijd; obscuratiekans groter dan 80%
- gaten in het scherm
- tijd, nodig om een rookscherm te produceren
- obscuratie in diverse golflengtebanden
- positie van het rookscherm t.o.v. waarnemer en doel

Voor de producent van rookmateriaal is van belang hoeveel materiaal in de lucht gebracht moet worden om aan de eisen van de gebruiker te voldoen. Wat hierbij een grote rol speelt is het weertype: vooral de thermiek en de wind spelen een rol, maar ook de vochtigheidsgraad en de temperatuur beïnvloeden het vormen van de rookdeeltjes.

Voor de fysicus blijft de taak om bovengenoemde eigenschappen te vertalen naar meetbare en voorspelbare grootheden. Zo betekent het niet zien met een ongewapend oog, dat het contrast beneden een



figuur 1
Voorbeeld van een rookscherm, kort na de explosie van een hoeveelheid fosfor in het terrein.

bepaalde grens komt. Definieren we als contrast C_0 :

$$C_0 = \frac{L_d - L_a}{L_a} \quad (1)$$

dan wordt als grens van waarnemen 0.02 genomen. In formule (1) is L_d de luminantie van het doel en L_a de luminantie van de achtergrond.

Indien een rookscherm wordt aangebracht met een transmissie τ en een luminantie L_r degradeert het contrast tot C_r :

$$C_r = \frac{C_0}{1 + \frac{1}{\tau} \cdot \frac{L_r}{L_a}} \quad (2)$$

Hieruit blijkt duidelijk het effect van de rookluminantie en -transmissie op de con-

trastreductie. Is b.v. $L_d = 1.5L_a$ en dus $C_0 = 0.5$, dan is $C_r = 0.02$ bij $\tau = 0.1$ en $L_r = 2.4L_a$ en het doel is niet meer waarneembaar.

Als het oog gewapend is met electro-optische middelen, dan is de waarnemer vaak in staat om contrastverhoging te bereiken door niveau en versterking te regelen. Hier zijn beperkingen aan tengevolge van de beperkte dynamiek van de detector en de fotonenruis van de achtergrond. In het algemeen worden radiantieverschillen of in het geval van warmtebeeldcamera's temperatuurverschillen geconverteerd naar luminantieverschillen op een beeldscherm, waarop formule (2) niet meer toe-
pasbaar is. Desondanks blijft de grens van waarnemen beperkt door de radiantie en transmissie van de rook, naast de doel- en

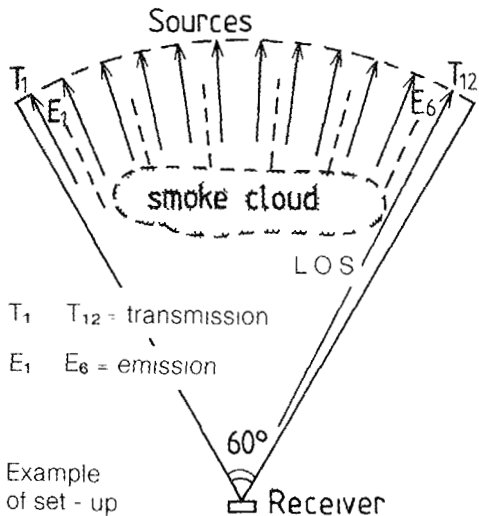
sensor-parameters.

3. Meetmethode

Uit het voorgaande blijkt de noodzaak om de transmissie en de radiantie van een rookscherm te bepalen, indien de afscherpende werking ervan geëvalueerd moet worden. Voor bepaling van de radiantie zou men gecalibreerde beeldvormende scanners kunnen nemen; de transmissie zou gemeten kunnen worden met standaard transmissometers, waarvan er dan wel een aantal moeten worden opgesteld. bruiken, die de deeltjesgrootte verdeling en de brekingsindex der deeltjes meet. Hieruit vallen de absorptie- en verstrooiingseigenschappen te berekenen. Een stap verder betekent het toepassen van een LIDAR: een laser die in de rook prikt, het liefst bij diverse golflengten.

