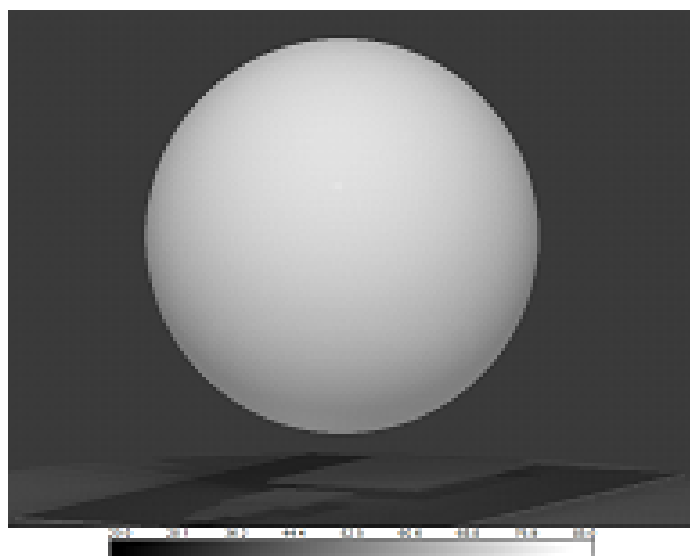
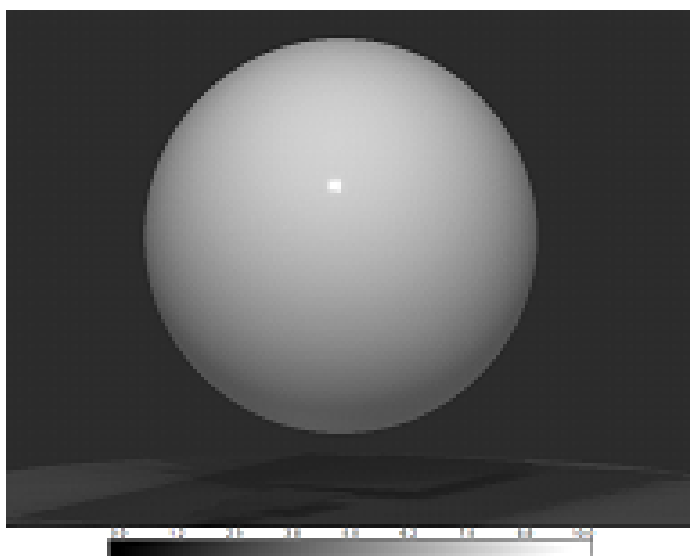
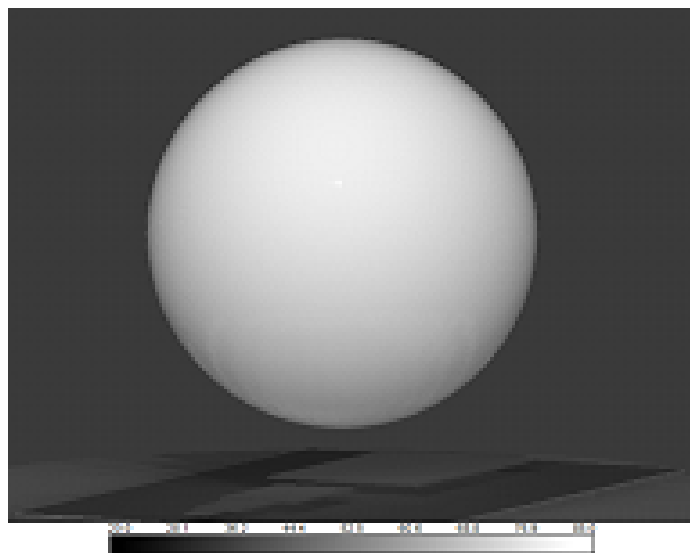
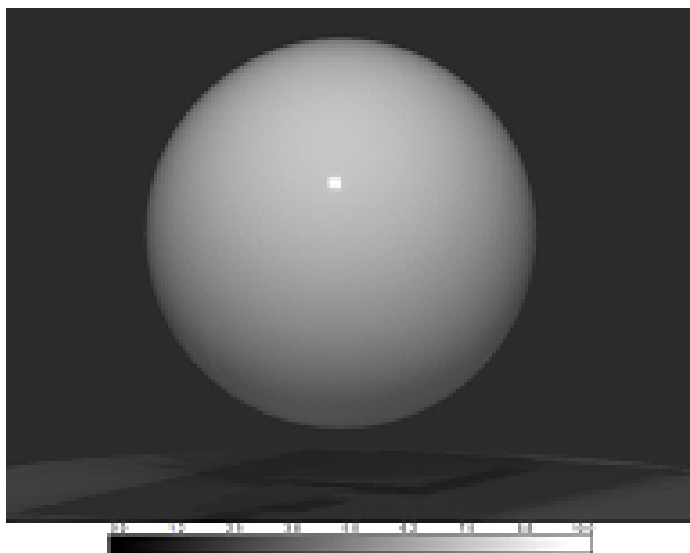


Förenklad bestämning av optiska ytegenskaper för IR-signaturmodellering

NILS KARLSSON, JAN FAGERSTRÖM, TOMAS HALLBERG, ROLAND LINDELL



Nils Karlsson, Jan Fagerström, Tomas Hallberg,
Roland Lindell

Förenklad bestämning av optiska ytegenskaper för IR-signaturmodellering

Titel	Förenklad bestämning av optiska ytegenskaper för IR-signaturmodellering
Title	Simplified determination of optical surface properties for IR signature modelling
Rapportnr/Report no	FOI-R--3770--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2013
Antal sidor/Pages	23 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54513
Godkänd av/Approved by	Per Johannesson
Ansvarig avdelning	Sensor- och TK-system

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Syftet med det arbete som beskrivs i rapporten är att undersöka om man kan använda mätdata från handhållna reflektometrar för att erhålla värden på parametrar till en BRDF-modell som kan användas för beräkning av IR-signaturer. Detta skulle innebära förenklade mätningar som kan göras i fält. Man undviker även risken för avvikelser mellan de provbitar som används i laboratoriemiljö och verkliga ytor på t.ex. de fordon som skall modelleras.

Mätningar har utförts med kommersiellt tillgänglig handhållna reflektometrar, laboratorieutrustning som BRDF-spektrometer och DHR-spektrometer. Parametrar har bestämts utifrån detta. Från den handhållna utrustningen saknas egentligen data för bestämning av den parameter som beskriver den spekulära lobens vidd i BRDF modellen. Det visar sig ändå att det finns ett samband mellan andelen diffus reflektivitet och den spekulära lobvidden. Då det finns möjlighet att bestämma andelen diffus reflektivitet med handhållen utrustning kan även lobviddsparametern bestämmas. Parametervärden som baserats på handhållna mätningar respektive laboratiemätningar jämförs. Exempel på bilder som är renderade med de olika parametervärdena visas och jämförs i rapporten.

Arbetet visar en sådan överensstämmelse att mätdata från den handhållna utrustningen är användbar till signaturberäkningar med BRDF-modeller. Man bör dock påminna om att detta är en begränsad studie och att den handhållna utrustningens spektrala upplösning är begränsad till sex våglängdsband från 0,9 till 12 μ m.

Nyckelord: BRDF, DHR, Sandford-Robertson, IR-signatur, modellering

Summary

The purpose of the work described in this report is to examine whether it is possible to use data from handheld reflectometers to obtain values for the parameters in a BRDF model that can be used for calculation of IR-signatures. This would mean simplified measurement procedures. The measurements can be made in field environment. It would avoid the risk of discrepancies between the samples used in the laboratory and the real surface of for example vehicles that are to be modeled.

