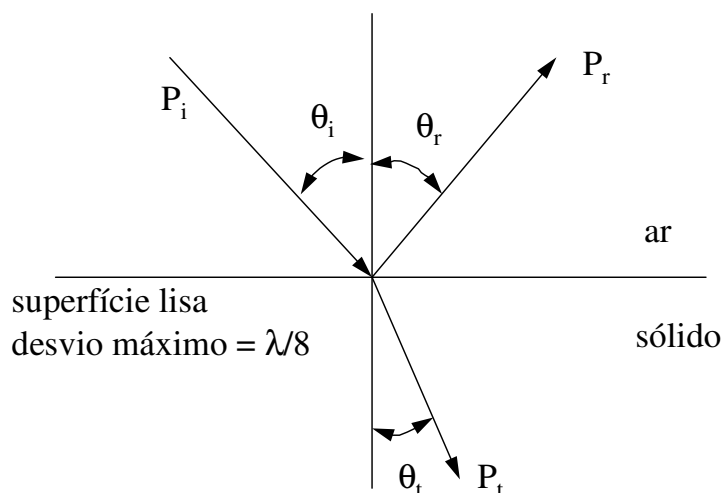


Reflexão tipo Fresnel



Três casos de interesse:

- Condutor
- Dielétrico sem perdas (isolante)
- Dielétrico com perdas (isolante)

Para um condutor (metal), $P_r = P_i$ e $P_t = 0$

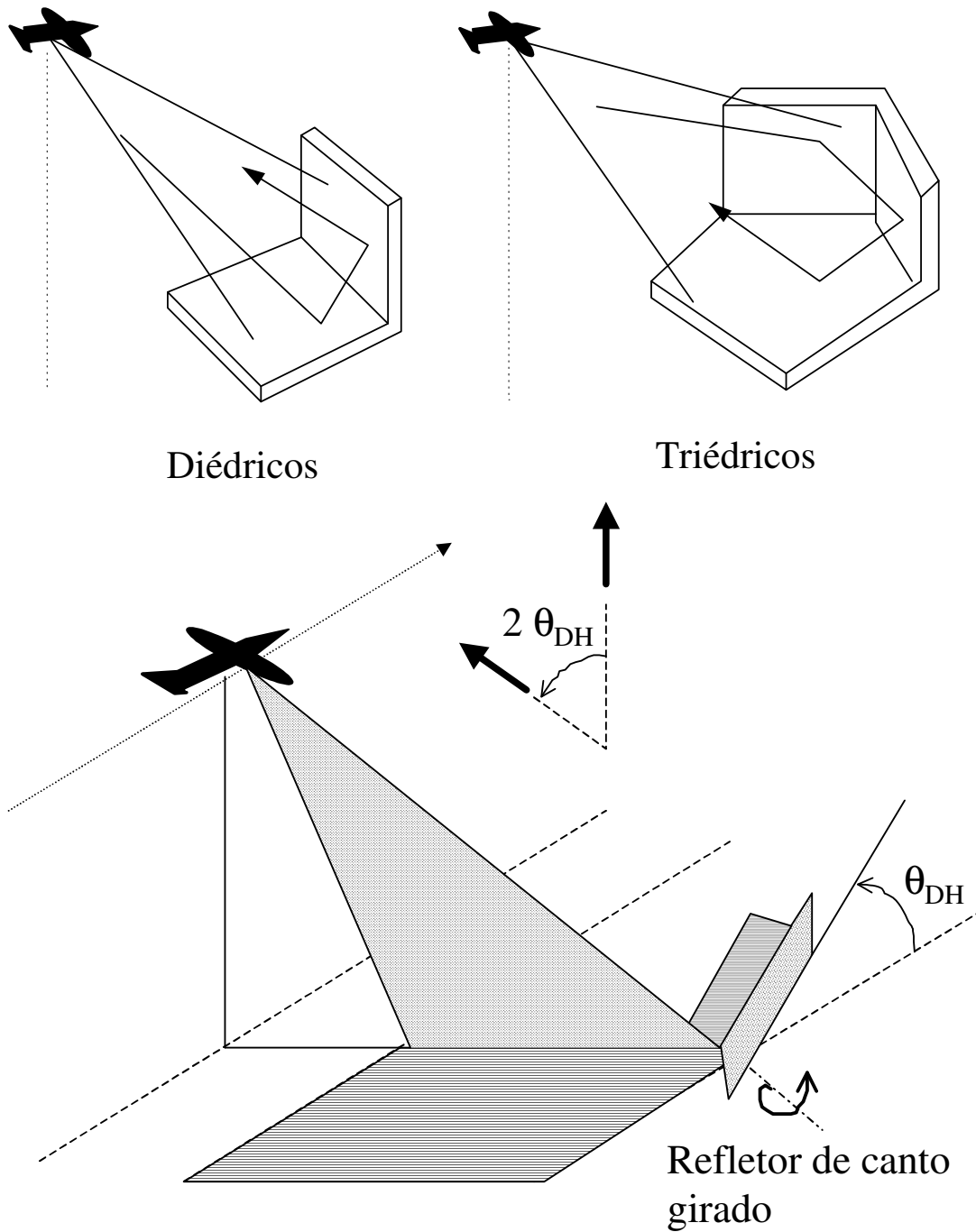
Não há retorno de potência para o Radar.