Een nieuwe methode is gebaseerd op het gebruik maken van een lijnscanner, welke het tafereel over een grote hoek aftast.

In figuur 2 is de positie van de scanner (receptor) aangegeven. Aan de andere kant van het rookscherm bevindt zich een aan-

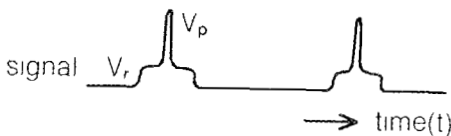


Example of set-up

figuur 2
Illustratie van de opzet van de transmissio-radiometer

tal bronnen, waarvan de straling in zekere mate gecollimeerd is in de richting van de scanner. Door de verzwakking van de signalen van de bronnen te meten, tijdens het voorbijtrekken van de rook, is de transmissie te bepalen, terwijl de radiantie uit de signaalsterkte in richtingen tussen de bronnen volgt.

Daar de bronnen uitgelijnd staan in het scan-vlak ontstaan er een aantal signaalpulsen op een scanlijn met de breedte van de "point-spread function" van de scanner. Om de signaalpulsen worden vervolgens poorten gecreëerd. Aan het begin van elke poort wordt een referentiesignaalniveau vastgelegd. Ten opzichte van dit niveau wordt de piekhoogte van het signaal in de poort gemeten (zie figuur 3). De piekhoogte van elk kanaal voor het begin van een proef wordt als 100% gekozen en het 0% niveau wordt verkregen door met een mechanische sluit de luchtbundels af te sluiten. Door het verloop van de piekwaarde te meten en te berekenen is een meerkanaalstransmissiemeting tot stand gekomen.



$$\text{transmission } \tau(t) = \frac{V_p(t) - V_r(t)}{V_p(0) - V_r(0)}$$

$$\text{calibration } \{ V_p(0) - V_r(0) \} \text{ at } t < 0$$

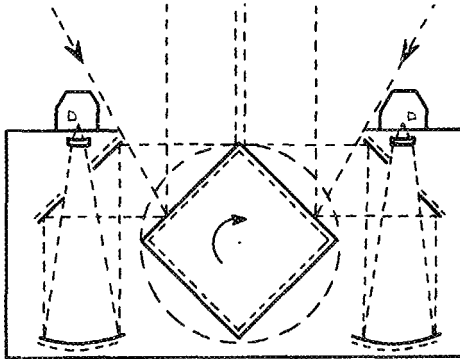
MPTR signal analysis

figuur 3
Bepaling van de transmissie op het tijdstip $\tau(t)$ gebeurt door meting van de signaal-piekhoogten $V_p(t)$ en $V_p(0)$ t.o.v de referentiespanningen $V_r(t)$ en $V_r(0)$ bij elk der poorten.

4. De meetapparatuur

De dimensionering van de componenten van het meetsysteem is, zoals behoort, bepaald door de eisen:

- totaal gezichtsveld: 60°
- grootte van een beeldelement: 1.2 mrad
- afstand bron tot scanner: max. 1500 m
- nauwkeurigheid transmissiemeting: 1‰
- nauwkeurigheid radiantiemeting; 1% bij bewolkt weer; 0.1° K
- 6 spectrale banden: 0.4-0.7 μm ; 0.7-1.0 μm ; 1.0-1.7 μm ; 2.0-2.5 μm ; 3-5 μm ; 8-14 μm



Top - view

figuur 4

Bovenaanzicht van het optisch systeem; D = detector

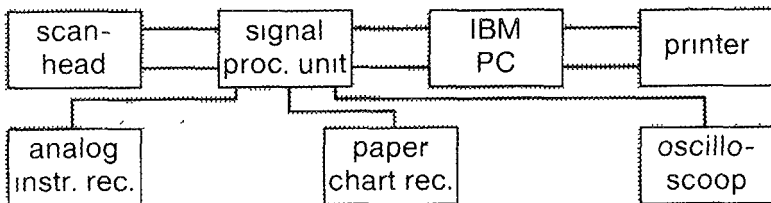
- integratietijd per spectrale band per gezichtsveldlijn: 1 sec.
- minimaal 12 gezichtsveldlijnen
- eenvoudige optische uitlijnmethode

Om aan deze eisen te voldoen is gekozen voor een scanner met een vierkante scanrotor (zie figuur 4). Deze wordt direct door een DC motor aangedreven met een rotatiesnelheid van 15 omw./sec, zodat 60 scans per seconde worden gemaakt. De rotorspiegels zijn uit een blok aluminium gefreesd op een CNC-bank en met de hand nagepolijst.