Measurements were performed with commercially available reflectometers and laboratory equipment such as BRDF and DHR spectrometers. Data that directly can be used to determine the parameter that describes the specular lobe width in the BRDF model from the handheld equipment is missing. It turns out that there is a correlation between the proportion of diffuse reflectance and specular lobe width. In the case when it is possible to determine the proportion of diffuse reflectivity with handheld devices also the lobe width parameter may be determined. Parameter values that are based on handheld measurements and laboratory measurements are calculated and compared. Examples of images that are rendered with the respective different parameter values are displayed and compared in the report.

The work shows such compliance that data from the handheld equipment is useful for signature calculations with BRDF models. However, one should recall that this is a limited study, and that the hand-held equipment's spectral resolution is limited to six wavelength bands between 0.9 to 12 μm

Keywords: BRDF, DHR, Sandford- Robertson, infrared signature modeling

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Mätningar	11
2.1	Provbitar	11
2.2	Handhållna reflektometrar	11
2.3	Laboratoriemätningar	11
3	BRDF-modell	12
3.1	Sandford-Robertsonmodellen	12
3.1.1	Parametern b	12
3.1.2	Parametern $\rho_D(\lambda)$	13
3.1.3	Parametern $\varepsilon(\lambda)$	13
3.1.4	Parametern e	13
4	Resultat	14
4.1	Parametrar	14
4.1.1	Parametern b	14
4.1.2	Spektral diffus reflektivitet och emissivitet	15
4.1.3	Parametern e	15
4.2	Renderade RadThermIR-bilder	16
5	Slutsatser	22
6	Referenser	23

1 Inledning

Under några år har projektet ”Plattformssignaturer” arbetat med modellering och utveckling av modeller för IR-signaturer av olika plattformar, soldater och bakgrunder [1-3]. Viktiga in-parametrar i sådana beräkningar är ytornas optiska spridningsegenskaper. Ett sätt att noggrant beskriva en ytas spridningsegenskaper är med dess BRDF (”bi-directional reflectance distribution function”) [4, 5]. BRDF behövs för att korrekt återge reflekterad och emitterad IR-strålning i olika riktningar. En illustration av skillnaden mellan beräkningar av IR-bilder med och utan BRDF kan ses i Figur 1–Figur 3. Då bilden är beräknad utan BRDF antas ytan vara helt diffus. De sidor av bilen som är ljusare representerar en högre temperatur och är uppvärmda av soluppvärmning. Det är en reflex av solen som ses i framskärmen i Figur 1 och Figur 3, men som saknas i Figur 2. Med BRDF fås en bättre likhet med en uppmätt IR-bild (notera t ex spekulärreflexerna på framskärmen). En avvikelse mellan Figur 1 som baseras på mätdata och Figur 2, Figur 3 är temperaturen på avgasröret. Denna temperatur har inte beräknats utan har i de beräknade bilderna ansatts till ett värde.

BRDF innehåller generellt mycket information, eftersom den är en funktion av våglängd samt alla infallsvinklar och utfallsvinklar. Det är därför komplicerat och tidskrävande att mäta BRDF. Ytterligare ett problem med BRDF är att ytorna normalt måste karakteriseras i labbmiljö, vilket betyder att ytorna på de verkliga objekten sällan kan användas för karakteriseringen. Istället måste man använda speciellt tillverkade provytor. Provytorna riskerar att ha delvis andra egenskaper än de verkliga ytorna. Detta har observerats i tidigare studier [3].

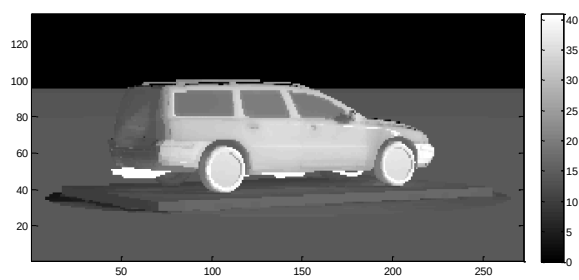
I detta arbete användes en provbit lackerad med bättringsfärg av samma kulör som fordonet för noggrann uppmätning av BRDF. Reflektiviteten mättes på denna provbit och på olika delar av fordonet med en handhållen utrustning. Resultat från detta visas i Figur 4 och Figur 5. I dessa kan man se att provbitens kulör överensstämmer med fordonets färg i det synliga våglängdsområdet (400 - 720 nm) medan avvikelsen är påtaglig för IR-våglängder (över 720 nm).



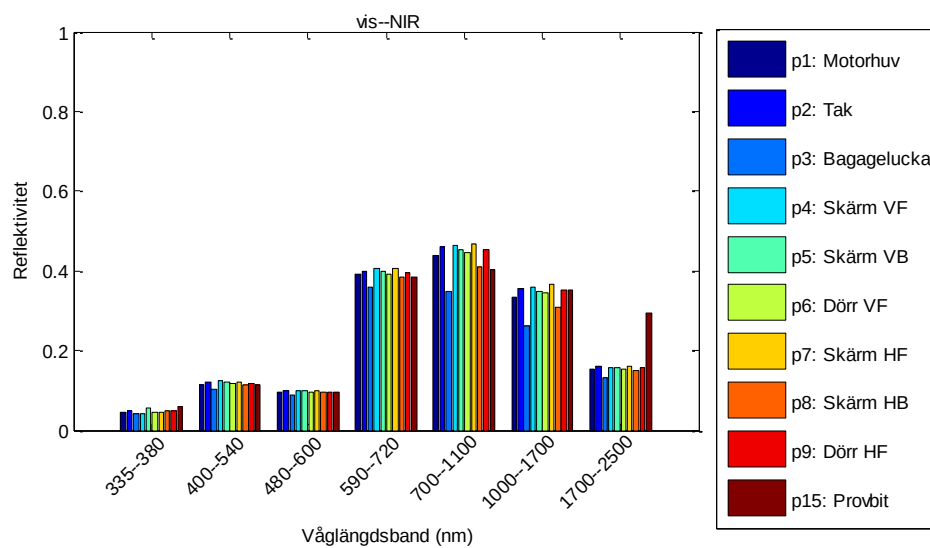
Figur 1. Uppmätt IR-bild av skenbar temperatur.



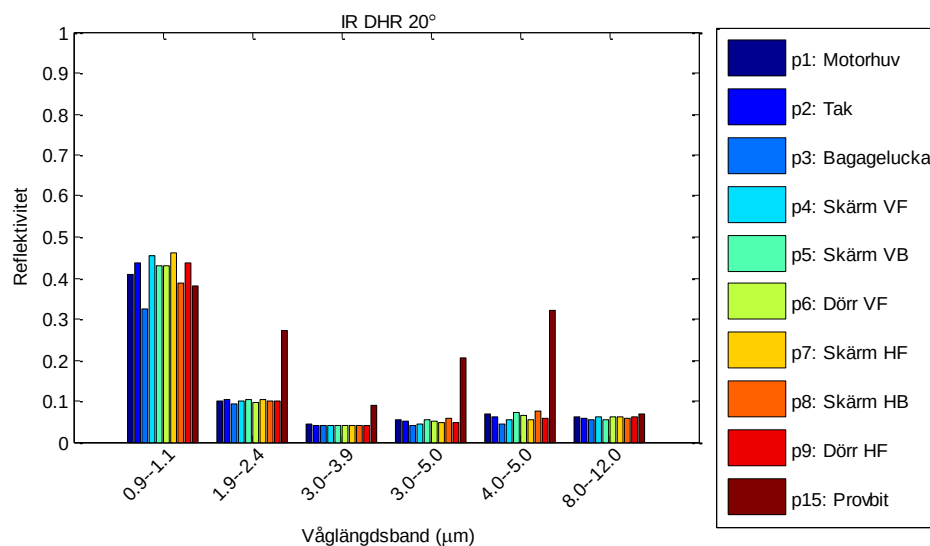
Figur 2. Beräknad skenbar temperatur utan BRDF.



