

Etude d'un écran photothermique de grandes dimensions adapté à la caractérisation par thermographie IR de champs électromagnétiques ultra brefs.

Daniel BALAGEAS*, Patrick LEVESQUE

ONERA, Département des Matériaux et Structures Composites
BP 72 - 92322 Châtillon cedex

* (auteur correspondant : daniel.balageas@onera.fr)

Résumé – La caractérisation de champs micro-onde intenses, ultra brefs et de grandes dimensions, dans des conditions de terrain, par des écrans photothermiques collés sur supports diélectriques basse densité, nécessite une modélisation compte tenu de la complexité de la réponse impulsionnelle de tels récepteurs. Un modèle a été développé et des simulations ont permis de définir et d'appliquer une procédure d'identification de la distribution de fluence reçue adaptée à l'imagerie IR. Une validation expérimentale à l'aide d'une source MFP impulsionnelle a été menée au Centre d'Etudes de Gramat (DGA).

1. Introduction

Parmi les nombreuses applications de la thermographie photothermique, la caractérisation de flux d'énergie photonique constitue une application innovante dans le domaine de l'électromagnétisme, permettant la visualisation instantanée et quantitative de champs de longueurs d'ondes fort éloignées de l'infrarouge. Dans ce cas la structure illuminée joue le rôle de capteur et de transformateur de longueur d'onde. C'est généralement un film mince, conducteur électrique, tendu sur un cadre (film auto porté) [1-2]. On souhaite étendre ce type de mesure à des champs micro-onde intenses, ultra brefs (quelques nanosecondes) et de grandes dimensions, et cela dans des conditions de terrain. Les films autoportés manquent alors de rigidité et de tenue mécanique. On s'est donc tourné vers des films collés sur un support de mousse rigide de basse densité. Cette solution pose néanmoins des problèmes d'interprétation compte tenu de la brièveté des phénomènes étudiés et de la structure complexe du récepteur. On étudiera ici le fonctionnement de tels récepteurs afin d'établir une méthode d'identification de la densité d'énergie micro-onde incidente. Pour ce faire, on établira un modèle numérique représentatif du récepteur. Les simulations numériques réalisées avec ce modèle et l'analyse de séquences thermographiques permettront de choisir la méthode d'identification optimale.

2. Films photothermiques

2.1. Film autoporté et film collé sur support mousse

En laboratoire le film peut être fixé sur un cadre rigide. Dans ce cas, le film, dans sa partie centrale, peut être considéré comme isolé de ce support. Des deux côtés du film, des pertes thermiques de nature radiative et convective existent. Si l'échauffement du film reste modéré ces pertes peuvent être considérées comme linéairement proportionnelles à l'échauffement et caractérisables par un coefficient de transfert mixte radiato-convectif, h .

Lorsque les dimensions du champ électromagnétique à caractériser sont grandes, la rigidité du film pose question, malgré l'existence du cadre, spécialement lorsque la mesure a lieu à l'extérieur. Une solution souvent utilisée aux Etats-Unis consiste à coller le film sur une plaque de mousse à basse densité, diélectrique. L'absorption du champ micro-onde dans la

mousse est considérée comme négligeable. Les pertes thermiques vers l'extérieur par radiation et convection sont alors divisées par deux. Cependant, dans ce cas, les inconvénients suivants existent : i) des pertes thermiques par conduction dans le support mousse se développent, difficilement estimables ; ii) l'uniformité du collage peut être problématique. Si celui-ci est localement imparfait (existence d'une résistance thermique de contact ou variation d'épaisseur du joint de colle) le coefficient de sensibilité du convertisseur photothermique reliant l'échauffement du film à l'intensité locale du champ électromagnétique peut varier.

