LETTRE : COMPARAISON ENTRE LES NOTIONS RADIOMETRIQUES UTILISEES EN OPTIQUE ET RADAR

Jean-Paul Rudant[1], Pierre-Louis Frison[1]
[1] Université Paris-Est, LaSTIG UPEM /IGN,
5, boulevard Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée
jean-paul.rudant@u-pem.fr

En liaison avec l'article des mêmes auteurs dans le même numéro : Télédétection Radar, de l'image d'intensité initiale au choix du mode de calibration des coefficients de diffusion $\beta^0, \sigma^0, \gamma^0$.

Cette note tente de répondre à de fréquentes questions touchant à la **comparaison optique et radar**, par exemple **: quelles sont les relations formelles existant entre coefficients de diffusion radar et facteurs de réflectance en optique ? Comment les images reflètent elles les coefficients optiques ou radar destinés à caractériser la surface ?**

Elle reprend les notations et relations établies dans l'article cité en titre (référencé ci-après SFPT_RF19) et s'appuie principalement sur la relation (11) de celui-ci :

$P = \Phi_r \,.\, S_p \,.\, cos(i_p) \,.\, R_{he}(\overrightarrow{u_i}) \,.\, G(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r}) \,.\, \Delta\Omega_{par}$ (1)

Elle nous servira de base pour comparer les facteurs de diffusion radar pour un flux incident Φ_r et les facteurs de réflectance optique pour un flux incident solaire Φ_s

Rappelons simplement que pour une longueur d'onde et une polarisation données, $R_{he}(\overrightarrow{u_i})$ dépend principalement des propriétés diélectriques du milieu alors que $G(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})$ dépend plutôt des propriétés géométriques de la surface à l'échelle de la longueur d'onde.

Comparer les paramètres optiques et radar demande de se limiter, en optique, à un éclairement direct et à une transparence totale de l'atmosphère. Pour alléger les notations nous n'introduirons pas l'indice λ pour signifier le caractère spectral des quantités considérées.

Vocabulaire général commun :

Albedo : La notion d'albédo, rapport du flux réfléchi sur le flux incident multidirectionnel n'a pas d'équivalent en imagerie radar car le flux est alors direct.

La notion d'éclairement est commune, même si ce terme n'est pas utilisé pour les micro-ondes, l'indice $._s$ pour le flux solaire remplaçant l'indice $._r$ pour le flux radar.

Pour un flux incident d'incidence i_p,

$$E = \Phi_r \,.\, cos(i_p) = \Phi_s \,.\, cos(i_p) \qquad (2)$$

Flux total réfléchi dans l'hémisphère supérieur par unité de surface ; c'est une notion commune.

Flux radar réfléchi par unité de surface dans le ½ espace supérieur :

$$\Phi_r \,.\, cos(i_p) \,.\, R_{he} = E \,.\, R_{he}(\overrightarrow{u_i})$$

En optique, cette quantité est nommée Emittance M,

$$M = \Phi_s \,.\, cos(i_p) \,.\, R_{he} = E \,.\, R_{he}(\overrightarrow{u_i})$$

Le terme *Emittance* correspond initialement à une surface émettrice (par exemple dans le domaine thermique). Dans notre cas, la surface qui réfléchit le flux incident constitue une source secondaire dans le domaine optique.

Cas de l'optique : Luminance et réflectance

La luminance $L(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})$, associée à la puissance P en provenance d'une surface S_p dans l'angle solide $\Delta\Omega_{par}$ autour de la direction définie par $\widehat{\vec{n}, \overrightarrow{u_r}}$ (cf. Fig. 2 SFPT_RF19), est définie par la relation suivante :

$$P = L(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r}) \,.\, S_p \,.\, cos(r) \,.\, \Delta\Omega_{par} \qquad (3)$$

Ce qui, d'après (1), donne :

$$L(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r}) = \Phi_s \,.\, cos(i_p) \,.\, R_{he}(\overrightarrow{u_i}) \,.\, G(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})/\cos(r) \qquad (4)$$

L présente donc un caractère bidirectionnel (car il s'agit d'une réflexion et non d'une émission).

