



LIVRET

Fascicule d'accompagnement du Mini Mooc : Principes fondamentaux de la rétrodiffusion radar

Auteur :

Jean-Paul Rudant

Professeur émérite Université Gustave Eiffel (UGE)

Laboratoire LaSTIG (IGN-UGE)

Membre correspondant du MNHN (Museum Nationale d'Histoire Naturelle de Paris)

Copyright : CC-BY-SA 'EO College'

Table des matières

Video 1 Rétrodiffusion	1
Video 2 Equation radar	3
Video 3 Le chatoiement (speckle)	6
Video 4 Longueur d'onde	11
Video 5 Polarimétrie	12
Video 6 L'angle d'incidence	14
Video 7 Facteur Rugosité de Surface	15
Video 8 Facteur Relief	16
Video 9 Végétation	18
Video 10 Le Facteur Humidité	19
Video 11 Comparaison optique radar	22

Fascicule d'accompagnement

Ce livret contient pour chaque séquence l'indication du plan, la base de temps et quelques informations sur les contenus. Pour certaines séquences traitant de sujets plus compliqués, des développements plus détaillés sont proposés ; c'est en particulier le cas lorsque des calculs ont été allégés lors de la présentation orale.

Video 1 Rétrodiffusion (What is backscatter ?)

Généralités, Part 1

Durée 21'48"

VIDÉO : QU'EST CE QUE LA RÉTRODIFFUSION RADAR ?

URL of the video : https://youtu.be/vSwoL84Z_nQ



- [0 à 2' 08"] Présentation de l'ensemble du cours
- [2'20"] Principe de fonctionnement du système imageur radar actif
- [5'33"] - Antenne d'Emission-réception rectangulaire, récepteur d'énergie solaire
- [6'26"] Structure de l'image, organisation en lignes et colonnes
- [7'07"] Emission latérale, fauchée, enregistrement du signal au cours du temps
- [12'02"] Les différents formats d'images RAW, GRD, SLC

Note : Le format RAW nécessite l'usage d'un processeur SAR. Le format SLC (complexe) correspond pour chaque pixel à un couple (X,Y) partie réelle, partie imaginaire, chacune codée sur 2 octets. Dans ce cas, l'image est fournie en géométrie radar avec un pixel rectangulaire. Les deux dimensions sont différentes selon les directions longitudinale et transversale. Le format SLC permet de calculer amplitude et phase. L'usage de la phase est indispensable pour les applications interférométriques et est aussi utile en polarimétrie, mais de manière moins cruciale. Le format GRD correspond à une image fournie en géométrie sol, avec un pixel carré pour les surfaces horizontales. Dans les zones de relief la taille du pixel sol dépend des pentes locales (voir **Video 8**)

[16'47" à 21'47"] Facteurs dont dépend la puissance mesurée par l'antenne. Certains facteurs sont liés à la surface imagée, d'autres au système radar, tandis que la surface du pixel sol, qui joue un rôle multiplicatif dans la réponse radar, dépend simultanément de la taille du pixel en géométrie radar et de la pente du terrain (voir **Video 1-part 2**)

Généralités, Part 2

Durée 8'55"

[21'47"] Principales originalités de l'imagerie radar

[22'21"] C'est une Image de synthèse. La résolution spatiale des données brutes est kilométrique. Cette résolution devient métrique (ou décimétrique) après traitement de synthèse d'ouverture (SAR en anglais)

[25'15"] Les différentes bandes (X, C, L, P) de longueurs d'onde centimétriques

[26'17"] Evocation de quelques satellites

[26'40"] En radar, propriétés (di)électriques et géométriques de la surface et

[27'12"] En optique ; couleurs visibles étendues à l'invisible (PIR et MIR),

[28'22"] L'imagerie optique est proche de la vision humaine (étendue au PIR MIR)

[28'52"] La réponse radar est proche du sens du toucher pour les principales caractéristiques de la surface (humidité, rugosité, densité de végétation, vibration. . .) auxquelles les radar sont sensibles

[30'17"] Exemple de complémentarité optique-vue et radar-toucher

Video 2 Equation radar

Durée 32'44"

VIDÉO : L'ÉQUATION RADAR

URL of the video : https://youtu.be/OMW_orZfqKk



[0' 00'] Vocabulaire : Ce que l'on nomme habituellement 'Equation radar' est relative aux puissances émise, réfléchié à la surface du sol, rétro-diffusée vers l'antenne de réception

Une autre équation radar relative à la phase mesurée est nécessaire pour aborder deux sujets : principalement 'interférométrie' et secondairement 'polarimétrie' . Cette seconde équation ne sera pas traitée ici.

[1' 10"] Notion de diagramme (ou Gain) d'antenne G_{ant} (G_{ant} a une propriété importante : l' intégrale dans l'espace entier de $G_{ant} * d\omega = 1$)

[4'40"] Densité de flux radar en W/m^2 , mesuré perpendiculairement au faisceau, au niveau de la surface du sol

[5'56"] Puissance reçue par le pixel au sol, (cible étendue)

[6'42"] Puissance réfléchié dans le demi espace supérieur,

[8'25"] puissance reçue par l'antenne de réception, surface efficace de l'antenne, angle solide efficace

Note : Le calcul est relatif à la moyenne que l'on obtiendrait comme réponse en puissance (ou intensité) sur une zone de terrain homogène. La variabilité des réponses observées due au chatoisement, 'speckle', en anglais, n'est pas considérée (voir **Video 3**)

[10'43"] Résumé pour une cible étendue, Puissance reçue par le capteur

[11'22"] Notion de SER (Surface Equivalente Radar) pour une cible étendue ou non

[14'28"] Calcul de la SER pour une cible étendue. G_{sol} représente le gain de l'antenne secondaire constituée par le pixel sol, avec intégrale de G_{sol} sur l'espace entier =1

[15'50"] Calcul du coefficient de rétrodiffusion $\sigma_0 = SER / S_{pixel} = 4\pi \cos(i) * R_{he} * G_{sol}$

[16'34"] Calcul du coefficient $\gamma_0 = SER / S_{apparente\ pixel\ vue\ du\ capteur} = SER / (S_{pixel} * \cos(r))$