2.2. Description du convertisseur photothermique réalisé

La fabrication d'un film sur un support de mousse nécessite de le coller. L'ONERA a optimisé un tel système, permettant l'élaboration de panneaux de plusieurs m^2 . Il est constitué : i) d'un film de Kapton® (polyimide) chargé de particules de carbone, de conductivité électrique carrée $375 \Omega/\square$, d'épaisseur $38 \mu m$, absorbant le champ électrique en volume (compte tenu du niveau modéré d'absorption totale du film, 40%, on considèrera l'absorption uniforme dans l'épaisseur) ; ii) d'une mousse de densité 0,034 et d'épaisseur 40 mm, réalisée par extrusion de polystyrène ; iii) d'un joint adhésif. L'examen du joint de colle montre une épaisseur variable, due à l'état de surface de la mousse, d'environ $20 \mu m$ (Fig. 1). A l'échelle d'un pixel de l'image thermique le joint de colle peut être considéré comme d'épaisseur uniforme. La résistance thermique équivalente au joint peut alors être estimée à $R_{f/m} = (L/k)_{joint} = 8.10^{-5} W^{-1}m^2K$, L et k étant respectivement l'épaisseur et la conductivité d'une couche, ici le joint. Cependant la présence de ce joint a un second effet sur la diffusion de la chaleur, effet lié à sa capacité calorifique, $(CL)_j$. Dans le cas présent, $(CL)_{joint}/(CL)_{film} = 0.5$, ce qui justifie de considérer ce joint comme une troisième couche de matériau intercalée entre le film et la mousse.

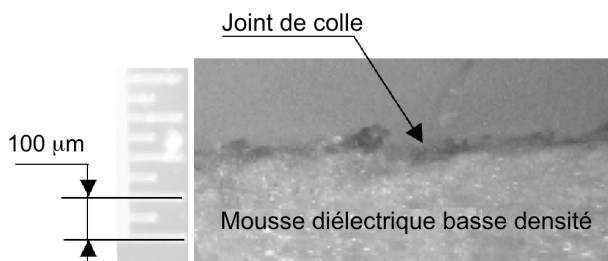


Figure 1 : Image du joint de colle adhérant au support de mousse diélectrique basse densité.

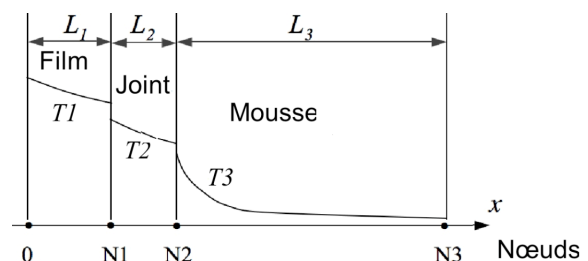


Figure 2 : Modèle tri-couche.

3. Modélisation du récepteur photothermique

Il s'agit donc de modéliser en 1-D un système tri-couche avec absorption en volume dans le film, résistances thermiques aux deux interfaces et pertes thermiques aux extrémités. On a choisi une méthode numérique très simple, programmée sur feuille de calcul Excel, donc éminemment portable : la méthode aux différences finies explicite (méthode d'Euler). Son inconvénient est son instabilité qui nécessite d'utiliser des pas de temps faibles, d'où de très grand nombres de pas de calcul. Cependant, les performances actuelles du tableur Excel permettent de réaliser très rapidement des calculs de volume important. On a ainsi effectué des calculs sur 50 tranches (pas d'espace) et 32 000 pas de temps en quelques secondes. Les conditions aux limites, surfaces externes et interfaces, ont été écrites à l'aide de la technique de la tranche fictive. Le dépôt d'énergie est considéré comme un dirac parfait et pris en compte au niveau des conditions initiales (échauffement isotherme adiabatique du film). On ne donnera pas ici les équations discrétisées, la méthode étant classique. Le système modélisé est présenté à la Fig. 2 et les paramètres géométriques et thermiques des constituants sont donnés au Tabl. 1.

Paramètres	Environnement	Film photo-therm.	Interface	joint de colle	Interface	Mousse	Environnement
Coeff. de transfert h ($Wm^{-2}K^{-1}$)	0 - 10						0 - 10
Epaisseur, L (μm)		38		0.19- 38		1500	
Conductivité therm. k ($Wm^{-1}K^{-1}$)		0,12		0,25		0,035	
Chaleur volumique $C = \rho C_p$ ($MJ m^{-3}K^{-1}$)		1,54		1,2		0,048	
Résistance therm. R ($W^{-1}m^2K$)			0 - 0.005		0 - 0,005		
Nb de pas d'espace dans la couche		5		5		40	

Tableau 1 : Paramètres thermophysiques et géométriques utilisés par le modèle numérique tri-couche simulant le convertisseur photothermiques développé par l'ONERA.