Condutores podem ser usados para construir refletores de canto (corner reflectors) para retornar potência para o transmissor.

Refletores diédricos (ver figura abaixo)

- O vértice deve ser alinhado perpendicularmente ao transmissor (vetor SAR-terreno) para retornar potência ao mesmo;
- Se o vértice for girado em relação ao vetor SAR com um ângulo ω , o plano de polarização girará de 2ω .

Reflexão especular da OEM do Radar em Refletores de canto



Dielétricos sem perdas

Lei de Snell

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

em que n é o índice de refração ($n \propto 1/\text{velocidade de propagação}$).

É importante notar que sempre que há uma mudança brusca no índice de refração ocorre reflexão de energia. Isto pode ou não corresponder a superfície visível. Para solo seco, areia seca, e neve seca, pode haver uma penetração considerável antes que ocorra uma mudança de n . Muitos experimentos que procuram relacionar a rugosidade do solo ao retroespalhamento em microondas falham porque é difícil medir a rugosidade real da camada de transição dielétrica.

Para incidência a nadir ($\theta_i = 0$) as equações para a potência refletida e transmitida são:

$$r_I = r_E r_M^* = - \left[\left(1 - \frac{n_2}{n_1} \right) / \left(1 + \frac{n_2}{n_1} \right) \right]^2$$

$$t_I = t_E t_M^* = 4 \frac{n_2}{n_1} / \left(1 + \frac{n_2}{n_1} \right)^2.$$

Mesmo tendo em mente que SAR funciona em visada lateral, estas equações ajudam no entendimento do espalhamento quando pequenos objetos numa dada célula de resolução estiverem orientados perpendicularmente ao SAR, e em casos de encostas voltadas para o radar (com ângulo de incidência local $\cong 0^\circ$).

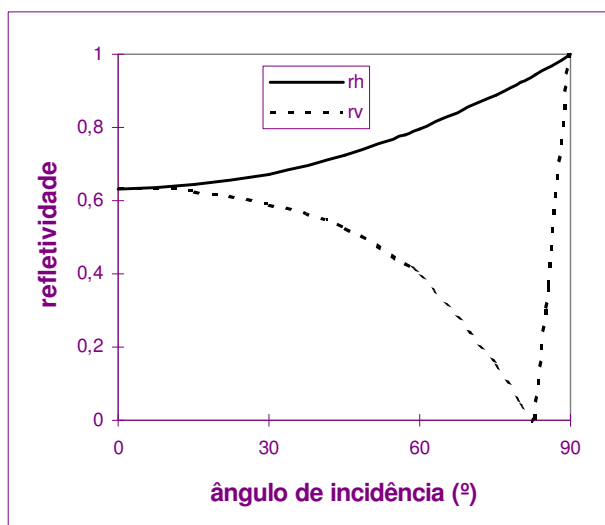
Incidência oblíqua num dielétrico

Neste caso, as equações são:

$$r_{Ih}(\theta) = \left\{ \frac{\left[n^2 - \sin^2(\theta) \right]^{1/2} - \cos(\theta)}{\left[n^2 - \sin^2(\theta) \right]^{1/2} + \cos(\theta)} \right\}^2$$

$$r_{Iv}(\theta) = \left\{ \frac{n^2 \cos(\theta) - \left[n^2 - \sin^2(\theta) \right]^{1/2}}{n^2 \cos(\theta) + \left[n^2 - \sin^2(\theta) \right]^{1/2}} \right\}^2.$$

A figura abaixo representa os coeficientes acima para a OEM incidente sobre a água ($n^2 \sim \epsilon' \sim 77$). Faça você mesmo o gráfico para o caso do visível ($\lambda \sim 600$ nm e $n^2 \sim \epsilon' \sim 1.77$). O ângulo de reflexividade 0 ($\sim 83^\circ$ para microondas) é conhecido como ângulo de Brewster. Qual é o valor deste ângulo para o caso do visível ?



Note-se que estas equações descrevem o caso de reflexão especular (e não de volta para o radar). Entretanto, duas reflexões especulares podem criar um retroespalhamento, como no caso de tronco de árvores em áreas alagadas (ou em terra firme...). Neste caso, a física mostra que o retorno HH é maior que o retorno em VV (especialmente no caso em que ocorrem duas reflexões).

Dielétricos com perdas

Neste caso as equações são bastante complexas :

$$r_{Ih}(\theta) = \frac{(p - \cos(\theta))^2 + q^2}{(p + \cos(\theta))^2 + q^2}$$

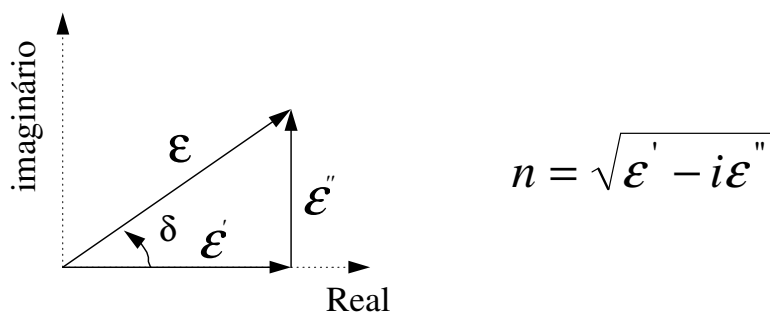
$$r_{Iv}(\theta) = \frac{(\epsilon_r' \cos(\theta) - p)^2 + (\epsilon_r'' \cos(\theta) - q)^2}{(\epsilon_r' \cos(\theta) + p)^2 + (\epsilon_r'' \cos(\theta) + q)^2}$$

com as abreviações

$$p = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \left[(\epsilon_r' - \sin^2(\theta) + \epsilon_r''^2)^{1/2} + [\epsilon_r' - \sin^2(\theta)] \right] \right\}^{1/2}$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \left[(\epsilon_r' - \sin^2(\theta) + \epsilon_r''^2)^{1/2} - [\epsilon_r' - \sin^2(\theta)] \right] \right\}^{1/2}$$

A constante dielétrica complexa é expressa em termos do índice de refração como:

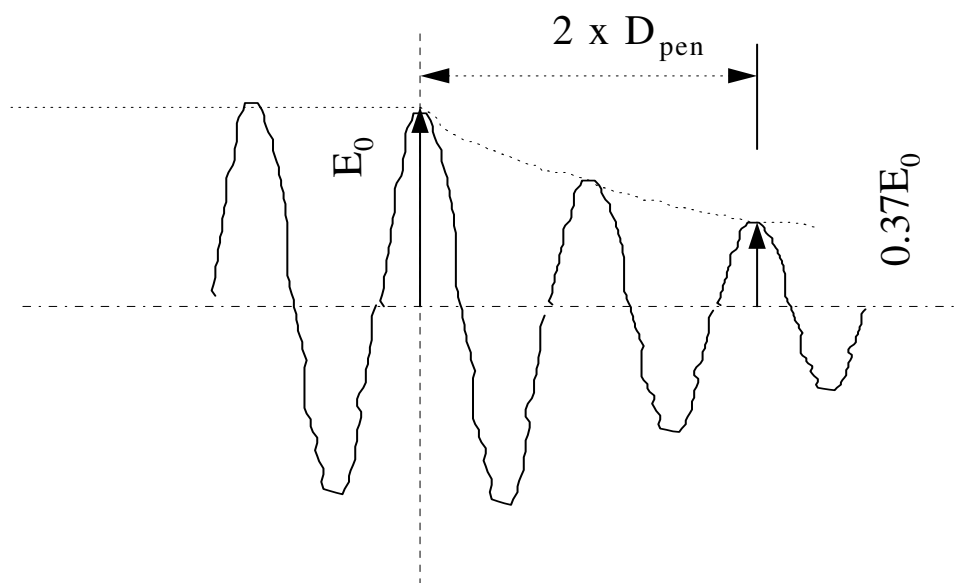


A quantidade complexa é necessária para descrever um campo elétrico propagando-se num meio e decaindo em amplitude (e potência) a medida em que energia é convertida em calor.

Tangente de perda e profundidade de penetração

A tangente de perda é definida como a razão entre a parte imaginária e a parte real:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$



Para o caso de materiais com fator de perda relativamente pequeno ($\tan \delta \ll 1$), define-se a profundidade de penetração

$$D_{pen} \approx \frac{\lambda}{\pi \tan \theta}$$

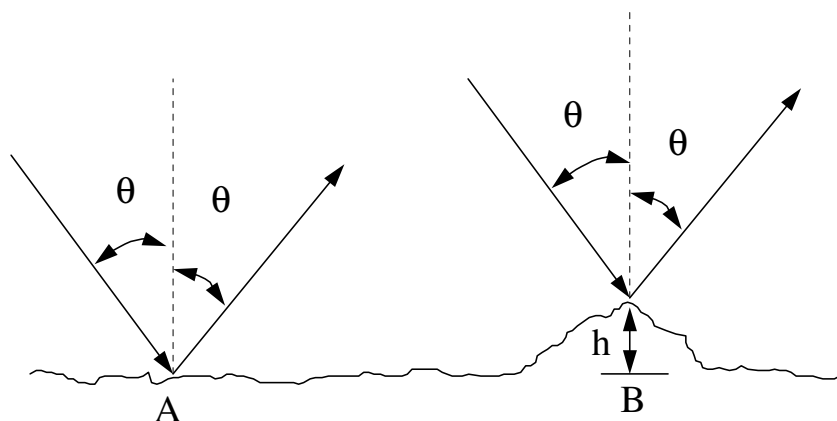
Para o caso de fator de perda elevado, utiliza-se o termo chamado “skin depth”, definido como

$$D_{skin} = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{2 \tan \delta}}$$

Mesmo para o caso de baixa perda, a penetração não é muito grande, geralmente menos que um comprimento de onda. Pode-se então fazer a seguinte observação:

SAR não penetra muito no alvo a menos que o mesmo seja muito, muito seco, ou que o comprimento de onda utilizado seja muito longo.