De optische bundels zijn 8 cm hoog en 6 cm breed. Convergentie vindt plaats met een holle spiegel met een brandpuntsafstand van 180 mm en een $2.2 \times$ verkleinende lens voor de detector.

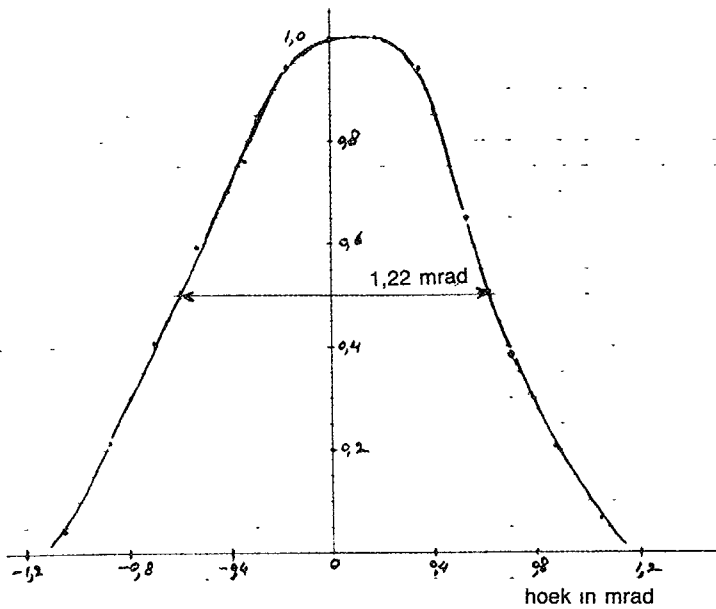
De detectormetingen zijn 0.1×0.1 mm, zodat de gewenste grootte van een beeldelement wordt gehaald. De gemeten "point-spread function" in verticale richting is gegeven in figuur 6. Door de versterkers een bandbreedte te geven van 120 kHz (3 db) is de overall point-spread function (50% punt) in horizontale richting 1.22 mrad geworden.

Analyse van de signaalverwerkings-elektronica leert dat de signaal-ruisverhouding na de voorversterkers minstens 100 moet zijn (signaal piek/ ruis piek-piek) om na processing en filtering op een nauwkeurigheid van 1‰ te komen in transmissiewaarde. Voor de radiantiemeting, waarbij gemiddeld



figuur 5

Blok-diagram van het MPTR meetsysteem.

