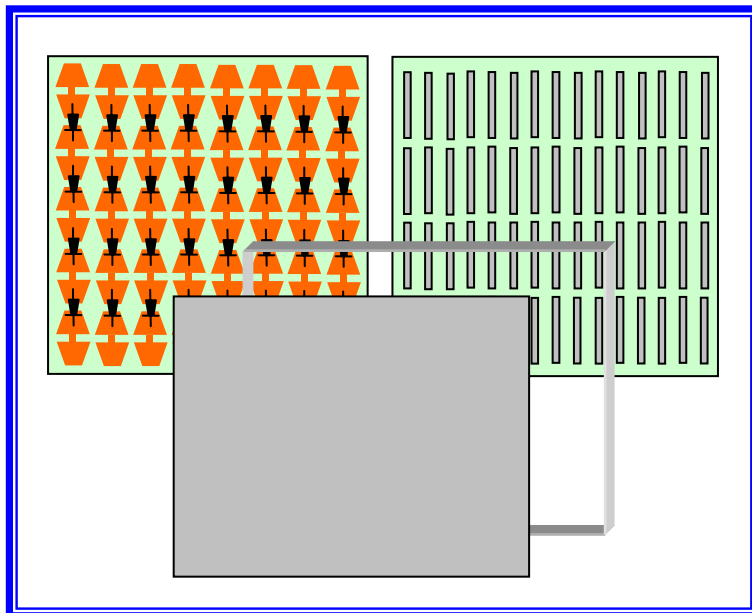


Jan-Olof Ousbäck

Principer för en styrbar Salisbury-screen



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik
Box 1165
581 11 Linköping

FOI-R--1598--SE

Mars 2005

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Jan-Olof Ousbäck

Principer för en styrbar Salisbury-screen

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1598--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år Mars 2005	Projektnummer E3068
	Delområde 62 Signaturanpassning	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Jan-Olof Ousbäck	Projektledare Hans Kariis	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Principer för en styrbar Salisbury-screen		
Sammanfattning (högst 200 ord) Rapporten redovisar principer för en styrbar Salisbury-screen, baserad på en ledande polymer PEDOT:PSS, (polyethylenedioxythiophene:polystyrenesulfonate) som ett tunt förlustskikt. Två andra förlustskikt, ett kretsanalogt skikt och ett PIN-diodbaserat fasskiftande skikt presenteras också. Några intressanta experimentella mätningar på PEDOT:PSS:s permittivitet inom mikrovågsområdet redovisas också. Studien visar på stor potential för att utveckla styrbara radarabsorbenter.		
Nyckelord Radarabsorbent, SAT, Signaturmaterial		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 35 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1598--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	Month year March 2005	Project no. E3068
	Subcategories 62 Low Observables	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Jan-Olof Ousbäck	Project manager Hans Kariis	
	Approved by	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Principals for a tunable Salisbury-screen		
Abstract (not more than 200 words) The report describe basic principals of a tunable Salisbury-screen based on a conducting polymer PEDOT:PSS (polyethylenedioxythiophene:polystyrenesulfonate) as a thin impedance sheet. Two other types of thin impedance layers, a circuit analogue layer and a PIN-diod phaseshift layer (PSS, Phase-Switched Screen) are also described. Some interesting experimental results on PEDOT:s permittivity in the microwave region are also presented. The study indicate a great potential to design tunable radar absorbers.		
Keywords Radar absorbers, Signature control, Signature materials,		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 35 p.	
	Price acc. to pricelist	

<u>INNEHÅLL</u>	<u>SIDA</u>
1. INLEDNING	5
2. BAKGRUND	5
3. ALLMÄNNA DEFINITIONER	6
3.1 Polarisering och infallsvinkel	6
3.2 Relativ bandbredd	6
4. MÄTUTRUSTNING OCH BERÄKNINGSMODELLER	7
4.1 Skalär mätutrustning för reflektionsmätningar	7
4.2 Beräkningsmodeller	7
4.2.1 Generell analysmodell för plana multilagerstrukturer	8
4.2.2 Modell för bestämning av relativ permittivitet för rent dielektriska material utifrån skalära mätdata	10
4.2.3 Modell för bestämning av ytresistans för tunna förlustskikt utifrån skalära mätdata	11
5. ÖVERSIKT AV ENKLA RADARABSORBERANDE STRUKTURER BASERADE PÅ TUNNA FÖRLUSTSKIKT	13
5.1 Salisbury-screen	13
5.2 Jauman-absorbent	15
5.3 Enfolieskikt	16
6. MÖJLIGHETER MED EN SALISBURY-SCREEN	17
6.1 Förlustskikt	17
6.1.1 Homogena impedansskikt	19
6.1.2 Kretsanaloga skikt	20
6.1.3 Förlustskikt med diodbaserat fasskiftande egenskaper	20
6.2 Distansmaterial	21
6.3 Exempel på styrbara Salisbury-screen absorbenter	23
6.3.1 Salisbury-screen med ett homogent styrbart förlustskikt	23
6.3.2 Salisbury-screen med ett styrbart förlustskikt baserat på PSS	23
6.4 Exempel på en designbar Salisbury-screen	24
7. MÄT- OCH BERÄKNINGSRESULTAT	25
7.1 Karaktärisering av PMMA-substrat	25
7.2 Karaktärisering av glassubstrat	26
7.3 Karaktärisering av PEDOT:PSS på PMMA-substrat	27
7.4 Radarabsorberande strukturer med PEDOT:PSS på PMMA- och glas substrat	30
7.5 Mätnoggrannhet	33
8. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	34
9. REFERENSER	35

1. INLEDNING

Inom projekt Styrbara SignaturMaterial (SSM), [1], studeras möjligheter att utveckla styrbara multispektrala signaturmaterial. Inom mikrovågsområdet studeras bl.a. möjligheten att utnyttja ledande polymerer som tunna förlustskikt i mikrovågsabsorberande strukturer.

Anledningen till att ledande polymerer har valts som förlustskikt är att det tidigare rapporterats om försök med styrbara mikrovågsabsorberande strukturer, baserade på en ledande polymer PPy (polypyrrol, [2]). PPy har den negativa egenskapen att den lätt tappas ledningsförmågan via oxidering då den exponeras för luft. Projektet har därför fokuserat på en annan ledande polymer PEDOT:PSS (polyethylenedioxythiophene:polystyrenesulfonate) som är betydligt mer stabil.

Syftet med denna rapport är att belysa möjligheter att utveckla en styrbar mikrovågsabsorberande absorbent samt att visa på möjligheter att avsevärt förbättra reflektionsegenskaper med designbara material. Fokus har inriktats mot en absorbent benämnd Salisbury-screen, som i sin konventionella form är smalbandig men har en enkel uppbyggnad.

Rapporten riktar sig till personer som arbetar med signaturmaterial eller har intresse för signaturanpassning.

2. BAKGRUND

Mikrovågsabsorberande strukturer har utvecklats under mer än 60 år. En översikt finns bl. a. i [3]. De första försöken gjordes i Tyskland under 1930-talet, med smalbandiga absorberande beläggningar på U-båtsperiskop. De första beläggningarna bestod av homogena förlustmaterial, Dällenbach-absorbenter, där tjockleken bestämde vid vilken frekvens absorbenten hade optimala absorptionsegenskaper.

På 1950-talet fick W.W. Salisbury patent på en smalbandig radarabsorberande struktur som kallas för Salisbury-screen [4]. Denna struktur består av ett tunt förlustskikt på utsidan av ett bärmaterial med låg relativ dielektrisk permittivitet. Strukturen backas upp med ett ledande metallskikt. Bredbandigare varianter av denna struktur, bestående av flera förlustskikt separerade med bärmaterial, har utvecklats och kallas för Jauman-absorbenter. En översikt av dessa finns bl. a. i [5]. FOA började utveckla radarabsorbenter i mitten av 1950-talet där de drivande personerna var Per-Erik Ljung, Åke Bergquist och Lars-David Wernlund. År 1957 utkom en FOA-rapport [6], som beskrev en bredbandig radarabsorbent kallad enfolieskikt, som var en hybrid av en Salisbury-screen och en Jauman-absorbent.

Radarabsorbenter baserade på tunna förlustskikt har den fördelen att de har en mycket enkel uppbyggnad, men om de ska ha bredbandiga egenskaper ökar deras tjocklek oftast.

I början av 1990-talet presenterades resultat från University of Sheffield i England, där förlustskikt baserat på ledande polymerer ingick [7-9]. Experimentella resultat presenterades där det visades att skiktets mikrovågsegenskaper kunde påverkas med en yttre signal. Därmed öppnades möjligheten att utveckla adaptiva radarabsorbenter, d.v.s. absorbenter som är smalbandiga men genom dess styrbarhet kan adapteras till optimal absorptionsförmåga inom ett visst frekvensområde.

Under projekt SSM:s första år har intressanta resultat erhållits utifrån reflektionsmätningar på PEDOT:PSS-skikt applicerade på substrat av PMMA (plexiglas) och glas.

Resultaten pekar på att tunna ledande polymerskikt inte kan karaktäriseras som ett rent resistivt skikt utan som impedansskikt med även en reaktiv komponent. Detta har tidigare konstaterats men då bara för PPy-impregnerade fiberdukar. Slutsatsen av dessa studier var att den reaktiva komponenten uppkom på grund av interaktion mellan de PPy-belagda fibrerna i dukarna [10]. De inom projekt SSM visade resultaten pekar på att denna effekt även finns hos ett tunt PEDOT:PSS-skikt, applicerat på PMMA- eller glassubstrat utan inblandning av fibrer.

3. ALLMÄNNA DEFINITIONER

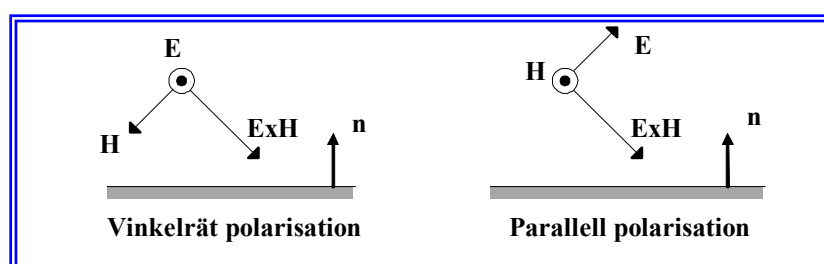
I den internationella litteraturen om radarabsorberande material och strukturer förekommer en blandning av orden absorbenter, material, skikt och strukturer. I denna rapport används, där så är möjligt, genomgående termerna enligt följande definition:

- **Material:** Ett enkelt homogent material med viss tjocklek ($\approx >0.01$ våglängd) karakteriserat av dess permittivitet (ϵ) och permeabilitet (μ)
- **Skikt:** Ett tunt homogent material ($\approx < 0.01$ våglängd) karakteriserat av dess ytimpedans (Z_{yt})
- **Struktur:** Flera sammanfogade material och/eller skikt
- **Absorbent:** En absorberande struktur

Det bör noteras att någon helt strikt terminologi är mycket svårt att konsekvent följa. I den internationella litteraturen blandas termerna beroende på författarens preferenser.

3.1 Polarisation och infallsvinkel

Den i rapporten genomgående använda definitionen på vinkelrät respektive parallell polarisation visas i figur 3.1. Med vinkelrät polarisation menas fallet då den elektriska fältvektorn \mathbf{E} är vinkelrät mot det plan som definieras av radarabsorbentens normalvektor \mathbf{n} och den infallande vågens utbredningsvektor \mathbf{ExH} (Pointings vektor). Med parallell polarisation menas fallet då den elektriska fältvektorn är parallell med motsvarande plan. Infallsvinkeln definieras som vinkeln mellan normalvektorn och det infallande fältets utbredningsvektor.



Figur 3.1 Definition av vinkelrät och parallell polarisation, där \mathbf{E} och \mathbf{H} betecknar elektrisk resp. magnetisk fältvektor och \mathbf{ExH} infallsriktningen

3.2 Relativ bandbredd

Som ett godhetstal på en radarabsorbents effektivitet används ofta absorbentens relativa bandbredd, d.v.s. det frekvensområde där reflektionsegenskaperna är de önskade. Man kan definiera en relativ bandbredd (B_{rel}) för absorbenten, enligt ekvation 3.1, som:

$$B_{rel} = \frac{(f_{\text{övre}} - f_{\text{undre}})}{f_{\text{undre}} + \left(\frac{f_{\text{övre}} - f_{\text{undre}}}{2}\right)} = 2 \cdot \frac{(f_{\text{övre}} - f_{\text{undre}})}{(f_{\text{övre}} + f_{\text{undre}})} \quad (\text{ekv. 3.1})$$

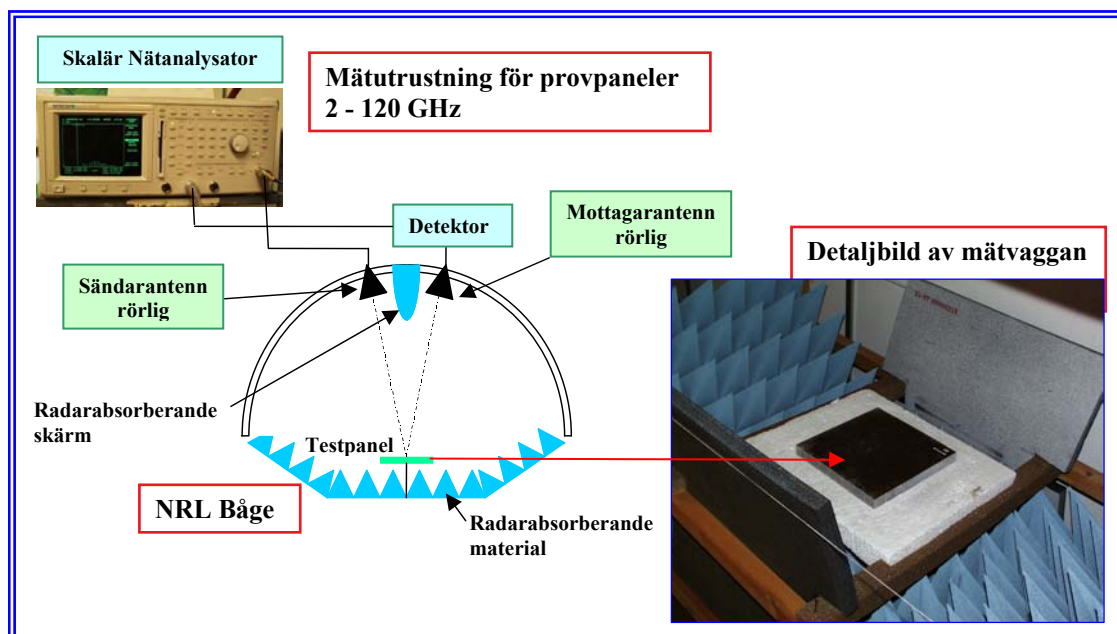
där $f_{\text{övre}}$ resp. f_{undre} betecknar övre respektive undre gränshfrekvens, mellan vilka en högsta acceptabel reflektion finns.

4. MÄTUTRUSTNING OCH BERÄKNINGSMODELLER

I detta kapitel beskrivs en mätutrustning för skalära reflektionsmätningar samt ett par beräkningsmodeller för att beräkna relativ permittivitet (ϵ_r) och ytresistans utifrån mätdata från denna utrustning och en generell beräkningsmodell för plana skiktade strukturer.