4. Réponse impulsionnelle du récepteur photothermique

On a supposé l'épaisseur du joint de colle variant entre 0 et 38 μm , avec une valeur nominale de 19 μm correspondant à ce que montre la coupe vue au microscope (Fig. 1). La Fig. 3 présente les thermogrammes obtenus par le modèle tri-couche pour ces trois épaisseurs de joint, des pertes caractérisées par $h = 10 W.m^{-2}.K^{-1}$ et des résistances d'interfaces égales à $5.10^{-4} W^{-1}.m^2.K$. Les thermogrammes du film autoporté sont donnés à titre de comparaison. On note que :

- Il existe en log-log une asymptote horizontale à l'origine. La valeur asymptotique est l'échauffement adiabatique du film photothermique, directement relié à la fluence qu'il s'agit d'identifier via un coefficient d'absorption du film, supposé connu.

- Pour une bonne évaluation de l'asymptote à l'origine il faut utiliser un système thermographique à haute fréquence image, sinon la précision sur la fluence risque d'être très mauvaise.

- Pour le film collé sur une support en mousse, les pertes dans le support s'ajoutent aux pertes vers le milieu environnant, faisant s'écarter plus précocement le thermogramme de l'asymptote. Ce film du point de vue métrologique est moins intéressant que le film autoporté.

- Le joint de colle a une influence très importante. Plus il est épais, plus le départ de l'asymptote est précoce et important. Ainsi, pour 19 μm d'épaisseur, au bout de 100 ms, l'échauffement est réduit de 40% par rapport à l'échauffement adiabatique à identifier.

- Les thermogramme une forme complexe, avec deux changements de courbure, ce qui ne facilite pas l'extrapolation vers l'origine lorsque l'on a une fréquence d'acquisition faible.

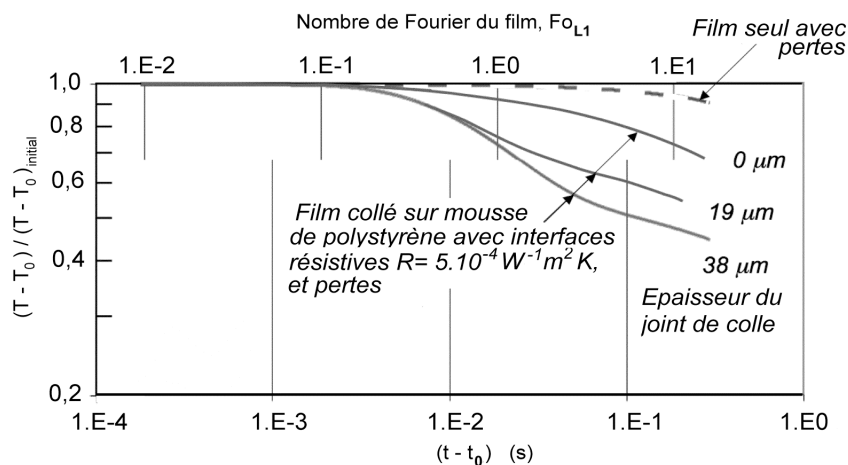


Figure 3 : Influence de l'épaisseur du joint de colle sur le thermogramme. Interfaces résistives ($R = 0,0005 W^{-1}m^2K$ pour chaque interface) et pertes de chaleur vers l'extérieur ($h = 10 Wm^{-2}K^{-1}$).

5. Identification de la fluence

L'identification de la fluence (par estimation de l'échauffement adiabatique initial) nécessite de connaître le moment de l'impulsion et d'extrapoler le thermogramme numérisé à cette origine. La faible durée du plateau initial rend l'influence de l'incertitude sur le temps de l'impulsion prépondérante. La solution optimale est de supposer que l'impulsion se produit une demi période image avant la première image révélant un échauffement. L'incertitude est alors bornée par cette demi période image. Deux méthodes simples d'identification sont proposées : i) Assimiler la première valeur de la réponse impulsionnelle digitalisée, ΔT^d , à la valeur adiabatique, ΔT_{adia} : $\Delta T^d = T^d - T^0 = \Delta T_{adia}$, T^d et T^0 étant respectivement les températures dans l'image suivant l'impulsion et dans celle la précédant ; ii) Extrapoler linéairement, à partir des deux premières valeurs digitalisées, au temps de l'impulsion supposé situé à 0,5 ms avant la première digitalisation : $\Delta T_{adia} = 1.5 \Delta T^d - 0.5 \Delta T^2$. Les deux méthodes donnent des résultats de précision analogue (comparaison non présentée ici faute de place). A l'aide du modèle on a également étudié, dans le cas de la seconde méthode, l'influence du joint de colle et des résistances thermiques d'interface, simulant ainsi la variabilité possible du collage (Fig. 4), et cela pour diverses fréquences images (Tabl. 2).