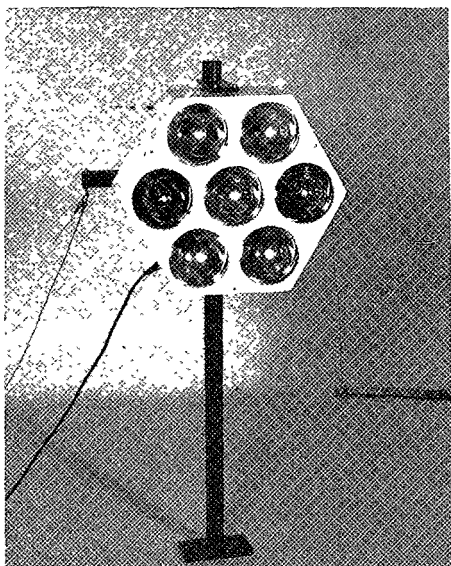


figuur 6
Verticale "point-spread-function" voor de 10 μm spectrale band

| Spectr. Band | Detector | N.E.P. RMS | transmissie | | | radiantie | | |
|-----------------------|------------|-------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|
| | | | W_B Bronstraling | W_d (op det) | S_p N_{pp} | W_Z Zonne-straling | W_d^* (op det) | S_p N_{pp} |
| 0,4-0,7 μm | Sil | $1,5 \cdot 10^{-14} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ | $750 \text{ W}/\text{sr}$ | $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ W}$ | $1,6 \cdot 10^4$ | $2,85 \cdot 10^3 \text{ W}/\text{cm}^2$ | $82 \cdot 10^{-9} \text{ W}$ | $2,6 \cdot 10^3$ |
| 0,7-1,0 | Sil | $1,0 \cdot 10^{-14}$ | 2500 | $1,7 \cdot 10^{-6}$ | $8,1 \cdot 10^4$ | $1,75 \cdot 10^3$ | $51 \cdot 10^{-9}$ | $2,4 \cdot 10^3$ |
| 1,0-1,7 | InGaAs | $5,0 \cdot 10^{-14}$ | 5000 | $3,3 \cdot 10^{-6}$ | $3,1 \cdot 10^4$ | $1,20 \cdot 10^3$ | $35 \cdot 10^{-9}$ | $3,3 \cdot 10^2$ |
| 2,0-2,2 | LR1129(PI) | $2,0 \cdot 10^{-12}$ | 1700 | $1,1 \cdot 10^{-6}$ | $2,6 \cdot 10^2$ | $0,85 \cdot 10^2$ | $2,5 \cdot 10^{-9}$ | 0,6 |
| 3,4-5,0 | HgCdTe | $1,7 \cdot 10^{-13}$ | 500 | $0,33 \cdot 10^{-6}$ | $9,2 \cdot 10^2$ | $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ W}/\text{cm}^2 \text{ Sr K}$ | $0,8 \cdot 10^{-10} \text{ W}/\text{K}$ | $0,22 \text{ K}^{-1}$ |
| 8,0-14,0 | HgCdTe | $2,7 \cdot 10^{-13}$ | 120 | $0,08 \cdot 10^{-6}$ | $1,4 \cdot 10^2$ | $6,2 \cdot 10^{-5} \text{ W}/\text{cm}^2 \text{ Sr K}$ | $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ W}/\text{K}$ | $2,4 \text{ K}^{-1}$ |

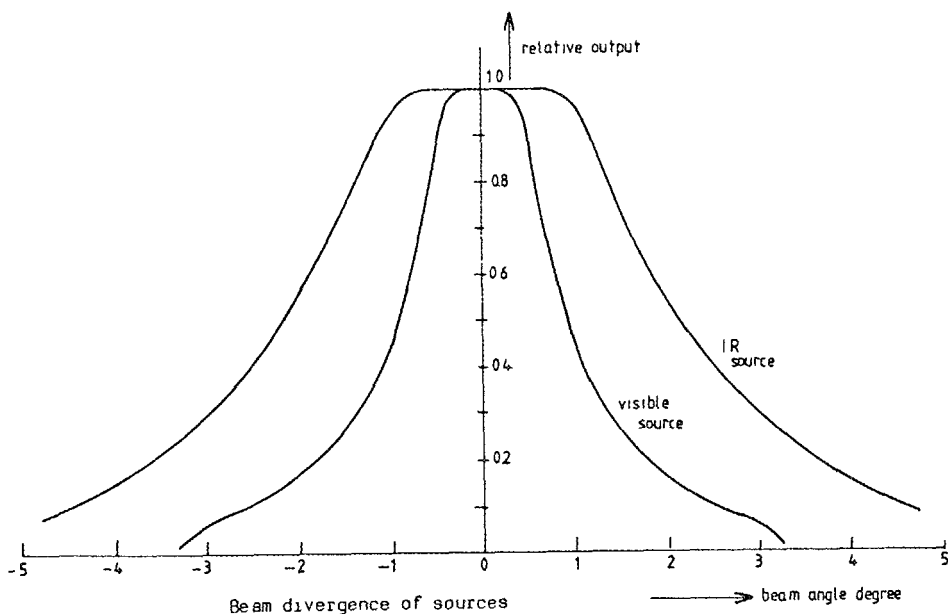
figuur 7
Weergave van detectorparameters en S/N verhoudingen