[18'00"] puissance reçue = $K * \sigma_0 * S_{pixel}$

[18'45"] Système monostatique $r=i$, $\gamma_0 = 4\pi R_{he} * G_{sol} = \sigma_0 / \cos(i)$

[20'00"] Illustrations en terrain plat

[20'32"] Exemple en zone de relief

[20'58"] Comparaison image et carte dans une zone de relief : distorsion géométrique de l'image radar

[21'25"] Interprétation des distorsions

[22'30"] Justification du calcul de σ_0 moyen (voir **Note 1**) $4\pi \cos(i) R_{he} * G$, ou $\cos(i)$ est un paramètre système, R_{he} dépend principalement des caractéristiques diélectriques du milieu et G_{sol} de sa géométrie de surface à l'échelle de la longueur d'onde

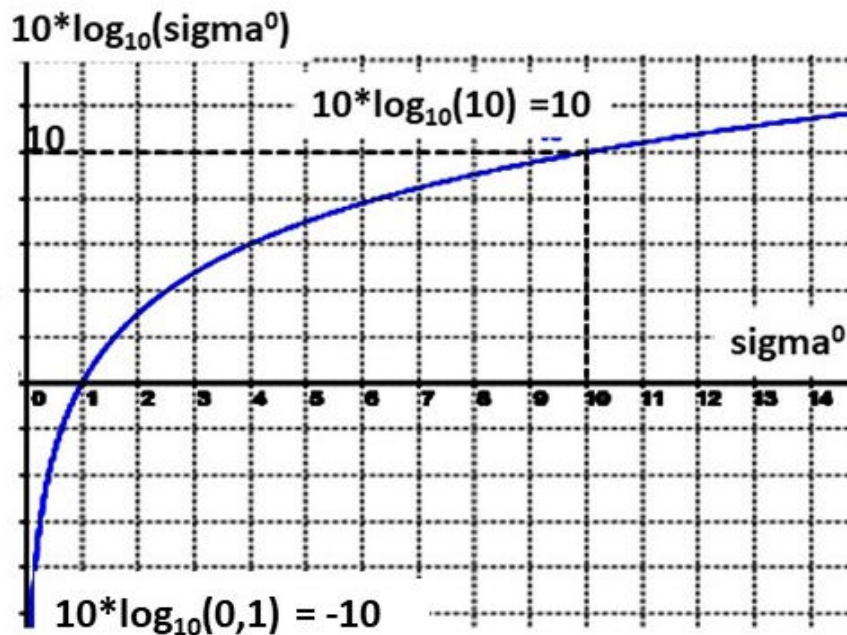
[25'00"] Cas simple d'une surface ayant un diagramme de réflexion isotrope dans le demi espace supérieur

[26'00"] intérêt de la Conversion en dB : $\sigma_{0dB} = 10 \log_{10}(\sigma_{0naturel})$ (voir **Note 2**)

Note 1 : La Puissance au niveau capteur représente la rétrodiffusion au sens général. σ_0 est le coefficient de rétrodiffusion le plus utilisé pour caractériser une surface étendue. Il est rapporté à l'unité de surface au sol en faisant le rapport de la SER sur la surface du pixel, laquelle dépend du relief. σ_0 dépend de la direction de visée et des caractéristiques diélectriques et géométriques de la surface pour une longueur d'onde et une polarisation donnée. (voir article revue RFPT)

Note 2 : Intérêt de la conversion en dB. Les valeurs de σ_0 pour les paysages naturels présentent une dynamique très différente pour les paysages naturels (forêts, marais, landes, cultures ...) et certaines structures anthropiques (bati...). Retenons pour l'explication qui suit les ordres de grandeurs (réalistes) suivants Paysage naturels : σ_0 varie entre 0,01 et 1, étendue absolue de 0,99 pour une variation relative de 100 Zones anthropiques : σ_0 varie entre 1 et 100, étendue absolue de 99 pour une variation relative de 100 Si l'on visualise sans précaution une image présentant de telles variations, les faibles valeurs apparaîtront extrêmement sombres et les fortes valeurs beaucoup plus claires. En pratiquant un changement de dynamique linéaire avec seuils, il apparait des zones saturées en blanc pour les valeurs les plus élevées et des blocs noirs pour les valeurs les plus faibles. Quel est l'intérêt de calculer $\sigma_{0dB} = 10 * \log_{10}(\sigma_0)$? Comparons l'apparence de deux zones lors d'une visualisation après transformation en dB ; l'une de paysage naturel et l'autre de bâti, en reprenant les ordres de grandeur précédents Pour une plage de faibles valeurs [0,01 à 1], d'étendue 0,99, la transformation en dB donne une étendue de $10 * \log_{10}(0,01) = -20dB$ à $10 * \log_{10}(1) = 0 dB$, c'est-à-dire une étendue de 20 dB, soit, par rapport à l'étendue en valeurs naturelles un facteur de zoom de $20/0,99 = 20,2$ (augmentation de dynamique) Pour la plage de fortes valeurs [1 à 100], d'étendue 99, nous obtenons en dB la plage de variation $10 * \log_{10}(1) = 0 dB$ à $10 * \log_{10}(100) = 20dB$, c'est-à-dire une plage de 20dB. Par rapport aux valeurs naturelles, cela correspond à un facteur de compression de $20/99 = 0,202$ (réduction de dynamique)

Les images de σ_{0dB} sont alors moins sujettes aux problèmes de visualisation évoqués précédemment. La dynamique des hautes valeurs est réduite alors que celle des basses valeurs est augmentée. Visuellement l'image est alors mieux équilibrée.



Remarque : Autres conséquences de la transformation en dB Passage de lois multiplicatives à des lois additives : le passage en dB transforme une loi multiplicative de produit de facteurs dépendants de paramètres différents en une loi additive qui peut, dans certains cas, en séparant l'effet des facteurs simplifier et faciliter l'interprétation.

Par ailleurs la conversion logarithmique conduit naturellement à une impression de saturation pour les fortes valeurs des variables étudiées. En valeurs naturelles, cette impression serait remplacée par une augmentation des incertitudes sur les valeurs des variables étudiées, car ces valeurs d'incertitudes sont globalement constantes exprimées en dB.