4.1 Skalär mätutrustning för reflektionsmätningar

För att mäta den relativa permittivitet (ϵ_r) hos substrat och distansmaterial samt ytresistans (R_{yt}) hos förlustskikten har FOI:s mätvågga för reflektionsmätningar används. Det är en NRL-båge (Navy Research Lab) vilket kan betraktas som en mycket väl känd standardmätmetod. I figur 4.1 visas en skiss och ett foto på utrustningen.



Figur 4.1. Skiss och bild på FOI:s mätvågga för reflektionsmätningar.

Mätutrustningen kalibreras mot en metallplatta med samma storlek som mätobjekten, normalt används objekt med en storlek på 30x30 cm, men objekt ner till 10x10 cm kan även användas. Den mottagna reflekterade signalen, R , (effektreflektion) från metallplattan (som funktion av frekvensen) motsvarar totalreflektion (0 dB reflektion). Den reflekterade signalen från resp. substrat/distansmaterial jämförs sedan med dessa kalibreringsdata och reflektionen kan därmed bestämmas. Oftast används en logaritmisk representering av mätdata enligt ekv. 4.1.

$$R = 10 \cdot \log \left(\frac{R_{\text{mätobjekt}}}{R_{\text{referens}}} \right) \quad (\text{ekv. 4.1})$$

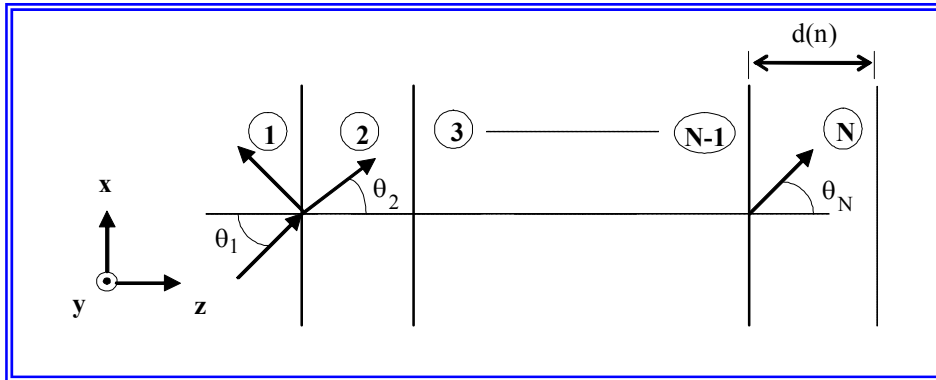
4.2 Beräkningsmodeller

Tre olika beräkningsmodeller har använts för att beräkna och karakterisera de material och skikt som har utnyttjats i studien.

- Generell analysmodell för plana multilagerstrukturer.
- Modell för bestämning av relativ permittivitet (ϵ_r) för rent dielektriska material utifrån skalära mätdata.
- Modell för bestämning av ytresistans (R_{yt}) för tunna förlustskikt utifrån skalära mätdata.

4.2.1 Generell analysmodell för plana multilagerstrukturer

För ett plant elektromagnetiskt fält som infaller mot en oändligt stor plan struktur, bestående av ett godtyckligt antal plana material och/eller skikt med godtycklig permittivitet och permeabilitet $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$ respektive $\mu = \mu' + j\mu''$, är de primärt intressanta parametrarna reflektions- och transmissionskoefficienterna $R_{\perp//}$, $T_{\perp//}$, där \perp resp. $//$ betecknar vinkelrät respektive parallell polarisation definierad enligt figur 3.1. Följande analys av en struktur, enligt figur 4.2 med ett godtyckligt antal (N) material/skikt, följer [11] vilken ger en enkel och framförallt datoranpassad analys.



Figur 4.2 Skiktad dielektrisk struktur.

Vid gränsen mellan två skikt måste de tangentiella \mathbf{E} - och \mathbf{H} -fälten vara kontinuerliga. Man kan då teckna fälten

$$\begin{bmatrix} E_{m-1} \\ H_{m-1} \end{bmatrix} = [A_m] \cdot \begin{bmatrix} E_m \\ H_m \end{bmatrix}, \quad m = 2 - N \quad (\text{ekv. 4.2})$$

där \mathbf{E}_m och \mathbf{H}_m betecknar y- och x- komponenten av respektive \mathbf{E} - och \mathbf{H} -fält för vinkelrät polarisation, eller x- och y- komponenterna för parallell polarisation.

Matrisen A_m definieras som:

$$[A_m] = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_m) & iz_m \sin(\alpha_m) \\ \frac{i}{z_m} \sin(\alpha_m) & \cos(\alpha_m) \end{bmatrix} \quad (\text{ekv. 4.3})$$

där argumentet α_m kan tecknas

$$\alpha_m = k_m [d(m) - d(m-1)] \cos(\theta_m) = k_m [d(m) - d(m-1)] \sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_m}\right)^2 \sin^2(\theta_1)} \quad (\text{ekv. 4.4})$$

I ekvation 4.4 betecknar k_m vågtalet som är

$$k_m = \frac{2\pi}{\lambda_m} \quad (\text{ekv. 4.5})$$

och λ_m våglängden i skikt m som är

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (\text{ekv. 4.6})$$

där λ_0 är våglängden i vakuum. z_m kan tecknas:

$$z_m^\perp = \frac{1}{\cos(\theta_m)} \sqrt{\frac{\mu_m}{\varepsilon_m}} = \frac{\sqrt{\mu_m / \varepsilon_m}}{\sqrt{1 - (k_1 / k_m)^2 \sin^2(\theta_1)}} \quad (\text{ekv. 4.7})$$

$$z_m^// = \cos(\theta_m) \sqrt{\frac{\mu_m}{\varepsilon_m}} = \sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_m}\right)^2 \sin^2(\theta_1)} \cdot \sqrt{\frac{\mu_m}{\varepsilon_m}} \quad (\text{ekv. 4.8})$$

Genom användning av den rekursiva ekvationen ovan fås följande samband mellan E_1, H_1 och E_m, H_m

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = [A_2] \cdot [A_3] \cdots [A_{m-1}] \cdot [A_m] \cdot \begin{bmatrix} E_m \\ H_m \end{bmatrix} \quad (\text{ekv. 4.9})$$

ur vilket en effektiv matris $[A]$ kan tecknas

$$[A] = [A_2] \cdot [A_3] \cdots [A_{m-1}] \cdot [A_m] \quad (\text{ekv. 4.10})$$

Av matrisen

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{ekv. 4.11})$$

kan en effektiv impedans för strukturen tecknas enligt

$$Z_{eff} = \frac{a_{11}z_m + a_{12}}{a_{22} + a_{21}z_m} \quad (\text{ekv. 4.12})$$

med vars hjälp reflektions- och transmissionskoefficienterna kan bestämmas enligt

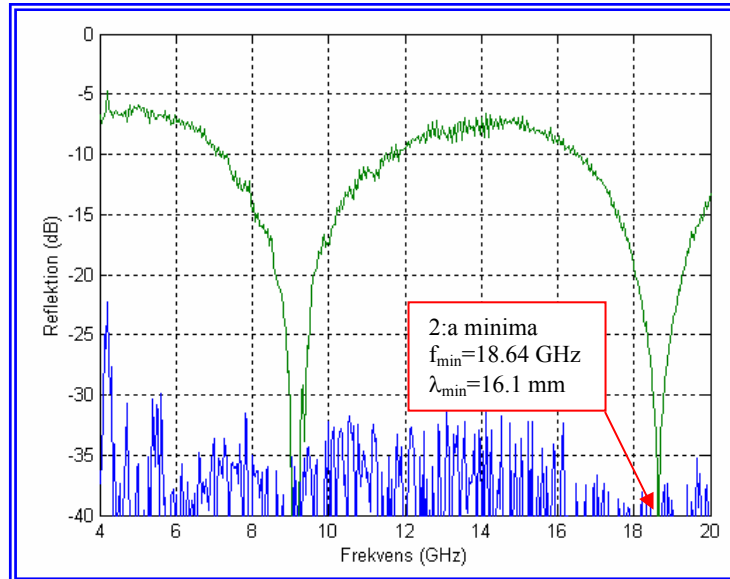
$$R = \frac{Z_{eff} - z_1}{Z_{eff} + z_1} \quad (\text{ekv. 4.13})$$

$$T = \frac{2(Za_{22} + a_{12})}{Z + z_1} \quad (\text{ekv. 4.14})$$

Reflektions- och transmissionsegenskaperna hos strukturen kan alltså bestämmas om man känner permittivitet (ε_r), permeabilitet (μ_r) och tjocklek hos de ingående materialen/skikten.

4.2.2 Modell för bestämning av relativ permittivitet för rent dielektriska material utifrån skalära mätdata

Den relativa permittiviteten (ϵ_r) hos ett rent dielektriskt material (d.v.s. $\mu_r=1$) kan bestämmas utifrån skalära mätdata på materialets reflektionsegenskaper. I figur 4.3 visas en reflektionsmätning på ett PMMA-material, med en tjocklek på 10 mm. Detta material har tidigare uppmätts [12] på tre olika mätplatser, FOA, Barracuda Tech och FFI (Norge) 1994 och befanns då ha en relativ permittivitet på ca 2.6. För PMMA är ϵ_r i princip frekvensoberoende inom mikrovågsområdet.



Figur 4.3. Reflektion som funktion av frekvens för en referensplatta av PMMA med en tjocklek på 10 mm. (grön kurva reflektion, blå kurva bakgrund)

Reflektionsminima fås då plattan har en tjocklek (d) på $\frac{1}{2}$ våglängd eller en multipel därav, d.v.s.:

$$d = \frac{\lambda_m}{2} \cdot n \quad (\text{ekv. 4.15})$$

där $n=1, 2, 3 \dots$ och där λ_m är våglängden i materialet.

Våglängden i materialet i förhållande till våglängden i luft (vakuum) beror på materialets relativa permittivitet (ϵ_r) enligt:

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{ekv. 4.16})$$

d.v.s. våglängden i materialet är kortare än våglängden i luft för samma frekvens, om $\epsilon_r > 1$.

Ekv. 4.16 insatt i ekv. 4.15 ger:

$$d = \frac{\lambda_0}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \cdot n \quad (\text{ekv. 4.17})$$

och man får att:

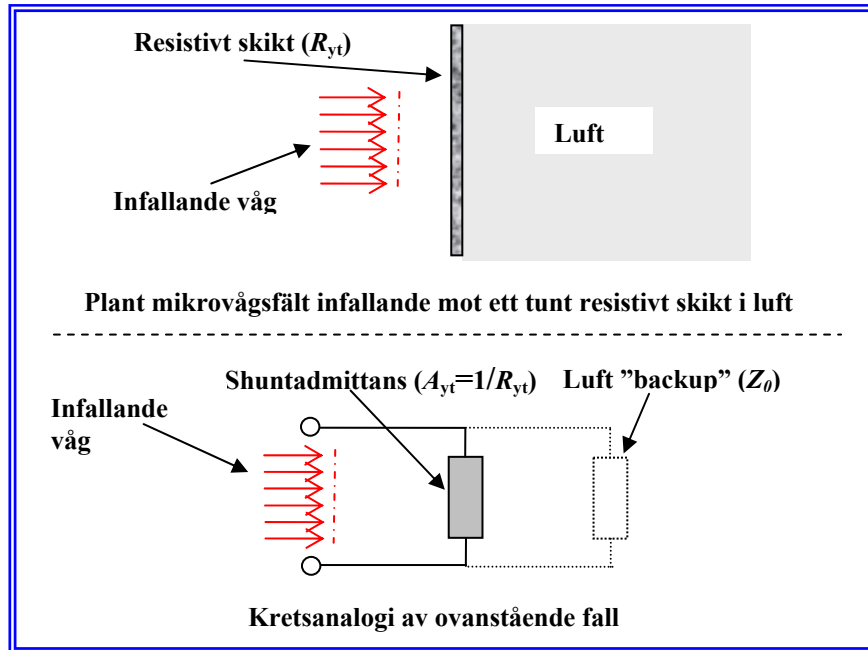
$$\epsilon_r = \left(\frac{\lambda_0}{2 \cdot d} \cdot n \right)^2 \quad (\text{ekv. 4.18})$$

Med de värden som fås ur figur 4.3 ($\lambda_0=16.1$ mm, $n=2$) samt att $d=10$ mm ger en relativ permittivitet $\epsilon_r \approx 2.6$ vilket stämmer bra med de tidigare genomförda mätningarna.

4.2.3 Modell för bestämning av ytresistans för tunna förlustskikt utifrån skalära mätdata

Inom mikrovågsområdet är det svårt att direkt mäta eller beräkna ett tunt skikts ytresistans. Om man istället mäter reflektions- och/eller transmissionskoefficienterna (R resp. T) hos förlustskiktet kan dess ytresistans beräknas. Noteras bör att vid konventionella reflektions- och transmissionsmätningar är det effektrefleksion respektive effekttransmission som mäts. Dessa mätvärden motsvarar $|R|^2$ resp. $|T|^2$.

Ett tunt förlustskikt med enbart resistiva förluster kan, enligt kretsanalogi karakteriseras med en shuntadmittans [13]. I figur 4.4. visas ett exempel med ett resistivt skikt i luft.



Figur 4.4. Resistivt skikt i luft och dess kretsanalogi

För ett tunt förlustskikt i luft, kan en effektiv matris $[A]$ enligt ekv. 4.11 tecknas som:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{yt} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ekv. 4.19})$$

där $Y_{yt} = 1/R_{yt}$. Insatt i ekv. 4.12 fås en effektiv impedans:

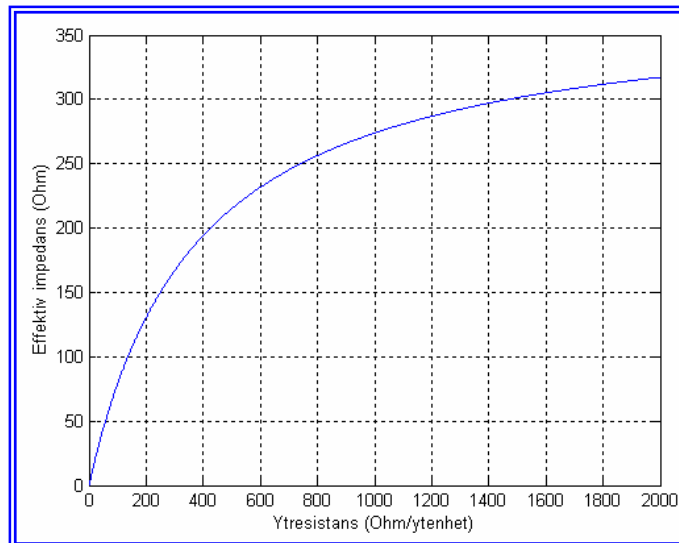
$$Z_{eff} = \frac{Z_0}{\left(1 + \frac{Z_0}{R_{yt}}\right)} \quad (\text{ekv. 4.20})$$

Studerar man ekv. 4.20 kan man notera att Z_{eff} alltid är mindre än Z_0 , (då $R_{yt} \rightarrow \infty$ går $Z_{eff} \rightarrow Z_0$ och då $R_{yt} \rightarrow 0$ går $Z_{eff} \rightarrow 0$) vilket visas i figur 4.5. Ekv. 4.20 insatt i ekv. 4.13 och ekv. 4.14 ger:

$$R_{yt} = \frac{T \cdot Z_0}{2(1-T)} \quad (\text{ekv. 4.21})$$

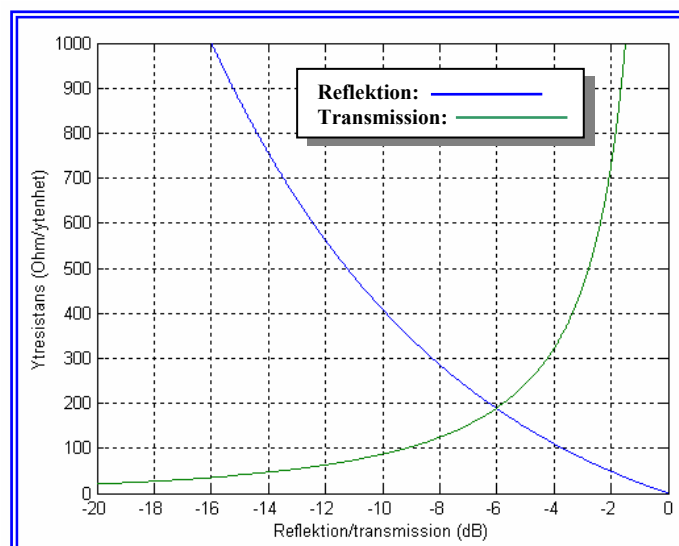
$$R_{yt} = \frac{-Z_0}{2} \cdot \left(\frac{1}{R} + 1\right) \quad (\text{ekv. 4.22})$$

R_{yt} kan alltså beräknas om man känner reflektions- eller transmissionsfaktorn.