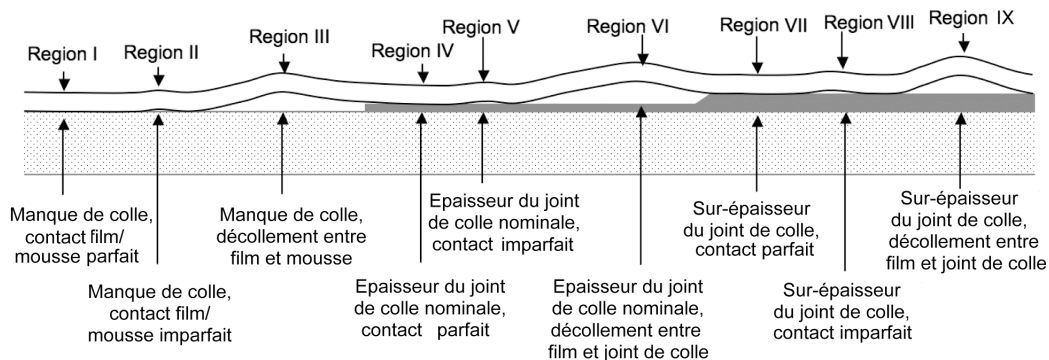


Figure 4 : Les différentes conditions de collage susceptibles d'être rencontrées dans le système de film sur support mousse élaboré par l'ONERA.

Epaisseur de colle (microns)	Résistance globale des interfaces ($W^{-1}m^2K$)	Coefficient de transfert de chaleur ($Wm^{-2}K^{-1}$)	Fréquence image (Hz)	125	250	500	Configuration du système convertisseur photothermique
				Erreurs limites (%)			
0	0	0	Maximum	2.4%	1.1%	0.3%	Region I
			Minimum	-3.3%	-0.9%	0.2%	
	0.001	10	Maximum	1.8%	0.7%	0.2%	Region II
			Minimum	-2.0%	-0.3%	0.2%	
	infinie	10	Maximum	0.2%	0.1%	0.1%	Region III
			Minimum	-0.2%	-0.2%	-0.1%	
19	0	0	Maximum	10%	4.8%	1.2%	Region IV
			Minimum	-17%	-3.7%	1.2%	
	0.001	10	Maximum	5.5%	1.9%	0.8%	Region V
			Minimum	-6.0%	-0.1%	0.4%	
	infinie	10	Maximum	0.2%	0.1%	0.1%	Region VI
			Minimum	-0.2%	-0.2%	-0.1%	
38	0	0	Maximum	12%	5.0%	1.8%	Region VII
			Minimum	-17%	-2.7%	-1.1%	
	0.001	10	Maximum	5.8%	1.9%	0.8%	Region VIII
			Minimum	-5.4%	0.1%	0.4%	
	infinie	10	Maximum	0.2%	0.1%	0.1%	Region IX
			Minimum	-0.2%	-0.2%	-0.1%	
Plage d'erreur pour l'ensemble des configurations				-17% to 12%	-3.7% to 4.8%	-0.1% to 1.8%	

Tableau 2 : Incertitudes sur les fluences identifiées par extrapolation à partir des deux premières images suivant l'impulsion. Influence de la fréquence image et des conditions locales de collage.

Les conditions locales envisagées peuvent exister simultanément sur le même panneau, d'où une erreur sur la fluence identifiée en supposant un contact uniforme et nominal (région IV). La plage d'erreur intégrant l'ensemble de ces conditions locales (chiffres donnés au bas du Tabl. 2) montre qu'à fréquence image élevée les deux méthodes sont satisfaisantes si l'erreur due à l'incertitude sur le temps origine est prépondérante sur celle due au bruit de mesure. Dans le cas contraire, la solution pourrait consister à effectuer l'extrapolation à partir d'une régression polynomiale aux moindres carrés du début du thermogramme dans l'espace $[\text{Log}(t), \text{Log}(\Delta T)]$.

