

6. FILTRAGEM DE FREQUÊNCIAS ESPACIAIS

6.1 Introdução

Em uma imagem qualquer de sensoriamento remoto, considerada em uma de suas bandas espectrais, observa-se que a intensidade de cinza, representada pelos DN's dessa imagem, varia bastante em função da distância. Ao se plotar essas variações em um gráfico como o da Figura 6.1, obtém-se geralmente uma curva complexa (Fig. 6.1a). Essa curva, por sua vez, pode ser decomposta em um conjunto de componentes senoidais (Fig. 6.1b), com diferentes frequências e amplitudes. Essas senóides fornecem uma idéia da **distribuição espacial de frequências** da imagem considerada. Nos gráficos da Figura 6.1, um caso hipotético é mostrado, em apenas uma dimensão, mas nas imagens de S.R. esse fenômeno é bidimensional.

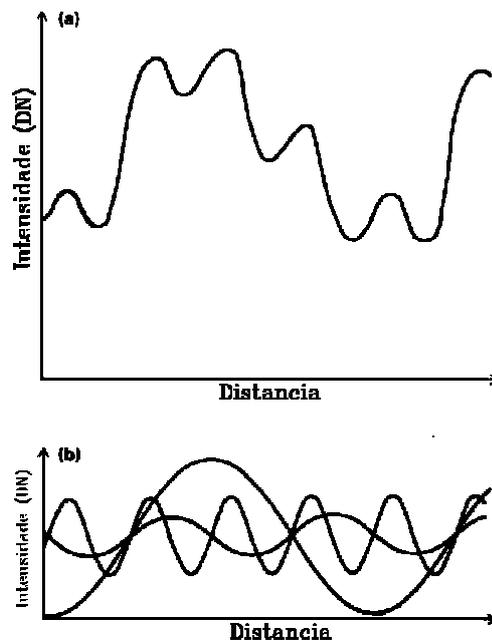


Figura 6.1 - As variações de DN ao longo de uma linha de uma imagem **(a)** podem ser expressas como várias componentes senóides **(b)**, com diferentes amplitudes e frequências (Modif. de Drury, 1989).

Todas as imagens possuem limites entre áreas com diferentes respostas em relação à energia eletromagnética. Esses limites podem ser, por exemplo, entre diferentes coberturas do terreno (solo, vegetação, rocha), ou podem representar o contato entre áreas com diferentes condições de iluminação, devido à sombra topográfico. Em uma imagem monocromática, esses limites representam portanto mudanças de um intervalo de DN's para outro. Ao se plotar esses limites em um gráfico como o da Figura 6.1, eles serão representados por um gradiente bastante inclinado, podendo chegar a vertical. Limites deste tipo são conhecidos como **bordas**. Eles ocupam geralmente áreas pequenas na imagem, sendo mais estreitos do que largos. Por variarem bastante em áreas pequenas, são chamados de **feições de alta frequência**, sendo representados na Figura 6.1a pelas senóides de pequena amplitude. Exemplos desse tipo de feição são limites entre diferentes tipos de plantações, entre áreas sombreadas e iluminadas, redes de transporte (malha urbana, rodovias, ferrovias), redes de drenagem, estruturas geológicas (falhas, fraturas) e outras.

Já limites gradacionais, que variam mais uniformemente com a distância, sendo conseqüentemente menos nítidos, são chamados de **feições de baixa frequência**. Estes são representados pelas senóides de grande amplitude na Figura 6.1b. Exemplos de feições de baixa frequência são dados por áreas monotonamente uniformes em imagens, tais como uma grande área de monocultura em terreno plano.

Percebe-se portanto que a noção de alta ou baixa frequência é uma função da escala da imagem. Ao se diminuir a escala, a frequência de um determinado tipo tende a se tornar maior e vice-versa.

Existe toda uma gama de frequências em praticamente qualquer imagem de S.R., das baixas, passando pelas médias e chegando até às altas frequências. Do ponto de vista de extração de informações a partir de imagens, as bordas normalmente são mais interessantes, representadas então pelas feições de alta frequência. Na seção anterior, foi visto que o olho humano é muito mais sensível a variações em intensidade do que a variações em cor. Uma outra característica do olho é que ele é **extremamente preciso na percepção de bordas**.