Comment est définie la réflectance bidirectionnelle ?
Plusieurs facteurs sont concurrents :

La BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) $BRDF = L(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})/E(\overrightarrow{u_i})$ (en sr^{-1})

$E(\overrightarrow{u_i})$ désignant l'éclairement de la surface en provenance de la direction $\overrightarrow{u_i}$ (Rees, 2001).

Selon (2) et (4) : $BRDF = R_{he}(\overrightarrow{u_i}) \,.\, G(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})/\cos(r)$ (5)

Le facteur de réflectance, FR, rapport entre $L(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})$ et la luminance lambertienne d'un réflecteur parfait ($R_{he}=1$) correspondant au même éclairement E :

$$FR = L(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})/L_{lambert}$$

Pour une surface lambertienne $M = \pi \,.\, L_{lambert}$

Si cette surface réfléchit la totalité de l'éclairement reçu, nous avons $M = E = \pi L_{lambert}$ et donc,

$FR = L(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})/(E/\pi) = \pi \,.\, L(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})/E$

D'où $FR = \pi \,.\, BRDF = \pi \,.\, R_{he}(\overrightarrow{u_i}) \,.\, G(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})/\cos(r)$(6)

Cas du radar, les coefficients de rétrodiffusion σ^0, γ^0 (cf RFTP_RF19)

$\Sigma = 4\pi \,.\, S_p \,.\, cos(i_p) \,.\, R_{he}(\overrightarrow{u_i}) \,.\, G(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})$

$\sigma^0 = \Sigma \,/\, S_p = 4\pi \,.\, cos(i_p) \,.\, R_{he}(\overrightarrow{u_i}) . G(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})$ (7)

$\gamma^0 = \Sigma / S_{ap} = 4\pi \,.\, cos(i_p) \,.\, R_{he}(\overrightarrow{u_i}) \,.\, G(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})/\cos(r)$ (8)

$\sigma^0(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})$ et $\gamma^0(\overrightarrow{u_i}, \overrightarrow{u_r})$ présentent comme en optique des caractères bidirectionnels.

Mode bi-statique : relations entre coefficients optique et radar

Formellement, nous obtenons les relations suivantes entre coefficients de réflectance et coefficients de diffusion :

$\sigma^0 = 4\pi \, . BRDF \, . cos(i_p) . \cos(r) = 4 \, FR \, . cos(i_p) \, cos(i_r)$(9)

$\gamma^0 = 4\pi \, . BRDF \, . cos(i_p) = 4 \, FR \, . cos(i_p)$ (10)

Le facteur γ^0 est proche du facteur *BRDF*, car ces deux coefficients sont relatifs à la surface apparente du pixel vue du capteur. Le facteur 4π. ***cos(i**p**)*** lie γ^0 et la *BRDF*. La présence de ce facteur tient au mode d'introduction des facteurs en optique et en radar. Le rapport qui définit la *BRDF = L / E* comporte l'éclairement au dénominateur (*E =* Φ_r **cos(i**p**)*) alors que la normalisation effectuée pour γ^0 s'appuie sur le rapport *(*$\Phi_r / 4\pi$*)*, Σ rayonnant de manière isotrope dans l'espace entier.

Dit autrement, si nous avions défini une $BRDF\_bis = L(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r})/(\Phi_s/4\pi)$, nous aurions obtenu la relation *BRDF_bis =* γ^0 .

A des facteurs de normalisation près, il s'agit bien, pour la *BRDF* et γ^0 de facteurs représentant la même propriété bidirectionnelle, relativement à la surface apparente du pixel vue depuis le capteur.

Qu'obtient-on de nouveau en supposant la surface lambertienne en optique ?

Dans ce cas, l'écriture se simplifie. Une surface lambertienne suppose que $L(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r})$ ne dépend pas de la direction $\overrightarrow{u_r}$. Le flux émis dans un angle solide ne dépend que de la surface apparente de la surface du pixel (cf rel.3).