Figur 4.5. Effektiv impedans (Z_{eff}) som funktion av ytresistansen.

I figur 4.6 visas ytresistansen (R_{yt}) som funktion av de uppmätta reflektions- och transmissions-egenskaperna. Man kan notera att det finns en brytpunkt vid en reflektion/transmission på -6 dB, vilket motsvarar en ytresistans på $Z_0/2 \approx 188.5 \Omega/\square$. Eftersom man strävar efter bästa signal/brusförhållande vid mätningar bör reflektionsmätning väljas för ytresistanser mindre än $Z_0/2$ och transmissionsmätningar för ytresistanser större än $Z_0/2$. Detta måste dock bedömas från fall till fall.



Figur 4.6. Ytresistansen som funktion av reflektions- och transmissions-egenskaperna

5. ÖVERSIKT AV NÅGRA ENKLA RADARABSORBERANDE STRUKTURER BASERADE PÅ TUNNA FÖRLUSTSKIKT

Radarabsorberande strukturer baserade på tunna förlustskikt har utvecklats under mer än ett halvt sekel. Strukturerna kan vara smalbandiga eller bredbandiga beroende på deras uppbyggnad, men samtliga karakteriseras av att reflektionsegenskaperna starkt beror på de ingående dielektriska materialens tjocklek. De brukar därför klassificeras som resonanta radarabsorbenter. I detta kapitel ges en översikt av de tre vanligaste strukturerna:

- Salisbury-screen
- Jauman-absorbenter
- Enfolieskikt

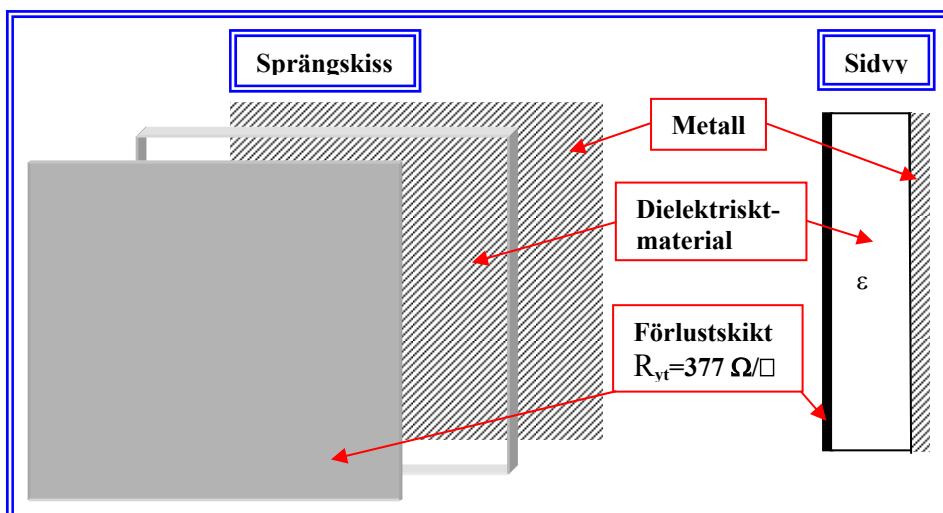
De principer för att styra en Salisbury-screens reflektionsegenskaper som presenteras i kapitel 6, kan naturligtvis även tillämpas på de två andra radarabsorberande strukturerna som presenteras i detta kapitel.

5.1 Salisbury-screen

En av de första radarabsorberande strukturerna som utvecklades var Salisbury-screen uppkallad efter W.W. Salisbury som fick patent på absorbenten 1952. Strukturen består ytterst av ett tunt resistivt skikt, exempelvis en fiberduk eller en tunn film med ett förlustmaterial, vanligen kol, kolfibrer eller ledande polymerer. Det resistiva skiktet skall ha en ytresistans (R_{yt}) lika med vågimpedansen i vakuum:

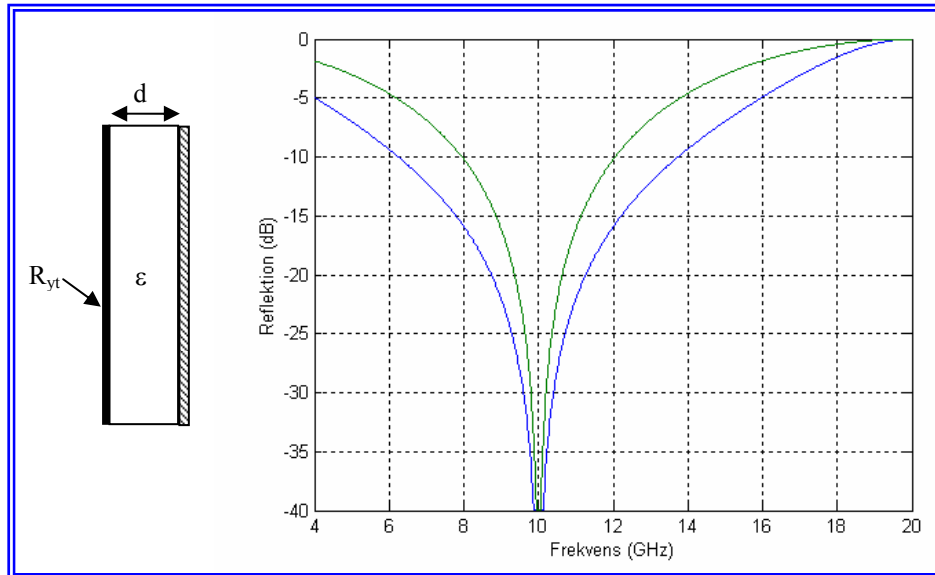
$$R_{yt} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \approx 377 \Omega/\square \quad (\text{ekv. 5.1})$$

Det resistiva skiktet backas upp med ett metallskikt, med oändlig ledningsförmåga, på ett avstånd av en kvarts våglängd ($\lambda/4$) vid mittfrekvensen. Det mellanliggande distansmaterialet skall, för maximal bandbredd, ha en relativ permittivitet nära vakuum ($\varepsilon_r \approx 1$). Distansmaterialet kan ha högre relativ permittivitet och kan då göras tunnare eftersom det är materialets tjocklek i våglängder räknat, som bestämmer reflektionsminimas läge i frekvensledd. Se ekv. 4.16. Ett högre värde på den relativa permittiviteten försämrar dock bandbredden. I figur 5.1 visas en skiss på en Salisbury-screen och i figur 5.2 ett diagram som visar reflektionen som funktion av frekvensen för en Salisbury-screen med två olika distansmaterial.



Figur 5.1. Skiss över en Salisbury-screen

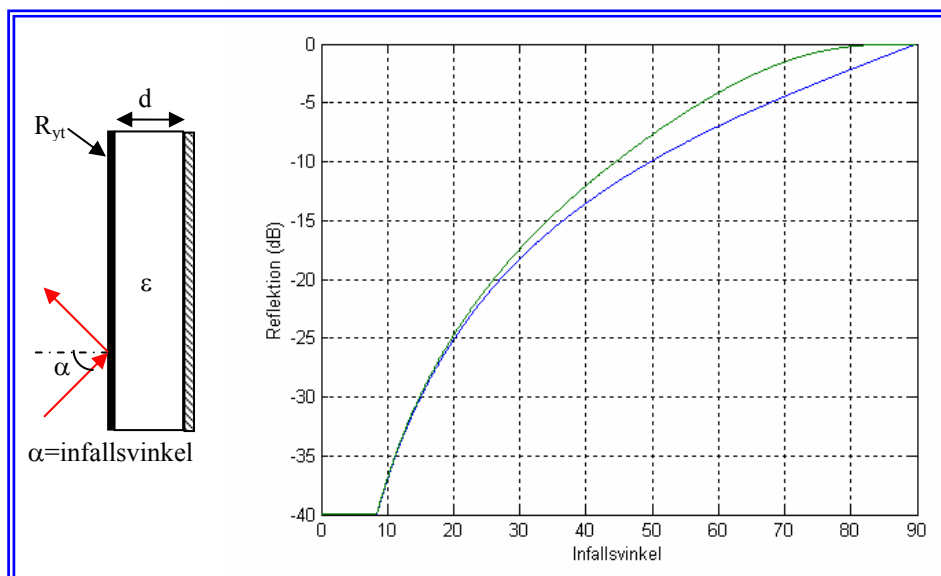
Figur 5.2 visar reflektionen vid vinkelrätt infall. För snett infall försämrats reflektionsegenskaperna, men absorbenten kan optimeras för en av de två ortogonala polarisationerna. I figur 5.3 visas reflektionen som funktion av infallsvinkeln för en Salisbury-screen.



Figur 5.2. Reflektion som funktion av frekvensen för en Salisbury-screen.

(blå: $d=7.5$ mm, $R_{yt}=377\Omega/\square$ och $\epsilon_r=1$), (grön: $d=3.75$ mm, $R_{yt}=377\Omega/\square$ och $\epsilon_r=4$)
Vinkelrätt infall.

Den relativa bandbredden för en Salisbury-screen, med en relativ permittivitet $\epsilon_r=1$, blir enligt ekv. 3.1 $B_{rel}=0.55$ (55 %) för en maximal reflektion på högst -13 dB (5 %).



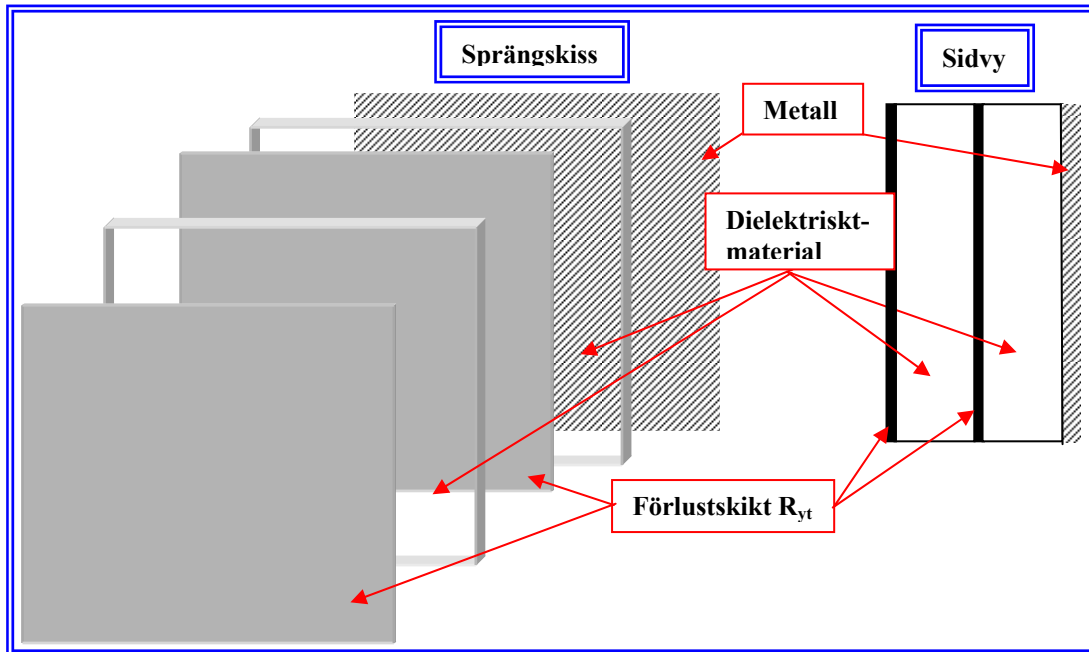
Figur 5.3. Reflektion som funktion av infallsvinkel för en Salisbury-screen. Frekvens 10 GHz, $d=7.5$ mm, $R_{yt}=377\Omega/\square$, $\epsilon_r=1$. (blå: \perp - polarisation, grön: $//$ - polarisation)

Som framgår av figur 5.2 fås vid mittfrekvensen (10 GHz) en maximal reflektion på högst -13 dB för infallsvinklar upp till ca 40° .

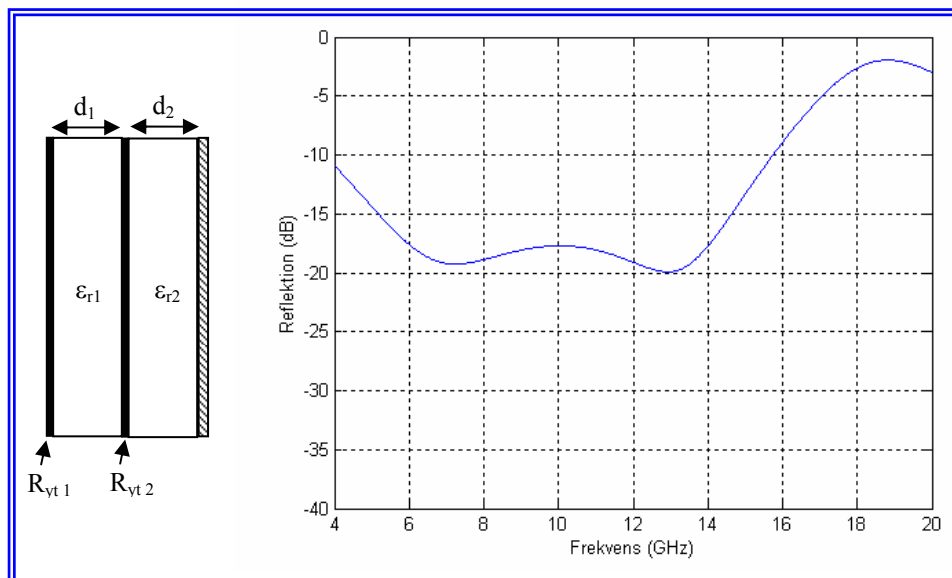
5.2 Jauman-absorbent

Nackdelen med en ren Salisbury-screen är dess begränsade bandbredd. En förbättring av bandbredden kan uppnås med en Jauman-absorbent som består av två eller flera resistiva skikt, med lämpligt valda ytresistanser och på lämpliga avstånd från varandra. Jauman-absorbenter brukar klassas efter antalet ingående resistiva skikt (N). En modern analys av denna typ av absorbent ges i [5]. Nackdelen med Jauman-absorbenter är att tjockleken ökar med ökad bandbredd.

