



República Federativa do Brasil  
Ministério de Desenvolvimento, Indústria  
e Comércio Exterior  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(21) PI 0808276-6 A2**



(22) Data de Depósito: 20/03/2008  
**(43) Data da Publicação: 22/07/2014**  
**(RPI 2272)**

**(51) Int.Cl.:**  
**G06T 5/50**

**(54) Título:** "MÉTODO IMPLEMENTADO EM COMPUTADOR PARA PROCESSAR IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR) E SISTEMA COMPUTADORIZADO PARA PROCESSAR IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR) COMPLEXAS"

**(57) Resumo:**

**(30) Prioridade Unionista:** 22/03/2007 US 11/689,616

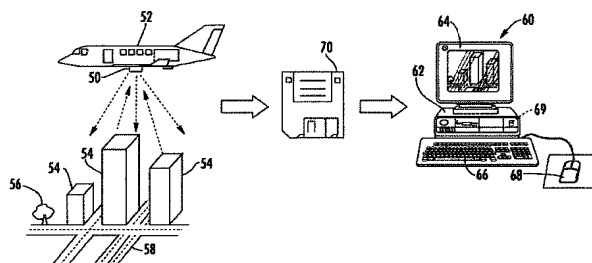
**(73) Titular(es):** HARRIS CORPORATION

**(72) Inventor(es):** EMILE GANTHIER, JOSEF ALLEN, KENNETH SARTOR

**(74) Procurador(es):** DAVID DO NASCIMENTO  
ADVOGADOS ASSOCIADOS

**(86) Pedido Internacional:** PCT US08057624 de 20/03/2008

**(87) Publicação Internacional:** WO 2008/116050de  
25/09/2008



MÉTODO IMPLEMENTADO EM COMPUTADOR PARA PROCESSAR  
IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR) E SISTEMA  
COMPUTADORIZADO PARA PROCESSAR IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA  
SINTÉTICA (SAR) COMPLEXAS

5           A presente invenção refere-se ao campo de  
processamento de imagens, e mais particularmente ao  
processamento de imagens de radar de abertura sintética  
(SAR).

10           A resolução de dados SAR não é comparável à  
resolução dos dados eletro-ópticos (EO). Os sensores EO  
incluem dispositivos fotográficos e outros dispositivos  
ópticos de formação de imagem, tais como coletores de  
detecção e variação da luz (LIDAR). Os sensores EO são  
15           passivos, uma vez que eles capturam a refletividade da luz  
das cenas para formar imagens fotográficas das mesmas. No  
entanto, os sensores EO são limitados pelo horário do dia e  
pelas condições atmosféricas.

20           Um radar de abertura sintético (SAR) é vantajoso,  
uma vez que as imagens podem ser adquiridas de dia ou à  
noite, bem como sob condições meteorológicas inclementes. Um  
SAR é ativo, uma vez que ele registra a radiação para retro-  
difusão dos sinais de rádio-frequência (RF) para gerar  
imagens SAR. Cada célula de resolução SAR tem geralmente  
muitos difusores. As fases dos sinais de retorno destes  
25           difusores são distribuídas aleatoriamente, e a interferência  
resultante causa salpicos.

30           Os salpicos conferem uma aparência granulosa na  
imagem detectada que é vista no final, e desse modo uma  
resolução mais baixa quando comparada a uma imagem EO. Os  
salpicos impõem uma limitação significativa na exatidão das  
medições que podem ser feitas. Por exemplo, a mensuração é  
frequentemente inclusiva nos dados SAR. A interferência de  
lobo lateral também cria uma aparência ruidosa nos dados SAR.

Além disso, o mau funcionamento do hardware ou a interferência de rádio podem diminuir a fidelidade dos dados SAR.

Os dados SAR estão sendo tratados atualmente com  
5 alguma forma de apodização em que os lobos principal e laterais são removidos. No entanto, a apodização faz com que os dados SAR pareçam binários. Isto também resulta em uma imagem detectada com uma aparência granulosa. Os dados SAR também estão sendo tratados com filtros de baixa passagem,  
10 tal como a ponderação de Taylor. No entanto, os difusores podem ficar borrados conjuntamente, resultando uma resolução reduzida. Em consequência das abordagens atuais utilizadas para tratar os dados SAR, determinadas aplicações de análise podem ser inclusivas, incluindo o registro, a detecção de  
15 estrada, a detecção de mudança, a extração de elevação e a mensuração.

Para as imagens SAR que contêm salpicos, um objetivo de realce consiste em remover os salpicos sem destruir características importantes da imagem. O brilho de  
20 um pixel é determinado não somente pelas propriedades dos difusores na célula de resolução, mas também pelas relações de fases entre os retornos destes difusores. Em determinadas aplicações, no entanto, a remoção dos salpicos pode ser contraproducente. Um exemplo em que a preservação dos  
25 salpicos é importante é onde a detecção das características é da mesma escala que os padrões de salpico. Uma técnica conhecida para remover salpicos dos dados SAR, bem com realçar a resolução, é a aplicação de algoritmos de difusão anisotrópica.

30 Uma abordagem para remover salpicos dos dados SAR é apresentada no artigo intitulado "Difusão Anisotrópica de Redução de Salpico", da autoria de Yu et al. Uma abordagem de equação diferencial parcial (PDE) é utilizada para a remoção

do salpico. Particularmente, um espaço em escala de imagem é gerado, o qual é um conjunto de imagens filtradas que variam de finas a grossas. Uma outra abordagem é apresentada no artigo intitulado "Remoção de Salpico por Difusão Anisotrópica Para Imagens SAR de Alta Resolução", da autoria de Xi et al. Um algoritmo de filtragem de difusão não-linear baseado em um esquema de distintização, isto é, um esquema de separação de operador aditivo (AOS), é aplicado nos dados de imagens distintas. Embora ambas estas abordagens resultem em uma melhora na resolução dos dados SAR pela redução do ruído e preservação das bordas, ainda existe uma demanda para fazer com que os dados SAR se pareçam mais como dados EO de alta resolução.

Em vista dos antecedentes expostos acima, portanto, um objetivo da presente invenção consiste em melhorar a resolução de dados SAR para que se pareçam mais como dados EO.

Este e outros objetivos, características e vantagens de acordo com a presente invenção são providos por um método implementado em computador para processamento das imagens de radar de abertura sintética (SAR), o qual compreende a determinação do ruído em uma imagem SAR a ser processada, a seleção de um limite de ruído para a imagem SAR com base no ruído determinado, e o ajuste matemático de um algoritmo de difusão anisotrópica com base no limite de ruído selecionado. O algoritmo de difusão anisotrópica ajustado é aplicado à imagem SAR.

O ruído pode ser determinado com base na análise estatística dos valores do gradiente da imagem SAR. A análise estatística pode ser baseada em um desvio padrão dos valores do gradiente mais uma constante, por exemplo. Alternativamente, o ruído pode ser determinado com base em um esquema de janelas de Fourier ou em uma decomposição de

ondulações.

O algoritmo de difusão anisotrópica pode ser baseado em uma equação de calor que compreende um termo não-constante. O ajuste matemático do algoritmo de difusão  
5 anisotrópica pode compreender o ajuste do termo não-constante com base no limite de ruído selecionado. Ao ajustar o termo não-constante, é vantajosamente possibilitado para que a equação de calor seja adaptada aos dados SAR que estão sendo processados. Em consequência disto, uma classe de funções  
10 pode ser criada para obter os resultados desejados, em que cada função corresponde aos dados específicos SAR que estão sendo processados. As séries de dados SAR discrepantes podem ser mais bem processadas ao melhorar a resolução da imagem SAR visualizada.

15 Um outro aspecto da invenção refere-se a um algoritmo de difusão anisotrópica complexo. As equações para o algoritmo de difusão anisotrópica acima descrito foram re-derivadas para dados complexos de modo que o processo ficasse agora não-linear. Em termos de dados complexos, os  
20 componentes reais e imaginários de um conjunto de dados SAR são processados em um mesmo tempo. Uma vez que os componentes reais e imaginários do conjunto de dados SAR estão sendo tratados como um objeto complexo, o algoritmo de difusão anisotrópica complexo pode retirar o conteúdo da cena dos  
25 dados extremamente ruidosos, o que melhora por sua vez a resolução da imagem SAR visualizada.

Um método implementado por computador para processar imagens SAR complexas compreende a recepção de um conjunto de dados SAR complexos para uma imagem SAR que  
30 compreende uma pluralidade de pixels, e a aplicação do algoritmo de difusão anisotrópica complexo à série de dados SAR complexos. O conjunto de dados SAR complexos compreende uma parte real e imaginária para cada pixel. Se o conjunto de

dados SAR complexos for recebida no espaço da frequência, o espaço da frequência é convertido em espaço da imagem. O espaço da frequência corresponde à fase e à intensidade para cada pixel, e o espaço da imagem corresponde à fase e à amplitude para cada pixel.