6. Résultats expérimentaux

Des essais avec une source micro-onde impulsionnelle ont été réalisés au Centre d'Etudes de Gramat (DGA). L'impulsion micro-onde avait une durée de 15 ns. Les mesures ont été effectuées avec une caméra CEDIP Jade LWIR à la fréquence image de 1 kHz (fenêtrage de 80×60 pixels). La Fig. 5 montre des images IR typiques. Le rapport signal/bruit est faible et l'échauffement du film à support mousse 10 ms après l'impulsion est le plus faible, conformément à la théorie.

La Fig. 6 présente une comparaison théorie-expérience. Le thermogramme du film seul est conforme à la théorie, avec un légère différence peut-être due à des pertes plus importantes ou à une diffusivité plus grande du film, hypothèse plus réaliste compte tenu du manque d'information sur la conductivité du film chargé de particules de carbone. Elle expliquerait également en partie les différences entre théorie et expérience pour le film collé sur mousse. Néanmoins, le calcul conduit à une forme de courbe analogue à l'expérience. Il serait difficile et illusoire de vouloir retrouver par calcul des thermogrammes théoriques collant à l'expérience compte tenu du grand nombre de paramètres (une douzaine) influant sur le comportement thermique du système. La Fig. 7 présente le début des thermogrammes de pixels situés au centre de la tache avec un lissage par régression polynomiale au moindres carrés. Ce lissage permet d'extrapoler au temps origine supposé et d'estimer ainsi le niveau adiabatique initial (3^e méthode d'identification). La comparaison des trois méthodes d'identification et l'influence de la fréquence image sont étudiées à partir du thermogramme du film sur support mousse de la Fig. 7. Pour simuler une acquisition à une fréquence plus basse que celle réellement utilisée (1 kHz), on ne garde qu'un point sur quatre (250 Hz) ou sur huit (125 Hz). On a ainsi 4 thermogrammes possibles pour 250 Hz et 8 pour 125 Hz, puisqu'il n'y a pas de synchronisation entre impulsion et prise d'image.

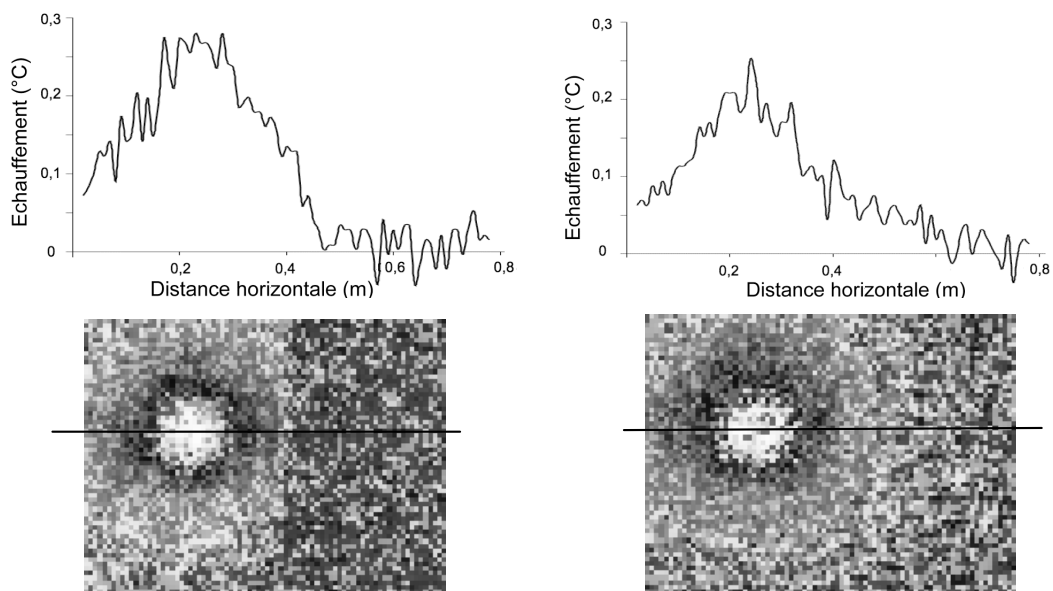


Figure 5 : A gauche: film autoporté, à droite, film collé sur polystyrène. En haut : profils de température horizontaux passant par le centre de la tache ; en bas, échauffement 10 ms après l'impulsion.