Det är antalet resistiva skikt som bestämmer bandbredden. I figur 5.4 visas en skiss på en Jauman-absorbent, (med $N=2$), och i figur 5.5 visas absorbentens reflektionsegenskaper som funktion av frekvensen vid vinkelrätt infall.



Figur 5.4. Skiss över en Jauman absorbent.



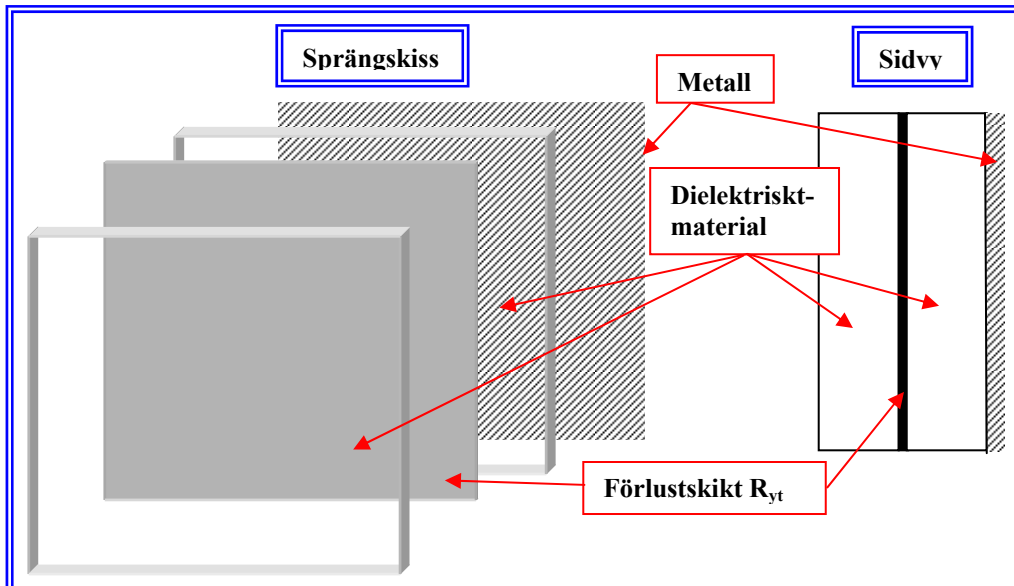
Figur 5.5. Reflektion som funktion av frekvensen för en Jauman-absorbent.

($d_1=6.5$ mm, $d_2=8.5$ mm, $R_{yt1}=850 \Omega/\square$, $R_{yt2}=270 \Omega/\square$, och $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2}=1$)
Vinkelrätt infall.

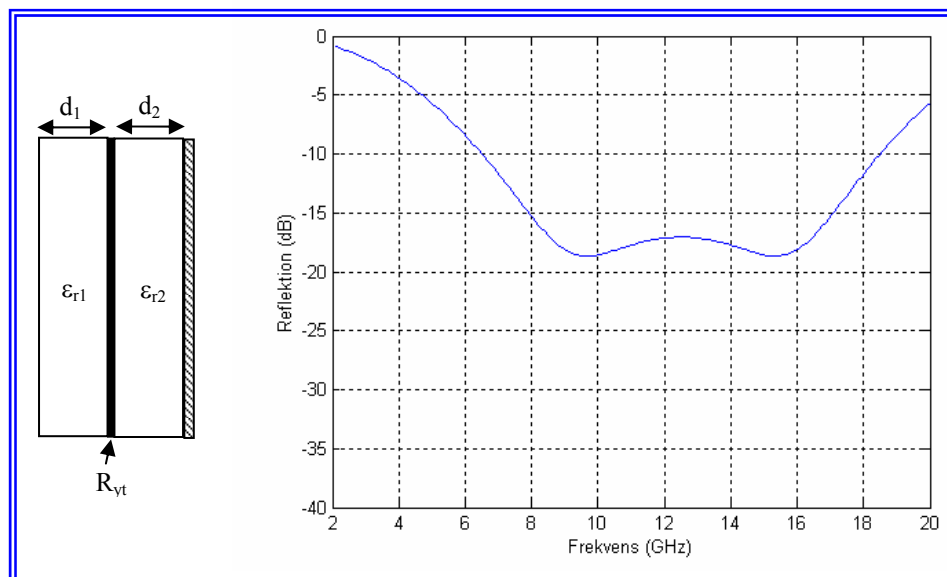
Den relativa bandbredden för en Jauman-absorbent enligt ovan, blir enligt ekv. 3.1 $B_{rel} = 1.1$ (110 %) för en maximal reflektion på högst -13 dB (5 %).

5.3 Enfolieskikt

En hybrid mellan en Salisbury-screen och en Jauman-absorbent (med $N=2$) utvecklades av FOA under det sena 1950-talet och benämns enfolieskikt [6]. Detta består av två dielektriska material med ett mellanliggande resistivt skikt. I figur 5.6 visas en skiss på ett enfolieskikt. Enfolieskiktet får reflektionssegenskaper som ungefär motsvarar en Jauman-absorbent ($N=2$) men består liksom en Salisbury-screen endast av ett resistivt skikt. I figur 5.7 visas reflektionen som funktion av frekvensen för ett enfolieskikt.



Figur 5.6. Skiss över ett enfolieskikt.



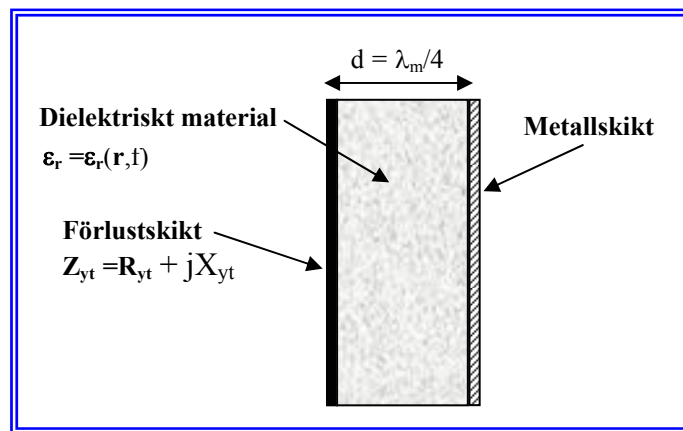
Figur 5.7. Reflektion som funktion av frekvensen för ett enfolieskikt.

($d_1 = d_2 = 3$ mm, $R_{yt} = 125 \Omega/\square$ och $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 4$). Vinkelrätt infall.

Den relativa bandbredden för ett enfolieskikt enligt ovan, blir enligt ekv. 3.1 $B_{rel} = 0.82$ (82 %) för en maximal reflektion på högst -13 dB (5 %). Detta är lite smalbandigare än den i avsnitt 5.2 visade Jauman-absorbenten, vilket beror på att principen bygger på dielektriska material med en relativ permittivitet högre än 1. Se även figur 5.2.

6. MÖJLIGHETER MED EN STYRBAR SALISBURY-SCREEN

En Salisbury-screen består som tidigare har visats huvudsakligen av två komponenter, generellt sett ett förlustskikt som karakteriseras av en ytimpedans Z_{yt} , och ett dielektriskt distansmaterial med en relativ permittivitet $\epsilon_r(\mathbf{r}, f)$, där \mathbf{r} är den 3-dimensionella riktningsektorn och f är frekvensen. Se figur 6.1. Konventionella dielektriska material har ofta en permittivitet som är oberoende av \mathbf{r} och svagt beroende av f inom mikrovågsområdet. I en traditionell Salisbury-screen består förlustskiktet av ett rent resistivt skikt ($Z_{yt} = R_{yt}$) och distansmaterialet av ett dielektriskt material med en relativ permittivitet nära 1. Principen för en Salisbury-screen bygger på att det infallande fältets reflektion från det resistiva skiktet destruktivt interfererar med fältet som penetrerar det resistiva skiktet och reflekteras mot metallskiktet. Detta sker då strukturens tjocklek, d är $\lambda_m/4$, eller en udda multipel därav, med hänsyn till våglängden i distansmaterialet (enligt ekv. 4.16) och eventuell fasvridning i förlustskiktet. Om förlustskiktet har fasvridande egenskaper krävs att den reaktiva komponenten $X_{yt} \neq 0$.



Figur 6.1. Schematisk skiss över en generell Salisbury-screen

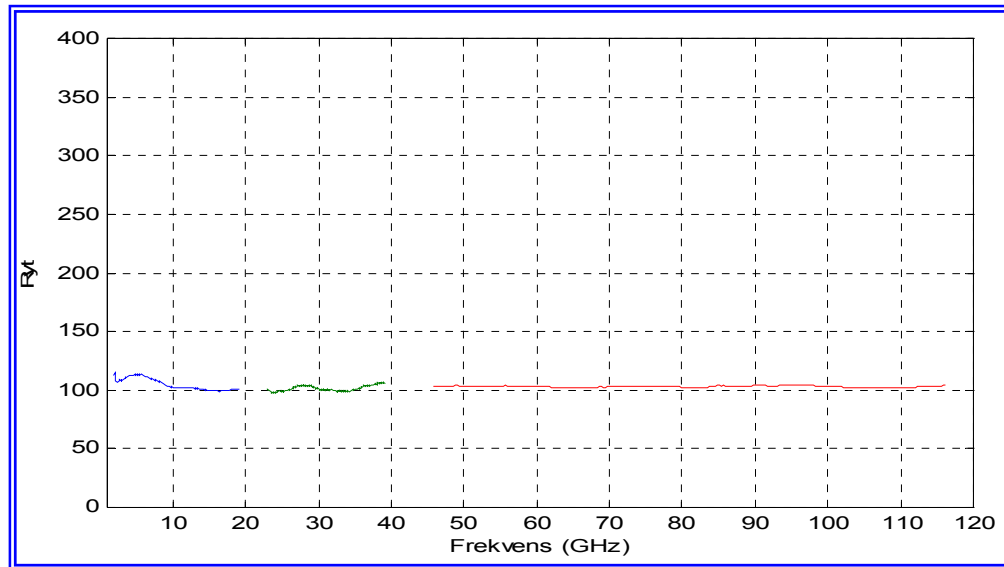
En konventionell Salisbury-screen är i princip smalbandig. Genom att styra och/eller designa förlustskikt och distansmaterial kan dock nya möjligheter öppnas, att utveckla en bredbandig eller en artificiellt bredbandig Salisbury-screen (smalbandig men styrbar). I de följande avsnitten ges några exempel på denna möjlighet.

6.1 Förlustskikt

De första förlustskikt för radarabsorberande tillämpningar byggde på tunna kolbeläggningar. Senare användes även tunna glasfiberdukar med inblandade kolfibrer. Ett exempel på en sådan duk visas i figur 6.2 och i figur 6.3 visas uppmätt ytresistans som funktion av frekvensen för denna duk.



Figur 6.2. Foto på ett förlustskikt bestående av en glasfiberduk med inblandad kolfiber.



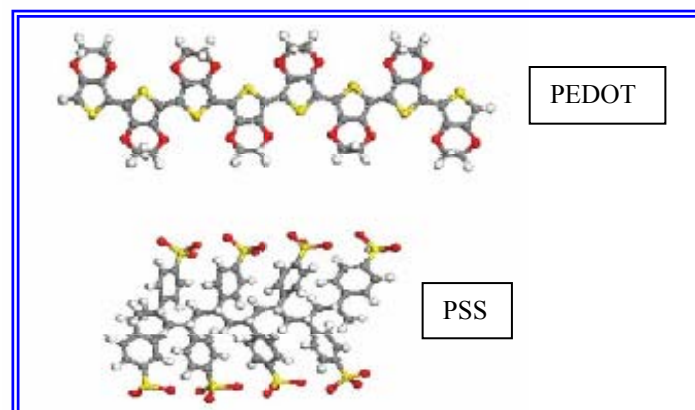
Figur 6.3. Mätning på R_{yt} (Ω/\square) för ett resistivt skikt, baserat på en glasfiberduk, med inblandad kolfiber.

Under 1980-talet började det utvecklas tunna textilsikt vilka impregnerades med ledande polymerer. De första polymerer som användes var polyannelin (PAn) och polypyrrol (PPy). I figur 6.4 visas ett foto på en sådant textilsikt (ContextTM, Milliken Research Corporation).



Figur 6.4. Foto på en textilduk impregnerad med en ledande polymer (PPy).

Dessa polymerer visade sig dock instabila, då de lätt oxiderades i kontakt med luft. PAn var dessutom lätt toxisk. I denna studie har experimentella undersökningar på en annan kommersiellt tillgänglig ledande polymer genomförts, PEDOT:PSS ((poly(3,4-etylenedioxythiophen): (polystyrensulfonat)). I figur 6.5 visas molekylstrukturer för PEDOT:PSS, [14].



Figur 6.5. Molekylstruktur för PEDOT:PSS.

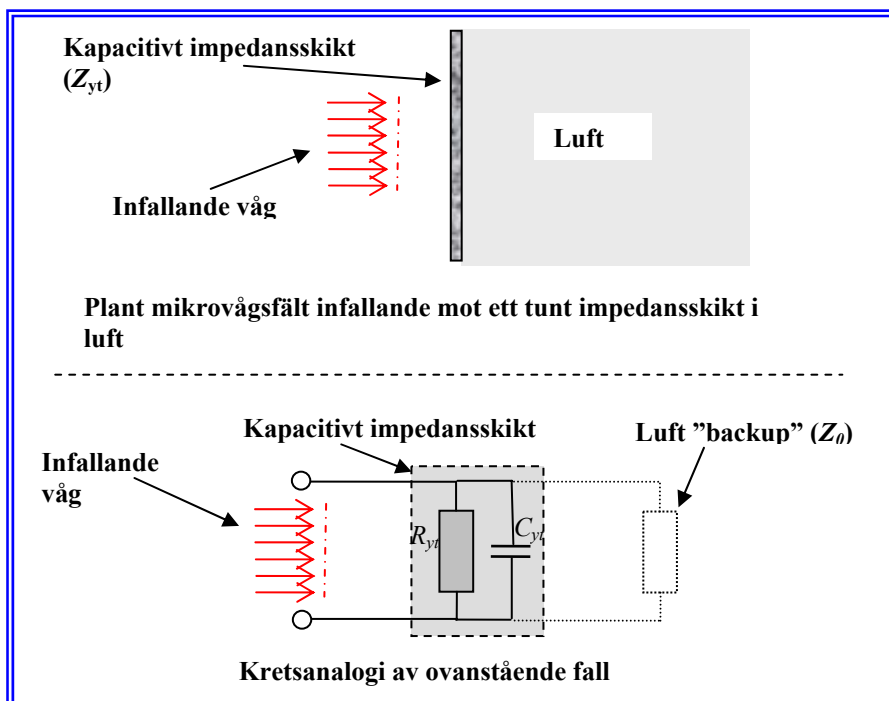
Förlustskikt med ledande polymerer har visat sig ha lite andra egenskaper jämfört med förlustskikt baserat på kol. De sistnämnda har rent resistiva egenskaper och kan modelleras som ett resistivt skikt, medan polymerbaserade förlustskikt måste modelleras som impedansskikt, med även en reaktiv komponent.