O algoritmo de difusão anisotrópica complexo também pode ser utilizado no processamento interferométrico de dados SAR, particularmente para medições do abrandamento em áreas urbanas, por exemplo. O abrandamento é um deslocamento do terreno em que a elevação da superfície da terra está diminuindo em relação ao nível do mar.

Um método implementado por computador para processamento interferométrico de imagens SAR compreende a recepção de primeiro e segundo conjuntos de dados SAR complexos de uma mesma cena, com o segundo conjunto de dados SAR complexos sendo deslocado em fase com respeito ao primeiro conjunto de dados SAR complexos. Cada conjunto de dados SAR complexos pode compreender uma pluralidade de pixels. Um interferograma é formado com base no primeiro e segundo conjuntos de dados SAR complexos para prover uma diferença de fase entre os mesmos. O algoritmo de difusão anisotrópica complexo é aplicado ao interferograma, em que o interferograma compreende uma parte real e imaginária para cada pixel. Um filtro de choque é aplicado ao interferograma.

O algoritmo de difusão anisotrópica complexo mitiga localmente o ruído enquanto que ao mesmo tempo preserva as descontinuidades da cena no interferograma. O filtro de choque é utilizado para remover borrões da imagem. A suavização não-linear através do algoritmo anisotrópica complexa e do realce do limite através do filtro de choque aumenta a exatidão e a qualidade da medição da diferença de fase. Uma vez que o abrandamento é medido ao utilizar objetos persistentes na cena (isto é, edifícios) como pontos de

referência, a melhora da qualidade do limite dos objetos persistentes melhora a medição do abrandamento.

O método também pode compreender a execução de um desenrolamento de fase variacional bidimensional no interferograma após a aplicação do filtro de choque. A diferença de fase entre as duas imagens SAR registradas é relacionada a uma quantidade física desejada de interesse, tal como a topografia da superfície. A diferença de fase pode ser registrada apenas no modulo 2B, e as técnicas interferométricas atuais recuperam principalmente a fase absoluta (a fase desmembrada) daquela registrada (fase enrolada) ao utilizar valores distintos que têm uma tendência de suavizar os dados.

O algoritmo de desenrolamento de fase variacional de acordo com a presente invenção pode ser baseado em uma função de custo para controlar a suavização. Ao invés de prover uma suavização global baseada nas propriedades dos dados, o algoritmo de desenrolamento de fase variacional deixa bordas intactas e suaviza seletivamente a área adjacente às bordas. Em consequência disto, o processamento interferométrico dos dados SAR com base no algoritmo de difusão anisotrópica complexo, no filtro de choque e no desenrolamento de fase variacional melhoram coletivamente a qualidade do limite, o que melhora por sua vez a medição do abrandamento.

O algoritmo de difusão anisotrópica também pode ser utilizado na compressão e descompressão de imagens SAR. Uma vantagem da aplicação do algoritmo de difusão anisotrópica é que o tamanho da imagem SAR após a compressão resulta em um arquivo com um tamanho menor, independentemente do esquema da compressão utilizado. Em termos de descompressão de uma imagem SAR, ao comprimir dinamicamente os dados SAR, quantificar esses dados, e então descomprimir com o algoritmo

de difusão anisotrópica um arquivo de tamanho menor também é obtido. Quanto maior a escala dinâmica melhor a relação de compressão. Em consequência disto, o armazenamento e a transmissão das imagens SAR comprimidas e descomprimidas com base no algoritmo de difusão anisotrópica ocupam menos espaço e largura de faixa.

O algoritmo de difusão anisotrópica também pode ser utilizado na extração de elevação e no registro para imagens SAR. Um método implementado por computador para registrar 10 imagens SAR compreende a seleção de primeira e segunda imagem SAR a serem registradas, o processamento individual da primeira e segunda imagem SAR selecionadas com um algoritmo de difusão anisotrópica, e o registro da primeira e segunda imagem SAR após o processamento. O método também pode 15 compreender a aplicação de um filtro de choque às respectivas primeira e segunda imagens SAR processadas antes do registro. Este esquema propicia uma exatidão maior para o registro da imagem SAR, o que permite por sua vez que os dados da elevação sejam melhor extraídos com base nas imagens SAR 20 registradas.

Ainda uma outra aplicação do algoritmo de difusão anisotrópica e de um filtro de choque é com respeito à extração de vetor e estrada para a classificação material. Um método implementado por computador para a extração do vetor 25 em imagens SAR compreende a seleção de uma imagem SAR para a extração do vetor, o processamento da imagem SAR selecionada com um algoritmo de difusão anisotrópica, e a extração os dados do vetor com base na imagem SAR processada. O filtro de choque pode ser aplicado à imagem SAR processada antes da 30 extração. Os dados da imagem da estrada podem então ser extraídos com base nos dados de vetor extraídos. Os dados são delineados desse modo ao utilizar um esquema coerente do algoritmo de difusão anisotrópica. Este esquema propicia uma

exatidão maior para a extração da estrada.

A FIGURA 1 é um diagrama de blocos esquemático da coleta e processamento de imagens SAR de acordo com a presente invenção.

5 As FIGURAS 2 e 3 são os respectivos gráficos da distribuição de intensidades de pixel e de valores de gradiente para um conjunto de dados SAR de acordo com a presente invenção.

10 A FIGURA 4 é uma imagem do conjunto de dados SAR que corresponde aos gráficos mostrados nas FIGURA 2 e 3.

A FIGURA 5 é uma imagem dos gradientes que correspondem aos gráficos mostrados nas FIGURAS 2 e 3.

15 A FIGURA 6 é uma imagem dos gradientes realçados com um esquema de ponderação de acordo com a técnica anterior.

A FIGURA 7 é a mesma imagem dos gradientes mostrados na FIGURA 6 realçados com um algoritmo de difusão anisotrópica de acordo com a presente invenção.

20 A FIGURA 8 é uma imagem original antes da filtragem de acordo com a presente invenção.

As FIGURAS 9, 10 e 11 são imagens que correspondem à imagem original mostrada na FIGURA 8 após a filtragem de acordo com a técnica anterior.

25 A FIGURA 12 é uma imagem que corresponde à imagem original mostrada na FIGURA 8 após a filtragem com um algoritmo de difusão anisotrópica de acordo com a presente invenção.

A FIGURA 13 é uma imagem original antes da filtragem de acordo com a presente invenção.

30 A FIGURA 14 é uma imagem que corresponde à imagem original mostrada na FIGURA 13 após a filtragem com um algoritmo de difusão anisotrópica complexa de acordo com a presente invenção.

A FIGURA 15 é um fluxograma que ilustra o processamento interferométrico não-linear de dados SAR para medições do abrandamento de acordo com a presente invenção.

5 A FIGURA 16 é uma imagem multi-espectral de vetor aproximado original antes da aplicação de um filtro de choque de acordo com a presente invenção.

A FIGURA 17 é uma imagem que corresponde à imagem original mostrada na FIGURA 16 após a aplicação do filtro de choque de acordo com a presente invenção.

10 As FIGURAS 18A e 18B são imagens bidimensionais e tridimensionais de uma cena original antes do processamento interferométrico de acordo com a presente invenção.

As FIGURAS 19A-22B são imagens bidimensionais e tridimensionais que correspondem à cena original mostrada nas 15 FIGURAS 18A e 18B que ilustram vários estágios da aplicação do processamento SAR interferométrico de acordo com a presente invenção.

A FIGURA 23 é uma imagem bidimensional de cima para baixo de uma cena original antes do processamento 20 interferométrico de acordo com a presente invenção.

As FIGURAS 24-27 são imagens de cima para baixo bidimensionais que correspondem à cena original mostrada na FIGURA 23 ilustrando vários estágios da aplicação de processamento SAR interferométrico de acordo com a presente 25 invenção.

A FIGURA 28 é uma imagem original antes da filtragem de acordo com a presente invenção.

A FIGURA 29 é uma imagem que corresponde à imagem original mostrada na FIGURA 28 após a aplicação de um filtro 30 de Gauss de acordo com a técnica anterior.

A FIGURA 30 é uma imagem que corresponde à imagem original mostrada na FIGURA 28 após múltiplas iterações de filtragem com um algoritmo de difusão anisotrópica complexa

de acordo com a presente invenção.

As FIGURAS 31-33 são imagens que ilustram a compressão de dados SAR de acordo com a presente invenção.

5 As FIGURAS 34-36 são imagens que ilustram a descompressão de dados SAR de acordo com a presente invenção.

As FIGURAS 37-44 são imagens e gráficos que ilustram o registro de imagens SAR de acordo com a presente invenção.