$$\left\{ \begin{array}{l}
 W_d = W_B \cdot \frac{\pi D_o^2}{R^2} \tau_o \tau_a \text{ met } \tau_o \tau_a = 0,3 \quad R = 1,5 \cdot 10^5 \text{ cm} \quad D_o = 8 \text{ cm} \\
 W_d^* = W_Z \cdot \frac{\pi D_o^2 D_d^2 D_z^2}{64 f^2 R_z^2} r \tau_o \tau_a \tau_a^* \text{ met } \tau_o \tau_a \tau_a^* = 0,1, \quad \frac{D_d}{f} = 1,2 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{D_z}{R_z} = 8 \cdot 10^{-3}, \quad r = 1 \\
 S_p/N_{pp} \text{ na voorv. } \Delta f = 120 \text{ KHz; } 3\text{-}5\mu\text{m} \text{ en } 8\text{-}14\mu\text{m} \text{ band t g v } \Delta T = 1 \text{ K}
 \end{array} \right.$$

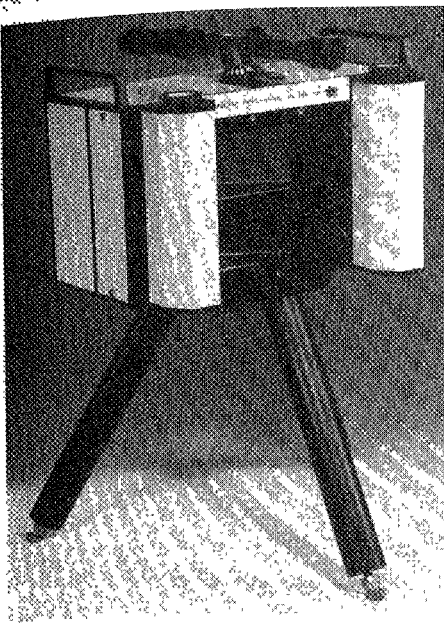


figuur 8
Foto van de bron met 5xIR en 2x visuele stralers
(meest links en meest rechts)

wordt over een instelbare poortbreedte en geïntegreerd over 1 seconde, levert een signaal-ruisverhouding van 1 aan de ingang (signaal/peik-pek ruis) een signaal-ruisverhouding aan de uitgang op van 30. Gegeven de detectorprestaties en de optische parameters is de straling van de bron te berekenen, welke de vereiste nauwkeurigheid in transmissiemeting oplevert. Omgekeerd is te berekenen wat de signaal-ruisverhouding wordt, gegeven een bron die wat overgedimensioneerd is om ook bij mindere weerscondities (slechter zicht) aan de eisen te voldoen. In figuur 7 zijn de resultaten van dergelijke berekeningen voor de 6 spectrale banden samengevat. De bron wordt in het terrein opgesteld, en moet daarom voldoen aan vele praktische eisen, zoals handelbaarheid, montage, vermogen en zichtbaarheid. Van een aantal prototypen is uiteindelijk het model, zoals geïllustreerd in figuur 8 uit de bus gekomen. Vanwege de spectrale eis is elke bron opgebouwd uit 2 visuele stralers en 5



figuur 9
Bundeldivergentie van een MPTR bron.