6.1.1 Homogena impedansskikt

I avsnitt 4.2.3 visades att ett rent resistivt skikt kan karakteriseras av dess ytresistans R_{yt} . Om skiktet även har en reaktiv komponent fås ett impedansskikt som kan karakteriseras som:

$$Z_{yt} = R_{yt} + jX_{yt} \quad (\text{ekv. 6.1})$$

där R_{yt} är den rent resistiva delen och X_{yt} den reaktiva delen. X_{yt} kan vara av induktiv eller kapacitiv karaktär. Impedansskikt kan modelleras med kretsanalogi och i figur 6.6 visas ett exempel på ett impedansskikt med kapacitiv karaktär.



Figur 6.6. Kretsanalogi av ett impedansskikt av kapacitiv karaktär

Skillnaden mellan ett rent resistivt skikt och ett impedansskikt är att det förstnämnda endast påverkar det elektromagnetiska fältets amplitud, medan det sistnämnda även påverkar fältets fas. Impedansskikt kan karakteriseras som en ytimpedans Z_{yt} och för ett kapacitivt skikt enligt figur 6.6 är [2]:

$$Z_{yt} = \frac{1}{Y_{yt}} \quad (\text{ekv. 6.2})$$

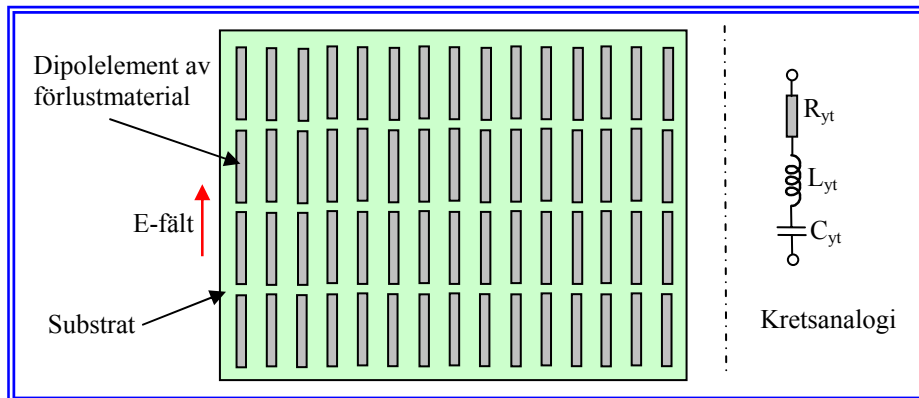
och

$$Y_{yt} = \left(\frac{1}{R_{yt}} + j\omega C_{yt} \right) \quad (\text{ekv. 6.3})$$

där ω är vinkelfrekvensen ($2\pi f$) och C_{yt} skiktets ytkapacitans.

6.1.2 Kretsanaloga skikt

Kretsanaloga förlustskikt består av kretselement av förlustbehäftat material i ett periodiskt mönster. Dessa skikt har stor likhet med frekvensselektiva ytor (FSS) men de senare består av element av perfekt ledande material. Rena FSS-ytors ytimpedans har därför i princip endast en reaktiv komponent och kan inte direkt användas som förlustskikt. Däremot kan FSS-tytor, med lågpasskaraktär användas i dielektriska distansmaterial för att skapa bredbandiga radarabsorbenter. Detta tas dock inte upp i denna rapport. Ett exempel på ett kretsanaloga skikt visas i figur 6.7 som består av linjära dipolelement.



Figur 6.7. Exempel på ett kretsanaloga förlustskikt.

Ett förlustskikt enligt figur 6.7, kan [15] enligt kretsanalogi karakteriseras som en ytimpedans Z_{yt} bestående av en ytresistans (R_{yt}), en ytinduktans (L_{yt}) och en ytkapacitans (C_{yt}) som:

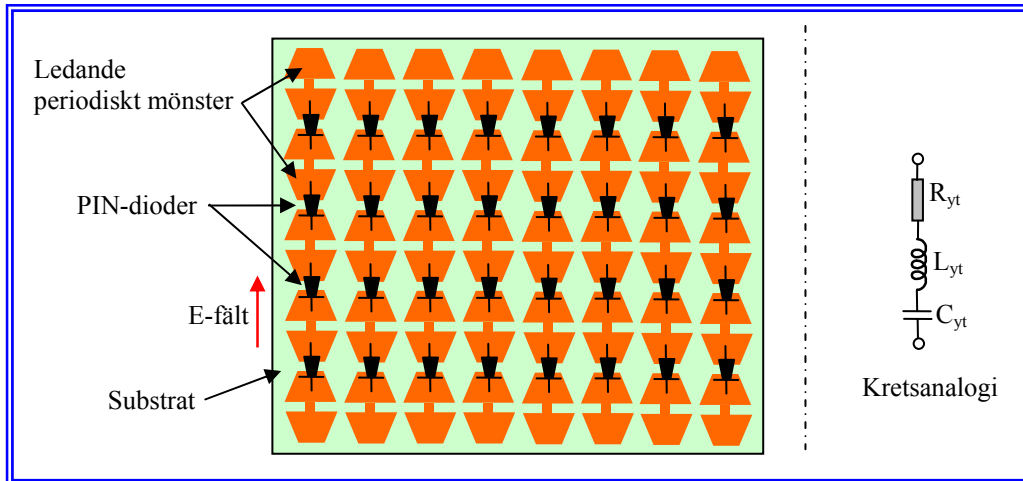
$$Z_{yt} = R_{yt} + j\omega L_{yt} + \frac{1}{j\omega C_{yt}} \quad (\text{ekv. 6.4})$$

Eftersom kretsanaloga skikt innehåller en reaktiv komponent, även om denna har fasta egenskaper kan en tunnare Salisbury-screen utvecklas med ett sådant skikt. För att styra ytimpedansen måste, med en fast ytresistans, ytinduktans och/eller ytkapacitans kunna styras. Styrbar ytkapacitans har tidigare visats möjligt [1].

Studier kring styrbara kretsanaloga skikt har inte öppet publicerats nationellt eller internationellt och det krävs därför ökade kunskapsinsatser inom området.

6.1.3 Diodbaserat förlustskikt med fasskiftande egenskaper

I förra avsnittet visades ett förlustskikt baserat på ett periodiskt mönster. Mönstret bestod av kretselement av ett förlustbehäftat material. Både homogena förlustskikt och skikt med förlustbehäftade kretselement, som baseras på ledande polymerer kan vara relativt svåra att styra över stora frekvensintervall. En metod att istället utnyttja PIN-dioder som resistiva element i en struktur enligt figur 6.8 har nyligen publicerats [16]. Denna metod ger stora möjligheter att snabbt förändra ytimpedansen (Z_{yt}). Ett förlustskikt enligt figur 6.8, benämns PSS (Phase-Switched Screen) och kan enligt kretsanalogi karakteriseras enligt ekv. 6.4. Som framgår av ekv. 6.4 kan Z_{yt} varieras genom att variera R_{yt} även om L_{yt} och C_{yt} är konstanta. Genom att använda PIN-dioder som resistiva element kan R_{yt} varieras genom att variera en elektrisk ström genom dioderna.



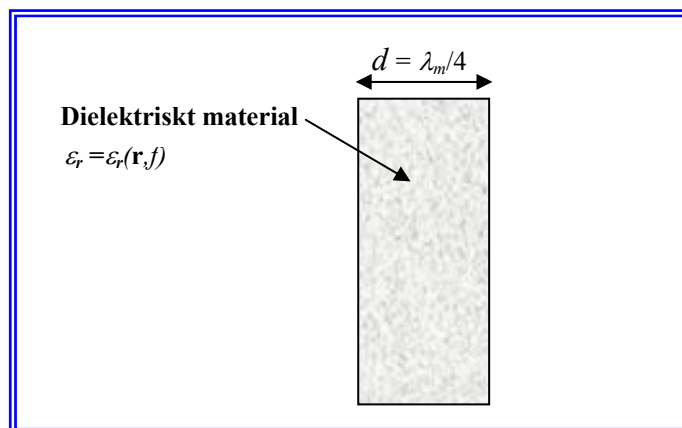
Figur 6.8 Exempel på ett förlustskikt med diodbaserat fasskiftande egenskaper.

I avsnitt 6.3.2 visas ett exempel på en styrbar Salisbury-screen med denna typ av förlustmaterial.

6.2 Distansmaterial

Det konventionella distansmaterialet i en Salisbury-screen består av ett dielektriskt material med en relativ permittivitet $\epsilon_r \approx 1$, som är oberoende av riktningsvektorn \mathbf{r} i materialet och frekvensen f . Tjockleken (d) hos distansmaterialet skall vara $1/4$ våglängd eller en udda multipel därav, (våglängd i materialet λ_m). Se figur 6.9. Tjockleken kan då tecknas m.h.a. ekv.4.16:

$$d = \frac{\lambda_m}{4} = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{ekv. 6.5})$$



Figur 6.9. Distansmaterial i en Salisbury-screen.

Man kan definiera en effektiv tjocklek (d_{eff}) hos distansmaterialet, tjocklek i våglängder som m.h.a. ekv.4.16 då kan tecknas:

$$d_{eff} = \frac{d}{\lambda_m} = \frac{d \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{\lambda_0} \quad (\text{ekv. 6.6})$$

Den effektiva tjockleken, d_{eff} , kan varieras på några olika sätt, exempelvis:

- Mekaniskt varierbar tjocklek
- Styrbar relativ permittivitet
- Designbar frekvensberoende relativ permittivitet

Mekanisk varierbar tjocklek på distansmaterialet har tidigare studerats, men detta är en metod som i praktiken är svår att realisera. Studier med pizelektriska material som distansmaterial har också studerats, men de tjockleksförändringar som krävs för att få önskad variation av reflektionsminimum i frekvensledd är svårt att uppnå med pizelektriska material. Exempelvis skall tjockleken ändras från 12.5 mm till 4 mm om reflektionsminimum skall flyttas från 6 GHz till 18 GHz ($\epsilon_r = 1$).

Styrbar relativ permittivitet kan ske exempelvis med olika ferroelektriska material. Med dagens ferroelektriska material krävs dock ett relativt högt elektriskt fält för att få en godtagbar ändring i materialets relativa permittivitet. För större ytor är detta inte praktiskt genomförbart i dagens läge.

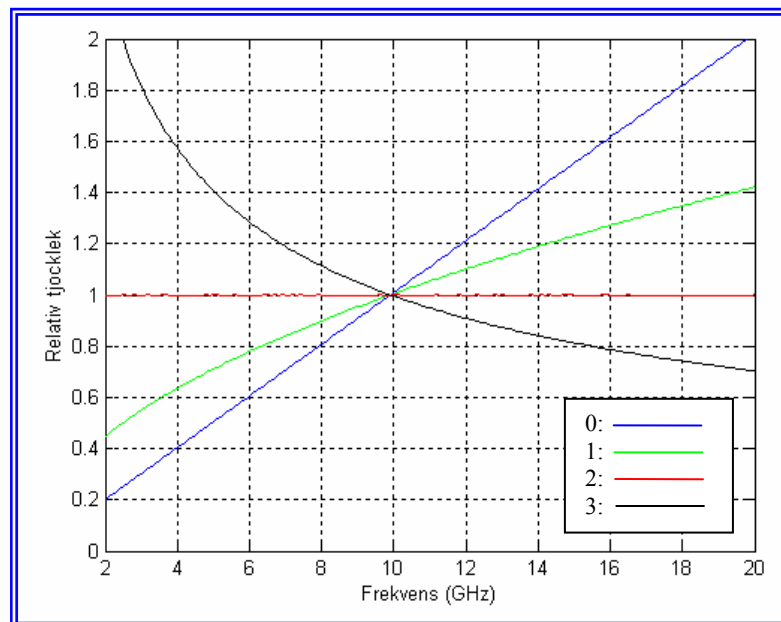
Om man kan designa ett dielektriskt material med en frekvensberoende relativ permittivitet $\epsilon_r(f)$, öppnas nya möjligheter att utveckla en bredbandig Salisbury-screen. Antag ett $\epsilon_r(f)$ som är omvänt proportionell mot frekvensen upphöjd med någon faktor n , se ekv 6.7.

$$\epsilon_r(f) \propto \frac{1}{f^n} \propto \lambda_0^n \quad (\text{ekv. 6.7})$$

Detta insatt i ekv 6.6 ger en effektiv tjocklek (d_{eff}) på distansmaterialet enligt ekv 6.8.

$$d_{eff} = \frac{d}{\lambda_m} = \frac{d \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{\lambda_0} \propto \frac{d \cdot \sqrt{\frac{1}{f^n}}}{\lambda_0} \propto \frac{d \cdot \sqrt{\lambda_0^n}}{\lambda_0} \quad (\text{ekv. 6.8})$$

I figur 6.10 visas hur den relativa tjockleken beror på frekvensen för några olika värden på faktorn n ($n=0, 1, 2, 3$).



Figur 6.10. Relativ tjocklek som funktion av frekvens för 4 olika värden på n (0-3), enligt ekv. 6.8.

Det intressanta är att notera om faktorn $n=2$ kommer den effektiva tjockleken (d_{eff}) hos distansmaterialet att vara oberoende av det infallande fältets frekvens (eller våglängd). Vad detta kan innebära för en Salisbury-screen visas i avsnitt, 6.4.

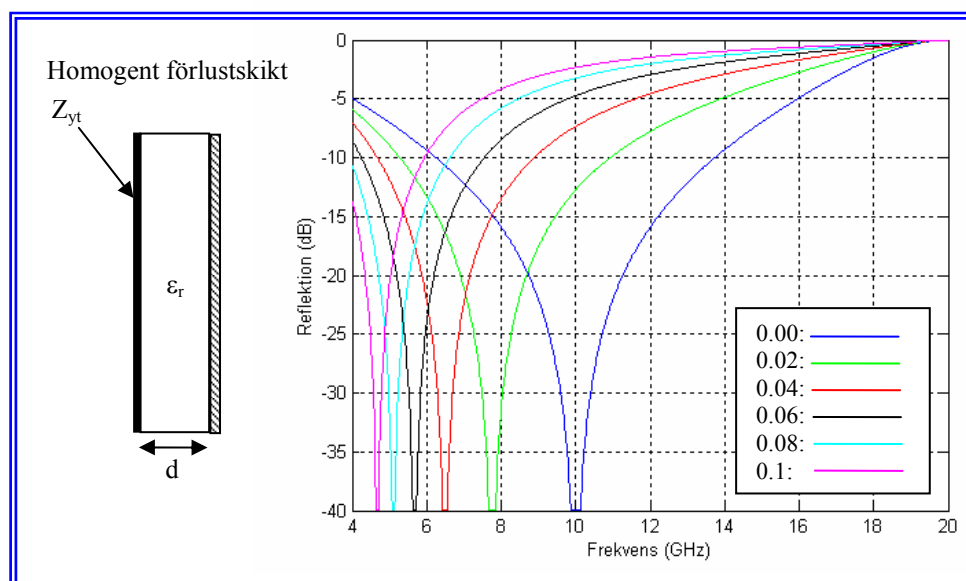
6.3 Exempel på styrbara Salisbury-screen absorbenter

De tidigare avsnitten i detta kapitel har visat på möjligheter med styrbara förlustskikt som impedansskikt i en Salisbury-screen och designbara dielektriska distansmaterial. I de följande avsnitten visas på vad detta kan innebära för att utveckla en styrbar eller designbar Salisbury-screen.