10 As FIGURAS 45-48 são imagens que ilustram a extração da estrada de acordo com a presente invenção.

A presente invenção será descrita agora de maneira mais abrangente em seguida com referência aos desenhos em anexo, nos quais são mostradas as realizações preferidas da invenção. A presente invenção pode, no entanto, ser  
15 incorporada em muitas formas diferentes e não deve ser interpretada como limitada às realizações aqui apresentadas. Ao invés disto, estas realizações são fornecidas de modo que esta descrição seja plena e completa, e irão indicar completamente o âmbito da invenção aos elementos versados na  
20 técnica. As referências numéricas semelhantes referem-se aos elementos semelhantes por toda parte.

Com referência inicialmente à FIGURA 1, um radar de abertura sintética (SAR) 50 coleta os dados SAR e um sistema implementado por computador 60 processa os dados SAR. O SAR  
25 50 é suportado por uma plataforma transportada por via aérea 52, tal como um avião, sobre uma área de interesse. A plataforma transportada por via aérea 52 também poderia ser baseada no espaço.

A área de interesse ilustrada é uma área urbana,  
30 tal como uma cidade, a qual inclui uma série de edifícios 54. Na área urbana também são incluídas características relativamente pequenas tais como as árvores 56 e as estradas 58, por exemplo, em comparação aos edifícios 54.

Alternativamente, a área de interesse poderia ser uma área rural, com muito poucos, quando então nenhum edifício 54.

Os elementos versados na técnica irão apreciar que uma imagem SAR é recebida primeiramente como um valor  
5 complexo antes de ser convertida em um valor real para a visualização. A imagem SAR é recebida inicialmente no espaço  $k$  que inclui a fase e a intensidade. Ao tomar a transformação de Fourier inversa dos dados retornados no espaço  $k$ , um espaço da imagem é gerado. O espaço da imagem inclui a fase e  
10 a amplitude. Uma vez que o espaço da imagem inclui as informações da fase e da amplitude, ele apresenta salpicos. Para ver a imagem SAR, a fase é removida do espaço da imagem ao tomar a magnitude dos dados no espaço da imagem. Isto produz uma imagem detectada ou real para a visualização.

15 Uma vez que as imagens SAR são coletadas, elas podem ser armazenadas em uma mídia de armazenamento 70, tal como um disco magnético, por exemplo, para a transferência a um computador 62. Dentro do computador 62, as imagens SAR podem ser armazenadas como parte de um banco de dados das  
20 imagens SAR a serem processadas. Naturalmente que outros métodos apropriados para transferir dados SAR também podem ser utilizados, tal como apreciado prontamente pelos elementos versados na técnica. As imagens SAR coletadas podem ser avaliadas como complexas ou reais.

25 Um monitor 64 é conectado ao computador 62 para visualizar as imagens SAR após o processamento. Dispositivos de entrada tais como um teclado 66 e um mouse 68 também são conectados ao computador 62. De acordo com a presente invenção, o computador 62 inclui um processador 68 para  
30 processar as imagens SAR.

Um aspecto para melhorar a resolução de dados SAR para que se pareçam mais como dados EO é baseado na modificação de uma equação de calor, que é uma equação

diferencial parcial linear de segunda ordem. A equação de calor é tal como segue:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} &= c \nabla^2 u(x,t), c \in \mathfrak{R} \\ or &= \text{div}(c \nabla u(x,t)) = \nabla \cdot c \nabla u(x,t) \end{aligned} \quad (1)$$

Sob determinadas condições, uma solução fundamental da equação de calor é a função da densidade de Gauss. A equação de calor também pode ser escrita tal como segue:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x,y,t)}{\partial t} &= \text{div}(c(x,y,t) \nabla u(x,y,t)), c \in \mathfrak{R} \\ &= c(x,y,t) \nabla^2 u(x,y,t) + \nabla c(x,y,t) \cdot \nabla u(x,y,t) \end{aligned} \quad (2)$$

A variável  $c$  é conhecida como uma função de convecção, e  $t$  corresponde ao tempo, e  $x$  e  $y$  formam um número complexo baseado nos dados SAR coletados. De acordo com a presente invenção, a variável  $c$  não é um valor constante. Isto permite vantajosamente que a equação de calor seja adaptada aos dados SAR que estão sendo processados, uma vez que  $c$  não é um valor constante.

Em conseqüência disto, uma classe de funções pode ser criada para obter os resultados desejados, em que cada função corresponde aos dados específicos SAR que estão sendo processados. Dentro de uma área urbana, os difusores em um conjunto de dados SAR podem ser diferentes dos difusores em um outro conjunto de dados SAR, de modo que os respectivos conjuntos de dados SAR sejam discrepantes.

Uma vez que os conjuntos de dados SAR não são similares, a aplicação de uma mesma função (isto é, um algoritmo de difusão anisotrópica) resulta na melhora da resolução do conjunto de dados SAR mais proximamente compatíveis com a função. Para o outro conjunto de dados SAR que não é proximamente compatível com a função, a sua resolução não será tão boa quanto se uma função mais

proximamente compatível fosse utilizada. O mesmo pode ser dito sobre conjuntos de dados de áreas rurais.

Ao mudar a função de convecção  $c$  para melhor compatibilizar com um conjunto de dados SAR particular, então a imagem de valor real correspondente para a visualização terá uma resolução melhor do que se  $c$  for um valor constante. Quando a função de convecção  $c$  é um valor constante, os conjuntos de dados SAR discrepantes são tratados igualmente. Um  $c$  não-constante permite que o algoritmo de difusão anisotrópica simultaneamente borre e afine um conjunto de dados SAR. Ao ajustar matematicamente a equação de calor através da função de convecção  $c$ , os conjuntos de dados SAR discrepantes podem ser mais bem processados.

Para ajustar matematicamente a equação de calor, o ruído no conjunto de dados SAR precisa ser determinado. Uma abordagem para determinar o ruído é baseada na coleta de estatística nos valores de gradiente em cada conjunto de dados SAR a ser processado. A estatística pode ser coletada no próprio conjunto de dados SAR real, ou pode ser predeterminada com base nos conjuntos de dados SAR similares que já foram processados. Outras abordagens para determinar o ruído incluem um esquema de janelas de Fourier ou uma decomposição de ondulações, tal como deve ser compreendido prontamente pelos elementos versados na técnica.

A referência é dirigida às FIGURAS 2-4 para ilustrar o cálculo do ruído em um conjunto de dados SAR com base na análise estatística, que é utilizada por sua vez para ajustar matematicamente a função de convecção  $c$  dentro do algoritmo de difusão anisotrópica a ser aplicado ao conjunto de dados SAR. Uma distribuição das intensidades de pixels para o conjunto de dados SAR é fornecida na FIGURA 2, ao passo que a distribuição dos valores de gradiente para os pixels é fornecida na FIGURA 3. A distribuição de valores de

gradiente é o número de valores de gradiente em um mesmo valor. Por exemplo, o ponto 100 que atinge seu pico em  $12 \times 10^4$  significa que há 120.000 gradientes que estão no mesmo valor.

A estatística de coleta para o ruído pode ser baseada em um desvio padrão dos valores de gradiente. Uma vez que o desvio padrão é determinado, uma constante predeterminada pode ser adicionada a um múltiplo do desvio padrão para obter o limite de ruído  $k$ . Uma vez que o limite de ruído  $k$  tenha sido determinado para o conjunto de dados SAR, o algoritmo de difusão anisotrópica correspondente é aplicado para suavizar os valores à direita de  $k$  enquanto não suaviza os valores à esquerda de  $k$ . Ao não suavizar os valores à esquerda de  $k$ , as bordas na cena são preservadas.

O desvio padrão para a distribuição ilustrada de valores de gradiente na FIGURA 3 é indicado pela linha que corresponde à referência 102. O limite  $k$  é ajustado como duas vezes o desvio padrão mais uma constante. Variações desta abordagem, assim como outras abordagens estatísticas, podem ser utilizadas para selecionar o limite  $k$  desejado, tal como deve ser apreciado prontamente pelos elementos versados na técnica.

O limite  $k$  é conhecido como valor  $k$ . Os valores elevados de gradiente correspondem aos difusores brilhantes, que devem permanecer inalterados. Portanto, o valor  $k$  é ajustado sem borrar os difusores brilhantes. Por outro lado, os valores de gradiente parecem similares devem ser suavizados. Ao ajustar o limite  $k$ , as classes diferentes de funções podem ser utilizadas para criar os resultados desejados específicos para os conjuntos de dados SAR que estão sendo processados. Uma vantagem do ajuste da função de convecção  $c$  através do limite de ruído  $k$  é que o usuário final não tem que fazer uma seleção entre múltiplos algoritmos de difusão anisotrópica para escolher aquele que é

mais apropriado para o processamento do conjunto de dados SAR. Ao invés disto, esta seleção é feita de maneira autônoma uma vez que o limite de ruído  $k$  tenha sido selecionado.