A enorme mistura de frequências em uma imagem dificulta sobremaneira a interpretação de feições com frequências específicas. Para contornar esse problema e melhorar a aparência da distribuição espacial das informações, são utilizadas técnicas de **filtragem espacial de frequências**. Estas consistem em realçar seletivamente as feições de alta, média ou baixa frequências que compõem as imagens de sensoriamento remoto.

De maneira geral, as filtragens espaciais são úteis em processamento de imagens de S.R. para realçar **bordas, feições lineares de determinadas direções e padrões de textura**. Isso tudo é feito através do realce ou da supressão de determinadas frequências espaciais.

Pelo exposto acima, fica claro que as bordas e essas outras feições não podem ser detectadas a partir da análise isolada do nível de cinza um único pixel. Ao contrário, pode-se dizer que a existência dessas feições é expressa pela **diferença entre as intensidades de pixels vizinhos**. Trata-se fundamentalmente de uma **operação de área** ou **de vizinhança**, ao contrário das operações pontuais como as usadas pelas técnicas de aumento de contraste vistas anteriormente.

Existem duas maneiras de se implementar as técnicas de filtragem de frequência: o processo conhecido por **convolução**, que opera no domínio espacial de uma imagem, ou a **Análise de Fourier**, que opera no domínio das frequências que compõem a imagem. A filtragem no domínio de frequências é sem dúvida mais poderosa e precisa, mas é também muito mais complexa. A convolução, por sua vez, é mais simples e fácil de implementar, atendendo satisfatoriamente à grande maioria das necessidades em termos de imagens de S.R. A maioria dos sistemas de processamento de imagens utiliza filtragem por convolução e, por isso, apenas esta última será aqui abordada.

São três os tipos básicos de filtros de convolução: filtros **passa baixas**, **passa altas** e **direcionais**. Um quarto tipo, o filtro **passa banda**, é geralmente menos utilizado em filtragem por convolução, por ser de difícil implementação, sendo mais comum nas filtrações executadas no domínio das frequências.

6.2 Filtragem com a janela móvel

Antes de abordar os tipos de filtros propriamente ditos, faz-se necessário entender a maneira pela qual operam os filtros de convolução em uma imagem. Para isso, examinemos o conceito de **janela móvel** ou **máscara**. A Figura 6.2 mostra uma imagem de entrada **A**, submetida à filtragem por convolução através de uma janela **M** de dimensões 3x3 pixels, para produzir uma imagem de saída **B**. Cada cela da imagem de entrada tem o seu valor próprio de DN e as 9 celas da janela de filtragem possuem também seus valores pré-definidos, conforme será visto mais adiante nesta seção.

A forma pela qual a janela móvel opera é a seguinte: primeiramente posiciona-se a janela sobre o canto superior esquerdo da imagem, multiplicando-se cada DN das 9 celas desta pelo respectivo valor das 9 celas da janela; em seguida, substitui-se o valor do pixel central dessa área da imagem (no caso, o pixel da 2ª linha/2ª coluna) pela soma desses 9 valores, encontrando-se então o novo valor do pixel correspondente da imagem de saída. O próximo passo é mover a janela um pixel ao longo da linha e fazer novamente essa mesma operação, encontrando-se então o valor do pixel correspondente à 2ª linha/3ª coluna da imagem de saída. Essa operação é feita portanto **pixel-a-pixel** para a imagem toda, sempre recalculando o novo valor do pixel em função dos seus 8

vizinhos mais próximos, no caso da janela ter uma dimensão de 3x3, ou dos seus 24 vizinhos no caso da janela ter dimensão 5x5.