6.3.1 Salisbury-screen med ett homogent styrbart förlustskikt

I avsnitt 6.1.1 beskrevs ett impedansskikt bestående av en ledande polymer som karakteriserades av en ytresistans (R_{yt}) och en ytkapacitans (C_{yt}). Om ytkapacitansen kan styras med en yttre signal kan reflektionsminimum flyttas i frekvensledd, vilket har visats [1].

I figur 6.11 visas ett exempel på en Salisbury-screen baserad på ett sådant förlustskikt och med varierande värden på ytkapacitansen, ($C_{yt} = 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1$ pF).



Figur 6.11. Reflektion som funktion av frekvensen för en styrbar Salisbury-screen för några olika värden på ytkapacitansen ($C_{yt}=0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1$ pF), $\epsilon_r=1$, $d=7.5$ mm. Vinkelrätt infall.

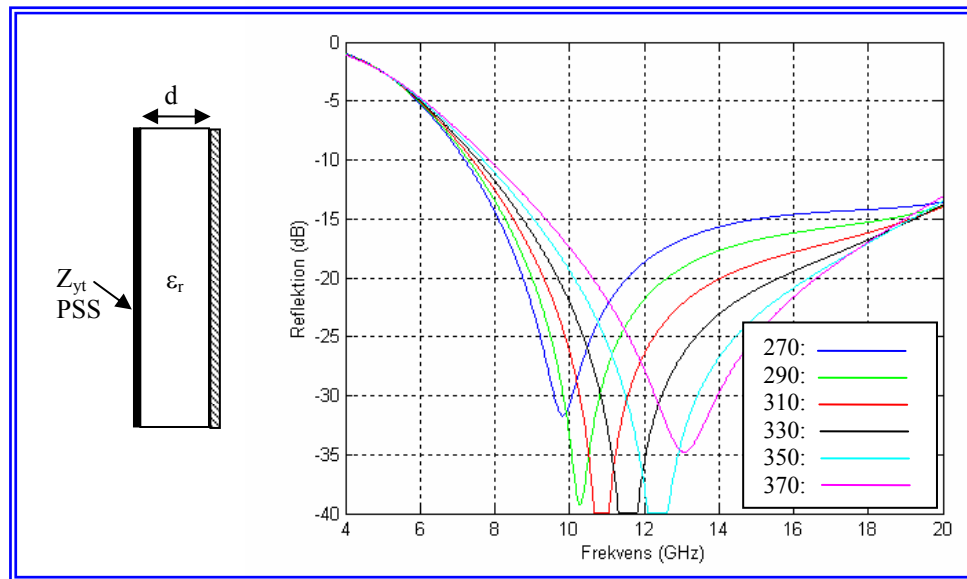
Som framgår av figur 6.11 kan en ändring av reflektionsminima ske över ett frekvensintervall på ca 5 GHz med en variation av C_{yt} mellan 0 - 0.1 pF, vilket har experimentellt verifierats av University of Sheffield [2].

Hur en sådan påverkan av förlustskiktet kan göras har inte publicerats nationellt eller internationellt. Uppenbart är dock att laddningsbärare måste transporteras till och från den ledande polymeren för att ändra dess reflekterande egenskaper. Detta borde kunna ske med någon form av elektrolyt. Studier av detta inom mikrovågsområdet har dock inte rapporterats.

6.3.2 Salisbury-screen med ett styrbart förlustskikt baserat på PSS

I avsnitt 6.1.3 redovisades ett relativt nytt förlustskikt baserat på en FSS-yta med PIN-dioder. PIN-dioderna fungerar som en varierbar resistans, genom att variera en elektrisk ström genom dioderna. Enligt ekv. 6.4 kan då ytimpedansen hos en sådan struktur varieras.

I figur 6.12 visas ett exempel på en Salisbury-screen med ett PSS-förlustskikt, med 6 olika värden på R_{yt} , (270, 290, 310, 330, 350 och 370 Ω/\square).

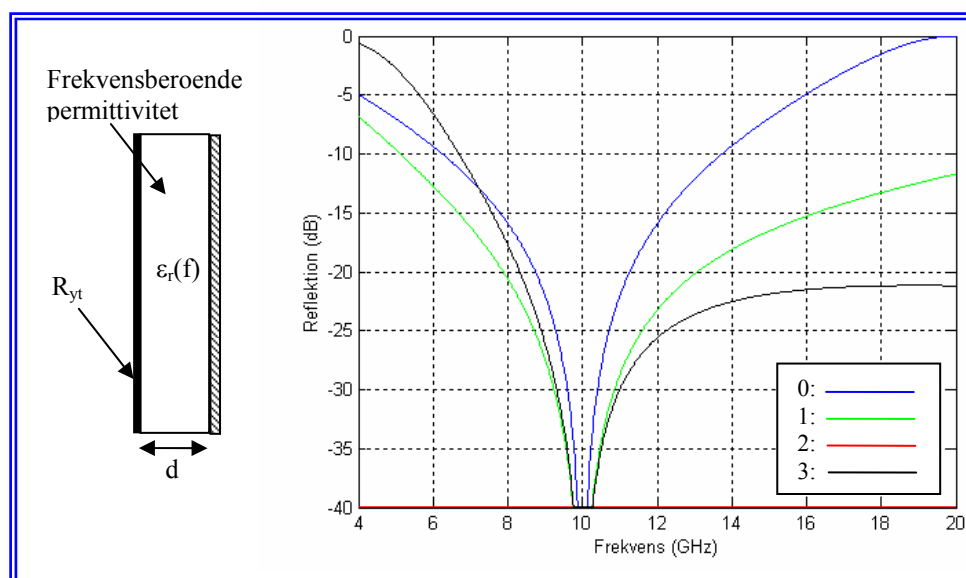


Figur 6.12. Reflektion som funktion av frekvens för en Salisbury-screen baserad på en PSS med olika ytresistans. Vinkelrätt infall.

Absorbenten som visas i figur 6.12 är inte på något vis optimerad utan ska ses som ett exempel på vad som kan göras med en PSS som ett styrbart förlustskikt i en Salisbury-screen..

6.4 Exempel på en designbar Salisbury-screen

I avsnitt 6.2 visades att om man kunde designa ett dielektriskt distansmaterial med en frekvensberoende relativ permittivitet ($\epsilon_r(f)$) kunde den effektiva tjockleken hos distansmaterialet få intressanta egenskaper. Om man enligt ekv. 6.8 kan variera den relativa permittivitets frekvensberoende med en faktor n ($n=0, 1, 2, 3$) och applicera detta på en design av en Salisbury-screen enligt figur 5.1 fås reflektionsegenskaper enligt figur 6.13.



Figur 6.13. Reflektionsegenskaper för en Salisbury-screen med ett frekvensberoende dielektriskt distansmaterial. Frekvensberoende enligt ekv. 6.8 ($n=0, 1, 2, 3$).

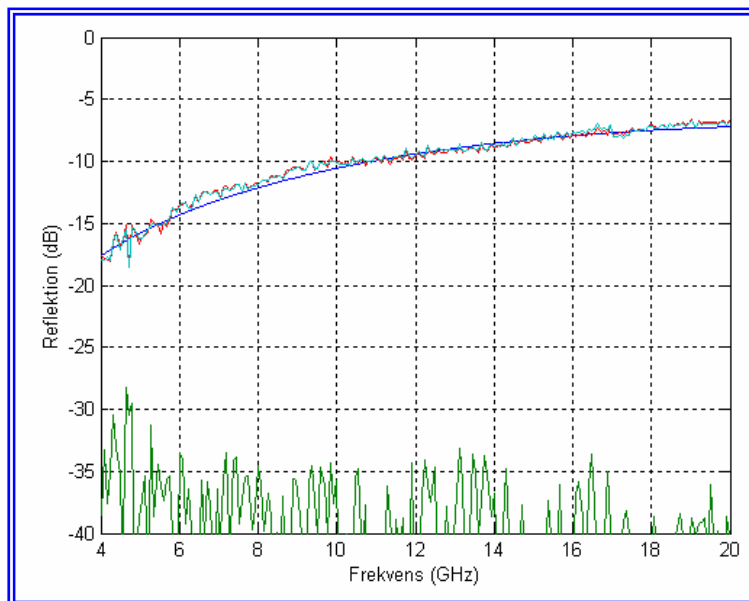
Man kan notera att om $n=0$ fås en konventionell Salisbury-screen, men om $n=2$, vilket motsvarar en frekvensoberoende effektiv tjocklek av distansmaterialet, så får man en i princip oändlig liten reflektion, oberoende av frekvens (jmf. Figur 6.10).

7. MÄT- OCH BERÄKNINGSRESULTAT PÅ PEDOT:PSS

I studien har en ledande polymer PEDOT:PSS undersökts och karakteriserats inom mikrovågsområdet. Syftet var att utvärdera dess potential som ett tunt förlustskikt i radarabsorberande strukturer. Eftersom polymeren behöver någon form av material att appliceras på valdes PMMA och glas som lämpliga substrat. Karakterisering av rena substrat samt substrat med applicerad polymer har genomförts. Även ett antal radarabsorberande strukturer baserade på PEDOT:PSS och PMMA- och glassubstrat har analyserats.

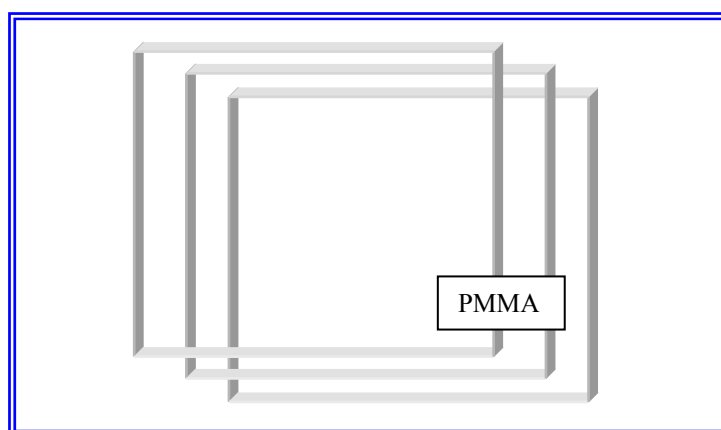
7.1 Karaktärisering av PMMA-substrat

Ett antal PMMA-substrat (30x30 cm) med en tjocklek på 2 mm tillverkades och reflektionen från dessa uppmättes med den skalära mätutrustning som visades i kapitel 4. Ett exempel på reflektion som funktion av frekvens från ett sådant substrat visas i figur 7.1.



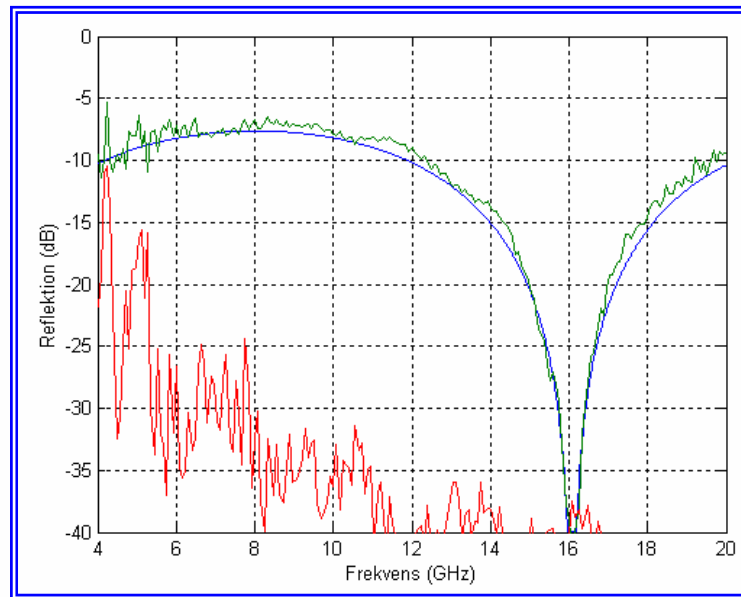
Figur 7.1. Reflektion som funktion av frekvens för ett 2 mm tjockt PMMA-substrat. (blå kurva beräknad, cyan och röd kurva uppmätta data (\perp , \parallel -pol.) och grön kurva bakgrund)

För att mer noggrant kunna bestämma den relativa permittiviteten hos PMMA-substraten mättes reflektionen från ett 6 mm tjockt PMMA substrat (3 x 2 mm PMMA plattor), se figur 7.2. Detta gjordes för att få ett distinkt minimum i reflektionsdiagrammet.



Figur 7.2. Tre PMMA-plattor med en total tjocklek på 6 mm

I figur 7.3 visas resultatet av mätningen. Minimum i diagrammet är det 1:a.

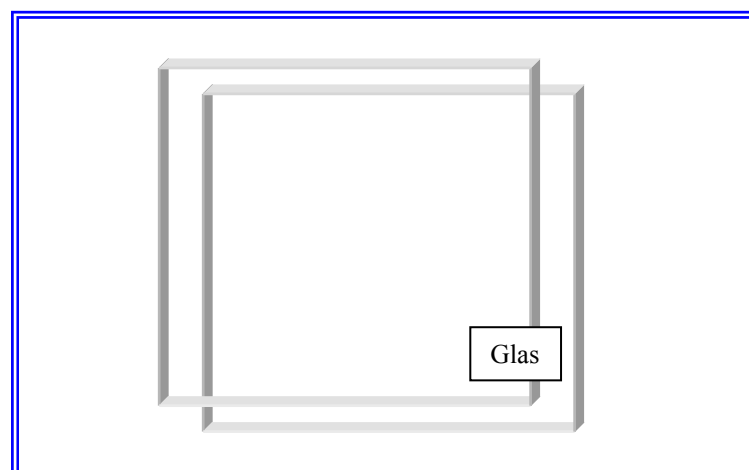


Figur 7.3. Reflektion som funktion av frekvens för ett 6 mm tjockt PMMA-substrat. (blå kurva beräknad, grön kurva uppmätt och röd kurva bakgrund)

I avsnitt 4.2.2 beskrevs en metod att beräkna den relativa permittiviteten hos ett dielektriskt material utifrån skalära mätdata på reflektionen. Ur figur 7.3 fås 1:a reflektionsminimum vid ca 16.1 GHz, vilket motsvarar en våglängd på ca 1.86 cm. Insatt i ekv. 4.18, med en substrattjocklek på 6 mm, ger en relativ permittivitet på ca 2.4. I figur 7.3 visas en beräkning på reflektionen för substratet med detta värde på den relativa permittiviteten (blå kurva). Som framgår är överensstämmelsen mycket god.