5 A distribuição de intensidades de pixels e de valores de gradiente nas FIGURAS 2 e 3 corresponde à imagem mostrada na FIGURA 4, e à imagem dos gradientes mostrada na FIGURA 5. As duas imagens são muito similares. Cada imagem inclui uma escala de 110 dB que representa a quantidade de brilho para visualizar a imagem.

10 Para a imagem dos gradientes ilustrada na FIGURA 6, um esquema de ponderação convencional, tal como a ponderação de Taylor, por exemplo, foi aplicado durante o processamento do conjunto de dados SAR. Os subtítulos ilustrados indicam que as bordas dos edifícios não estão claras, nem as árvores e as sombras podem ser facilmente determinadas.

15 Na FIGURA 7, o limite de ruído  $k$  para o conjunto de dados SAR foi ajustado com base em uma análise estatística da distribuição dos valores de gradiente, tal como discutido acima. A filtragem adaptada, que também pode ser indicada como um filtro inteligente combina melhor com os dados SAR  
20 que estão sendo processados ao ajustar onde a suavização deve ser executada. Em consequência disto, os subtítulos ilustrados indicam que as bordas dos edifícios estão mais claras, e as árvores e as sombras estão mais claras, o que é  
25 vantajoso para uma melhor mensuração.

As comparações da mesma cena ao utilizar esquemas filtrando diferentes serão discutidas agora com referência às FIGURAS 8-12. Os vários difusores de interesse são circundados em cada FIGURA. A cena original antes da  
30 filtragem é mostrada na FIGURA 8. Na FIGURA 9, a filtragem da cena original é baseada em uma janela de grade de 9. Cada grupo de 3x3 pixels é calculado em média, e isto é repetido para todos os pixels no conjunto de dados SAR. Um filtro de

Gauss padrão foi aplicado à cena original tal como mostrado na FIGURA 10, e um algoritmo de difusão anisotrópica padrão foi aplicado à cena original tal como mostrado na FIGURA 11.

Para melhor remover o ruído em torno dos difusores na cena original, enquanto os componentes dos difusores ficam intactos, o ruído no conjunto de dados SAR é determinado primeiramente. Com base no limite de ruído  $k$  selecionado, o algoritmo de difusão anisotrópica é ajustado de maneira correspondente para prover uma imagem de maior resolução, tal como mostrado na FIGURA 12.

Mesmo que um algoritmo de difusão anisotrópica seja aplicado à cena na FIGURA 11, os difusores ainda têm o que é conhecido como multi-rechaço em torno dos mesmos. Com o multi-rechaço, as ondas atingem os difusores e a interface com a terra, e em conseqüência disto rebatem todos em torno dos difusores. O multi-rechaço se parece com o ruído, mas em algumas situações pode divulgar informações úteis sobre os difusores. Na FIGURA 12, a função de convecção  $c$  foi selecionada de modo que o multi-rechaço fosse removido.

A vantagem de controlar seletivamente a função de convecção  $c$  com base em uma análise estatística da distribuição de valores de gradiente para o conjunto de dados SAR que estão sendo processados provê uma maior resolução. A suavização entre regiões e a preservação das bordas são providas para as imagens corrompidas pelo ruído aditivo. Nos casos onde os conjuntos de dados SAR contêm salpicos, o algoritmo de difusão anisotrópica com a função ajustável de convecção  $c$  produz a redução de salpico sensível a borda.

A função de convecção  $c$  seletivamente controlada pode ser vantajosamente aplicada em dados complexos crus (isto é, componentes reais e imaginários) e nas imagens detectadas (isto é, apenas os componentes reais) ao utilizar hardware e/ou software para melhorar a fidelidade total do

conjunto de dados SAR. Isto também pode ser feito de maneira autônoma com base na seleção do limite de ruído para os conjuntos de dados SAR que estão sendo processados. Cenas do tipo EO de alta resolução podem desse modo ser criadas a partir dos conjuntos de dados SAR. Ao remover simultaneamente o ruído e ao suavizar as áreas de dados similares no conjunto de dados SAR, os dados de alta frequência são preservados. Conseqüentemente, a textura da informação e as estruturas lineares são preservadas, o que propicia uma avaliação mais exata entre os dados EO e SAR.

Um outro aspecto da invenção refere-se a um algoritmo de difusão anisotrópica complexo. As equações para o algoritmo de difusão anisotrópica tal como discutido acima foram re-derivadas para dados complexos de modo que o processo ficasse agora não-linear. Em termos de dados complexos, os componentes reais e imaginários de um conjunto de dados SAR são processados em um mesmo tempo.

Por outro lado, mesmo que os algoritmos de difusão anisotrópica tivessem sido aplicados aos dados complexos SAR, isto foi feito de uma forma linear. Isto significa que os componentes reais e imaginários dos dados SAR complexos são processados separadamente, e os resultados são então combinados conjuntamente.

As equações re-derivadas para o algoritmo de difusão anisotrópica complexo são tal como segue:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{div}(g(\nabla I)\nabla I) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\left(\frac{\partial a}{\partial x}\right) K^2}{K^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial y}\right)^2} \right] + & (3) \\
 & z \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\left(\frac{\partial b}{\partial x}\right) K^2}{K^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial y}\right)^2} \right] = \\
 & \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} \left[ \frac{K^2}{K^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial y}\right)^2} \right] + \frac{\partial a}{\partial x} \left[ \frac{-K^2 \left( 2 \left(\frac{\partial a}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial^2 a}{\partial x^2}\right) + 2 \left(\frac{\partial b}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x^2}\right) + 2 \left(\frac{\partial a}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial^2 a}{\partial x \partial y}\right) + 2 \left(\frac{\partial b}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x \partial y}\right) \right)}{\left( K^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial y}\right)^2 \right)^2} \right] \\
 & + z \left[ \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} \left[ \frac{K^2}{K^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial y}\right)^2} \right] + \frac{\partial b}{\partial x} \left[ \frac{-K^2 \left( 2 \left(\frac{\partial a}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial^2 a}{\partial x^2}\right) + 2 \left(\frac{\partial b}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x^2}\right) + 2 \left(\frac{\partial a}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial^2 a}{\partial x \partial y}\right) + 2 \left(\frac{\partial b}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x \partial y}\right) \right)}{\left( K^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial y}\right)^2 \right)^2} \right] \right]
 \end{aligned}$$

Uma vez que os componentes reais e imaginários do conjunto de dados SAR estão sendo tratados como um objeto complexo, o algoritmo de difusão anisotrópica complexo pode retirar o conteúdo da cena dos dados extremamente ruidosos, melhorando por sua vez a resolução da imagem visualizada.

Como uma comparação, a referência é dirigida à imagem original mostrada na FIGURA 13. A difusão anisotrópica complexa é aplicada ao conjunto de dados SAR que corresponde à imagem SAR original na FIGURA 13 para formar a imagem difusa mostrada na FIGURA 14. Os limites e as características são visivelmente mais agudos na imagem difusa.

Além do algoritmo de difusão anisotrópica complexa que está sendo aplicado aos conjuntos de dados SAR de imagem simples, ele também pode ser aplicado a processamento interferométrico. Particularmente, o processamento interferométrico para a medição do abrandamento para a cena urbana é particularmente benéfico ao utilizar o algoritmo de difusão anisotrópica complexo.

O processamento interferométrico de dados SAR será discutido agora em mais detalhes. Com referência ao

fluxograma na FIGURA 15, o processamento interferométrico de dados SAR para medições do abrandamento em áreas urbanas será discutido como um exemplo ilustrado. O abrandamento é um deslocamento do terreno em que a elevação da superfície da terra está diminuindo em relação ao nível do mar.

As imagens SAR são recebidas em um Bloco do histórico da fase de aparar 120. Para finalidades de discussão, duas imagens SAR estão sendo comparadas. As duas imagens SAR são da mesma cena, mas as imagens estão ligeiramente deslocadas uma da outra, tal como deve ser apreciado prontamente pelos elementos versados na técnica. Se as imagens SAR forem recebidas como dados crus, elas são convertidas de espaço da frequência em espaço da imagem. O espaço da frequência corresponde à fase e à intensidade, ao passo que o espaço da imagem corresponde à fase e à amplitude. A fase e a amplitude para cada pixel na imagem SAR fornecem os componentes reais e imaginários para os dados complexos SAR a serem processados.