Em filtragens digitais pode-se usar teoricamente filtros de quaisquer dimensões, embora os programas de processamento de imagens disponíveis geralmente limitem as dimensões a, no máximo, 11x11 elementos, por problemas computacionais. Outro ponto diz respeito à forma do filtro, que tanto pode ser unidimensionais, em forma de **linha ou coluna**, quanto bidimensionais, em forma de **quadrado** (também chamado filtro "**box**") ou do sinal "+" (também chamado de "**plus-shaped**").

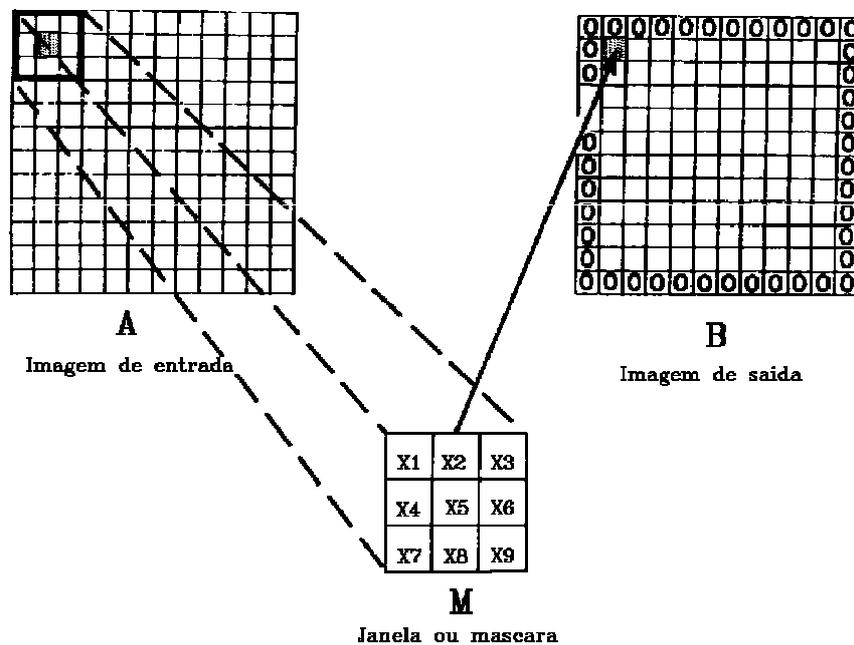


Figura 6.2 - Esquema da janela móvel para filtragem de uma imagem por convolução. **A** e **B** são as imagens de entrada e saída, respectivamente, e **M** é a máscara ou janela, de dimensões 3x3 pixels. O DN do pixel central da imagem de saída é calculado multiplicando-se os valores X1, X2, ..., X9 (pêsos) da máscara pelos valores de DN dos nove pixels da imagem de entrada e somando-se os resultados.

A imagem de saída produzida pela filtragem mostrada na Figura 6.2 possui os valores dos pixels situados nas suas bordas iguais a zero. Isso é devido ao chamado **efeito de bordas**, provocado pelo fato de que a primeira posição da janela móvel em que a máscara pode ser aplicada, no caso desta ter 3x3 elementos, é o segundo pixel da segunda coluna. Esse fato ocorre em todas as bordas da imagem, cujos valores de intensidade são então substituídos por zeros. Note-se que, no caso de uma máscara de 5x5 elementos, as bordas terão 2 linhas e 2 colunas.

Pode-se notar portanto que operações de filtragem por convolução são bastante intensivas do ponto de vista da quantidade de cálculos necessários, motivo pelo qual são geralmente demoradas em sistemas de processamento de imagens. Por isso, deve-se tomar um certo cuidado de planejar cuidadosamente as filtragens a serem aplicadas, tentar implementá-las usando máscaras de dimensões pequenas (3x3 ou 5x5) e em imagens igualmente de pequenas dimensões (1024x1024 pixels).

Outro detalhe a respeito das operações de filtragem por convolução é que elas produzem geralmente uma imagem com baixo contraste, necessitando a aplicação de técnicas de aumento de contraste. Estas podem ser de quaisquer tipos, dentre os já tratados anteriormente, sendo o aumento linear de contraste a mais comum.