Lecture conseillée :

Jean-Paul Rudant, Pierre-Louis Frison, Télédétection radar : de l'Imagerie d'intensité initiale aux choix du mode de calibration des coefficients de diffusion σ^0 , β^0 , γ^0

Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, pp19-28, n° 219-220 (Janvier-Juin 2019)

Accessible sur le site RFPT, apres inscription

www.sfpt.fr

ou

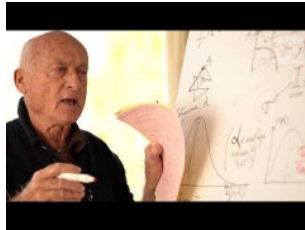
<https://www.sfpt.fr/rfpt/index.php/RFPT>

Video 3 Le chatoisement, speckle en anglais

Durée 21'37"

VIDÉO : LE CHATOIEMENT, SPECKLE EN ANGLAIS

URL of the video : <https://youtu.be/xDJgeRGyGbE>



[0'0''] Introduction : variabilité de la réponse sur une zone homogène

[0'30''] Origine du phénomène

[4'50''] Calculs simplifiés

Note : A l'oral, confusion sur la somme des termes $\cos(\phi)$. cette somme apparait normalement dans le calcul de la partie réelle de la réponse complexe et non directement dans le calcul de la réponse globale du pixel en amplitude.

[8'10''] Cas de la réponse de N cibles élémentaires

[15'50''] La réponse varie beaucoup, une moyenne est nécessaire pour obtenir une mesure significative du milieu observé, en supposant celui-ci homogène.

[18'35''] Exemple d'une image fortement moyennée avec réduction de taille adaptée

[18'45''] Comparaison entre chatoisement moyenné avec le chatoisement en pleine résolution

[19'45''] Simulation d'un chatoisement sur une image optique

[20'30''] Sur une petite zone homogène, les rapports (Ecart type /moyenne) calculés pour les images d'amplitude et d'intensité varient peu. On en déduit que le phénomène de chatoisement est un phénomène multiplicatif.

Note : Plus de détails pour les calculs relatifs au Chatoisement (Speckle) Considérons un terrain homogène présentant partout les mêmes propriétés macroscopiques (par ex. forêt dense, terrain de foot ball..), les réponses observées en Intensité (et en amplitude) dans l'image radar présentent une grande variabilité d'un pixel à un autre.

Ce phénomène, nommé chatoisement, concerne les cibles étendues lorsqu'un pixel présente plusieurs cibles qui vont chacune renvoyer un écho vers le capteur et globalement donner lieu à un phénomène d'interférences. Le fait que la taille du pixel soit grande devant la longueur d'onde entraîne de fortes variations dans la distance antenne-cible, fortes variations qui se traduiront par des différences de phase, liées à la propagation, absolument quelconques sur l'intervalle $0-2\pi$, (à $k2\pi$ près).

Quelle approche simplifiée du phénomène peut-on avoir ?

Première remarque : Des pixels présentant chacun une cible unique ne seront pas sujets à ce phénomène. Un seul écho donnera une mesure de s'intensité (ou puissance) proportionnelle au carré du champ de cet écho unique.

Avec deux cibles que l'on supposera pour simplifier identiques, chacune d'amplitude a_0 , Si les deux cibles sont telles que les distances aller retour antenne cible pour chaque cible, sont différentes d'un facteur entier de longueur d'onde $\delta D = k\lambda$ alors les deux signaux seront en phase et l'amplitude de l'addition des deux réponses sera $2 a_0$.

Pour $\delta D = (2k+1)\lambda/2$ les deux signaux seront en opposition de phase et l'amplitude résultante sera 0.

Pour une valeur quelconque de δD , la différence de phase sera quelconque et l'amplitude située entre 0 et $2 a_0$ Il s'agit d'un simple phénomène d'interférences à 2 sources identiques.

Avec N cibles

L'approche est identique mais l'existence de N cibles (toujours supposées identiques pour simplifier) complique le résultat. Manipuler la somme des échos en provenance des N cibles $S = \sum_{1,N} a_0 \cos(\omega t + \phi_i)$ demande de retenir la représentation complexe, dont S sera la partie réelle

$$\text{Somme Complexe} = A e^{j\Psi} = \sum_{1,N} a_0 \cos(\omega t + \phi_i) + j \sum_{1,N} a_0 \sin(\omega t + \phi_i) = \sum_{1,N} a_0 e^{j(\omega t + \phi_i)}$$

$$A e^{j\Psi} = (X + jY) e^{j(\omega t)} \text{ avec}$$

$$X = a_0 \sum_{1,N} \cos(\phi_i) \quad Y = a_0 \sum_{1,N} \sin(\phi_i)$$

Les termes ϕ_i prenant des valeurs absolument quelconques dans l'intervalle $0-2\pi$, les termes X et Y apparaissent comme la somme de N variables aléatoires indépendantes de mêmes lois (sin et cos) centrées sur 0 et de variance $(a_0^2/2)$ (résultat supposé connu) Si N est assez grand (disons ≥ 10), X et Y vont suivre des lois de Gauss centrées (espérance nulle) de variance $(N a_0^2/2)$ (somme de variables aléatoires indépendantes de mêmes lois, X et Y ayant les mêmes propriétés comme somme de sin et de cos) En notant $\alpha = a_0 \text{Rac}(N/2)$, écart type des variables X et Y (notation choisie α pour éviter le σ classique, source de confusion avec le coefficient de rétrodiffusion qui apparaîtra ensuite) Nous obtenons pour X et Y les lois de Gauss (résultat supposé connu)

$$P(X) = (1 / (\alpha \text{ rac}(2\pi))) * \exp(-X^2/2\alpha^2)$$

$$P(Y) = (1 / (\alpha \text{ rac}(2\pi))) * \exp(-Y^2/2\alpha^2)$$

X et Y étant des variables indépendantes, la probabilité conjointe vaut $P(X,Y) = P(X)*P(Y)$

$$P(X)*P(Y) = (1/2\pi \alpha^2) * \exp(-(X^2 + Y^2)/2\alpha^2) = 1/2\pi \alpha^2 * \exp(-A^2/2\alpha^2)$$

$$A^2 = X^2 + Y^2$$

en raisonnant dans le plan en coordonnées polaires, on en déduit

$$P(A) dA = (1/2\pi \alpha^2) * \exp(-A^2/2\alpha^2) * 2\pi A dA$$

D'où :

$$P(A) = A/\alpha^2 * \exp(-A^2/2\alpha^2)$$

Il s'agit de la loi de Rayleigh dont l'allure est la suivante (figure 1)