O bloco de histórico da fase de aparar 120 assegura em um nível muito elevado que as duas imagens SAR são apropriadas para o processamento interferométrico. A interseção dos respectivos históricos da fase no espaço da frequência é selecionada entre as duas imagens SAR, e tudo o mais é rejeitado. As duas imagens SAR são registradas no bloco 122. O registro assegura que as características entre as duas imagens SAR fiquem alinhadas. Por exemplo, um canto de um edifício em uma determinada latitude/longitude/altura na primeira imagem SAR é registrado para corresponder a uma mesma latitude/longitude/altura na segunda imagem SAR. Em consequência disto, os pixels são alinhados acima entre as duas imagens SAR.

O interferograma é formado no bloco 124. A primeira imagem SAR é multiplicada pelo conjugado complexo da segunda

imagem SAR. O resultado é uma diferença de fase entre as duas imagens SAR. O interferograma resultante é relacionado diretamente à altura. No interferograma, a fase para cada pixel é obtida ao tomar o arco tangente de sua parte imaginária dividido por sua parte real. Para a primeira imagem SAR, os dados da fase para cada pixel são determinados. Do mesmo modo, os dados da fase para cada pixel são determinados para a segunda imagem SAR. Conforme será discutido em detalhes abaixo, os dados da fase para cada pixel variam do interferograma entre menos  $\pi$  e mais  $\pi$ . Conseqüentemente, as fases envolvem ao redor.

Em seguida, um filtro de baixa passagem deve ser aplicado normalmente para suavizar o interferograma. No entanto, isto tem uma tendência de borrar as bordas na cena. Para uma cena rural, o borrão é aceitável, mas para uma cena urbana em que o abrandamento está sendo medido em indicações específicas o borrão não é desejável, uma vez que isto afeta a exatidão do abrandamento medido.

Ao invés de um filtro de baixa passagem, um algoritmo de difusão anisotrópica complexa tal como discutido acima é aplicado no bloco 126 e um filtro de choque é aplicado no bloco 128. Com o algoritmo de difusão anisotrópica complexo, as partes reais e imaginárias de cada pixel são processadas como um objeto complexo, isto é, um processamento não-linear. Por outro lado, o processamento linear envolve o processamento separado das partes reais e imaginárias e então a combinação dos resultados conjuntamente. O algoritmo de difusão anisotrópica complexo mitiga localmente o ruído enquanto ao mesmo tempo preserva as descontinuidades de cena no interferograma.

O filtro de choque é utilizado para eliminar o borrão da imagem tal como deve ser compreendido prontamente pelos elementos versados na técnica. Em outras palavras, os

limites na cena são realçados ao utilizar morfologia matemática. A equação que corresponde ao filtro de choque é tal como segue:

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = -\text{sign}(\nabla^2 u(x, y, t)) \|\nabla u(x, y, t)\| \quad (4)$$

A equação de choque é uma equação diferencial  
 5 hiperbólica não-linear. primeira parte da equação corresponde à erosão/dilatação que é determinada por Laplace. A segunda parte da equação é uma magnitude do gradiente. Para ilustrar a aplicação do filtro de choque, uma imagem multi-espectral de vetor próximo original é mostrada na FIGURA 16, e a  
 10 aplicação do filtro de choque à imagem é mostrada na FIGURA 17. Os limites são observáveis mais agudos após a aplicação do filtro de choque.

A suavização não-linear através do algoritmo anisotrópica complexa e do realce do limite através do filtro  
 15 de choque aumenta a exatidão e a qualidade da medição da diferença de fase. Uma vez que o abrandamento é medido ao utilizar objetos persistentes na cena (isto é, edifícios) como pontos de referência, a melhora da qualidade do limite dos objetos persistentes melhora a medição do abrandamento.

Uma vez que a fase só pode variar entre mais  $\pi$  e  
 20 menos  $\pi$ , ela é chamada uma fase enrolada. Se não houver nenhum enrolamento de ambigüidade nas fases entre as duas imagens SAR, o abrandamento pode então ser medido no bloco 130. No entanto, se existir um enrolamento de ambigüidade,  
 25 como é tipicamente o caso, então um desenrolamento de fase variacional é executado no bloco 132.

O desenrolamento de fase variacional é aplicado ao interferograma, que é a diferença de fase entre a primeira e a segunda imagem SAR registradas. A diferença de fase entre  
 30 as duas imagens SAR registradas é relacionada a uma quantidade física desejada de interesse, tal como a

topografia da superfície. A diferença de fase pode ser registrada somente no modulo 2B, e as técnicas interferométricas atuais recuperam principalmente a fase absoluta (a fase desmembrada) da fase registrada (fase  
5 enrolada) utilizando valores distintos. O desenrolamento de fase atual pode ser executado por algoritmos de árvore de corte de resíduo e algoritmos dos menores quadrados, por exemplo.

Para executar o desenrolamento de fase, a fase é  
10 determinada a partir do interferograma, que é um objeto complexo com partes reais e imaginárias. O arco tangente da parte imaginária em relação à parte real fornece as respectivas fases. A amplitude é rejeitada e a fase permanece.

15 Uma vez que a fase só pode variar entre mais  $\pi$  e menos  $\pi$ , ela é chamada fase enrolada. Na realidade, no entanto, a fase vai de mais infinito a menos infinito. Isto é onde as dificuldades residem no processo interferométrico.

O objetivo consiste em determinar o mapeamento  
20 apropriado para ir do espaço mais/menos  $\pi$  ao espaço mais/menos infinito. No entanto, as imagens finitas são limitadas pela altura do objeto mais alto na cena. Se o edifício mais alto for de 800 pés, a diferença é baseada então no nível na terra e 800 pés. Na teoria, mais/menos  
25 infinito é matematicamente correto, mas na realidade a variação fica entre zero e a altura do objeto mais alto na cena.

O desenrolamento de fase variacional lida com não-linearidades e descontinuidades nos dados. Existe uma  
30 ambigüidade nos enrolamentos de fase nos limites de mais/menos  $\pi$  antes de tirar a diferença de fase entre as duas imagens SAR. O ponto em que a fase é enrolada é conhecido como linhas limítrofes.

O algoritmo de desenrolamento de fase variacional é bidimensional. As técnicas de desenrolamento de fases unidimensionais podem ser re-derivadas para duas dimensões ao utilizar os requisitos que se aplicam especificamente ao problema de abrandamento. Outras técnicas de desenrolamento de fase bidimensional que são disponíveis também podem ser adaptadas.

Na análise de imagem, a segmentação é a divisão de uma imagem digital em regiões múltiplas (conjuntos de pixels) de acordo com algum critério. O objetivo da segmentação é tipicamente encontrar objetos de interesse. Algumas técnicas comuns para a segmentação incluem a fixação de limites, o crescimento de região e a etiquetagem de componentes de conexão. Os contornos ativos também constituem um método comum.

O algoritmo de desenrolamento de fase variacional é baseado na função de Mumford-Shah ou na função de custo, tal como indicado abaixo:

$$E(f, \tilde{C}) = \beta \int_{\Omega} (f - g)^2 dA + \alpha \int_{\Omega \setminus \tilde{C}} |\nabla f|^2 dA + \gamma \int_{\tilde{C}} ds \quad (5)$$

$$\beta \int_{\Omega} (f - g)^2 dA$$

$$\int_{\Omega \setminus \tilde{C}} |\nabla f|^2 dA$$

$$\gamma \int_{\tilde{C}} ds$$

A equação determina que  $f$  e  $\tilde{C}$  irão fornecer a fase desenrolada. O primeiro termo é a aproximação da suavização de pedaços  $f$  a  $g$  (a imagem) com descontinuidades ao longo de  $\tilde{C}$ . Esta parte da equação pode ser imaginada como um termo de

fidelidade dos dados que mede a qualidade de  $f$ . O segundo termo da equação é o termo da lisura. Isto pode ser visto como o modelo prévio para  $f$  resultar em  $C$ . O terceiro corresponde ao comprimento de  $C$ . Normalmente, há uma penalidade para o comprimento de arco excessivo. A função original de Mumford-Shah ou a função de custo utilizou a medição de Hausdorff para conjuntos de descontinuidades mais gerais. De acordo com a presente invenção,  $C$  é restringido para que seja uma curva suave a fim de ser substituída pelo comprimento do arco.