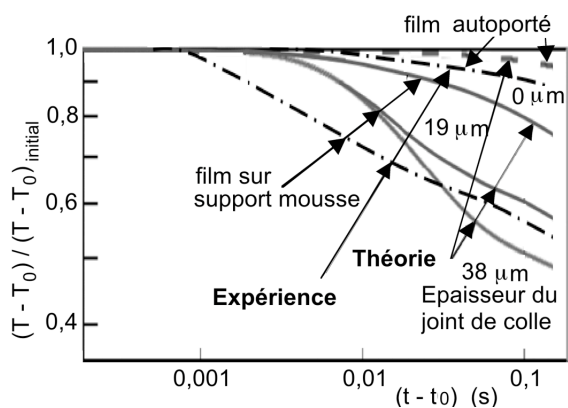


Figure 6 : Comparaison expérience/théorie pour le film seul (autoporté) et le film collé sur polystyrène (avec pour ce dernier plusieurs épaisseurs de colle).

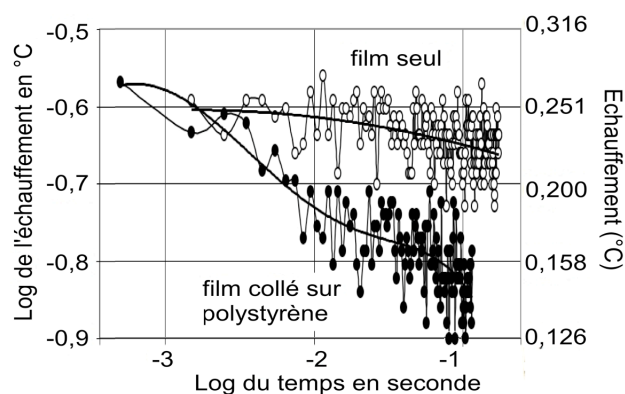


Figure 7 : Début des thermogrammes après l'impulsion - réduction polynomiale aux moindres carrés pour évaluation de l'échauffement initial.

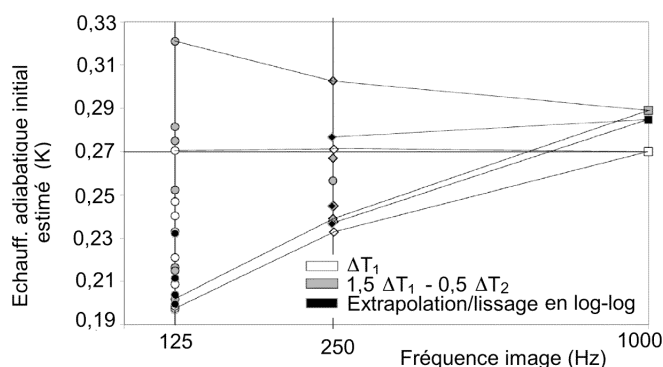


Figure 8 : Evaluation de l'échauffement adiabatique initial d'un film collé sur support mousse par les trois méthodes d'identification proposées. Influence de la fréquence image.

La Fig. 8 montre que seule la fréquence de 1 kHz conduit à une faible dispersion entre méthodes d'identification. La méthode la plus simple (assimiler le première image d'échauffement à l'échauffement adiabatique) est recommandée car ne nécessitant pas de traitement inter-image.

7. Conclusion

Dans les conditions expérimentales réalisées, il est nécessaire d'utiliser une fréquence image élevée, quitte à fenêtrer, donc à limiter le champ ou la résolution spatiale. La méthode d'identification de la fluence la plus simple ne nécessitant pas de traitement inter-images et considérant le premier échauffement relevé comme adiabatique est recommandée.

Remerciements

Cette étude a été financée par le Centre d'Etudes de Gramat (DGA ; marché N° 05 25 049 00 470 46 51)

Références

- [1] D. Balageas, P. Levesque, "EMIR: a photothermal tool for electromagnetic phenomena characterization", *Revue Générale de Thermique*, 37 (1998), 725-739.
- [2] P. Levesque, D. Balageas, P. Brémond, J.L. Lasserre, A. Paupert, Performance of FPA IR cameras and of their improvement by time, space and frequency data processing - Part II: Application to the thermographic measurement of microwave fields, *QIRT Journal*, 2-2 (2005), 237-250.