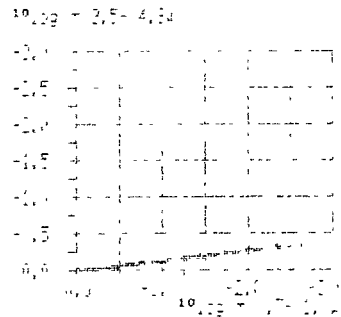
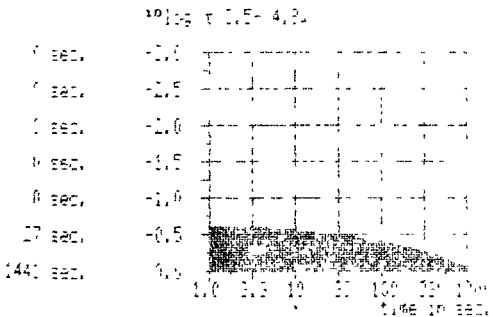
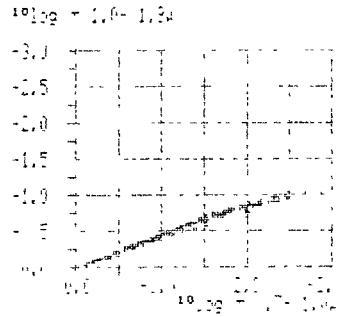
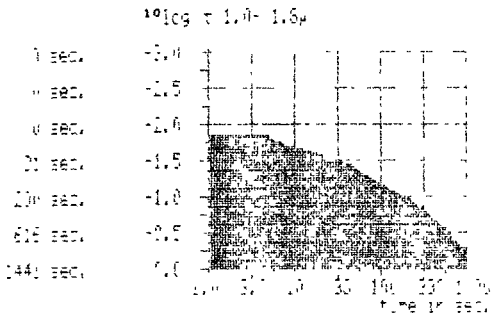
figuur 10
Foto van de MPTR scanner op instelbare 3-poot.

IR-stralers. De bundeldivergentie is gegeven in figuur 9; deze mag niet te klein zijn omdat anders richtproblemen ontstaan en windinvloeden te groot zijn. Als reflectoren zijn standaard Hella reflectoren met 3 cm brandpuntsafstand gekozen en 150 mm diameter. In figuur 10 is een foto van de scanner te zien.

Het blokdiagram van het systeem (MPTR = Multi-Path-Transmissometer-Radiometer) is gegeven in figuur 5. Zoals te zien wordt de sturing verzorgd door een standaard IBM-PC(AT). De meetgegevens worden op een floppy disc opgeslagen. Dit opslagmedium is voldoende voor registratie van de resultaten van proeven met een duur van 15 minuten.

Het uitprinten van de meetresultaten kan direct na een proef beginnen. Uitgeprint kunnen worden:

- de ruwe data
- transmissies en radianties voor alle gezichtsveldlijnen en spectrale banden



figuur 11
Voorbeeld histogram (links) en log τ -log τ plot (rechts) voor fosforrook

- histogrammen van obscuratietijden op verschillende niveau's van obscuratie
- $\log\tau(\lambda_1)$ tegen $\log\tau(\lambda_2)$ plots (optische diepten)