Figur 3. Beräknad skenbar temperatur med BRDF.

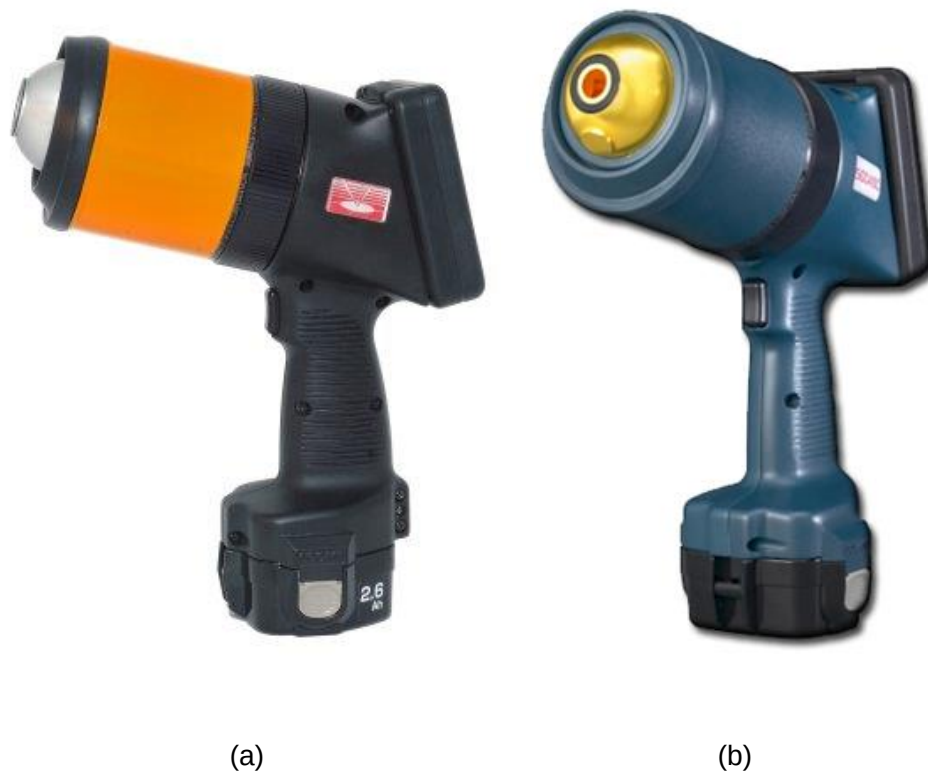


Figur 4. Reflektivitet för uppmätt på olika delar av ett fordon och en provbit inom Vis-NIR-området.



Figur 5. Reflektivitet uppmätt på olika delar av ett fordon och en provbit inom IR-området.

För att komma till rätta med båda problemen (tidskrävande mätningar och användningen av speciellt tillverkade provytor) har vi analyserat en metod att ta fram BRDF från förenklade reflektivitetsmätningar med handhållen utrustning som kan användas i fält, se Figur 6. Utrustningen mäter reflekterad strålning inom ett antal olika våglängdsband (se Figur 4 och Figur 5) och för några få olika infallsvinklar [6, 7].



Figur 6. Handhållen utrustning för reflektansmätning. (a) 410-Solar reflectometer och (b) SOC 410 DHR Reflectometer. Fotografier och utrustning från Surface Optics Corporation.

Ett sätt att hantera BRDF är modeller som beskrivs med ett antal parametrar. Detta arbete syftar till att ta fram en metod för att ta fram värden på parametrar i Sandford-Robertsons BRDF-modell [4] baserat på mätdata från förenklade mätningar med handhållen utrustning, samt att undersöka hur väl en sådan parametrisering fungerar för att modellera IR-egenskaperna för ett objekt.

Syftet med den förenklade metodiken är alltså att:

- Minska antalet mätningar (jämfört med mätningar av BRDF- och DHR (Directional Hemispherical Reflectance) på labb) och därmed snabba upp mätprocessen.
- Basera BRDF-parametreringen på mätdata från verkliga objekt, inte provbitar.

I arbetet studeras hur olika parametreringar av Sandford-Robertson-modellen fungerar i simuleringar av IR-signaturer. Först beskrivs hur de optiska ytegenskaperna har mätts på flera olika sätt, dels med noggranna BRDF- och DHR-mätningar, dels med förenklade mätningar med handhållen utrustning. Därefter jämförs olika parametreringar av Sandford-Robertson-modellen, dels parametreringar baserade på noggranna mätningar, dels parametreringar baserade på förenklade mätningar. Slutligen undersöks hur väl de olika BRDF-parametreringarna fungerar i beräkningar av IR-bilder.

2 Mätningar

Vi utgår från ett antal lackerade ytor som karakteriserats med handhållna reflektometrar, BRDF-spektrometer samt DHR-spektrometer. I möjligaste mån har vi använt redan uppmätta data. I huvudsak används data från den provbit med den billack som använts i tidigare studier [3].

2.1 Provbitar

De provbitar som använts i studien presenteras i Tabell 1.

Tabell 1. Provytor som används i studien.

Provyta nummer	Typ av yta	Kommentar
1	Röd billack (Volvo V70)	Se [3].
2	Röd bilplåt	Ej samma men relativt lik provyta 1
3	Ljus provyta	Relativt diffus, militär typ
4	Mörk provyta	Relativt diffus, militär typ
5	Grön CUBI-färg	Se [1]

2.2 Handhållna reflektometrar

Till förfogande finns två handhållna reflektometrar levererade från Surface Optics Inc, se Figur 6. Den ena arbetar i det visuella området och benämns ”410 Solar reflectometer” och den andra är avsedd för IR våglängder och benämns ”SOC 410 DHR Reflectometer”. Båge arbetar enligt principen med integrerande sfär.

I det visuella området (”410 Solar reflectometer”) mäts data för ”solar reflectance” och ”solar absorptance”. Man kan här även mäta total respektive diffus reflektans. En fast infallsvinkel om 20° används för det infallande ljuset. Via filter får man ett medelvärde över de spektrala våglängdsbanden 335-380, 400-540, 480-600, 590-720, 700-1100, 1000-1700, 1700-2500 nanometer.

I IR-området (”SOC 410 DHR Reflectometer”) mäts DHR-värden. I detta fall finns två fasta infallsvinklar på 20° och 60°. Via filter får man här medelvärden över våglängdsbanden 0.9-1.1, 1.9-2.4, 3.0-3.9, 3.0-5.0, 4.0-5.0, 8.0-12.0 µm.

Den utrustning som FOI har i dag mäter total DHR. Surface Optics som tillverkat och levererat befintlig utrustning kan även tillhandahålla ett nytt mät huvud till befintlig utrustning som kan mäta total, spekulär och diffus DHR för våglängdsbanden 3-5µm respektive 8-12 µm. Detta mät huvud skulle mäta med en fast infallsvinkel på 20°. Den rymdvinkel som avsätts för mätningar av den spekulära loben är 8.96°.