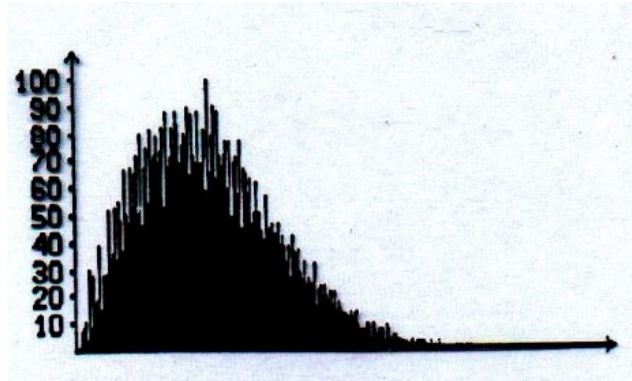


Figure 0.1 : *Figure 1 : histogramme du chatoiement pour l'amplitude (image mono vue)*

On en déduit espérance et variance puis écart type pour l'amplitude A , avec $\alpha = a_0 \text{ Rac}(N/2)$,

$$E(A) = \text{rac}(\pi/2)\alpha = \text{rac}(\pi N/4)a_0$$

$$E(A^2) = 2\alpha^2 N a_0^2$$

$$V(A) = (2 - (\pi/2))\alpha^2$$

$$\text{Ecarttype}(A) = \text{rac}(2 - (\pi/2))\alpha$$

e rapport $(\text{Ecarttype}(A) / E(A))$ est appelé coefficient de variation pour l'amplitude, note Cva , il caractérise le phénomène de chatoiement

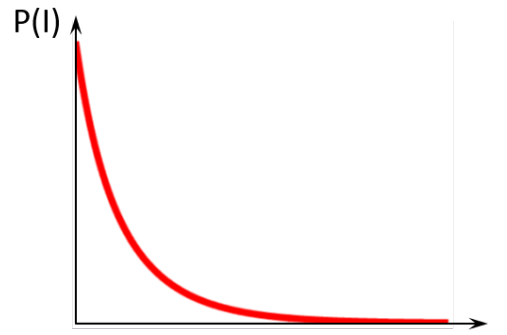
$$Cva = (\text{Ecarttype}(A) / E(A)) = \text{rac}(2 - (\pi/2)) / \text{rac}(\pi/2) = 0,523$$

Le rapport constant Cva traduit un phénomène multiplicatif (on parle souvent de bruit multiplicatif, c'est une erreur, car le chatoiement n'est pas un bruit. C'est un phénomène déterministe qui dépend complètement de la nature et de la position des cibles élémentaires dans le pixel).

De cette loi relative à l'amplitude, il est possible de déduire la loi correspondant à l'intensité $I = A^2$ Puis les paramètres associés, espérance, variance, écart-type Pour la loi relative à I , on obtient, après calcul

$$P(I) = (1/2\alpha^2) * \exp((-1/2\alpha^2))$$

Il s'agit d'une exponentielle décroissante, très différente de la courbe 'en cloche' caractérisant l'amplitude. Tracer l'histogramme d'une zone homogène permet de connaître la nature d'une image, en distinguant image d'amplitude et d'intensité par la forme de leurs histogrammes respectifs. On obtient pour l'intensité



$E(I) = 2\alpha^2 = Na_0^2$ ou N est le nombre de cibles élémentaires d'amplitude a_0 dans un pixel

$$E(I^2) = 8\alpha^4$$

$$V(I) = 4\alpha^4$$

$$\text{Ecart-type}(I) = 2\alpha^2$$

Coefficient de variation pour l'intensité : $C_{vi} = \text{Ecart-type}(I) / E(I) = 1$ Le chatoiement, toujours multiplicatif, est donc plus marqué sur les images d'intensité que sur les images d'amplitude.

Remarquons que la valeur moyenne de l'intensité trouvée $E(I) = N a_0^2$ correspond à un résultat logique. Chaque cible élémentaire véhicule une puissance proportionnelle à a_0^2 , la somme pour un pixel étant $N a_0^2$, mais les valeurs varient d'un pixel à l'autre selon le phénomène d'interférence se produisant pour un pixel donné. Pour un ensemble de pixels, la loi de conservation de l'énergie prend le dessus et l'on voit que les variations d'intensité dues au chatoiement disparaissent lors d'une moyenne globale.

Note : Image mono-vue et image multi-vues (voir calculs plus loin) Tous les calculs précédents correspondent à des valeurs d'amplitude et d'intensité n'ayant pas subi de transformation numérique. Pour réduire les effets du chatoiement qui altère la lisibilité des images, il est fréquent de pratiquer une moyenne m de valeurs sur le voisinage d'un pixel donné, dont on notera la valeur v .

Considérons le cas général où l'on effectue la moyenne m de M valeurs v (d'intensité ou d'amplitude). Supposant les comportements de ces valeurs de pixels indépendants (en terme probabiliste, chatoiement développé), la moyenne m obtenue pour M pixels est proche de l'espérance de la variable v (si M est assez grand). L'espérance de m est elle-même égale à l'espérance de v . L'écart type de m est égal à l'écart type des valeurs initiales v divisé par le facteur $\text{Rac}(M)$.

$\sigma(m) = \sigma(v) / \text{Rac}(M)$. La diminution de $\sigma(m)$ par rapport à $\sigma(v)$ signifie que le chatoiement est alors réduit pour la variable m .

On parle alors d'image multi vue ou M est le nombre de vues. En l'absence de traitement de ce type, l'image est qualifiée de monovue.

Cette moyenne s'accompagne en général d'un changement de taille du pixel que l'on augmente proportionnellement à $\text{Rac}(M)$ dans le cas simple ou l'on manipule des images dont les pixels sont initialement carrés. Dans ce cas on réduit en général le volume de l'image d'un facteur M^2 en ne retenant pour l'image moyenne qu'un pixel sur M en ligne et en

colonne. Dans le cas du passage des images Sentinel1 du format SLC, (Single Look Complexe) au format GRD (Ground Detection), une moyenne est effectuée à partir des pixels rectangulaires du format SLC pour aboutir aux images GRD dont le pixel est carré. Dans ce cas, le nombre de vue est voisin de 4.