Para minimizar a função de Mumford-Shah ou a função de custo, uma nova função de custo é desenvolvida para melhor solucionar a descontinuidade dos dados entre as linhas limítrofes. A nova função de custo é tal como segue:

$$E(f, \bar{C}) = \beta \int_{\Omega} (f_x - g_x)^2 dA + \beta \int_{\Omega} (f_y - g_y)^2 dA + \alpha \int_{\Omega, \bar{C}} |\nabla f|^2 dA + \gamma \int_{\bar{C}} ds \quad (6)$$

O primeiro termo expressa os gradientes entre a fase enrolada e desenrolada. O segundo termo expressa o conhecimento prévio da cena a ser processada. O terceiro termo impõe limites no comprimento limítrofe máximo do interferograma não processado. A maioria dos algoritmos de desenrolamento de fase trabalha com dados suaves. Após ter determinado a solução mínima para a função de custo  $E(f, C)$ , uma conversão é feita em uma equação diferencial parcial (PDE). A PDE é então solucionada.

O algoritmo de desenrolamento de fase variacional tira vantagem do fato que os dados são pré-processados com o algoritmo de difusão anisotrópica complexo. O algoritmo de difusão anisotrópica complexo é projetado para não suavizar as descontinuidades. Conseqüentemente, a abordagem variacional para o desenrolamento de fase tira vantagem do fato que os dados serão ainda descontínuos.

O desenrolamento de fase variacional será discutido agora com referência aos gráficos mostrados nas FIGURAS 18-27. Uma cena original de dois edifícios 150, 152 e a terra correspondente 160 adjacente aos edifícios é fornecida nas FIGURAS 18A e 18B. A FIGURA 18B é um gráfico tridimensional da imagem SAR, e a FIGURA 18A é uma vista de cima para baixo da mesma imagem SAR. Na cena original, a terra 160 é um morro que é quase tão alto quanto um dos edifícios 152.

Um interferograma enrolado da cena original é fornecido nas FIGURAS 19A e 19B. Uma vez que o interferograma é um objeto complexo, a sua fase é determinada de modo que o interferograma possa ser visualizado. Conseqüentemente, a linha central do gráfico na FIGURA 19B é em radianos. Para cada pixel de x e de y há um valor da fase, que é enrolada. Isto significa que a faixa fica sempre entre mais/menos  $\pi$ . As bordas da faixa de mais/menos  $\pi$  são as linhas limítrofes 170 e 172.

Na FIGURA 19B, o centro do morro 160 caiu. A diferença de fase não inclui nenhum ruído. O ruído é adicionado artificialmente à cena para simular uma coleta real, tal como mostrado nas FIGURAS 20A e 20B. Nas FIGURAS 21A e 21B, o ruído é mitigado com a aplicação de um filtro suavizante. Uma vez que os algoritmos de suavização normal têm uma tendência de suavizar as descontinuidades, as linhas limítrofes 170, 172 foram suavizadas. Em conseqüência disto, a resolução foi reduzida. Um interferograma de difusor anisotrópico complexo é provido nas FIGURAS 22A e 22B. As linhas limítrofes 170, 172 são mais agudas, e as bordas do edifício são preservadas.

Um outro conjunto de exemplos será discutido agora com referência às FIGURAS 23-27. Uma vista de cima para baixo de quatro edifícios 180, 182, 184 e 186 é mostrada na FIGURA 23. Cada edifício fica em uma altura diferente tal como

indicado por uma sombra diferente. Um interferograma sem ruído é mostrado na FIGURA 24. Por causa do enrolamento de fase entre mais/menos  $\pi$ , os quatro edifícios 180, 182, 184 e 186 parecem estar na mesma altura que aquela indicada pela mesma sombra. Quando o ruído é adicionado ao interferograma, os edifícios 180, 182, 184 e 186 ficam escondidos pelo ruído, tal como mostrado na FIGURA 25. Um interferograma de ruído anisotropicamente difuso complexo de acordo com a invenção é mostrado na FIGURA 26. Os edifícios 180, 182, 184 e 186 são extraídos do ruído após a aplicação do algoritmo de difusão anisotrópica complexo. Uma vista aproximada do edifício 180 é fornecida na FIGURA 27 para ilustrar como as bordas limite são mantidas.

Com referência novamente ao fluxograma na FIGURA 15, a geometria de cada SAR que fornece uma respectiva imagem SAR é estimada no bloco 134. É feita uma determinação a respeito de onde cada SAR foi localizado no momento em que a imagem correspondente foi tomada. Se o primeiro SAR estiver apontando a uma determinada latitude/longitude/altura, então haverá uma alta confiança nos valores de pixel contanto que a latitude/longitude/altura seja para esse pixel.

A fase desenrolada em radianos é convertida em altura no bloco 136. Quando uma medição de fase desenrolada é obtida, ela é em radianos. Uma conversão é feita então dos radianos na altura. Uma equação de forma fechada toma o valor do radiano em altura tal como compreendido prontamente pelos elementos versados na técnica. A altura fornece a medição necessária para determinar o abrandamento entre as duas imagens SAR. Para finalidades de ilustração, uma imagem original é mostrada na FIGURA 28, a imagem original alisada com um filtro de Gauss é mostrada na FIGURA 29, e a imagem original filtrada com um algoritmo de difusão anisotrópica complexo após vinte iterações é mostrada na FIGURA 30. Entre

as duas imagens, as bordas limite são visivelmente mais encrespadas na FIGURA 30.

A descontinuidade é mantida desse modo pelo algoritmo de difusão anisotrópica por causa das propriedades  
5 do algoritmo. O algoritmo opera basicamente nos gradientes de modo que fica sabendo, com base estritamente no gradiente da imagem, se deve ou não suavizar. Se o gradiente estiver abaixo do limite do ruído que é ajustado acima da parte  
dianteira, o algoritmo deve seguir adiante e suavizar o  
10 gradiente. Se o gradiente estiver acima do limite, o algoritmo não irá suavizar o gradiente a fim de manter ou preservar uma borda de uma estrutura correspondente. Conforme observado acima, o limite é ajustado preferivelmente com base no conhecimento da cena.

15 O desenrolamento de fase variacional é derivado da matemática de erro denominada cálculo variacional. Os princípios do cálculo variacional são utilizados para compatibilizar com um algoritmo de desenrolamento de fase que lida com descontinuidades. Os algoritmos de desenrolamento  
20 atuais têm uma tendência de suavizar os dados. Por outro lado, o algoritmo de desenrolamento de fase variacional é baseado em uma função de custo para controlar a suavização. Em vez de prover suavização global com base nas propriedades dos dados, o algoritmo de desenrolamento de fase variacional  
25 deixa bordas intactas e suaviza seletivamente a área adjacente às bordas.

Um outro aspecto da invenção é a aplicação do algoritmo de difusão anisotrópica ao comprimir e ao descomprimir as imagens SAR. Os conjuntos de dados SAR podem  
30 ser relativamente grandes, e quando um conjunto de dados SAR é comprimido a resolução é geralmente reduzida durante o processo. Este é um resultado de esquemas de compressão de pré-processamento de perda. Os algoritmos do pré-

processamento de perda geralmente degradam os difusores em uma cena. Além disso, o volume de dados pode sufocar as capacidades de processamento atuais.

Os algoritmos de pré-processamento mais comuns agem  
5 como filtros de baixa passagem. Os seguintes esquemas de compressão tentam agrupar os dados de uma maneira que encontre similaridades entre todos os dados: a análise de componente independente (ICA), a transformação de ondulações (filtros Gabor) e esquemas de exploração do paralelismo.  
10 Devido à faixa dinâmica dos dados SAR, é difícil limitar os dados de uma maneira tal que os dados possam ser bem agrupados.

Um método implementado por computador para comprimir imagens SAR compreende a recepção de uma imagem SAR  
15 a ser comprimida, a aplicação de um algoritmo de difusão anisotrópica à imagem SAR, e a compressão da imagem SAR após ter aplicado o algoritmo de difusão anisotrópica à mesma. Uma vantagem da aplicação do algoritmo de difusão anisotrópica é que o tamanho da imagem SAR após a compressão resulta em um  
20 arquivo de menor tamanho, independentemente do esquema de compressão utilizado. Conseqüentemente, o armazenamento e a transmissão da imagem SAR comprimida ocupam menos espaço e largura de faixa.

Para finalidades da comparação, a métrica para a  
25 compressão é baseada na cena original mostrada na FIGURA 31. A cena original tem um tamanho de arquivo não-Tiff comprimido de 691 kB. A compressão JPEG da cena original reduz o tamanho do arquivo para 62 kB, ao passo que a compressão Winzip da cena original reduz o tamanho do arquivo para 41 kB.

30 A filtragem da cena original com um filtro de Gauss é mostrada na FIGURA 32. A compressão JPEG da imagem original com filtragem de Gauss reduz o tamanho do arquivo para 55 kB, ao passo que a compressão Winzip da imagem original com

filtragem de Gauss reduz o tamanho do arquivo para 33 kB.