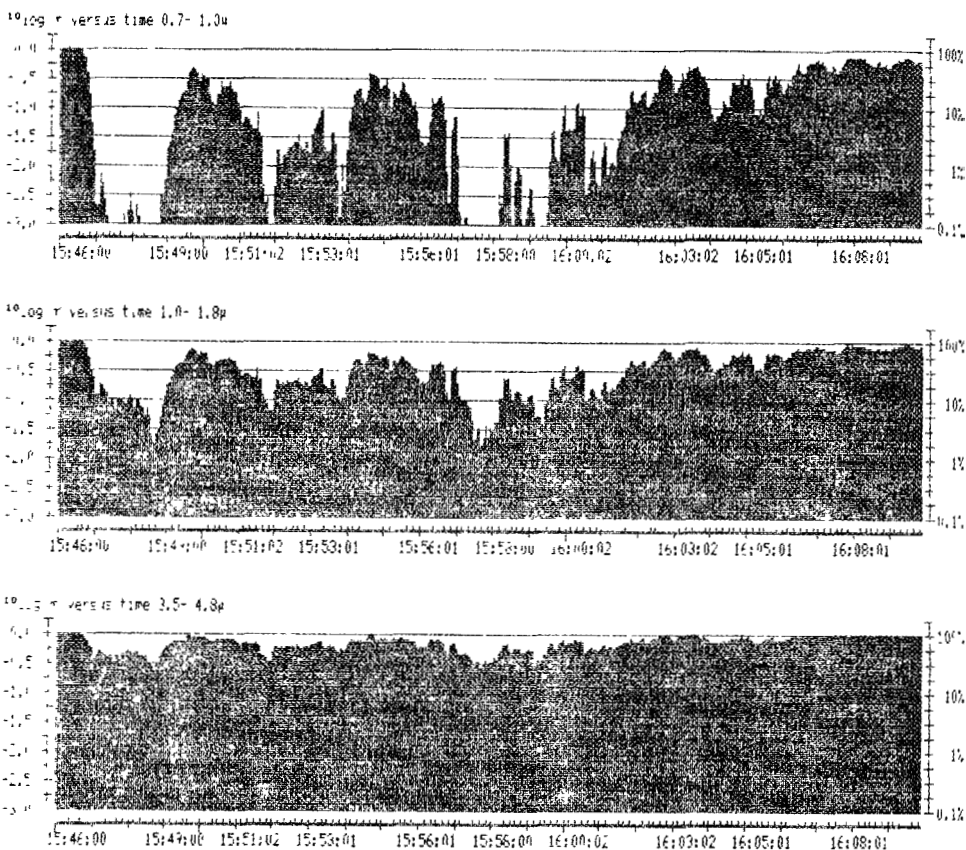
5. Uittijning, calibratie

Er is veel aandacht geschonken aan uittijning en calibratie. In de eerste plaats is boven op de scanner een richtkijker met kruisdraad gemonteerd. Deze is zodanig afgesteld, dat de lijn door het centrum in een vlak beweegt, dat loodrecht op de rotaties van de scanrotor staat. Alle bronnen worden in het veld op hoogte gezet m.b.v. deze richtkijker. De bronnen zijn

daartoe langs een verticale paal over enkele meters verstelbaar.

Ten tweede zijn de lensjes voor de detector in hoogte verstelbaar met micrometerinstellingen. Daarmee is te bereiken dat elke detector (spectrale band) in een vlak scant, dat eveneens loodrecht op de scanrotor staat. Ten derde zijn de holle spiegels horizontaal verstelbaar om het moment dat de detectoren naar een ver verwijderd punt "kijken" gelijk te stellen (langs de scanlijn).

Om de calibratie te verzorgen zijn alle spectrale banden in het laboratorium geijkt met zwarte stralers en een wolframband-



figuur 12
Voorbeeld van een transmissieplot voor 3 spectrale banden (fosfor)

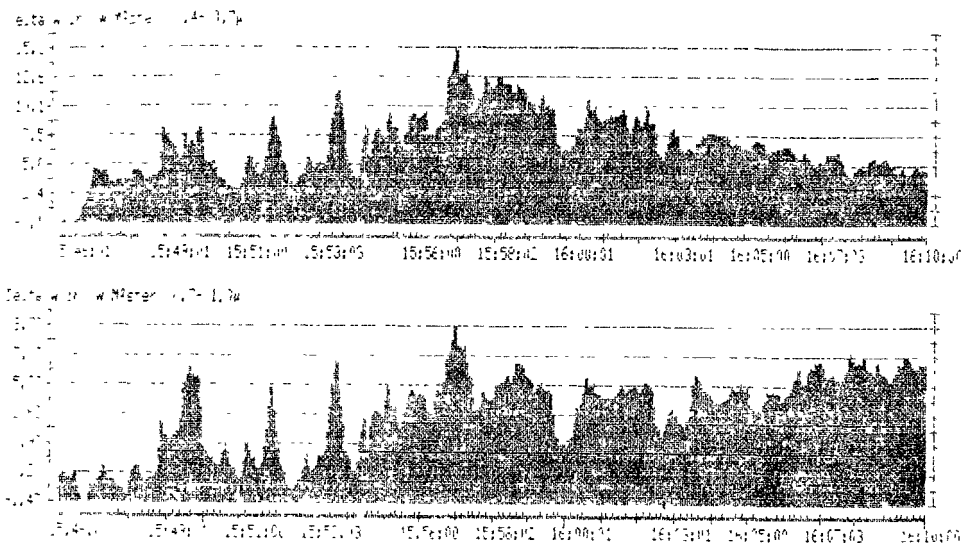
lamp. Om ook in het veld een geïmproviseerde ijking te doen is een calibratie-unit gebouwd, welke voor de ingang kan worden geplaatst. Hierin bevinden zich lampjes en een opgewarmde zwarte plaat voor de thermische banden. De unit is op zich eveneens eenmaal gecalibreerd. Calibratie is op deze wijze slechts enkele malen per dag nodig.