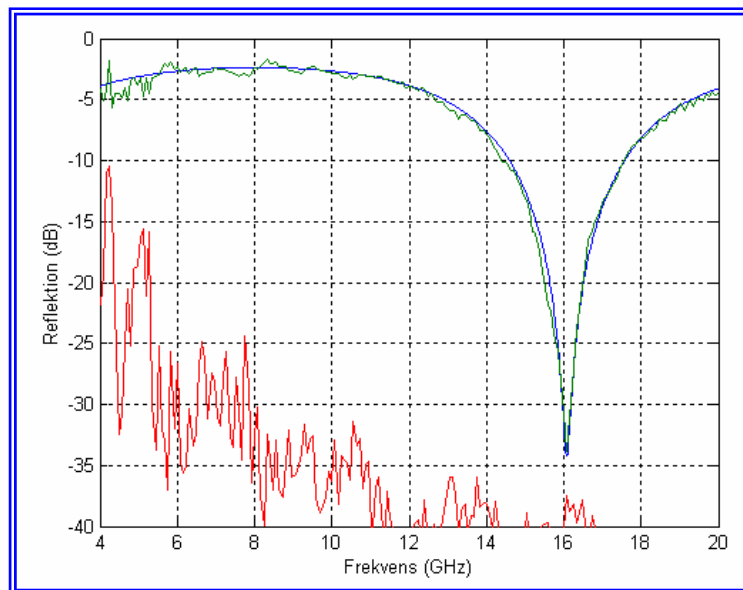
7.2 Karaktärisering av glassubstrat

För att bestämma den relativa permittiviteten hos glassubstraten mättes reflektionen på 2 glasplattor med en total tjocklek på 3.4 mm (2 x 1.7 mm), se figur 7.4.



Figur 7.4. Två glasplattor med en total tjocklek på 3.4 mm

I figur 7.5 visas resultatet av reflektionsmätningen. Enligt avsnitt 4.2.2 kan nu den relativa permittiviteten för glassubstraten beräknas.

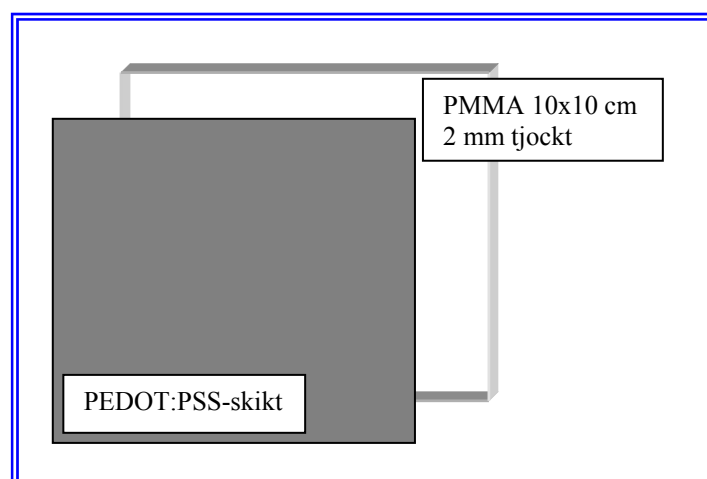


Figur 7.5. Reflektion som funktion av frekvens för ett 3.4 mm tjockt glassubstrat. (blå kurva beräknad, grön kurva uppmätt och röd kurva bakgrund)

Ur figur 7.5 fås 1:a reflektionsminimum vid ca 16.1 GHz, vilket motsvarar en våglängd på ca 1.86 cm. Insatt i ekv. 4.18, med en tjocklek på substratet på 3.4 mm ger detta en relativ permittivitet på ca 7.5.

7.3 Karaktärisering av PEDOT:PSS på PMMA-substrat

För att bestämma ytresistansen hos ett tunt skikt av PEDOT:PSS tillverkades 3 st. PMMA-plattor, med en storlek på 10x10 cm och med en tjocklek på 2 mm vilkas yta blästrades och ruggades med ett grovt sandpapper för att få god vidhäftning. Därefter målades substraten med PEDOT:PSS. Det visades sig dock svårt att få god vidhäftning mellan polymeren och substratet. De tre plattorna fick olika tjocklek av PEDOT:PSS. I figur 7.6 visas en skiss på plattorna och figur 7.7 ett foto på de tre plattorna.

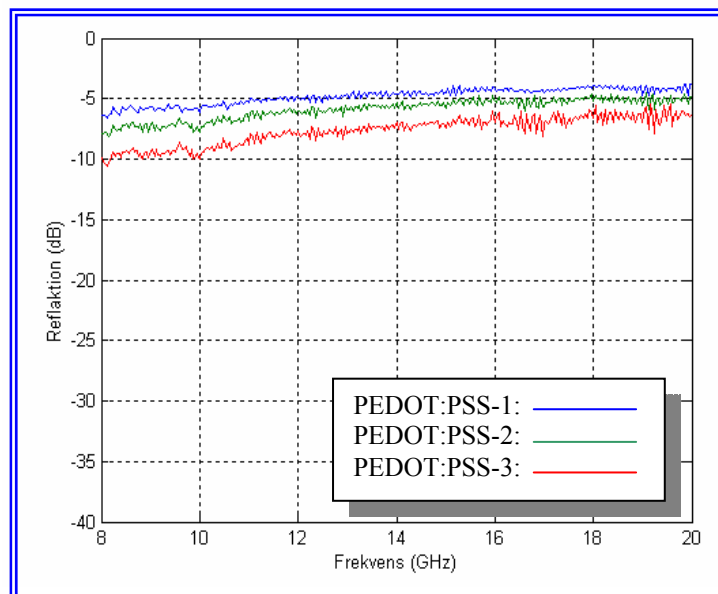


Figur 7.6. Skiss över PEDOT:PSS-skikt på PMMA-skikt.

Reflektionsmätningar på de tre plattorna gjordes med den skalära mätutrustningen och resultatet visas i figur 7.8.



Figur 7.7. Foto på de tre PEDOT:PSS-skikten.



Figur 7.8. Reflektion som funktion av frekvens för proven PEDOT:PSS-1 - 3. PEDOT:PSS på 2 mm PMMA.

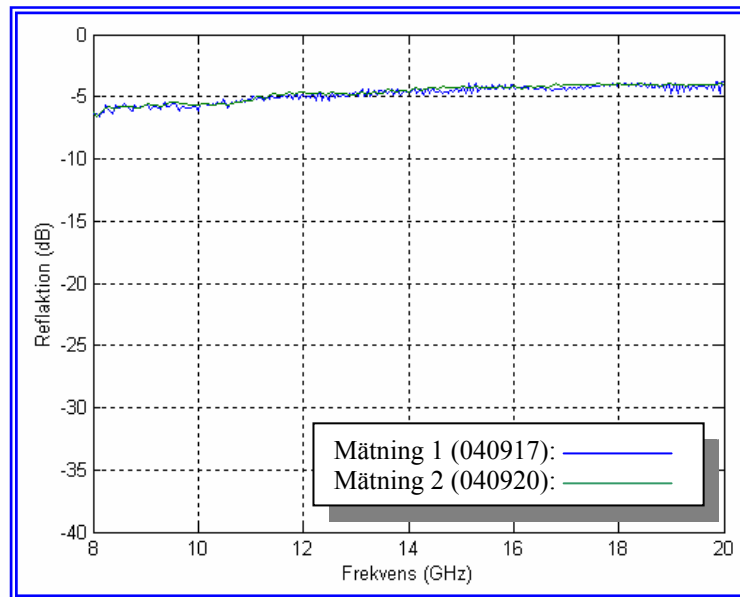
Som framgår av figur 7.8 blev reflektionen något olika för de tre mätobjekten, vilket är naturligt eftersom tjockleken hos PEDOT:PSS-skikten är olika. För att kontrollera mätnoggrannheten (reproducerbarheten) samt ev. oxidation av PEDOT:PSS-skiktet, gjordes två mätningar på mätobjekt PEDOT:PSS-1 med några dagars mellanrum. Resultatet visas i figur 7.9. Som framgår blev överensstämmelsen mycket god.

Två mätningar gjordes också på PEDOT:PSS-1 för att undersöka om skiktet har polarisationsberoende reflektionsegenskaper. Mätningen gjordes för två ortogonala mätsnitt, genom att mätobjektet vreds 90° mellan mätningarna. Resultatet visas i figur 7.10 och som framgår verkar skiktet inte ha några polarisationsberoende reflektionsegenskaper.

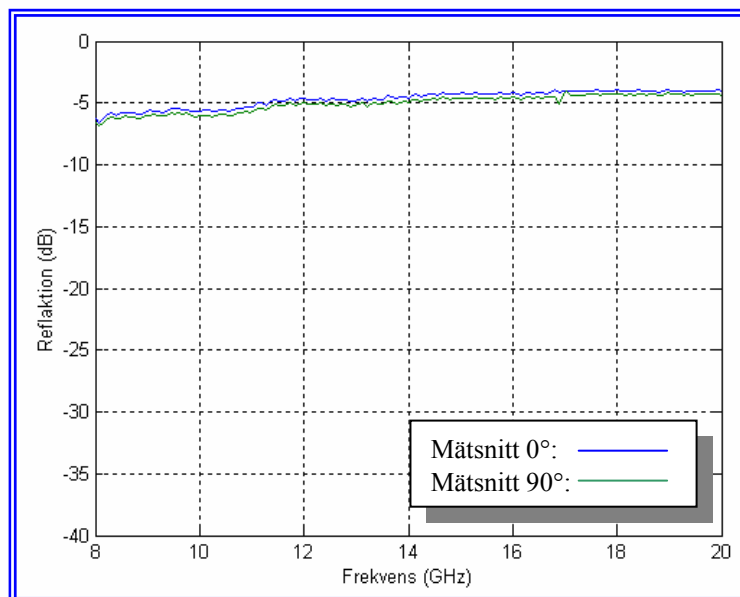
I avsnitt 4.2.3 redovisades en metod att bestämma ytresistansen för ett tunt rent resistivt förlustskikt genom att mäta reflektion eller transmission från skiktet. Om man antar att PEDOT:PSS-skiktet är rent resistivt kan dess ytresistans bestämmas ur reflektionsmätningen som visas i figur 7.8.

I diagrammet framgår att reflektionen för mätobjekt PEDOT:PSS-1, vid 16 GHz är ca -7 dB.

Ur figur 4.6 skulle detta motsvara en ytresistans på ca $220 \Omega/\square$. Detta är en alldeles för låg ytresistans för att användas i en Salisbury-screen. Det skulle innebära ett reflektionsminimum på endast ca -12 dB. Noteras bör att ytresistansen hos PEDOT:PSS kan ändras genom ändrad dopning eller inblandning av andra ämnen.



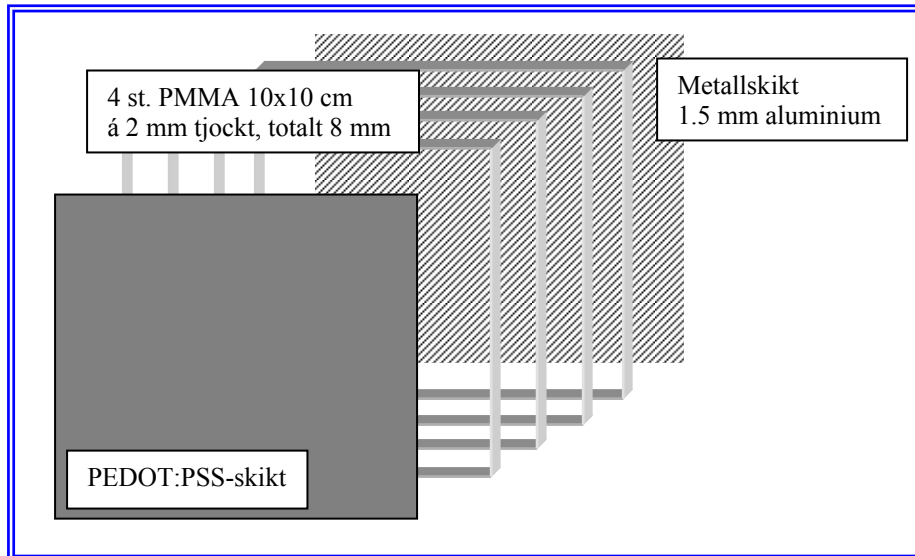
Figur 7.9. Reflektion som funktion av frekvens för 2 olika mätningar (3 dagars mellanrum) på prov PEDOT:PSS-1.



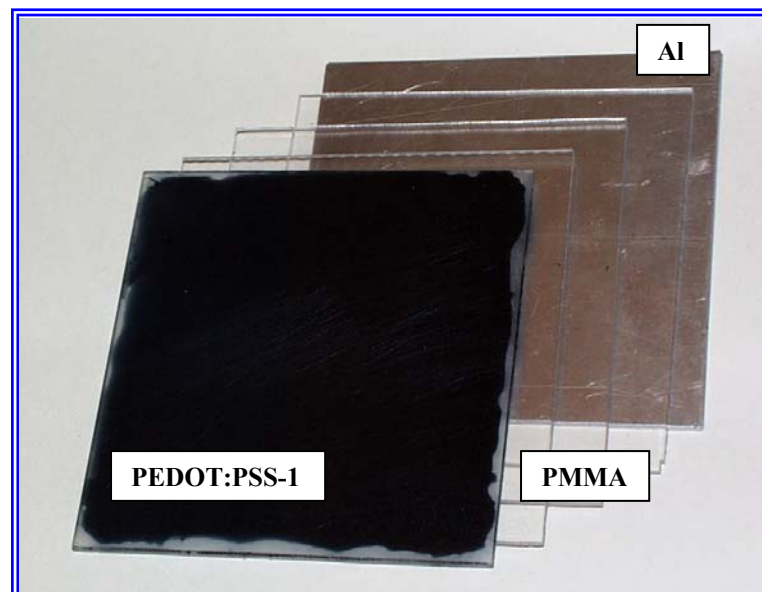
Figur 7.10. Reflektion som funktion av frekvens för prov PEDOT:PSS-1 för två ortogonala mätsnitt.

7.4 Radarabsorberande strukturer med PEDOT:PSS på PMMA- och glas-substrat

Som framgick av förra avsnittet är ytresistansen hos PEDOT:PSS-skiktet för lågt för att användas i en Salisbury-screen. Detta om skiktet har rent resistiva egenskaper. För att undersöka förlustskiktets egenskaper i en radarabsorberande struktur gjordes först reflektionsmätningar på en Salisbury-screen, uppbyggd enligt figur 7.11. Strukturen består av ett förlustskikt av PEDOT:PSS ytterst, sedan distansmaterial av PMMA med en tjocklek på 8 mm och som avslutning ett metallskikt (1.5 mm aluminium). I bild 2.2 visas ett foto på strukturen.

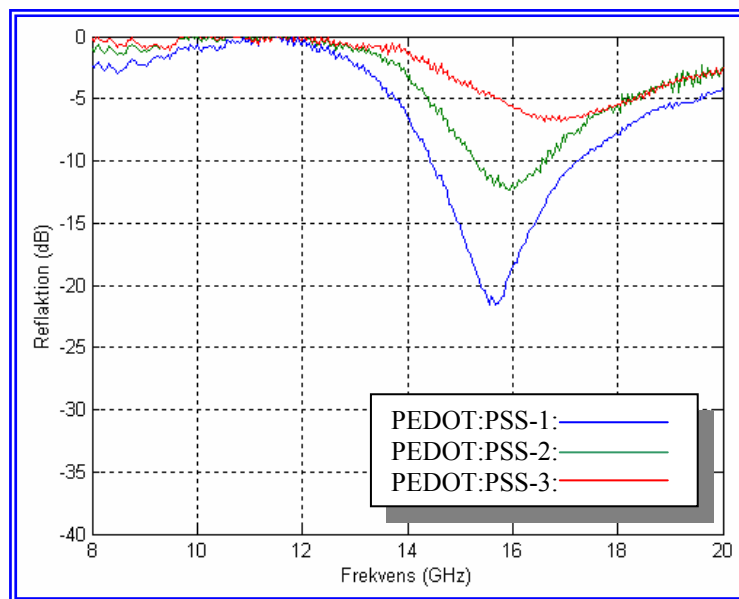


Figur 7.11. Skiss över en Salisbury-screen struktur med ett förlustskikt av PEDOT:PSS, 8 mm distansmaterial av PMMA och ett avslutande metallskikt (1.5 mm aluminium).