De acordo com a presente invenção, a filtragem da cena original com um algoritmo de difusão anisotrópica é mostrada na FIGURA 33. O tamanho da cena filtrada difusa anisotrópica é ainda do mesmo tamanho que a cena original sem filtragem e com filtragem de Gauss. A compressão JPEG da cena anisotropicamente difusa reduz o tamanho do arquivo para 44 kB, ao passo que a compressão Winzip da cena anisotropicamente difusa reduz o tamanho do arquivo para 23 kB.

A TABELA 1 fornece uma comparação lado-a-lado entre as imagens diferentes. Quando a difusão anisotrópica foi aplicada a algumas das imagens SAR, uma compressão maior pode ser conseguida do que quando o algoritmo de difusão anisotrópica não foi aplicado. A imagem filtrada com difusão anisotrópica tem uma compressão JPEG de 16:1 e uma relação de compressão Winzip de 30:1.

TABELA 1

Tabela de Relação de Compressão			
Tipo de imagem	Tiff não comprimida	Compressão JPEG	Winzip
Imagem original	1	11:1	16:1
Com filtragem Gauss	1	13:1	21:1
Filtrada anisotrópica	1	16:1	30:1

Em termos de descompressão, a descompressão é executada com base na difusão anisotrópica. Mais particularmente, um método implementado por computador para descomprimir imagens SAR compreende a recepção de uma imagem SAR a ser descomprimida, a execução de uma compressão de faixa dinâmica na imagem SAR, a quantificação da imagem comprimida SAR, e a descompressão da imagem SAR comprimida e quantificada ao aplicar um algoritmo de difusão anisotrópica à mesma. A quantificação pode ser em unidade8, por exemplo. A

compressão da faixa dinâmica é um processo não-linear.

Agora é feita referência às FIGURAS 34-36 para ilustrar a descompressão. A imagem original a ser descomprimida é mostrada na FIGURA 34, e tem um tamanho de armazenamento de imagem de 65,68 MB. A compressão não-linear da faixa dinâmica é aplicada e os resultados são quantificados em unidade8, tal como mostrado na FIGURA 35. O tamanho de armazenamento da imagem é agora de 4,11 MB. A árvore e as sombras não são bem definidas na imagem quantificada.

A descompressão da imagem quantificada com um algoritmo de difusão anisotrópica é mostrada na FIGURA 36. As árvores e as sombras são agora mais bem definidas. Um filtro de choque pode até mesmo ser aplicado para realçar ainda mais a imagem SAR visualizada. Ao comprimir dinamicamente os dados SAR e então quantificar esses dados, a quantidade de dados que são requeridos durante a transmissão é reduzida significativamente. Em média, esses conjuntos de dados devem requerer  $4,11/65,7 = 6,25\%$  dos dados da cena para a transmissão. Quanto maior a faixa dinâmica, maior a relação de compressão. Para difusores muito brilhantes em uma cena, fica comprimida ainda mais. Mesmo se um usuário for provido com uma imagem comprimida/descomprimida de perda, a aplicação das abordagens de compressão/descompressão acima irá melhorar realmente a qualidade da imagem original para a visualização.

A extração/registo da elevação ao utilizar a difusão anisotrópica tal como discutido acima para a formação de imagens com ruído e imagens SAR será discutida agora com referência às FIGURAS 37-44. Os dados de ruído efetuam a exatidão da correlação, do registo (o mesmo ou sensor transversal) e da extração da elevação. Atualmente, os filtros de baixa passagem são utilizados para dados de ruído. A apodização é utilizada para dados SAR.

Um método implementado por computador para registrar imagens SAR compreende a seleção da primeira e segunda imagens SAR a serem registradas, o processamento individual da primeira e segunda imagens SAR selecionadas com um algoritmo de difusão anisotrópica, e o registro da primeira e segunda imagens SAR após o processamento. Um filtro de choque é aplicado preferivelmente à primeira e segunda imagens SAR processadas respectivas antes do registro. Os dados da elevação podem então ser extraídos com base nas imagens SAR registradas.

Para finalidades de ilustração, duas imagens SAR não registradas são mostradas nas FIGURAS 37 e 38. Para obter a métrica em relação às vantagens de utilização de um algoritmo de difusão anisotrópica durante o registro, a correlação é entre a imagem 1 na FIGURA 37, que é a referência, e a imagem 2 na FIGURA 38, que é a imagem secundária. Um mapa de coeficiente de correlação para as duas imagens é determinado. O valor máximo do mapa de correlação é obtido, isto é, o pico. A posição do pico no mapa da correlação indica o deslocamento entre os dados, isto é, o deslocamento registrado. Toda a imagem 1 é correlacionada com toda a imagem 2. O valor máximo da correlação é obtido após o registro. A imagem é então filtrada ao utilizar o algoritmo de difusão anisotrópica.

O pico da correlação é de 0,9081 na superfície da correlação não filtrada tal como mostrado na FIGURA 39. Após a filtragem, o pico da correlação é de 0,9674 tal como mostrado na FIGURA 40. Depois que o registro é aplicado, as imagens das FIGURAS 37 e 38 não se movem, tal como mostrado nas FIGURAS 41 e 42. Estas imagens não são filtradas. O pico da correlação para o registro é de 0,9081 e a pós-correlação de toda a imagem depois do registro é de 0,3634. Após a filtragem, as imagens correspondentes são mostradas nas

FIGURAS 43-44. O pico da correlação para o registro é de 0,9674 e a pós-correlação de toda a imagem depois do registro é de 0,8094. O registro é incrementado em 9,4%, e a correlação é incrementada após o registro em 45%.

5           A extração de vetor/estrada ao utilizar processamento de difusão anisotrópica não-linear e filtros de choque para a classificação material serão discutidos agora com referência às FIGURAS 45-48. Existe uma demanda para a extração da estrada de cenas refletivas simples. Atualmente,  
10 kernels de suavização são aplicados aos dados. Filtros morfológicos também são aplicados (dilatação/erosão) aos dados. A extração de vetor/estrada pode então ser provida ao utilizar um filtro de Gauss/de cruzamento zero.

De acordo com a presente invenção, um método  
15 implementado por computador para a extração do vetor em imagens SAR compreende a seleção de uma imagem SAR para a extração do vetor, o processamento da imagem SAR selecionada com um algoritmo de difusão anisotrópica, e a extração dos dados do vetor com base na imagem SAR processada. Um filtro  
20 de choque pode ser aplicado à imagem SAR processada antes da extração. Os dados da imagem da estrada podem então ser extraídos com base nos dados de vetor extraídos. Os dados são delineados desse modo ao utilizar um esquema coerente de algoritmo de difusão anisotrópica. Este esquema fornece uma  
25 exatidão maior para a extração da estrada. Uma cena original é mostrada na FIGURA 45. Depois que a difusão anisotrópica é aplicada, o alvo é mais bem definido, tal como mostrado na FIGURA 46. Em geral, os alvos são mais bem delineados para superfícies refletivas simples. Isto se presta bem para a  
30 segmentação.

O algoritmo de difusão anisotrópica também ser aplicado a outras imagens depois que elas já foram filtradas por outros tipos de filtro. Estes tipos de filtro incluem um

filtro Prewitt e um filtro Roberts, por exemplo. Uma imagem original que foi filtrada por um filtro Prewitt é mostrada na FIGURA 47. A FIGURA 48 mostra a mesma imagem após a aplicação do algoritmo de difusão anisotrópica. O alvo ilustrado, bem como a cerca da ligação de cadeia são mais bem definidos.

5

REIVINDICAÇÕES

1. MÉTODO IMPLEMENTADO EM COMPUTADOR PARA PROCESSAR IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR), caracterizado pelo fato de compreender:

5 a recepção de um conjunto de dados de SAR complexos para uma imagem de SAR que compreende uma pluralidade de pixels em que o conjunto de dados de SAR complexos compreende uma parte real e imaginária para cada pixel; e

10 a aplicação de um algoritmo de difusão anisotrópico complexo ao conjunto de dados de SAR complexos de modo que a parte real e imaginária para cada pixel seja processada sem linearidade para gerar uma imagem de SAR processada.

2. MÉTODO IMPLEMENTADO EM COMPUTADOR, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o conjunto de dados de SAR complexo é recebido no espaço de frequência; e então compreende adicionalmente a conversão do espaço de frequência em espaço de imagem, em que o espaço de frequência corresponde à fase e potência para cada pixel e o espaço de imagem corresponde à fase e à amplitude para cada pixel.

3. MÉTODO IMPLEMENTADO EM COMPUTADOR, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de compreender adicionalmente a exibição da imagem de SAR processada depois da aplicação do algoritmo de difusão anisotrópico complexo à mesma.

4. MÉTODO IMPLEMENTADO EM COMPUTADOR, de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de compreender adicionalmente a remoção da fase de imagem de SAR processada depois da aplicação do algoritmo de difusão anisotrópico complexo, porém antes da exibição.