Les calculs que nous venons d'évoquer correspondent à l'opération suivante : Pour des variables aléatoires indépendantes de même loi, $E(X)$, $V(X)$, $\text{Ecart-type}(X) = \text{Rac}(V(X))$
 moyenne $m = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + \dots + X_M) / M$

Nous obtenons $E(m) = M E(X) / M = E(X)$ $V(m) = M E(X) / M^2 = V(X) / M$

$\text{Ecart-type}(m) = \text{Ecart-type}(X) / \text{rac}(M)$

Le chatolement est donc réduit et le coefficient de variation est divisé par le facteur $\text{Rac}(M)$

Pour une zone homogène dans une image d'amplitude, coefficient de variation $Cva = 0,523 / \text{Rac}(M)$

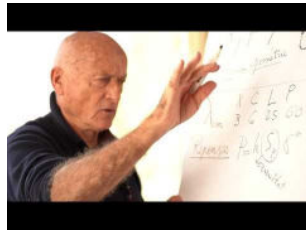
Pour l'intensité $Cvi = 1 / \text{Rac}(M)$

Video 4 Paramètre Système no 1, Longueur d'onde

Durée 10'37"

VIDÉO : L'INFLUENCE DE LA LONGUEUR D'ONDE SUR LA RÉTRODIFFUSION RADAR

URL of the video : <https://youtu.be/C2gwYBuZ2X4>



Note :

Dans l'expression $P = k \cdot \sigma_0 \cdot S_p$, la longueur d'onde influence uniquement σ_0 avec $\sigma_0 = 4\pi \cos(i) \cdot R_{he}(ui) \cdot G_{sol}(-ui, ui)$ (en mode monostatique $ur = -ui$) R_{he} facteur de réflexion hémisphérique des ondes électromagnétiques dépend de la fréquence. Mais ce facteur de nature diélectrique varie peu avec λ dans le domaine micro-onde pour une humidité donnée lors d'une réflexion superficielle. Lorsque l'onde pénètre un milieu, le facteur R_{he} intégrera les hétérogénéités diélectriques de la partie pénétrée.

Par contre, $G_{sol}(ui)$, facteur de directivité de l'onde réfléchi, dépend fortement de λ pour une rugosité de sol ou une structure végétale donnée.

Pour une rétrodiffusion superficielle, la variabilité de σ_0 avec λ est liée avant tout au facteur directionnel G . Pour une surface lisse, la forme de l'indicatrice G étant fine et inclinée dans la direction spéculaire et $G_{sol}(-ui, ui)$ est très faible. Pour une surface très rugueuse, l'indicatrice se rapproche d'une demi-sphère et G est voisin de $1/2\pi$.

[0'00"] Généralités sur les paramètres systèmes, ui , i , S_{pixel} , polar, λ

[2'41"] En terrain plat, $S_p = cste$ et $P = K \cdot \sigma_0 \cdot S_p$, ne dépend que de σ_0

[3'30"] Remarque concernant le chevauchement entre variables, phénomènes, et sujet traités dans les différents paragraphes qui vont suivre.

[5'00"] Comparaison entre bande L-HH et bande C-VV sur l'estuaire du Wouri au Cameroun

[7'20"] L'onde radar peut pénétrer certains milieux comme le sable hyper sec du désert. Exemple au Sahara

[8'30"] Les graphes donnant les variations de σ_0 avec la biomasse diffèrent selon la longueur d'onde. La saturation intervient plus rapidement pour les courtes longueurs d'onde.

[9'15"] Illustration du phénomène précédent

[9'45"] Insensibilité aux nuages dans le domaine micro-ondes : comparaison d'une image radar avec une image optique en contexte tropical humide

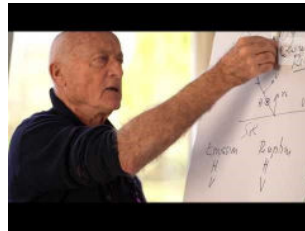
[10'37"] Fin

Video 5 Paramètre Système no 2 Polarimétrie

Durée 21'26

VIDÉO : L'INFLUENCE DE LA POLARISATION SUR LA RÉTRODIFFUSION RADAR

URL of the video : <https://youtu.be/2GVVH1m8EGI>



Note : Dans l'expression $P = k \cdot \sigma_0 \cdot S_p$, la polarisation influence uniquement σ_0 avec $\sigma_0 = 4\pi \cos^2(i) \cdot R_{he}(ui) \cdot G_{sol}(-ui, ui)$ (en mode monostatique $ur = -ui$) R_{he} facteur de réflexion hémisphérique des ondes électromagnétiques peut dépendre fortement de la polarisation.

G_{sol} , facteur de directivité de l'onde réfléchie, dépend conjointement des propriétés géométriques des cibles et de l'orientation du champ électrique donc de la polarisation.

Remarque : en électromagnétisme, il est habituel de nommer parallèle la polarisation V contenue dans le plan d'incidence et perpendiculaire la polarisation H (horizontale, effectivement perpendiculaire au plan d'incidence)

[0'0"] introduction : polarisations H et V définis par les directions des axes de l'antenne radar

[5'17"] combinaison des polarisations H et V pour aboutir à une polarisation elliptique quelconque et connaître la réponse des cibles en additionnant les réponses correspondant aux deux composantes H et V élémentaires envoyées séparément (phénomènes linéaires)

[6'58"] discussion sur la capacité du système à permettre de déterminer les réponses à une polarisation quelconque par combinaison de réponses à des polarisations incidentes plus simples

Discussion sur les réponses de cibles de géométries variées, verticales ou horizontales

[8'37"] sensibilité particulière de la polarisation HV à la végétation (phénomène de pénétration et de réflexion multiple)

[11'00"] le principe des 'décompositions'

[11'32"] Décomposition de Pauli pour séparer la rétrodiffusion d'un sol nu ($HH+VV$), de la végétation ($2HV$) et des doubles réflexions –par exemple forêt inondée–($HH-VV$). Pour ces 'décompositions', il est nécessaire que tous les termes HH , VV , HV soient complexes