Rugosidade da Superfície



Uma superfície é considerada lisa (reflexão especular, como um espelho), se as irregularidades da superfície não distorcerem a fase da frente de onda eletromagnética de mais que $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda, ou $\lambda/4$. Isto corresponde a um erro máximo de fase de 90° ou $\pi/2$.

Neste caso, as ondas podem ainda se superpor na direção de reflexão especular ($\theta_r = \theta_i$) e a maior parte da energia estará na direção especular.

O erro máximo de fase introduzido por uma superfície com diferença máxima de altura h é:

$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\text{diferença de percurso}}{\lambda}$$

e, pela geometria da figura acima:

$$\Delta\phi = 2\kappa h \cos \theta$$

fazendo $\Delta\phi < \pi/2$,

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$$

Note-se que três variáveis estão envolvidas no critério de rugosidade (do ponto de vista de ondas de radar):

1. O comprimento de onda. Uma superfície pode ser lisa (refletor especular) para grandes comprimentos de onda e rugosa (refletor difuso) para pequenos comprimentos de onda.

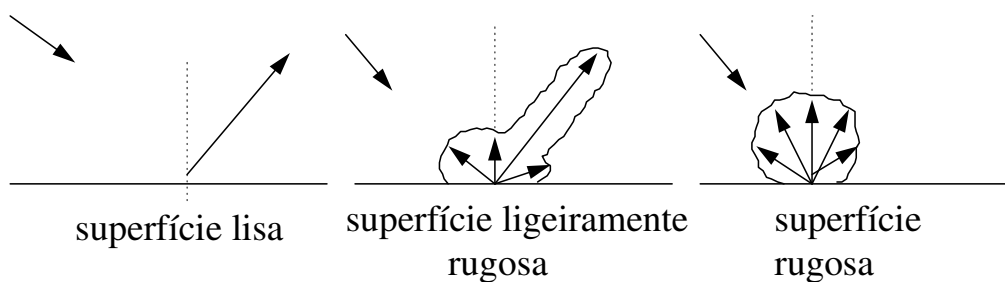
2. A altura das irregularidades. Normalmente se utiliza o desvio quadrático médio (δh_{rms}) em lugar da variação máxima (h). Uma regra prática é usar $\delta h_{\text{rms}} \sim 1/5$ de h , e então:

$$\delta h_{\text{rms}} < \frac{\lambda}{40 \cos \theta}$$

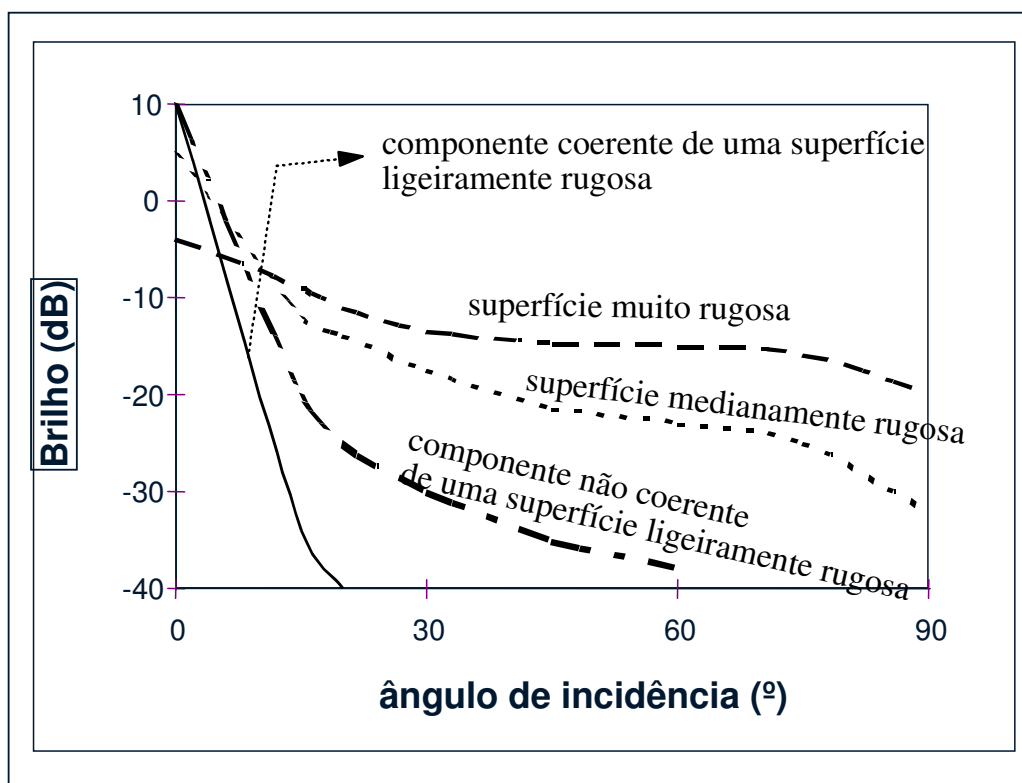
para ser um refletor especular

3. O ângulo de incidência. Para ângulos de incidência elevados, superfícies consideradas normalmente como refletores difusos podem se tornar especulares.

Superfícies rugosas refletem energia numa amplitude angular de direções bem maior que superfícies lisas. Estas superfícies são denominadas refletores difusos e geralmente aparecem mais brilhantes em imagens radar que superfícies lisas (a não ser que haja reflexão dupla). Muitas superfícies fazem parte do caso intermediário, com uma componente especular (para longe do radar) e outra difusa.

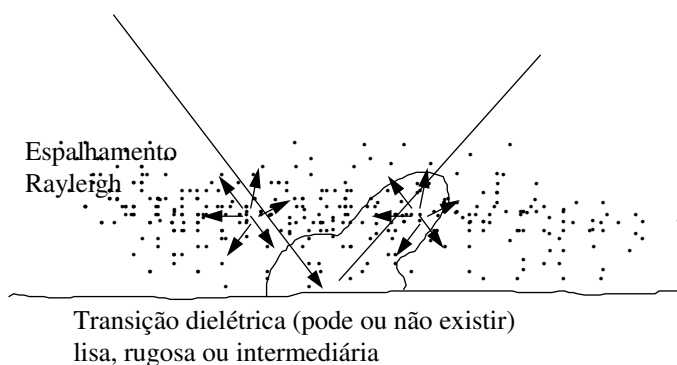


A figura abaixo representa a variação do brilho para superfícies com diferentes rugosidades em função do ângulo de incidência.



Espalhamento volumétrico

Espalhamento tipo Rayleigh

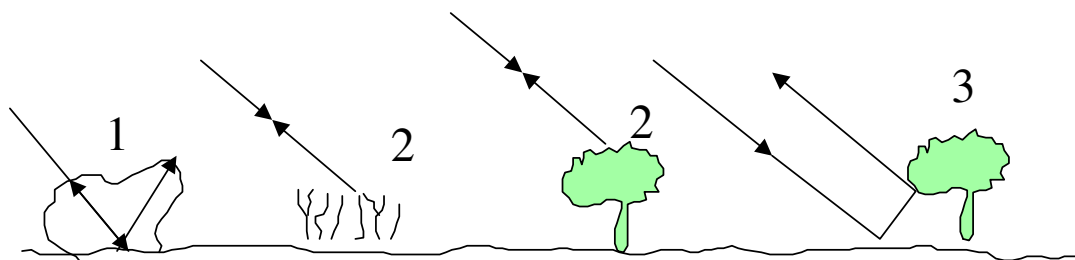


1. A eficiência do espalhamento é $\propto 1/\lambda^4$: é necessário usar comprimentos de onda curtos para detectar o meio difusor (teor de água de neve) e comprimentos longos se a penetração for o objetivo (areia no deserto).