2.3 Laboratiemätningar

För att bestämma referensytornas spektrala DHR (diffus och total) användes en FTIR-spektrometer. När det gäller spektrometrarna och mätning av den diffusa andelen kopplar man bort den spekulära strålen. För IR-spektrometern är den rymdvinkeln som kopplas bort 26,1° och för VIS-NIR-spektrometern så är denna 12,1°. Provets BRDF bestämdes med en scatterometer. En noggrannare beskrivning av den laborativa mätutrustningen och mätförfarandet ges i tidigare arbete [1].

3 BRDF-modell

Ett sätt att noggrant beskriva hur ljus reflekteras av en ogenomskinlig yta är med ytans BRDF, ("Bidirectional reflectance distribution function"). Med denna beskrivs kvoten av den spridda radianzen i varje rymdvinkel relativt irradiansen som infaller mot ytan. Både infallande och reflekterad riktning är parametriserad i azimutvinkel ϕ och elevationsvinkel θ . BRDF är också specificerad för varje våglängd. För att bestämma en full BRDF för en yta krävs alltså mycket mätningar. Man har därför infört olika modeller som beskriver en ytas BRDF. En vanlig förekommande modell för IR-området är Sandford-Robertsonmodellen [4, 5] som även används i ThermoAnalytics program RadTherm IR. För att bestämma ingående parametrar i modellen krävs det ändå relativt omfattande mätningar [1].

3.1 Sandford-Robertsonmodellen

Sandford-Robertson-modellen är en modell med fyra parametrar (b , e , $\rho_D(\lambda)$ och $\varepsilon(\lambda)$), två av dem våglängdsberoende, se [1]:

$$\rho_{SR}^{BRDF} = \frac{g(b, \theta_s) \rho_D(\lambda) g(b, \theta_i)}{\pi G(b)^2} + \frac{\rho_s^{DHR}(\lambda, \theta_i) h(e, \alpha)}{4\pi H(e, \theta_i) \cos \theta_s}. \quad (1)$$

De olika termerna g , G , h och H i Ekvation (1) är funktioner av de fyra parametrarna:

b	Fresnel koefficient.
e	Spekulär lobbredd.
$\rho_D(\lambda)$	Spektral diffus reflektivitet.
$\varepsilon(\lambda)$	Spektral emissivitet.

Parametrering av BRDF-modellen är väl beskrivet i tidigare arbete [1], till vilket härledning av formler hänvisas.

3.1.1 Parametern b

Fresnel koefficienten b ingår i funktionerna $g(b, \theta)$ och $G(b)$ som utgör ett samband mellan vinkelberoende och vinkeloberoende emissivitet. Vi antar här att emissiviteten har samma vinkelberoende som den diffusa reflektiviteten.

$$g(b, \theta) = \frac{1}{1 + b^2 \tan^2 \theta} \quad (2)$$

$$G(b) = \frac{1}{1 - b^2} \left[1 + \frac{b^2}{1 - b^2} \ln(b^2) \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon(\lambda, \theta_i) = \frac{g(b, \theta_i)}{G(b)} \varepsilon(\lambda) \quad (4)$$

Parametern b kan bestämmas av DHR om dessa finns för minst två olika vinklar enligt formel 5. I och med att den handhållna utrustningen bestämmer DHR vid två vinklar finns värden som direkt kan sättas in i formeln för beräkningen av parametern b :

$$b^2 = \frac{\rho^{DHR}(\lambda, \theta_1) - \rho^{DHR}(\lambda, \theta_2)}{[1 - \rho^{DHR}(\lambda, \theta_1)]\tan^2 \theta_1 - [1 - \rho^{DHR}(\lambda, \theta_2)]\tan^2 \theta_2} \quad (5)$$

Observera att funktionen $g(b, \theta)$ endast varierar svagt med θ från $\theta = 0^\circ$ till $\theta = 70^\circ$.

Vinklarna θ_1 och θ_2 bör därför skilja sig åt så mycket som möjligt eftersom det resulterande värdet på b annars riskerar att bli imaginärt på grund av variationer i de uppmätta ρ^{DHR} . Detta problem uppstår för vissa våglängder där ρ^{DHR} uppmätts med den handhållna utrustningen, se sektion 4.1.1.

3.1.2 Parametern $\rho_D(\lambda)$

Den vinkeloberoende parametern $\rho_D(\lambda)$ beskriver den diffusa reflektiviteten hos ytan. Vi har tillgång till mätningar av DHR vid infallsvinkeln $\theta_i = 20^\circ$ och $\theta_i = 60^\circ$ från vilka $\rho(\lambda)$ bestäms via formel 6.

$$\rho(\lambda) = \frac{G(b)}{g(b, \theta_i)} \rho^{DHR}(\lambda, \theta_i) \quad (6)$$

I brist på separat mätning av diffus reflektivitet approximeras $\rho_D(\lambda)$ med $\rho(\lambda)$.

3.1.3 Parametern $\varepsilon(\lambda)$

Parametern $\varepsilon(\lambda)$ bestäms från mätningar av total hemisfärisk reflektivitet med hjälp av formel 7.

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{G(b)}{g(b, \theta_i)} [1 - \rho^{DHR}(\lambda, \theta_i)] \quad (7)$$

3.1.4 Parametern e

Mätdata för att bestämma parametern e kan inte fås direkt från den handhållna utrustningen. En strategi för att hantera detta är att välja e -värden som finns angivna för standardmaterial. I fallet med billacken (yta nummer 1, se Tabell 1) kan man välja ett värde för blanka lackerade plåtytor bland standardmaterialen i RadThermIR. Exempel på renderade bilder med olika värden på parametern e visas i kapitel 4. I denna rapport undersöks även om kvoten mellan diffus och total DHR kan användas som mått på den spekulära lobens vidd och därmed användas för att bestämma värdet på parametern e .

4 Resultat

Resultatkapitlet är uppdelat i två delar där den första behandlar värden på parameterberäkningarna (sektion 4.1) och den andra visar resultat med renderade bilder där olika paramervärden använts (sektion 4.2). Mätningarna och analysen är gjorda på en provbit med billack (yta nummer 1 i Tabell 1).

4.1 Parametrar

4.1.1 Parametern b

Värdet på parametern b bestäms för provyta nummer 1 baserat på mätdata från handhållen utrustning och BRDF-mätningar. Om mätdata från handhållen utrustning, för våglängdsintervallet 3.0-3.9 μm , se tabell 2, används erhålls värdet $b=0.1225$ som kan jämföras med $b=0.1251$ som är det värde som tagits fram ur BRDF-mätningar vid våglängden 3.39 μm .

Tabell 2. Den handhållna utrustningen ger medelvärden av DHR i våglängdsintervall. I tabellen visas DHR och b -parametern för provytan.