6.3 Filtros passa baixas ou de suavização

O nome **passa baixas** ou de **suavização** (do termo inglês "*smoothing*") advém do fato que esse tipo de filtro elimina as altas frequências da imagem, deixando "passar" somente as baixas frequências. A maior utilização dos filtros passa baixas é na remoção de ruídos eletrônicos, comuns em imagens de S.R. O grande problema desse tipo de filtro é que o efeito colateral produzido equivale a "desfocar" a imagem toda e, conseqüentemente, perder informações de detalhe. Todavia, existem alguns tipos de filtros passa baixas que permitem a retenção de detalhes ou bordas. Nesse tipo de filtro a soma dos pesos usados na máscara é sempre igual a 1. Outra característica deles é que o efeito de suavização ou "desfocagem" aumenta proporcionalmente à dimensão da máscara usada, de tal forma que uma máscara 9x9 vai produzir uma imagem muito mais desfocada do que uma máscara equivalente de dimensões 3x3.

Alguns dos tipos mais comuns de filtros dessa família são apresentados a seguir.

6.3.1 Filtro de Média

Esse é um dos tipos mais simples de filtros passa baixas e o seu efeito é o de substituir o DN do pixel original pela média aritmética do pixel e seus vizinhos. Uma máscara de dimensões 3x3 teria então os seguintes pesos:

máscara quadrada	máscara "+"
1/9 1/9 1/9	1/5
1/9 1/9 1/9	1/5 1/5 1/5
1/9 1/9 1/9	1/5

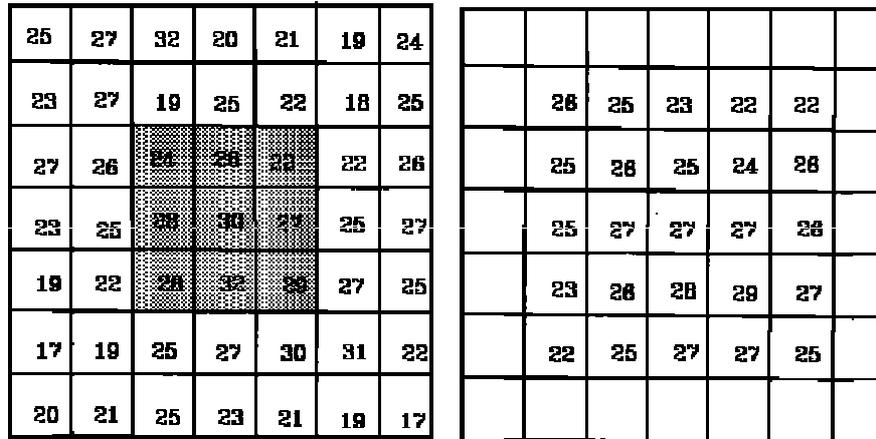
Um exemplo da maneira como o filtro de média atua na imagem é mostrado na Figura 6.3, para a máscara quadrada de 3x3 acima.

6.3.2 Filtro de Média Ponderada

Nesse tipo de filtro passa baixas, uma média ponderada é usada, na qual os pesos são definidos em função de sua distância do peso central. Filtros desse tipo de dimensões 3x3 são:

máscara quadrada	máscara "+"
1/16 1/8 1/16	1/6
1/8 1/4 1/8	1/6 1/3 1/6
1/16 1/8 1/16	1/6

O efeito de suavização é menos intenso neste caso, uma vez que o peso do pixel central é proporcionalmente maior do que no filtro de média.



$$\text{Pixel Central} = 1/9 \begin{bmatrix} 24 + 26 + 22 \\ + 28 + 30 + 27 \\ - 28 + 32 + 23 \end{bmatrix} = 27$$

Figura 6.3 - Exemplo de um filtro de média (passa baixas) quadrado de 3x3 atuando na imagem original à esquerda, para produzir a imagem filtrada direita. Notar que na imagem filtrada os pixels das bordas da imagem não são considerados, pois não possuem todos os 8 vizinhos necessários para o cálculo. É mostrado na parte inferior da figura o cálculo necessário para se determinar o novo valor de DN do pixel central da imagem filtrada.