[15'47"] l'exemple des rizières, en partie de sols nus, en partie plants inondés [16'55"] la polarisation HV est réputée pour être une source d'information pertinente sur la biomasse

[17'40"] le barrage de Petit Saut avec des troncs inondés, images diverses selon les longueurs d'onde et polarisations (bandes L et C, polar HH et VV)

[18'26"] schémas sur la décomposition de Pauli, différents modes

[18'58"] comparaison de la décomposition de Pauli en bande L et d'une image optique en Guyane

[20'10"] introduction de différents faciès végétaux

[20'20"] interprétation de la décomposition de Pauli en Guyane

[21'26"] Fin

Video 6 Paramètre Système no 3 ; L'angle d'incidence

Durée 11'20

VIDÉO : L'INFLUENCE DE L'ANGLE D'INCIDENCE SUR LA RÉTRODIFFUSION RADAR

URL of the video : <https://youtu.be/DR1F0ZnpzXc>



Note : Dans l'expression $P = k \cdot \sigma_0 \cdot S_p$, l'incidence influence σ_0 et S_p . $\sigma_0 = 4\pi \cos(i) \cdot R_{he}(ui) \cdot G_{sol}(ui, ui)$. R_{he} facteur de réflexion hémisphérique des ondes électromagnétiques dépend de l'incidence locale pour une longueur d'onde et une polarisation donnée. Ce facteur de nature diélectrique varie moins avec l'incidence pour la polarisation HH que pour VV.

Le facteur G décroît plus rapidement avec l'incidence locale pour les faibles rugosités que pour les fortes rugosités.

Pour les sols non horizontaux, nous verrons plus loin (effets du relief) que les effets de pente sont fortement marqués dans le facteur S_p .

[01'47"] Variation de l'incidence dans la fauchée

[02'30"] Problème posé lors de la réalisation de mosaïques sur les parties communes aux images

[03'20"] L'existence de sillons perturbe l'incidence locale (la direction de visée devrait être introduite comme paramètre pour être plus général)

[05'09"] Variabilité de la réponse en puissance sur l'océan et la forêt dans une même image

[06'05"] La surface de l'océan est modulée par des perturbations climatiques pour une même incidence mettant en évidence les effets d'une rugosité variable

[06'45"] Analyse d'images pour différentes incidences (23° et 44°) sur la ville de Kourou

[08'03"] La variation de σ_0 en fonction de l'incidence pour différents milieux

[10'10"] Variation de σ_0 avec l'incidence en fonction de la rugosité

[11'20"] fin

Video 7 Géométrie des cibles no1 ; Facteur Rugosité de Surface

Durée 12'40"

VIDÉO : L'INFLUENCE DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE SUR LA RÉTRODIFFUSION RADAR

URL of the video : <https://youtu.be/qYOY0xydoHs>



Note :

Dans l'expression $P = k \cdot \sigma_0 \cdot S_p$, la rugosité centimétrique influence uniquement σ_0 . $\sigma_0 = 4\pi \cos(i) \cdot R_{he}(ui) \cdot G_{sol}(ui, ui)$. R_{he} facteur de réflexion hémisphérique des ondes électromagnétiques dépend secondairement de la rugosité. C'est le facteur directionnel G_{sol} qui est influencé essentiellement par la rugosité de manière conjointe avec l'incidence car (**Video 6**) G_{sol} décroît plus rapidement avec l'incidence locale pour les faibles rugosités que pour les fortes rugosités.

[0'20"] Discussion : On peut distinguer 3 échelles pour les aspects qui touchent à la géométrie des cibles, 1-échelles centimétrique (rugosité), 2- échelle macroscopique (relief), 3-échelle intermédiaire métrique liée à la structure des cibles (par ex pour la végétation)

[02'35"] Exemple de relief à l'Ouest de Santo Domingo

[02'54"] Exemple d'un sol caillouteux

[03'10"] Exemples de galets sur les bords de la Durance en France

[03'18"] Différents types de végétation aux structures différentes

[03'50"] échelle centimétrique : facteurs quantitatifs pour caractériser la rugosité

[04'55"] Seuil de Rayleigh

[10'00"] Effets d'une pollution pétrolière en mer

[10'47"] Les inondations du Rhône

[11'30"] Image radar de brulis

[12'05"] Image radar en bande C d'un point d'eau regroupant des animaux au Sahel

[12'45"] Différence entre calcaire et grès (image du CCT)

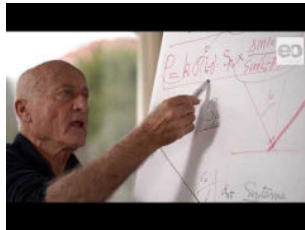
[13'40"] Fin

Video 8 Géométrie des cibles no 2 ; Facteur Relief

Durée 14'25"

VIDÉO : L'INFLUENCE DE LA TOPOGRAPHIE SUR LA RÉTRODIFFUSION RADAR

URL of the video : <https://youtu.be/OrvudJTqtgw>



Note :

Dans l'expression $P = k \cdot \sigma_0 \cdot S_p$, les pentes influencent l'incidence locale, et en conséquence σ_0 et S_p . $\sigma_0 = 4\pi \cos(i) \cdot R_{he}(u_i) \cdot G_{sol}(u_i, u_i)$. Les variations de σ_0 avec l'incidence locale ont déjà été analysées. En présence de reliefs, l'incidence locale dépend directement de la pente. En simplifiant, i_{local} sera la différence algébrique entre $i_{terrain}$ plat et la pente. Le facteur S_p est fortement influencé par les variations de l'incidence locale (variation en $1 / \sin(i_{local})$), ce qui fait que le relief se marque nettement dans les images de puissance enregistrée. Dans les calculs, la pente p est algébrique, positive si la pente fait face à l'antenne, négatif dans le cas contraire.