Våglängd [μm]	DHR 20°	DHR 60°	Parameter b
0.9 - 1.1	0.3813	0.4550	0.2179
1.9 - 2.4	0.2702	0.2880	0.0933
3.0 - 3.9	0.0900	0.1275	0.1225
3.0 - 5.0	0.2048	0.2047	0.0000
4.0 - 5.0	0.3195	0.2825	0.1339i
8.0 - 12.0	0.0668	0.1167	0.1407

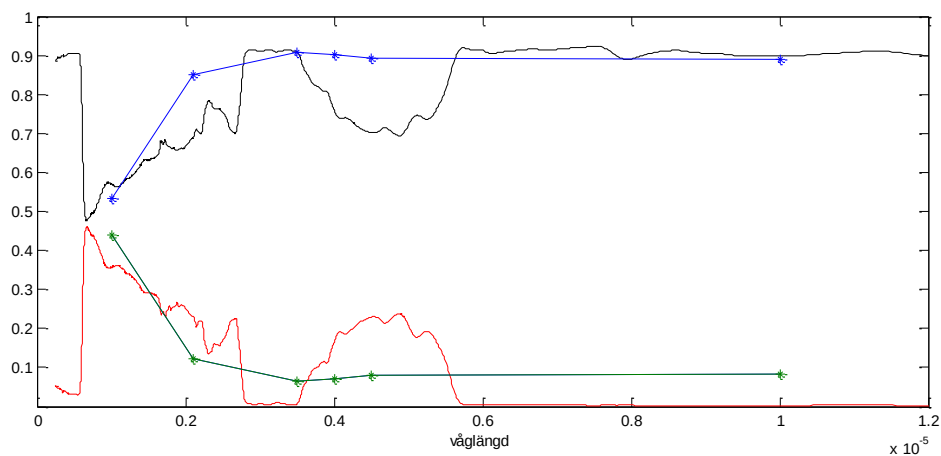
Parametern b beräknad utifrån DHR-data uppmätt i spektrometer, se Tabell 3. Parametern b beräknas som medelvärdet av flera jämförda vinklar θ , nämligen $\theta_1 = 12^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ och $\theta_2 = 70^\circ, 75^\circ$ respektive $\theta_1 = 12^\circ, 30^\circ$ och $\theta_2 = 60^\circ$. Resultaten i Tabell 3 visar att problemen med imaginära värden på parametern b undviks om θ_1 och θ_2 skiljer sig åt tillräckligt mycket. Detta ställer krav på mätutrustningen, som alltså bör mäta DHR vid två olika infallsvinklar, varav den ena bör vara större än 70° , och den andra mindre än, säg, 45° .

Tabell 3. Röd Volvo V70-färg (provyta nr. 1).

Våglängds- område (μm)	b (Handhållen)	b (DHR <12 30 40 – 70 75>)	b (DHR <12 30 – 60>)
0.9 - 1.1	0.2179	(Rådata saknas)	(Rådata saknas)
1.9 - 2.4	0.0933	0.1275	0.1200
3.0 - 3.9	0.1225	0.1261	0.1136
3.0 - 5.0	0.0000	0.1151	0.0699 + 0.0200i
4.0 - 5.0	0.1339i	0.09897	0.0041 + 0.0522i
8.0 - 12.0	0.1407	0.13397	0.1334
1.7 -15.1		0.1251	0.1056 + 0.0061i

4.1.2 Spektral diffus reflektivitet och emissivitet

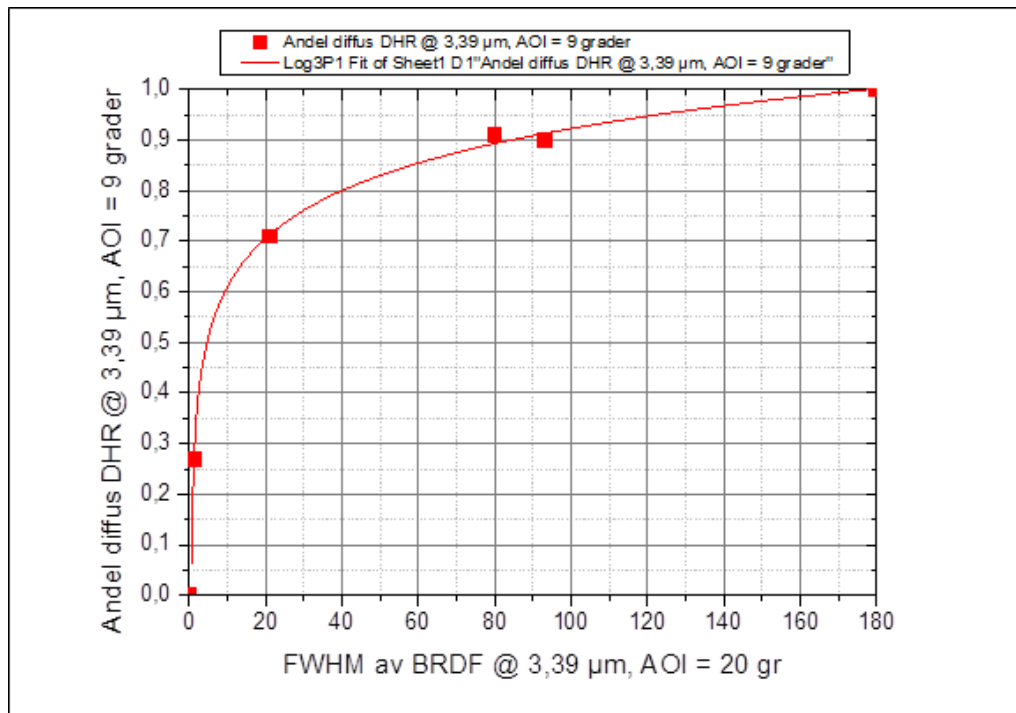
Spektral diffus reflektivitet och emissivitet finns beräknad med data från laboriemätningar som är väl upplösta i våglängd, se svart och röd kurva i Figur 7. Den handhållna utrustningen levererar data för sex olika våglängdsintervall, se Tabell 2. Resultat för dessa intervall är markerade i Figur 7 med '*' i mittpunkten av varje våglängdsintervall. En blå respektive grön linje förbinder dessa punkter. Den mest påtagliga skillnaden mellan mätmetoderna är att man med den handhållna utrustningen bara får sex mätpunkter för hela våglängdsintervallet. Detta gör att de variationer som syns i de högre upplösta laboriemätningarna inte kan upplösas. I mätningarna som ligger till grund för de lågupplösta kurvorna har man mätt den totala reflektiviteten. Detta kan man åtgärda om man använder en handhållen utrustning som har möjlighet till separation av total och diffus reflektivitet.



Figur 7. Uppmätt spektral reflektivitet och emissivitet för provyta nummer 1. Röd kurva är högt upplöst diffus reflektivitet $\rho_D(\lambda)$ och grön kurva är lågt upplöst total reflektivitet $\rho(\lambda)$. Svart och blå kurva är högt respektive lågt upplöst emissivitet $\varepsilon(\lambda)$.