Quelle que soit la direction $\overrightarrow{u_\iota}$, le terme $L(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r})$ ne doit pas dépendre de l'angle de réflexion *r*, ce qui signifie que le terme $G(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r})/\cos(r) = k$, constante indépendante de *r*. $G(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r}) = k \, . \cos(r)$ devant en plus vérifier

$$\int_{1/2 \text{ espace supérieur}} G(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r}) \; d\omega(\overrightarrow{u_r}) = 1$$

d'où $k=1/\pi$, càd $G(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r}) = G(\overrightarrow{u_r}) = \cos(r)/\pi$ (11)

l'on déduit de (4) :

$$L_{Lambert}(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r}) = L(\overrightarrow{u_\iota}) = \Phi_r \, . cos(i_p) . R_{he}(\overrightarrow{u_\iota})/\pi = E . Rhe(\overrightarrow{u_\iota}) \;\; /\pi \quad (12)$$

Notons que $L_{Lambert}$ $(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r})$ ne dépend alors plus de $\overrightarrow{u_r}$ mais de $(\overrightarrow{u_\iota})$ par les facteurs *cos(i**p**)* et $R_{he}(\overrightarrow{u_\iota})$

Selon (5), $BRDF \; (\overrightarrow{u_\iota}) = L_{lambert}/E = R_{he}(\overrightarrow{u_\iota})/\pi$ (13)

et $FR \; (\overrightarrow{u_\iota}) = \pi \, L_{lambert}/ \, E = R_{he}(\overrightarrow{u_\iota})$ (14)

Il s'agit de la réflectance hémisphérique appelée couramment « réflectance » ou réflectivité, sans autre précision, que l'on trouve habituellement pour présenter la notion de signature spectrale.

Notons également que l'indicatrice lambertienne de réflexion $G(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r})$ ne dépend plus de $\overrightarrow{u_\iota}$.

$G(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r}) = G(\overrightarrow{u_r}) = \cos(r)/\pi$ correspond à une sphère de rayon 1/2π posée au sol et non à une demi-sphère de même rayon plaquée au sol (ce cas correspond au cas de l'isotropie avec *G* $(\overrightarrow{u_r})$ = cste = 1/2π).

Mode mono-statique : qu'obtient-on de nouveau ?

Comme pour le radar, le capteur optique est alors supposé dans la direction de la source, $\overrightarrow{u_r} = -\overrightarrow{u_\iota}$ (configuration dite de « hot spot »). Tous les termes à caractère bidirectionnel ne dépendent plus que de $\overrightarrow{u_\iota}$

Dans ce cas*,* $i_p = r$ et *cos(i**p**)= cos(r)*

La relation (10) est inchangée, mais la relation (9) devient :

$\sigma^0 (\overrightarrow{u_\iota}) = 4 \, \pi \, BRDF(\overrightarrow{u_\iota}) \, cos^2(i_p) = 4 \, FR(\overrightarrow{u_\iota}) \, cos^2(i_p)$ (15)

Par ailleurs, avec $i_p = r$, la relation (8) devient :

$\gamma^0 \; (\overrightarrow{u_\iota}) = \; 4\pi \, . R_{he} \, . G(\overrightarrow{u_\iota}, -\overrightarrow{u_\iota}) = 4 \, \pi \, BRDF(\overrightarrow{u_\iota}) \, cos(i_p)$ (16)

Si l'on suppose en plus une diffusion isotrope identique au modèle qui a servi à la normalisation (pour le radar, une isotropie totale dans tout l'espace pour Σ), alors :

$G(\overrightarrow{u_\iota}, \overrightarrow{u_r}) = G(\overrightarrow{u_\iota}, -\overrightarrow{u_\iota}) = 1/(4\,\pi)$ et _$\gamma^0 \; (\overrightarrow{u_\iota}) = R_{he}(\overrightarrow{u_\iota})$