[0'25"] $P = k \cdot \sigma_0 \cdot S_p$

[1'00"] Cellule de résolution

[1'30"] Dimension pixel transversal en géométrie radar

[3'00"] Dimension pixel transversal en géométrie sol pour un sol plat

[3'25"] Dimension pixel transversal en géométrie sol pour une pente p

[5'05"] Rapport $SurfacePixelenPente_p / Surface\ pixel\ sol\ plat = \sin I_o / \sin(i-p)$ avec I_o = incidence pour un terrain plat

[6'20"] Cas d'une pente voisine de l'incidence à plat I_o

[7'23"] Exemple des effets du relief pour une colline boisée

[8'26"] Distorsions géométriques

[8'57"] Comparaison Carte et image sur la Guyane

[9'51"] Comparaison d'une Ortho-image optique et de deux images radar d'incidences à plat 23° et 45°

[10'15"] Zoom sur ce qui précède

[10'30"] Schéma explicatif pour le phénomène d'ombrage

[11'34"] Image corrigée des distorsions géométriques grâce à un MNT. Certains artefacts sont liés aux défauts des MNT

[12'45"] Impression de relief pour une image de végétation (Mangroves d'altitude variable)

[13'52"] La perception du relief dépend du mode de restitution et de l'observateur

[14'05"] Détails sur les images précédentes

[14'29"] Fin

Video 9 Géométrie des cibles no 3 ; Echelles intermédiaires métriques, végétation

Durée 7'02"

VIDÉO : L'INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION SUR LA RÉTRODIFFUSION RADAR

URL of the video : <https://youtu.be/kTelrIEIMCI>



Note :

Dans le cas de la végétation, l'expression $P = k \cdot \sigma_0 \cdot S_p$, ne traduit pas explicitement le phénomène de pénétration à l'intérieur du couvert . Retenons néanmoins cette expression qui permet de calculer σ_0 à partir de la puissance enregistrée

Reprenons l'expression $\sigma_0 = 4\pi \cos(i) \cdot R_{he}(u_i) \cdot G_{sol}(u_i, u_i)$ pour faciliter l'explication.

Les termes diélectriques et directionnels devraient être intégrés en profondeur selon une épaisseur qui dépend de la pénétration, elle-même dépendant de la longueur d'onde et de la nature du couvert (biomasse, structure)

Les effets de pente se retrouveront dans l'image dans des conditions voisines rencontrées pour les surfaces avec l'influence du facteur $1/\sin(i_{local})$. Cet effet de pente peut devenir plus diffus si la pénétration s'avère très importante.

[0'40"] Influence de la polarisation

[1'00"] Rôle des différentes longueur d'onde

[1'50"] Evocation de l'humidité du couvert végétal

[2'40"] Composition de Pauli, comparaison des effets de la pénétration en bandes C, L , P

[4'00"] Comparaison du rapport radar VV/HV au NDVI optique pour des forêts tempérées

[5'50"] Comparaison d'une composition trichrome des bandes X C L et d'une photographie aérienne

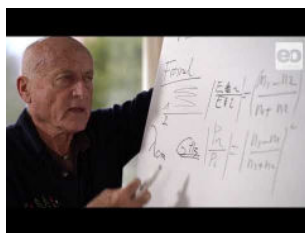
[7'00"] Fin

Video 10 Le Facteur Humidité

Durée 28'09"

VIDÉO : L'INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ DU SOL SUR LA RÉTRODIFFUSION RADAR

URL of the video : <https://youtu.be/iCMtDjVtSpk>



- [1'10'] Discussion : effets de l'humidité intra-image (une date) ou inter-images (plusieurs dates)
- [2'20'] Discussion : Surface avec ou sans végétation
- [3'37"] Effet d'une pluie localisée au sein d'une image (CCT)
- [4'40"] Mesure au laboratoire : courbe de croissance σ_0 avec humidité
- [5'20"] Dispersion expérimentale sur le terrain des réponses radar HH et VV en fonction de l'humidité
- [6'43"] Loi de réflexion de Fresnel (interface plane, incidence nulle)
- [8'40"] Parties réelle et imaginaire de la constante diélectrique $\epsilon_r = \epsilon_r' + j \epsilon_r''$ avec $\epsilon_r = \epsilon_r' + j \epsilon_r'' \text{ rac}(n)$, $n =$ indice complexe) alerte : lapsus à l'oral : l'indice r signifie relatif et non réel, voir ϵ_r définition plus loin
- [9'00"] valeurs de $\epsilon_r = \epsilon_r' + j \epsilon_r''$ pour différents milieux, cas de l'eau
- [10'00"] valeurs de ϵ_r'' influence de l'eau
- [10'24"] Cas du sable
- [12'30"] Cas de l'eau de mer
- [14'00"] Eau, glace, sol gelé
- [14'43"] Sol sec, sol humide
- [15'15"] Influence du contenu en eau sur ϵ_r pour un matériau
- [15'30"] Pour justifier l'usage de la relation de Fresnel avec une incidence nulle , évocation des modèles de rétrodiffusion avec des facettes perpendiculaires au faisceau
- [15'36"] Profondeur de pénétration d . Rapport de puissances $P(d)/P_0 = 1/e$ avec $e = 2,71 \dots$
- [16'32"] $d = (\lambda / 2\pi) (\text{rac}(\epsilon_r') / \epsilon_r'')$ des milieux naturels usuels
- [16'50"] Cas de l'eau de mer
- [18'20"] Propriétés diélectriques et électriques (voir texte ci-dessous)
- [19'47"] Croissance de ϵ_r' et ϵ_r'' avec l'humidité
- [20'50"] Evolution annuelle du σ_0 pour des feuilles de maïs

- [21'50"] Maïs vert et blé sec de couleur jaune
 [23'00"] Evolution temporelle de la réponse de parcelles agricoles
 [23'48"] Exemple au Mali (Rharous), évolution parallèles de la réponse radar et de la pluviométrie
 [24'52"] Exemple en Tunisie (Chott el Jerid), évolution de la réponse radar en fonction de la pluviométrie
 [25'53"] Episode pluvieux sur une prairie, saturation et apparition d'eau en surface
 [26'05"] Chute de σ_0 lors de la saturation
 [26'51"] Exemple d'un amas coquiller situé en sub-surface
 [27'44"] Cas d'une Surface lisse avec pénétration ou non selon le niveau d'humidité de la partie superficielle .