6.3.3 Filtro de Moda

Considerando-se uma máscara de dimensões pré-definidas (digamos 3x3), o pixel central seria substituído pelo valor de DN mais comum dentro da máscara. No exemplo da Figura 6.3, o pixel central da imagem original seria substituído pelo DN=28, que ocorre duas vezes. Este tipo filtro é bastante útil para "limpar" pixels isolados em imagens representando resultados de classificação estatística multi-espectral.

6.3.4 Filtro de Mediana

Neste tipo de filtro passa baixas, o pixel central da máscara é substituído pela mediana dos seus vizinhos. A mediana de um conjunto de, digamos, 9 números (de uma máscara 3x3) representa neste caso o DN intermediário do conjunto. No exemplo da Figura 6.3, a mediana do pixel central seria igual a 28. Embora seja um filtro de implementação algo complexa, devido à necessidade de um ordenamento dos valores, o filtro de Mediana é um dos filtros de suavização que **melhor preserva as bordas em uma imagem.**

6.4 Filtros passa altas ou de realce de bordas

São filtros que eliminam as feições de baixa frequência, deixando apenas as de alta frequência, normalmente expressas por bordas ou limites entre áreas de diferentes valores de DN. Considerando que uma imagem é composta pela soma de suas componentes de alta e baixa frequência, conforme mostrado na Figura 6.1, a maneira mais simples de obter uma filtragem passa altas é **subtraindo a imagem suavizada (passa baixas) da imagem original**.

Assim como nos filtros de suavização, a dimensão da máscara de convolução influencia no resultado final. Neste caso, porém, quanto menor a máscara, menores serão os detalhes a serem realçados na imagem. Portanto, no caso de se desejar realçar feições lineares extensas, como por exemplo falhas geológicas, máscaras de grandes dimensões são as mais indicadas. Como regra geral, um filtro passa altas normalmente vai realçar feições de dimensões **menores do que a dimensão da máscara usada**. Por exemplo, para realçar lineamentos geológicos com cerca de 3 quilômetros de extensão em uma imagem TM (onde o pixel tem 30 metros), o ideal é usar uma máscara de dimensões 31x31 pixels!

Os tipos mais comuns de filtros passa altas encontram-se a seguir.

6.4.1 Filtros Laplacianos

São úteis na detecção de bordas e geralmente a soma dos pesos usados na máscara é igual a zero. Existe uma infinidade de tipos de filtros Laplacianos, sendo mais comuns os seguintes:

$$\begin{array}{ccc}
 0 & -1 & 0 \\
 -1 & 4 & -1 \\
 0 & -1 & 0
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 -1 & -1 & -1 \\
 -1 & 8 & -1 \\
 -1 & -1 & -1
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 1 & -2 & 1 \\
 -2 & 4 & -2 \\
 1 & -2 & 1
 \end{array}$$

6.4.2 Filtros Laplacianos+Original

As imagens produzidas por filtragem passa altas, embora ricas em informação textural, são geralmente muito pobres em contraste, com pouca informação tonal, sendo portanto de difícil interpretação. Uma maneira de se manter o contraste da imagem original, e conseqüentemente a informação tonal, ao mesmo tempo em que se tenha o realce de bordas, é **adicionar** a imagem filtrada à imagem original. Esse processo pode ser aplicado, por exemplo, a 3 bandas TM as quais, após um aumento de contraste adequado, produzem um

excelente produto para interpretação visual, contendo a informação tonal expressa por cores e toda a informação textural e de bordas.

Isso pode na verdade ser feito em uma única etapa de filtragem, através do assim chamado **filtro Laplaciano+original**. Para isso, toma-se as máscaras mostradas acima e adiciona-se **a unidade** ao valor central da máscara, as quais passariam então a ser:

$$\begin{array}{ccc}
 0 & -1 & 0 \\
 -1 & 5 & -1 \\
 0 & -1 & 0
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 -1 & -1 & -1 \\
 -1 & 9 & -1 \\
 -1 & -1 & -1
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 1 & -2 & 1 \\
 -2 & 5 & -2 \\
 1 & -2 & 1
 \end{array}$$

Para se obter bons resultados neste tipo de filtragem, o ideal é adicionar a imagem original com um peso muito maior do que a versão filtrada. Desse modo, em vez do valor central da máscara ser 5, ele deve variar de 10 a 15, dependendo das características da imagem sendo filtrada. Um pouco de experimentação com esses valores é recomendável.