4.1.3 Parametern e

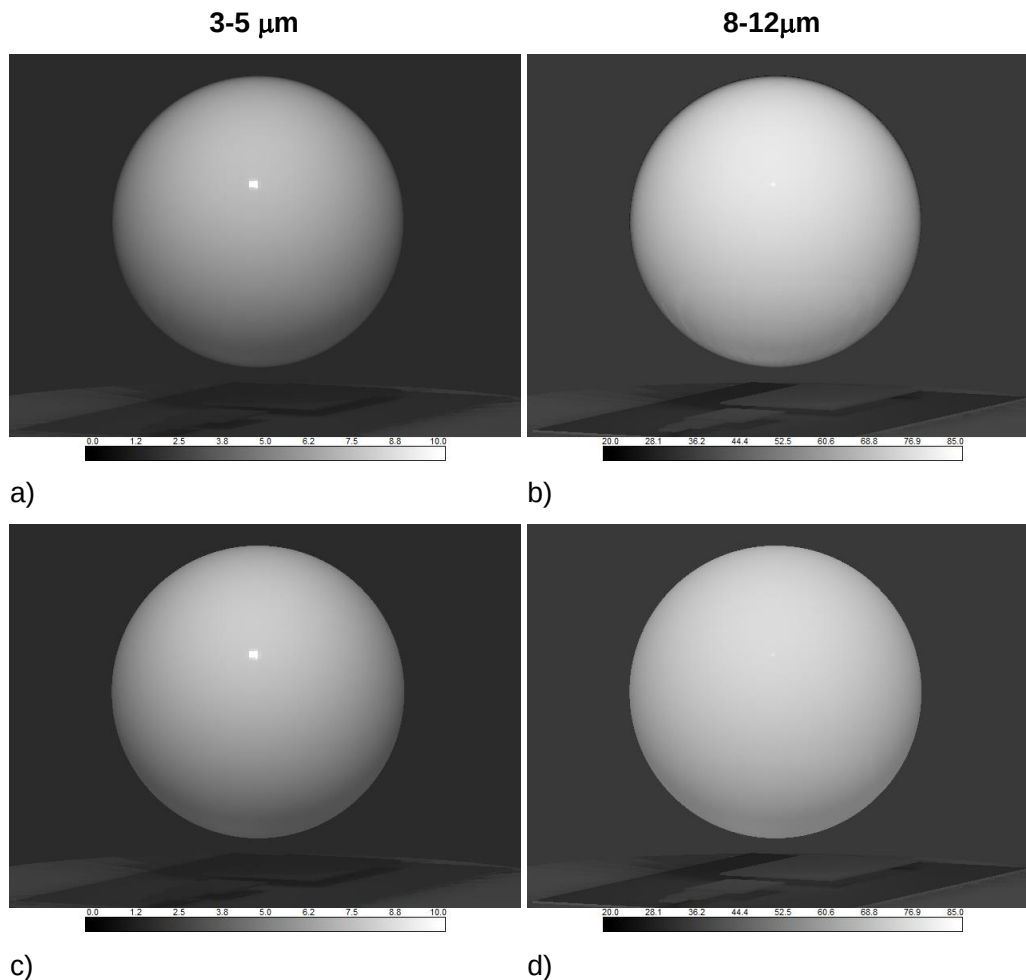
Parametern e som är ett mått på den spekulära lobens vidd kan inte direkt bestämmas ur data från den handhållna utrustningen. Det finns möjlighet att införskaffa tilläggsutrustning som möjliggör mätning som separerar total och diffus del av reflektivitet. Man har på ett antal provtyper mätt upp andel diffus DHR samt vidden på den spekulära loben i laboratorium. I Figur 8 ses dessa värden plottade. Man kan se att dessa värden följer en kurva som kan göra det möjligt att utifrån kunskap om andelen diffus reflektivitet få ett värde på lobvidden för vidare bestämning av parametern e . En förutsättning för den förenklade metoden att bestämma e är förstås att den handhållna utrustningen mäter både diffus och total DHR. Sådan utrustning finns kommersiellt tillgänglig, men den befintliga handhållna utrustningen för IR-området mäter enbart total DHR.



Figur 8. Uppmätt samband mellan den spekulära lobens lobvidd angiven i grader för FWHM (Full Width at Half Maximum) och andel diffus reflektivitet för de provtyper som är listade i tabell1.

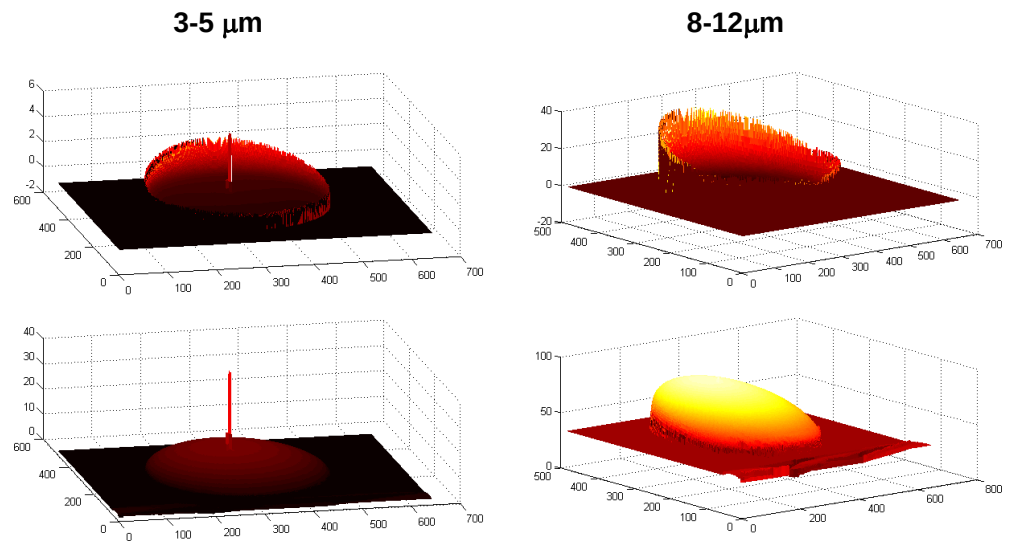
4.2 Renderade RadThermIR-bilder

Vid rendering av bilder har samma miljö och uppmätta väder använts som i tidigare arbete med modellering av IR-signatur för fordon [3]. Scenen består av en sfär av stål som är lackerad med en billack vars optiska ytegenskaper beskrivs med BRDF-modellen. Genom att använda en sfär som testobjekt säkerställer vi att den spekulära loben syns i scenen. Bilder är renderade för ytparametervärden baserade helt på lab-data samt data utifrån handhållen utrustning, men med värdet på parametern e given. Ytterligare bilder är därför renderade med en variation av e -värdet. Sfären har fiktivt placerats ut i den atmosfär och det väder som erhållits vid tidigare mätningar [3]. Den befinner sig alltså utomhus och den reflex som ses i bilderna är en solreflex.