On retrouve un résultat voisin de celui d'une surface lambertienne en optique où le facteur de réflectance *FR* égalait le facteur de réflectivité hémisphérique R_{he} (cf. 14)

Dans le cas plus réaliste en radar d'une réflexion isotrope seulement dans le demi espace supérieur, alors *G=1/ 2*π et $\gamma^0(\overrightarrow{u_\iota}) = 2 \, . \, R_{he}(\overrightarrow{u_\iota})$

Globalement, que ce soit en optique ou radar, on retrouve pour le facteur de réflectance en optique ou le coefficient γ^0 en radar, la valeur de la réflectivité hémisphérique R_{he} pour les comportements qui correspondent aux modèles servant de base aux normalisations, modèle Lambertien pour un éclairement *E (=* Φ_s *.cos(i**p**))* en optique ou isotopie totale sur le flux capté *(*$\Sigma \, . \, \Phi_r$*)* en radar.

Pour conclure, discutons d'une question pratique « utilisateur » : comment l'image de puissance *P* traduit-elle les coefficients optiques ou radar dans les conditions habituelles d'utilisation ; radar mono-statique et optique bi-statique ?

Pour le radar mono-statique reprenons la relation $P = k \, . \sigma^0 . S_p$, (eq.8 RFPT_RF19) où, en ce qui concerne la configuration géométrique, σ^0 dépend de $\overrightarrow{u_\iota}$, où S_p dépend de $\overrightarrow{u_\iota}$ et de la pente p, et où *k* varie légèrement dans l'image (ou s'avère constant si des corrections de distance antenne cible et de formes de diagrammes d'antennes ont été effectuées préalablement). Supposant *k* constant, l'image d'intensité sera alors celle du produit ($\sigma^0 . \, S_p$) où S_p est très sensible à la pente *(*$S_p = S_{rad} / sin(i_p)$*)*.

Pour une surface horizontale, l'image de σ^0 coïncidera globalement avec celle de *P***,** au facteur S_p près qui diminuera entre le nadir et l'autre extrémité de la fauchée en suivant l'augmentation de l'incidence i_0.

Dans le cas d'un terrain homogène, la réponse *P* sera plus élevée au nadir qu'en extrémité de trace, les deux facteurs σ^0 et S_p, étant plus élevés pour une incidence plus faible.

En présence de relief, *P* exprimera les effets de pente par le facteur *(*$\sigma^0(i_p) \; / \; sin(i_p)$*)* et ces effets pourront être dominants, le contraste avec un sol plat étant mesuré par le facteur $(\sigma^0(i_p) / \sigma^0(i_0)) * (\sin(i_0) / \sin(i_p))$. (17)

En optique bi-statique, surface non lambertienne.

En faisant apparaitre *l'IFOV*= $S_p .\cos(r) / d^2_{par}$ (ou d_{par} est la distance pixel-capteur), avec $\Delta\Omega_{par} = \Delta S_{eff} / d^2_{par}$, la relation (3) devient : $P = L(\vec{u_i}, \vec{u_r}) . IFOV . \Delta S_{eff}$

Au coefficient ΔS_{eff} *.IFOV* près, l'image *P* est celle de $L(\vec{u_i}, \vec{u_r})$. Connaître le produit ΔS_{eff} *.IFOV* en fonction de la direction d'observation permet de déduire *L* de la mesure de *P*. *P* dépend alors, par $\vec{u_r}$, de la direction du capteur, pour toutes les directions d'éclairement $\vec{u_i}$.

Si l'on suppose le produit ΔS_{eff} *.IFOV* constant, les images de *P* et *L* coïncideront à un facteur près, les effets du relief s'exprimant alors directement (cf. rel. 4) dans le facteur $L(\vec{u_i}, \vec{u_r})$ par le facteur $\cos(i_p)$ et les variations de $R_{he}(\vec{u_i}) . G(\vec{u_i}, \vec{u_r}) / \cos(r)$ avec $\vec{u_i}$, ce qui rend en général possible une lecture des images optiques avec la perception du relief, alternance de faces éclairées plus claires et de faces opposées plus sombres.