6.5 Filtros direcionais

Estes filtros são um tipo especial de filtro passa altas, que possuem a característica de realçar bordas em direções pré-determinadas. Eles são na verdade uma combinação de filtragem passa altas e limiarização de níveis de cinza. Os filtros direcionais podem ter apenas uma dimensão (horizontal ou em linha e vertical ou em coluna). O problema com este tipo de filtro é que muitas vezes eles produzem bordas artificiais, também chamadas de **artefatos**, que podem confundir o intérprete, fazendo-o pensar que se trata de uma feição verdadeira. Exemplos desse tipo de filtro unidimensionais (1x2) são:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{vertical} & & \text{horizontal} \\
 \\
 1 & & -1 \quad 1 \\
 -1 & &
 \end{array}$$

Os filtros direcionais podem também ser quadrados, existindo diversos tipos deles. Os mais comuns são:

Filtros de Roberts

$$\begin{array}{ccc}
 0 & -1 & -1 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 1
 \end{array}$$

Filtros de Sobel

N-S	NE-SW	E-W	NW-SE
1 2 1	0 1 2	-1 0 1	-2 -1 0
0 0 0	-1 0 1	-2 0 2	-1 0 1
-1 -2 -1	-2 -1 0	-1 0 1	0 1 2

Filtros de Prewitt

N-S	NE-SW	E-W	NW-SE
1 1 1	1 1 1	-1 1 1	-1 -1 1
1 -2 1	-1 -2 1	-1 -2 1	-1 -2 1
-1 -1 -1	-1 -1 1	-1 1 1	1 1 1

Nota-se que, ao contrário dos filtros normais de detecção de bordas, os direcionais possuem seus pesos distribuídos assimetricamente ao redor de um eixo hipotético. **As direções a serem realçadas são paralelas à esse eixo hipotético**, sendo que o realce se dá num intervalo de 45° para ambos os lados em relação à direção de realce.

6.6 Remoção de ruído por convolução

As imagens digitais geradas por sensores remotos possuem frequentemente imperfeições que são inerentes ao processo de imageamento e transmissão. Esse ruído não só representa um fator visualmente desagradável em uma imagem, mas também pode afetar algumas técnicas de processamento de imagens, as quais são muitas vezes sensíveis à esse tipo de erro. A remoção desse ruído pode ser feita por filtragem de frequências.

O ruído conhecido por "*drop-out*" é provavelmente o mais comum, e também o mais óbvio dos encontrados em imagens de S.R. Ele aparece como um valor anômalo, muito mais claro ou escuro do que o "*background*" local. Muitas vezes esse tipo de ruído nem é tão óbvio mas aparecerá nitidamente em consequência de alguns tipos de processamento (por exemplo, razão de bandas e análise por principais componentes). O método mais comum de eliminá-lo é usando um filtro de média, com a desvantagem porém que as bordas presentes na imagem serão igualmente suavizadas. Resultados geralmente melhores podem ser obtidos com um filtro de Mediana, pois um pixel com ruído tipo "*drop-*

out" será substituído pela mediana em relação aos DN's do pixels vizinhos. Além das imagens originais, imagens transformadas por técnicas de processamento tais como razão de bandas ou principais componentes, que exibem geralmente muito ruído, podem ser visualmente melhoradas através da aplicação do filtro de média ou de mediana.

Um ponto importante ao se usar filtros para remoção de ruídos: assim como o ruído, o valor de DN obtido para o pixel defeituoso **não é verdadeiro**, mas sim uma simples aproximação. Desse modo, algum cuidado é necessário com os resultados de, por exemplo, classificação multi-espectral realizada sobre bandas filtradas para remoção de ruídos.