2. O espalhamento em uma zona de transição dielétrica sob um meio difusor tipo “Rayleigh” depende da natureza da transição: lisa, rugosa ou intermediária. De todo modo a radiação refletida na zona de transição será re-espalhada pelo meio difusor no seu caminho de volta. O meio tipo “Rayleigh” atua como um atenuador, em primeira aproximação. As equações de transferência radiativa podem ser usadas neste caso para uma onda polarizada. Se não houver zona de transição, a radiação pode desaparecer no meio com uma pequena componente do espalhamento Rayleigh retornando ao Radar.

Espalhamento volumétrico - caso intermediário

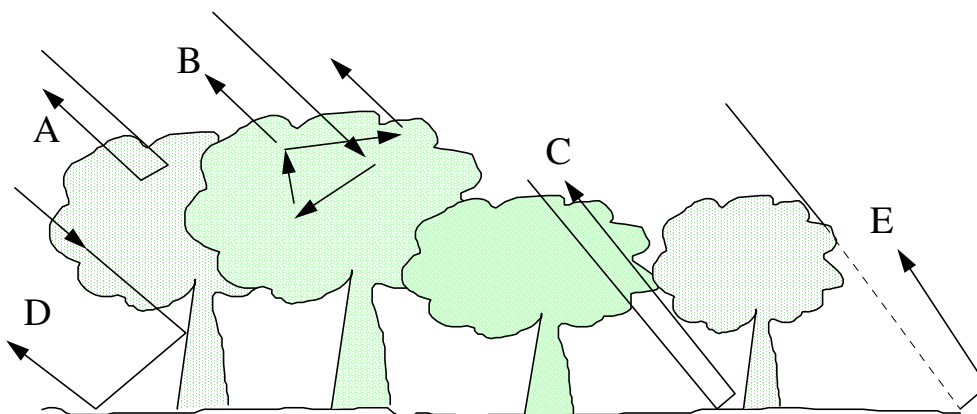
Culturas agrícolas e vegetação de pequeno porte e esparsa



Neste caso temos três importantes mecanismos de espalhamento:

1. Espalhamento difuso pela superfície do solo;
2. Espalhamento direto (“single bounce”) pelos componentes da vegetação;
3. Reflexão dupla (“double bounce”) pela interação vegetação-solo. Se a vegetação tem uma orientação preferencial (por exemplo, vertical para gramíneas), o retorno HH pode diferir do retorno VV. Mas a estrutura vertical não implica necessariamente que $VV > HH$ (Lembre-se do ângulo de Brewster!).

Espalhamento volumétrico - caso complexo



Podemos ter vários tipos de contribuição numa cena de floresta, como detalhado abaixo:

- Espalhamento direto no dossel da floresta (A);
- Espalhamento múltiplo e volumétrico no interior do dossel (B);
- Retroespalhamento na superfície do solo (C);
- Interação tronco-solo (ou água) (D);
- Sombra (E)

Exercício espalhamento radar

Para cada abaixo indique o mecanismo de espalhamento predominante: superfície lisa, superfície rugosa, volumétrico simples (“rayleigh”), espalhamento volumétrico - caso intermediário, espalhamento volumétrico - caso complexo, reflexão diédrica, reflexão triédrica. Indicar também como você esperaria que o alvo aparecesse (brilhante, médio, escuro) em uma imagem radar tomada em banda C, Polarização HH, ângulo de incidência = 45°.

1. Dunas de areia no deserto do Saara

2. Pasto limpo
3. Pasto sujo
4. Floresta primária da Amazônia
5. Paliteiros emergentes na represa de Balbina, ao norte de Manaus
6. Cerradão, próximo a Cuibá
7. Paliteiros submersos na represa de Tucuruí
8. Campo de soja recém plantado
9. Campo de soja com plantas de 15 cm de altura
10. Campo de soja com plantas de 45 cm de altura
11. Plantas aquáticas em Tucuruí
12. Floresta de várzea quando inundada
13. Floresta de várzea não inundada
14. Capoeira nova (~ 3 anos)
15. Capoeira antiga (~ 20 anos)
16. Tabuleiros de arroz antes do plantio e irrigação por inundação
17. Tabuleiros de arroz depois da inundação com plantas emergentes
18. Tabuleiros de arroz antes de cachear
19. Tabuleiros de arroz pronto para colheita
20. Tabuleiros de arroz após colheita
21. Manguezal na maré baixa
22. Manguezal na maré alta