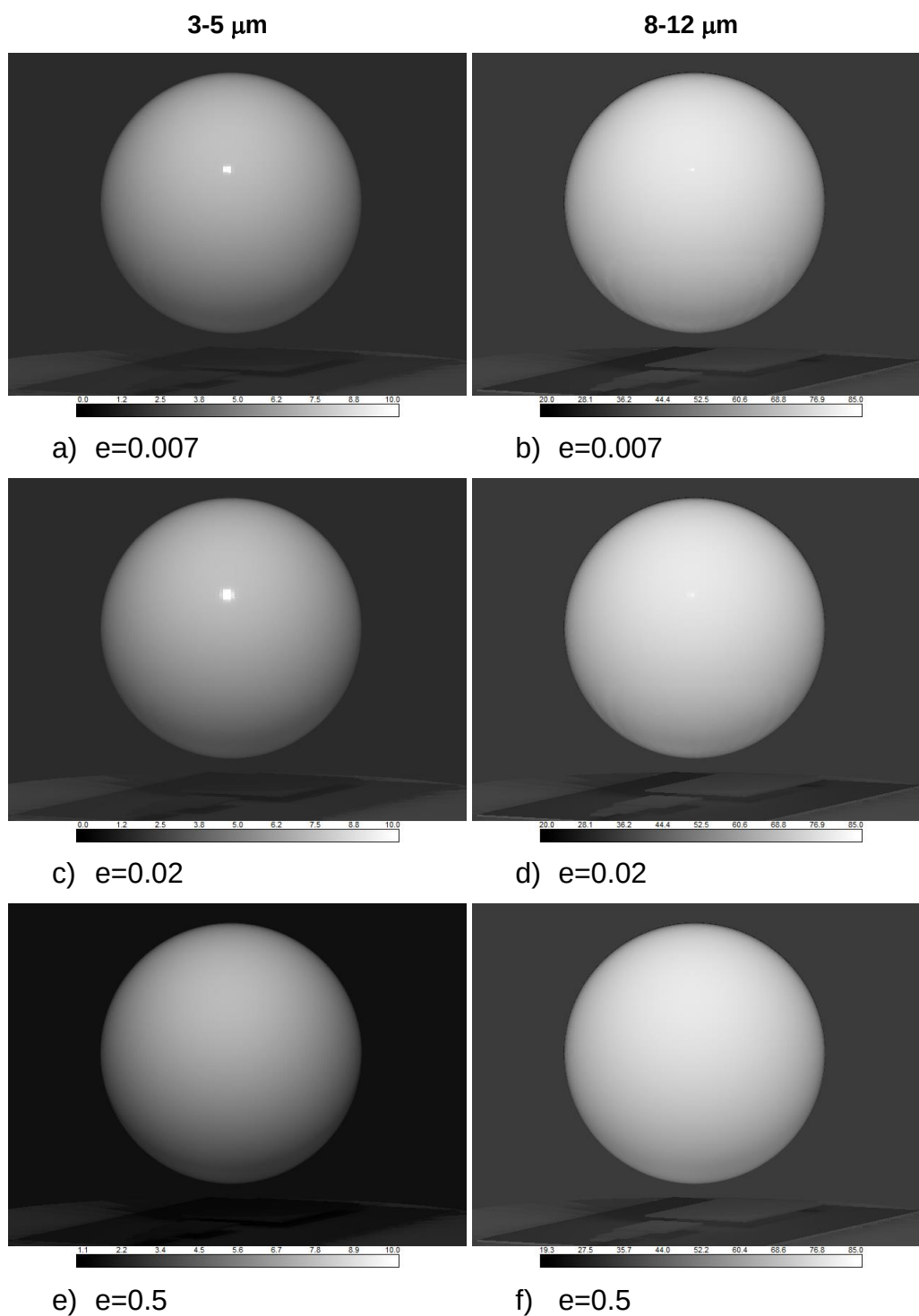
Figur 9. Figuren visar radiansen beräknad för en sfär där man i de övre bilderna (a och b) använt BRDF-data utifrån labmätningar på en provbit. I de undre bilderna (c och d) har BRDF-data bestämts utifrån den handhållna utrustningen med undantag av data för den spekulära lobvidden (e -parametern) som har hållits lika i de bägge fallen.

De övre bilderna i Figur 9 är baserade på data som baseras helt på noggranna mätningar från laboratorium [det vill säga, $b=0.1251$, $e=0.007$, samt ρ och ε enligt de *högt* upplösta röda och svarta kurvorna i Figur 7]. I de undre bilderna baseras parametrarna b , ρ och ε på mätningar med handhållen utrustning [det vill säga, $b=0.1225$, $e=0.007$, samt ρ och ε enligt de *lågt* upplösta gröna och blå kurvorna i Figur 7]. Överensstämmelsen mellan bilderna är god, men parametern e är samma i alla bilder, varför bilder med varierande e också är renderade. Den spekulära reflexen i bilderna för våglängdsområdet 8-12 μm existerar även om den kan vara svår att se i figur 9 och figur 10. Dess lob är smalare än vid lägre våglängder och dess intensitet är inte så stor relativt radiansen för sfären som helhet.



Figur 10. Figuren visar radiansvärden. De nedre är de noggrant bestämda radiansvärdena. De övre figurerna är skillnaden mellan de radiansvärden som baseras på den handhållna utrustningen och mer noggrant bestämda radiansvärden.

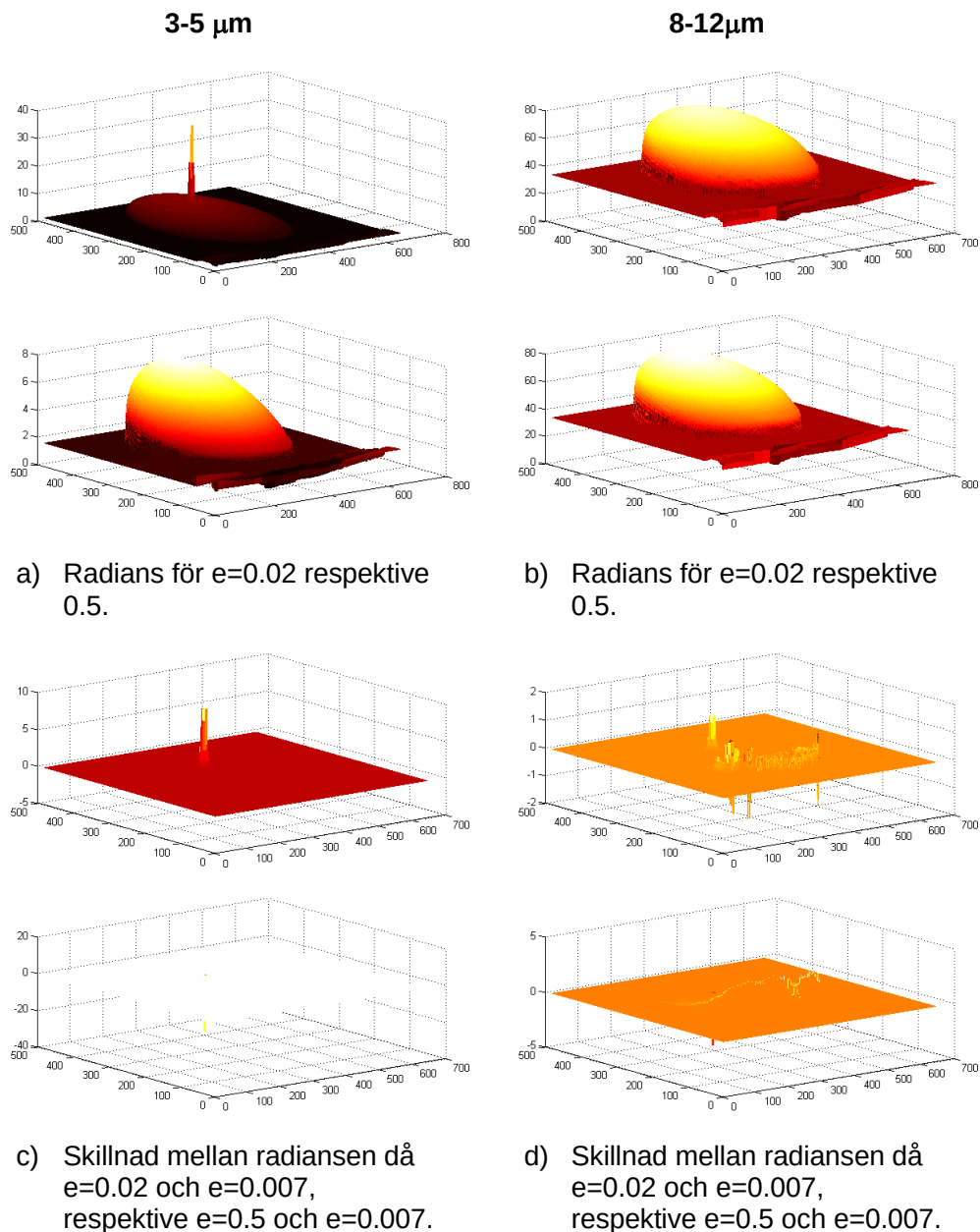
I figur 10 visas radiansvärde för bilder som baseras på en noggrant bestämd BRDF och skillnaden mot radiansvärden som baseras på den förenklade metoden att ta fram BRDF-parametrar. De bilder på sfären som ses i figur 9 är baserade på samma data som figur 10. Skillnaden mellan radiansvärdena framgår främst vid randen av sfären. För den spekulära loben blir det en förhöjd skillnadsnivå för dessa pixlar. I övrigt är skillnaden i radiansvärden relativt liten.