6. Resultaten

Met deze zogenoemde "Multi-Path-Transmissometer-Radiometer" (MPTR) zijn reeds een aantal succesvolle metingen gedaan. Enkele voorbeelden zijn gegeven van rookschermmetingen op Eglin Air Force Base (Florida). In figuur 11 is een

2-tal histogrammen en een 2-tal logt-logt plots gegeven voor een fosforschermer. Duidelijk is de verhouding in extinctiecoëfficiënt in de diverse spectrale banden af te lezen. Hieruit kan informatie verkregen worden over de deeltjes-grootteverdeling.

In figuur 12 is een 3-tal transmissieplots voor een der 12 gezichtsveldlijnen gegeven voor dezelfde proef. Duidelijk blijkt dat de afscherming in de spectrale banden met kortere golflengte beter is. Door naast elkaar liggende plots met elkaar te vergelijken kan informatie verkregen worden over de driftsnelheid van de zich in de rookwolk bevindende inhomogeniteiten. In figuur 13 is een voorbeeld van 2 radiantieplots ge-



figuur 13
Voorbeeld van een radiantieplot voor 2 spectrale banden (fosfor).
Geplot is ΔW t.o.v. de radiantie voor de proef.

ven. Hier is het verschil geplot van de radiantie op tijdstip t t.o.v. de radiantie op tijdstip 0 sec. Het verschil in de spectrale banden kan veroorzaakt worden door verschil in verstrooiingseigenschappen der rookdeeltjes, maar ook doordat de vegetatie op de achtergrond, welke een reflectietoename heeft bij $0.7 \mu\text{m}$ meer of minder afgeschermd wordt.

Er zijn correlaties gedaan betreffende de MPTR meetresultaten en waarnemingen met warmtebeeldkijkers en andere electro-optische sensoren. Daarbij bleek een zeer goed verband te bestaan tussen de voorspelde reductie in herkenningkans en de waarnemersresultaten.

Geconcludeerd kan worden dat het MPTR systeem zich uitstekend leent voor evaluatie van rookschermen, doordat de relevante parameters op adequate wijze worden gemeten.

Bovendien is het systeem eenvoudig van opzet, simpel te bedienen en betrekkelijk goedkoop, gelet op de enorme hoeveelheid informatie die verkregen wordt.

Daarbij valt tenslotte op te merken, dat het systeem zich ook uitstekend leent voor an-

dere absorptiemetingen in de atmosfeer, welke in de huidige milieubewuste frequent voorkomen.

7. Dankzegging

Dank is verschuldigd aan Dr. Michael Farmer van het "Science and Technology Corporation" te Las Cruces voor zijn stimulerende opmerkingen en aan Walter Klimmek van het "Office of PM Smoke" te Aberdeen (Md) voor het in de gelegenheid stellen van optimalisering van het systeem door deelname aan de "Smoke Weeks". Binnen het FEL-TNO is met name de bijdrage van Marco Roos zowel wat betreft het meetprincipe, als de electronica en de software ontwikkeling te noemen. Verantwoordelijk voor een groot deel van de technische realisatie was Peter Fritz, die veel coördinatie werk tussen werkplaatsen verrichtte en zorgde dat het project binnen de gestelde tijd gereed kwam. Tenslotte dank aan Hans Remmerswaal en Koos van den Ende, die de mechanische problemen oplosten en de afbouw verzorgden.