23. Floresta primária aberta com predominância de bambu

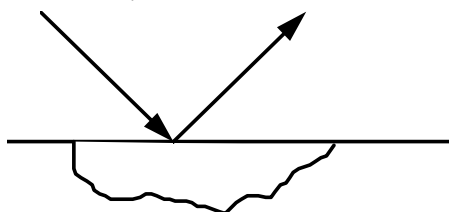
24. Pastagem com grande número de Babaçu (palmeira)

25. Caatinga

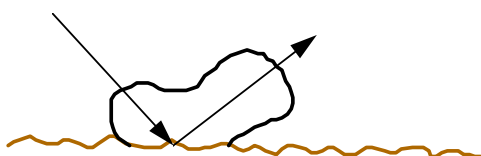
Considere uma castanheira em meio a uma pastagem na Amazônia. Seja a altura do tronco de 35 m e um (tipo esférico) de 10 m sobre o mesmo. Qual é a sombra projetada por ela para ângulos de incidência de 30° , 45° e 60° ?

Interação OEM terreno - resumo

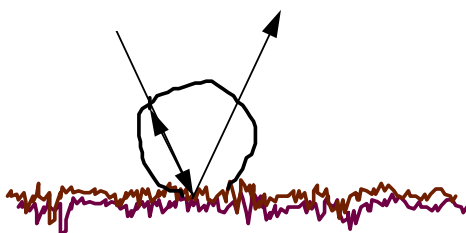
superfície calma de lagos,
rios,...



superfície lisa



superfície rugosa

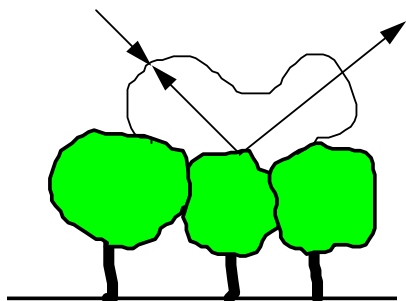


- reflexão especular
- retroespalhamento muito fraco
- Nivel de cinza muito baixo
- aparece muito escuro em imagens

- retroespalhamento fraco, maior parte é na direção especular
- NC baixo
- aparece escuro na imagem
- aumento da umidade (solos) faz aumentar o retorno

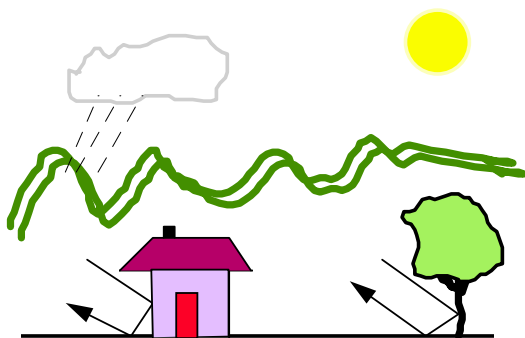
- retroespalhamento forte, distribuição tipo "lambertiana"
- NC elevado
- Pixel aparece claro
- aumento da umidade (solos) acarreta aumento no retroespalhamento

dossel de florestas



- espalhamento volumétrico e atenuação
- retroespalhamento médio
- NC médio
- tons cinza médio na imagem
- em caso de floresta inundada ocorre reflexão de canto, o que torna o pixel mais brilhante

edificações, troncos,...



- Reflexão de canto, muito comuns em áreas urbanas
- retroespalhamento muito forte
- NC elevado
- Pixel aparece brilhante na imagem