Figur 11. Renderade bilder där BRDF baseras på lab-data. Parametern e har varierats mellan bilderna. Bilderna i vänstra kolumnen avser våglängdsbandet 3-5 μm och den högra kolumnen avser 8-12 μm .

I de renderade bilderna i Figur 11 baseras BRDF parametrarna på data från laboratorium. De vänstra är renderade för 3-5 μm och de högra för 8-12 μm . Den parameter som ändrats är e -parametern. Delfigurerna a) och b) är renderade med det ursprungliga värdet på 0.007. I delfigurerna c) och d) är e parametern 0.02 och för delfigurerna e) och f) är värdet på e -

parametern 0.5. Vid en jämförelse mellan de översta och mellersta bilderna (där det ett förhållande på ca 3 mellan e -parameterns värde) ser man att den vita punkt som utgör den spekulära reflexen är något bredare med ett högre värde på e -parametern. Detta är förväntat, och i övrigt är nivån på reflektansen på sfären relativt lika.



Figur 12. Figurerna visar radiansvärden. Delfigurerna a och b visar radiansvärden för olika e -värden. Delfigurerna c och d visar skillnaden mellan de fyra övre bilderna (a och b) och radiansvärden som baseras på det korrekta e -värdet 0.007, d.v.s. de värden som de nedre bilderna i Figur 10 visar.

I figur 12 visas i delfigurerna a) och b) radiansvärden motsvarande de fyra nedre figurer som ses i figur 11. Delfigurer c) och d) i figur 12 visar differensen mellan radiansvärdena i delfigurer a) och b) och motsvarande radians om man använder det korrekta värdet på e som kan ses i nedre delen av figur 10. Delbilderna c) och d) visar alltså den skillnad man får i radiansvärden då e -parameterns värde varierar relativt det noggrant beräknade e -värdet (0.007), och allt i övrigt hålls konstant. Vid en mindre förändring av e -värdet påverkas i stort sett bara radiansen i den spekulära loben och lite vid sfärens rand. Då

reflektansen är låg är bidraget från reflekterade källor liten. Det är för små, intensiva strålningskällor som e -parametern är viktig, som vid beräkning av solreflexer. Solreflexens utbredning beror på e om lobvinkeln är större än strålningskällans öppningsvinkel.

Det kan vara önskvärt att kunna få mer kunskap om den spekulära lobvidden ur mätdata från de handhållna reflektometrarna för att få stöd i bestämningen av värdet på e -parametern.

5 Slutsatser

Tre av fyra parametrar kan bestämmas direkt ur mätdata från handhållna mätningar. Dessa är Fresnel-koefficienten b , diffus reflektivitet $\rho(\lambda)$ och emissivitet $\varepsilon(\lambda)$. Man ska notera att den spektrala upplösningen är mycket lägre för de parametrar som baseras på den handhållna utrustningen. De renderade bilder som presenteras avser hela våglängdsbanden 3-5 μm respektive 8-12 μm . Avser man att rendera bilder över smalare våglängdsband löser man inte upp eventuella spektrala variationer.

Parametern e som utgör ett mått på den spekulära lobvidden kan inte fås direkt ur mätdata från den befintliga handhållna utrustningen, men om man inte avser att studera just den spekulära loben i detalj pekar resultaten på att man för en blank lack kan välja värden på e -parametern ur bibliotek med standardmaterial. Väljer man e -värde för någon typ av blank lack och jämför bilder med olika e ser man att den spekulära loben visserligen ändrar utseende med värdet på e -parametern men att avvikelsen för radiansen i övrigt är relativt liten. Det är ändå önskvärt att kunna få mer kunskap om den spekulära lobvidden ur handhållna data. I arbetet har vi därför undersökt om det finns ett samband mellan andel diffus reflektivitet i DHR mätningar och den spekulära lobvidden för vidare bestämning av e -parametern. Data som presenteras i rapporten pekar på ett samband. Mätdata baseras på data från laboratorium, men det finns möjlighet att ta fram motsvarande mätdata med hjälp av handhållen utrustning.

Sammantaget är resultatet lovande och man kan använda data från handhållen utrustning som indata för BRDF-modell för rendering av IR-bilder. Den spektrala upplösning är sämre, men ger renderade bilder som stämmer väl överens med bilder som renderats med parametrar baserade på data från laboratorium. Det finns ett tydligt samband mellan andelen diffus DHR och den spekulära lobvidden som pekar på möjligheten att bestämma spekulär lobvidd (parametern e) från mätningar av diffus och total reflektivitet med handhållen utrustning.

Genom att karakterisera ett antal provytor med både förenklad reflektivitetsmätning (handhållen utrustning) och noggrann mätning av BRDF och total reflektivitet har vi identifierat ett samband mellan de förenklade mätningarna och BRDF-egenskaperna. Resultatet är en metod att ta fram BRDF-parametrar från förenklade mätningar av ytor. Med denna metod kan vi enklare karakterisera ett stort antal verkliga ytor där man mäter på just de material som man avser att modellera som sedan kan användas i realistiska simuleringar av IR-signaturen hos plattformar, soldater och bakgrunder. Målet är att utnyttja metoden i kommande IR-signaturberäkningar.

Det ska dock poängteras att jämförelserna mellan de olika metoderna att bestämma BRDF-parametrar baseras enbart på ett fåtal prov, varför mera tester måste göras för att definitivt dra slutsatsen att de resultat som presenteras i denna rapport gäller för andra typer av ytor. Fortsatt arbete är därför att utöka studien till flera ytor, speciellt ytor med optiska egenskaper som avviker från de som behandlats i denna rapport. Notera också att den förenklade metoden att bestämma BRDF-parametrarna bygger på att den handhållna mätutrustningen mäter: (a) DHR vid två olika infallsvinklar varav den ena bör vara större än ca 70° och (b) både total och diffus DHR.

6 Referenser

- [1] Jan Fagerström, Tomas Hallberg, Annica Hjelm, Nils Karlsson, Roland Lindell och Andreas Persson, "IR-analys av ett generiskt markobjekt "CUBI". Konstruktion, mätningar och simuleringar.", FOI-rapport FOI-R--2888--SE, Linköping (2009).
- [2] Jan Fagerström, Annica Hjelm, Nils Karlsson, Roland Lindell och Jonas Rahm, "Termiska beräkningar på två varianter av referensobjekt CUBI. Känslighetsanalys och jämförande mätningar.", FOI-rapport FOI-R--3268--SE, Linköping (2011).
- [3] Jan Fagerström, Nils Karlsson, Roland Lindell och Jonas Rahm, "Metod för modellering av IR-signatur för fordon. Mätningar och beräkningar.", FOI-rapport FOI-R--3591--SE, Linköping (2012).
- [4] Brian P. Sandford and David C. Robertson, "Infrared Reflectance Properties of Aircraft Paints", Proceedings of IRIS Targets, Backgrounds and Discrimination, pp 111-127, (1985).
- [5] Samuel I. Harkiss, "A study of bi-directional reflectance distribution functions and their effect on infrared signature models", Thesis. Air force institute of technology, Wright-Patterson Air Force Base Ohio, AFIT/GE/ENP/07-01.
- [6] Surface Optics 410-Solar Visible/NIR Hand-Held Reflectometer, <http://www.surfaceoptics.com>.
- [7] Surface Optics SOC 410 Hand-Held DHR Reflectometer, <http://www.surfaceoptics.com>.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se