Note explicative : 'le Facteur Humidité' , Mots clefs : Constante diélectrique, Puissance réfléchie, longueur (ou profondeur) de pénétration Ordres de grandeur, précisions sur les données fournies oralement Le Rapport (Pr/Pi)= (Préfléchie/Pincidente) peut être approché par la relation de Fresnel en fonction des indices complexes n_1 et n_2 des deux milieux (onde allant de 1 vers 2) $(Pr/Pi) = ((n_1 - n_2)/(n_1 + n_2))^2$

Cette relation est valable pour une interface plane et une incidence nulle, et ne fournit donc que des tendances de comportement et des ordres de grandeur. Certains modèles de rétrodiffusion supposent que l'on prend en compte des facettes perpendiculaires au faisceau, c'est-à-dire une incidence nulle. Dans ce cas les polarisations H et V ont le même comportement.

Dans les milieux matériels, la constante diélectrique relative ϵ_r est définie comme le rapport des constantes diélectriques du milieu ϵ et du vide ϵ_0 , , cad $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$

$\epsilon_r = \epsilon'_r + \epsilon''_r + j \epsilon'''_r$ est introduite pour décrire le comportement des ondes électromagnétiques dans les milieux polarisables. Dans les milieux diélectriques (polarisables) sans pertes, ϵ_r est réel (donc limité à ϵ'_r) . Pour les milieux avec perte. ϵ_r possède une composante imaginaire . Pour les milieux naturels usuels, souvent plus ou moins humide, la conductivité électrique doit être prise en compte. On introduit alors une constante effective (ou équivalente) qui prend en compte la conductivité du milieu

$\epsilon_{eff} = \epsilon'_r + j\epsilon''_r + j\sigma/(\omega^*\epsilon_0) = \epsilon'_r + j(\epsilon''_r + \sigma/(\omega^*\epsilon_0))$ où $\omega=2\pi f$ (f est la fréquence de l'onde) . Les pertes associées à la polarisabilité (agitation des dipôles liés) et à la conductivité (électrons libres) se superposent en un effet commun de perte énergétique. Le calcul des indices n se fait à partir des valeurs des constantes diélectriques relatives , $n = \text{rac}(\epsilon_r)$

Valeurs typiques de ϵ_r pour des fréquences de l'ordre de 5 Ghz sable sec $\epsilon_r = 3-0,1j$, sable moyennement humide (20%) $\epsilon_r = 12-3 j$, eau moyennement salée $\epsilon_r = 78-15 j$

Valeurs typiques du Rapport en surface des puissances réfléchie et incidente, $Pr/Pi = ((n_1 - n_2)/(n_1 + n_2))^2$

Simplifions en ne considérant que ϵ'_r pour le calcul de n ($n = \text{rac}(\epsilon'_r)$) , on obtient pour les valeurs de Pr/Pi à l'interface air-sable ou air eau salée

Sable sec : $Pr/Pi = ((1 - \text{rac}(3))/(1 + \text{rac}(3)))^2 = (0,732/2,732)^2 = 0,07$ Sable humide : $Pr/Pi = ((1 - \text{rac}(12))/(1 + \text{rac}(12)))^2 = (0,55)^2 = 0,30$ Eau salée $Pr/Pi = ((1 - \text{rac}(78))/(1 + \text{rac}(78)))^2 = (7,83/9,83)^2 = 0,64$

Valeurs typiques des Profondeurs de pénétration d, Définition : La puissance pénétrante en profondeur est divisée par un facteur $e=2,71...$ pour une distance de propagation d

$$d = (\lambda_0/2\pi) \operatorname{rac}(\epsilon'_r) / \epsilon''_r$$

pour un milieu naturel usuel, diélectrique pouvant être légèrement conducteur pour un sable sec, bande C, $\lambda=6\text{cm}$, en cm $d = 6 * \operatorname{rac}(3) / 0,1/6,28 = 16,6, \text{cm}$ et 4 fois plus en bande L (attention, un sable sec en surface peut présenter de l'humidité en profondeur) pour un sable humide bande C $d = 6 \operatorname{rac}(12) / 3/6,28 = 1,1 \text{ cm}$ Pour de l'eau salée , bande C, $d = 6 \operatorname{rac}(78) / 15/6,28 = 0,56 \text{ cm}$, beaucoup moins pour de l'eau de mer avec un ϵ''_r de 45

Lecture conseillée : Odile Picond et Patrick Poulichet , Aide mémoire d'Electromagnétisme 398p, DUNOD 2010

Video 11 Cibles radar particulières et comparaison optique radar

Durée 13' 00"

VIDÉO : COMPARAISON OPTIQUE RADAR

URL of the video : <https://youtu.be/JrxuM-9vwtU>



- [1'04"] Coin réflecteur, exemple du trièdre
- [1'40"] Schéma de trièdre corrigé
- [3'18"] Image radar des pyramides
- [3'28"] Comparaison avec une image optique
- [4'10"] Image d'un filet de pêche en surface
- [4'12"] Filet pêche in situ
- [5'00"] image radar de la tour Eiffel
- [5'36"] Image radar d'une ville (New York)
- [6'56"] Comparaison optique radar, Les différents domaines de la télédétection (CNES)
- [7'42"] Appareil de Mesure de vitesse sur l'autoroute
- [9'20"] Image Optique SPOT de La ville de Saint Louis du Sénégal
- [9'45"] Image Radar ERS de La ville de Saint Louis du Sénégal
- [9'52"] Comparaison optique et radar (le fleuve 'pénètre' l'océan en optique et la houle 'pénètre' le fleuve en radar)
- [10'58"] Zone aride : Amas coquiller en sub-surface et croute lisse superficielle
- [11'15"] Succession de différents états de surface : cailloux, galets, plage
- [11'23"] Succession de différents types de végétation
- [11'36"] Succession de tous les milieux précédents
- [12'25"] Sensibilité radar, celle de la main , sensibilité optique, celle de la vue augmentée
- [13' 00"]] Fin

Lecture conseillée : Jean-Paul Rudant, Pierre-Louis Frison, Existe-t-il des relations formelles entre coefficients de diffusion radar et facteurs de réflectance en optique? Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection pp29-32, n° 219-220 (Janvier-Juin 2019)

Ouvrage de référence Ulaby F.T, Long D.G., Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing, 984 p. The university of Michigan press, 2014.