Figur 7.12. Foto över Salisbury-screen strukturen.

I figur 7.13 visas reflektionsmätningar på en Salisbury-screen, enligt figur 7.11 med de tre olika PEDOT:PSS-skikten, PEDOT:PSS-1 – PEDOT:PSS-3.

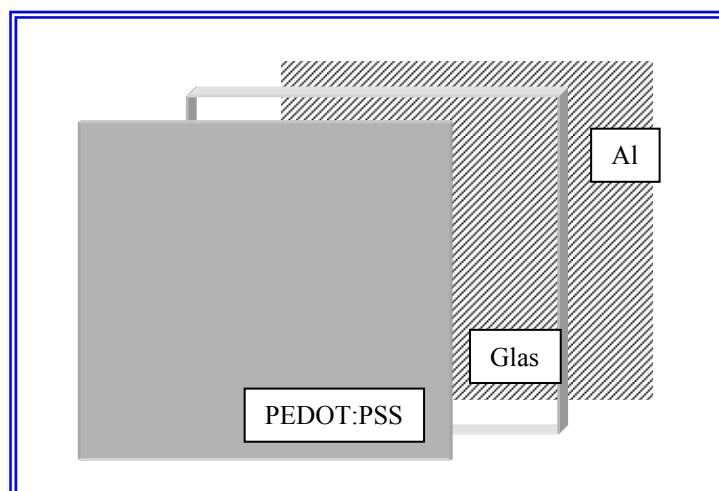


Figur 7.13. Reflektion som funktion av frekvens för en Salisbury-screen med ett 8 mm tjockt PMMA distansmaterial.

Ur diagrammet framgår att absorbenten med PEDOT:PSS-1 som förlustskikt ger ett reflektionsminimum på ca -22 dB vilket skiljer sig betydligt från det förväntade -12 dB. Vidare framgår att minimum fås vid ca 15.6 GHz. En Salisbury-screen med ett 8 mm tjockt distansmaterial, med en relativ permittivitet på 2.4, får reflektionsminimum vid ca 18.2 GHz.

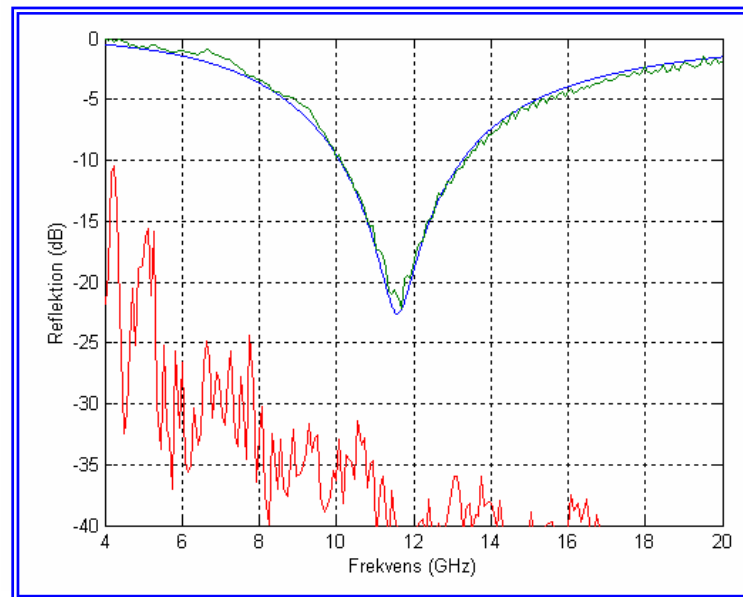
Ur detta kan man anta att PEDOT:PSS-skiktet inte kan karakteriseras som ett rent resistivt skikt. Som framgick av avsnitt 6.1.1 kan tunna impedansskikt karakteriseras med en ytimpedans Z_{yt} som förutom en resistiv komponent även innehåller en reaktiv komponent. Tidigare har visats, [2], att förlustskikt av textildukar impregnerade med en ledande polymer kan modelleras med en ytresistans R_{yt} och en ytkapacitans C_{yt} .

För att undersöka detta vidare tillverkades en absorberande struktur, med glas som substrat, enligt figur 7.14.



Figur 7.14. Skiss över en Salisbury-screen struktur med ett förlustskikt av PEDOT:PSS, 1.7 mm distansmaterial av glas och ett avslutande metallskikt (1.5 mm aluminium).

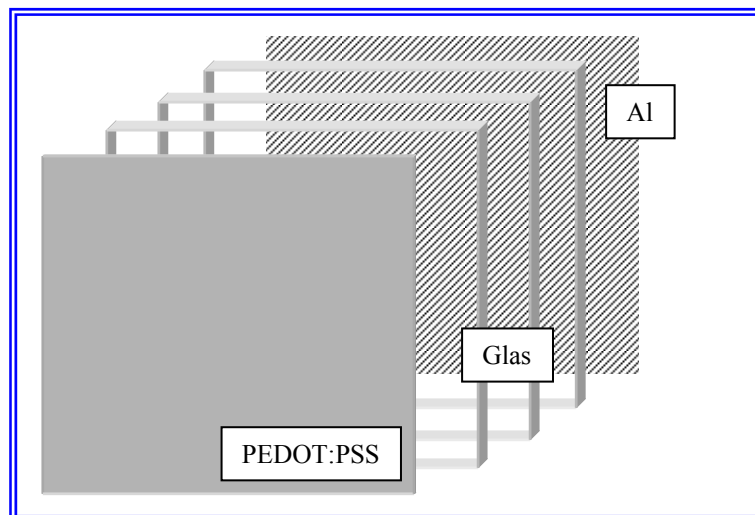
Reflektionen från strukturen mättes och resultatet visas i figur 7.15 (grön kurva).



Figur 7.15. Reflektion som funktion av frekvens för en Salisbury-screen med ett 1.7 mm tjockt glas som distansmaterial.

För att undersöka om PEDOT:PSS-skiktet kan karakteriseras som ett kapacitivt förlustskikt gjordes en beräkning på strukturen i figur 7.14, med ett förlustskikt ($R_{yt}=330 \Omega/\square$ och $C_{yt}=0.46 \text{ pF}$), ett distansmaterial ($\epsilon_r=7.5$, $d=1.7 \text{ mm}$). Resultatet visas i figur 7.15 (blå kurva) och överensstämmelsen med mätdata är mycket god.

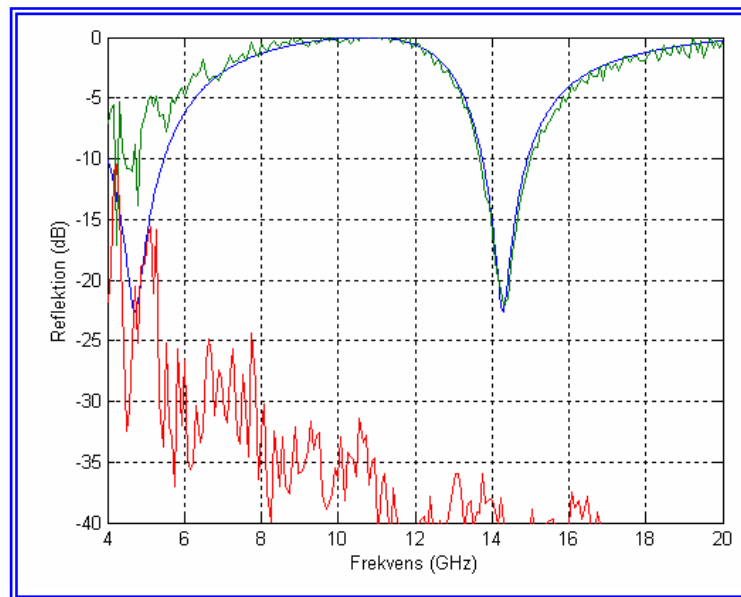
Ytterligare en absorberande struktur tillverkades. I figur 7.16 visas en skiss strukturen.



Figur 7.16. Skiss över en Salisbury-screen struktur med ett förlustskikt av PEDOT:PSS, 5.1 mm distansmaterial av glas och ett avslutande metallskikt (1.5 mm aluminium).

Denna struktur påminner om den i figur 7.14, men är tjockare, detta för att få en mer distinkt reflektionsminimum, vilket ställer större krav på beräkningsmodellen.

Reflektionen från strukturen mättes och resultatet visas i figur 7.17 (grön kurva).



Figur 7.17. Reflektion som funktion av frekvens för en Salisbury-screen med ett 5.1 mm tjockt glas som distansmaterial. (mätdata grön kurva, beräknad blå kurva och bakgrund röd kurva)

En beräkning på strukturen i figur 7.16 gjordes, med ett förlustskikt ($R_{yt}=330 \Omega/\square$ och $C_{yt}=0.46$ pF), ett distansmaterial ($\epsilon_r=7.5$, $d=5.1$ mm). Resultatet visas i figur 7.15 (blå kurva) och överensstämmelsen med mätdata är mycket god även i detta fall.

Ur dessa resultat kan man dra slutsatsen att ett rent PEDOT:PSS-baserat förlustskikt kan karakteriseras som en ytimpedans med kapacitiv karaktär. Som tidigare sagts har andra studier också visat [2] att förlustskikt baserade på ledande polymerer kan karakteriseras på detta sätt. Den studien förklarade att det berodde på interaktion mellan fibrerna i den textilduk som användes som bärmaterial av polymeren. Detta gäller inte för det PEDOT:PSS-skikt som har använts i denna studie, vilket manar till fördjupade studier.

7.5 Mätnoggrannhet

Avsikten med mätningarna var att peka på vissa egenskaper hos ett förlustskikt med PEDOT:PSS, inte att noggrant bestämma reflektionsegenskaperna. Därför följer här bara en kort analys av mätosäkerheten.

De mätningar som har redovisats i detta kapitel har gjorts med den i avsnitt 4.1 visade mätutrustningen. Mätmetoden bygger på relativmätningar, d.v.s. utrustningen kalibreras vid varje mätning mot en perfekt ledande platta och reflektionsmätningarna mot mätobjekten jämförs sedan mot kalibreringsdata. Detta innebär att inga absolutmätningar sker.

Noggrannheten i mätningarna bestäms därmed huvudsakligen av:

- reproducerbarhet
- signalskillnad mellan mätobjektets reflektion och bakgrunden (störsignaler)
- multipelreflektioner mellan de två antennerna, p.g.a. ej perfekt anpassning.

Reproducerbarheten hos systemet är typiskt ± 0.2 dB. (Se även figur 7.9)

Bakgrundsstörningar ger ett fel i uppmätt reflektion på ca ± 1 dB om signalskillnaden är 20 dB, ca ± 0.5 dB om skillnaden är 30 dB och ca ± 0.1 dB om signalskillnaden är 40 dB.

Multipelreflektioner ger typiskt ett rippel på ca ± 0.5 dB.

För en typisk reflektionsmätning blir då det totala felet ca ± 1 dB.

8. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Studien har visat att det finns en stor potential att utveckla radarabsorberande strukturer med styrbara eller designbara egenskaper. Dock råder det en stor internationell sekretess inom området. Den ledande polymer, PEDOT:PSS, som huvudsakligen har studerats i studien har visat intressanta egenskaper. PEDOT:PSS kan användas som förlustskikt i radarabsorberande strukturer, men den kan inte karakteriseras som ett rent resistivt skikt. Studien har visat att PEDOT:PSS även består av en reaktiv komponent som påverkar faseegenskaperna hos skiktet. För att påverka de elektromagnetiska egenskaperna hos ett homogent PEDOT:PSS-skikt krävs troligen någon typ av elektrolyt. För att vidareutveckla kunskapen inom området styrbara skikt och material för radarabsorberande strukturer och deras integration i multispektrala signaturmaterial kan några punkter urskiljas:

- Karakterisering av elektrolytskikt inom mikrovågsområdet
- Studier av hur PEDOT:PSS ytresistans kan kontrolleras genom dopning
- Utveckling och karakterisering av förlustskikt bestående av elektrolyt/PEDOT:PSS
- Inventering/utveckling av programvara för kretsanaloga förlustskikt
- Karakterisering av VIS/IR material inom mikrovågsområdet (ex. flytande kristaller)
- Utveckling av ett PIN-diod baserat fasskiftande förlustskikt
- Studier av möjligheter att styra/designa dielektriska material med önskad frekvensberoende permittivitet
- Studier av styrbara material för radomtillämpningar

9. REFERENSER

- [1] H. Kariis et al, "Styrbara signaturmaterial - möjligheter och forskningsbehov", FOI Rapport, FOI-R--1412--SE, November 2004.
- [2] B. Chambers, "Frequency Tuning Characteristics of Capacitively Loaded Salisbury-screen Radar Absorber", Electronics Letters, Vol. 30 No. 19, 15th September 1994.
- [3] W. H. Emerson, "Electromagnetic Wave Absorbers and Anechoic Chambers Through the Years", IEEE Trans. on AP, Vol 21, No 4, July 1973.
- [4] W. W. Salisbury, "Absorbent Body for Electromagnetic Waves", US Patent No 2 599 944, June 10, 1952.
- [5] L. J. du Tiot, "The Design of Jauman Absorbers", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol 36, No 6, December 1994.
- [6] Å. Bergquist, "Mikrovågsabsorberande skikt", FOA Rapport AH-459, April 1958.
- [7] T.C.P Wong et al, "Large area Conducting Polymer Composites and use in Microwave Absorbing material", Electronics Letters, Vol. 28 No. 17, 13th August 1992.
- [8] B. Chambers, "Internal Monitoring of the Frequency Response of a Dynamically Adaptive Radar Absorbing Material", Electronics Letters, Vol. 30 No. 22, 27th October 1994.
- [9] T.C.P Wong, "Impedance Characteristics of Conducting Polymer Composites for use in Radar Absorbing Materials", Proc. of 3rd ICEAA in Torino, September 14-17, 1993.
- [10] B. Chambers et al, "Characterisation and Modelling of Conducting Polymer Composites and Their Exploitation in Microwave Absorbing Materials", Proc. 15th AMTA Symp. Dallas TX, October 1993.
- [11] G. T. Ruck, et al, "Radar Cross Section Handbook", Vol 2, Plenum Press, New York, 1970.
- [12] O. Lilleaeter, L Karlsson, J-O Ousbäck et al, "Interlaboratory Harmonization of Measuring Techniques for Multispectral Signature Materials", FOA Rapport, FOA-R--95-00120-2.4,3.1--SE, 1995.
- [13] Å. Berquist, "Resistiva skikt. Teori och mätmetoder", FOA Rapport C 30513-3.2, November 1988.
- [14] C. Nilsson et al, "Reflektansstyrning med hjälp av dopning av konjugerade polymerer", FOI Rapport, FOI-R--1196--SE, Mars 2004.
- [15] B. Munk, "Frequency Selective Surfaces, Theory and Design", John Wiley & Sons, Inc, ISBN 0-471-37047-9, 2000.
- [16] B. Chambers, A. Tennant, "A Smart Radar Absorber Based on the Phase-Switched Screen", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53 No. 1, January 2005.