Autre manière de voir :

la rel. 12 donne : $L(\vec{u_i}, \vec{u_r}) = (1/\pi) . FR . E$ (avec $E = \Phi_S . \cos(i_p)$).

L'image de *P* (valeurs proportionnelles à L) sera donc celle du produit du facteur de réflectance *FR* par *E*. L'image de *P* présentera les mêmes propriétés bidirectionnelles que *L* et *FR*.

En optique bi-statique, pour une surface lambertienne.

Cette hypothèse simplifie le résultat. Dans ce cas $L(\vec{u_i}, \vec{u_r})$ est indépendant de $\vec{u_r}$, ce qui conduit à :

$P = L(\vec{u_i}) . IFOV . \Delta S_{eff}$

Supposons le produit $IFOV . \Delta S_{eff}$ constant (ou que l'image *P* a été corrigée des variations de ce facteur) :

La valeur de *P* conduit, à un facteur constant près, à celle de $L(\vec{u_i})$ qui ne dépend pas de l'élévation du capteur. Il s'agit de la propriété majeure des surfaces lambertiennes. Ce point présente de l'intérêt si l'on souhaite fusionner des images obtenues à partir de dépointages différents pour des directions d'éclairement voisines.

Dans ce cas, on a toujours (cf. rel. 12):

$L(\vec{u_i}) = R_{he} (\vec{u_i}) . E/\pi . = FR . E / \pi$

Pour un sol horizontal, et un éclairement *E* uniforme, l'image de P suivra les variations de $R_{he}(\vec{u_i})$, que l'on nommera alors réflectance sans précision supplémentaire. Insistons sur le fait que ce résultat simple demande que la surface soit lambertienne, ce qui entraine en plus la coïncidence entre *FR* et R_{he} (ce qui rend les choses plus intuitives)

En présence de pentes, pour un flux solaire Φ_s uniforme, les effets du relief se marqueront dans les variations du produit $(R_{he}(\vec{u_i}) . \cos(i_p))$, résultat plus simple que dans le cas non lambertien où $L(\vec{u_i}, \vec{u_r})$ (rel 4) avait un comportement bidirectionnel, mal connu *a priori*.

Pour une surface lambertienne, la variabilité de radiométrie liée au relief suivra donc celle du facteur $R_{he}(\vec{u_i}) . \cos(i_p)$, permettant ainsi dans les cas favorables une lecture de la morphologie du terrain.

Comparée à une image radar, les variations du facteur $R_{he}(\vec{u_i}) \cos(i_p)$ s'avèrent beaucoup plus faibles que celles (eq. 17) du facteur $(\sigma^0(i_p) / \sin(i_p))$, l'image radar marquant de ce fait nettement plus les effets du relief (au moins pour les valeurs usuelles d'incidence des capteurs spatiaux).

Note : C'est au travers des variations du facteur $R_{he}(\vec{u_i}) . \cos(i_p)$ que l'on peut expliquer la luminance presque constante de la lune dans ses différentes phases. En supposant la surface lambertienne, le facteur $R_{he}(\vec{u_i})$ vient compenser par son augmentation la diminution de l'éclairement solaire (facteur $\cos(i_p)$ pour les fortes valeurs de (i_p)), et ce, en particulier lorsque le flux solaire incident se rapproche d'une direction tangente au globe lunaire.

Dernière remarque : l'hypothèse lambertienne est usuelle en optique mais a très peu cours en radar. En la supposant néanmoins valable, nous obtenons pour σ^0, γ^0 en mode monostatique:

$$\sigma^0(\vec{u_i}) = 4 \cos^2(i_p) R_{he}(\vec{u_i})$$

$$\gamma^0(\vec{u_i}) = 4 \quad \cos(i_p) . R_{he}(\vec{u_i})$$

Référence

Rees W. G., 2001: Physical Principles of Remote Sensing, 2nd ed., Cambridge Univesity Press.