5. MÉTODO IMPLEMENTADO EM COMPUTADOR, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de compreender adicionalmente a provisão da imagem de SAR processada depois

da aplicação do algoritmo de difusão anisotrópico complexo como entrada para o processamento interferométrico com uma outra imagem de SAR processada.

5 6. SISTEMA COMPUTADORIZADO PARA PROCESSAR IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR) COMPLEXAS, caracterizado pelo fato de compreender:

um banco de dados para armazenar as imagens de SAR complexas a serem processadas; e

10 um processador para processar as imagens de SAR complexas armazenadas do dito banco de dados, em que o dito processamento compreende:

a recepção de um conjunto de dados de SAR complexos para cada imagem de SAR complexa armazenada em que cada conjunto de dados de SAR complexo compreende uma parte real e  
15 imaginária para cada pixel, e

a aplicação de um algoritmo de difusão anisotrópico complexo ao conjunto de dados de SAR complexos de modo que a parte real e imaginária para cada pixel seja processada sem linearidade para gerar uma imagem de SAR processada.

20 7. SISTEMA COMPUTADORIZADO, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que cada conjunto de dados de SAR complexo é recebido no espaço de frequência; o dito processador também converte o espaço de frequência em espaço de imagem, em que o espaço de frequência corresponde à  
25 fase e à potência para cada pixel e o espaço de imagem corresponde à fase e à amplitude para cada pixel.

8. SISTEMA COMPUTADORIZADO, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de compreender adicionalmente um monitor acoplado ao dito processador para  
30 exibir a imagem de SAR processada depois da aplicação do algoritmo de difusão anisotrópico complexo à mesma.

9. SISTEMA COMPUTADORIZADO, de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que o dito

processador também remove a fase de imagem de SAR processada depois da aplicação do algoritmo de difusão anisotrópico complexo, porém antes da exibição.

5 10. SISTEMA COMPUTADORIZADO, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que o dito processador também remove a imagem de SAR processada depois da aplicação do algoritmo de difusão anisotrópico complexo como entrada para o processamento interferométrico com uma outra imagem de SAR processada.

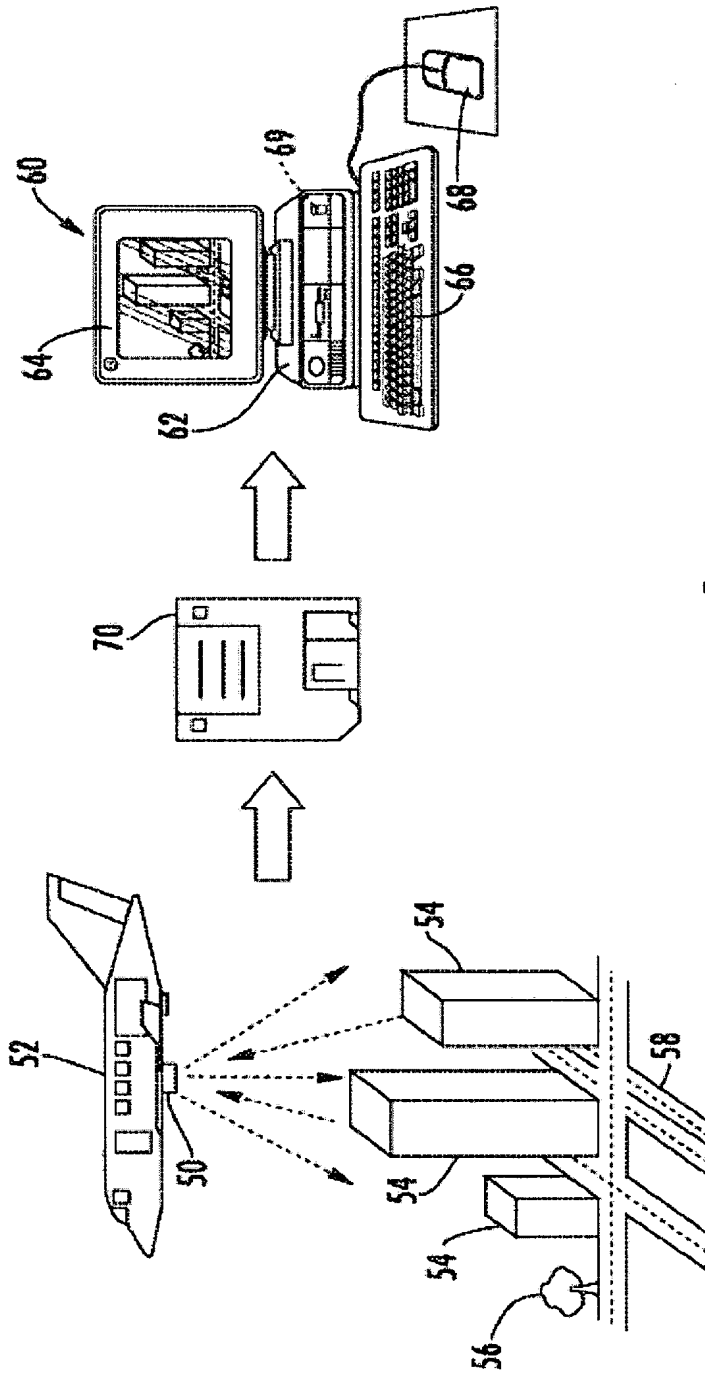
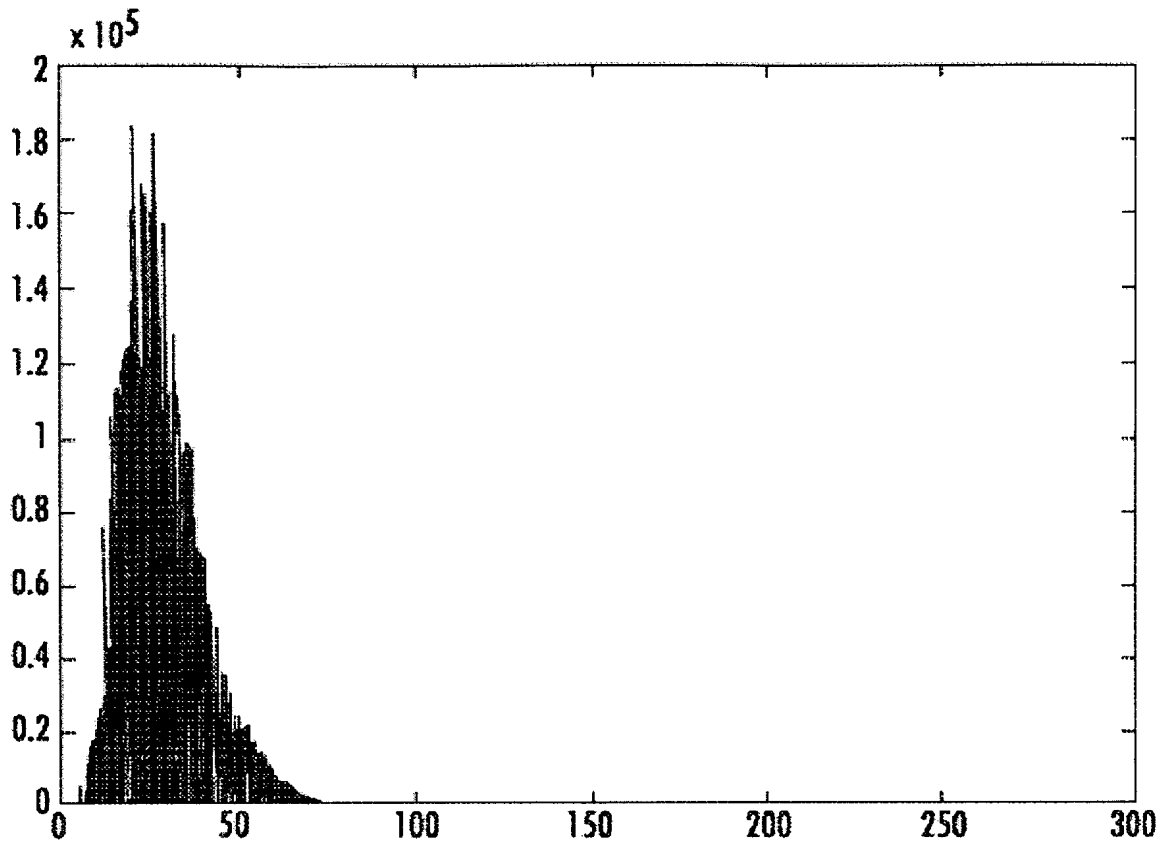


FIG. 1

Distribuição de intensidades de pixels



**FIG. 2**

## Distribuição de valores de gradientes

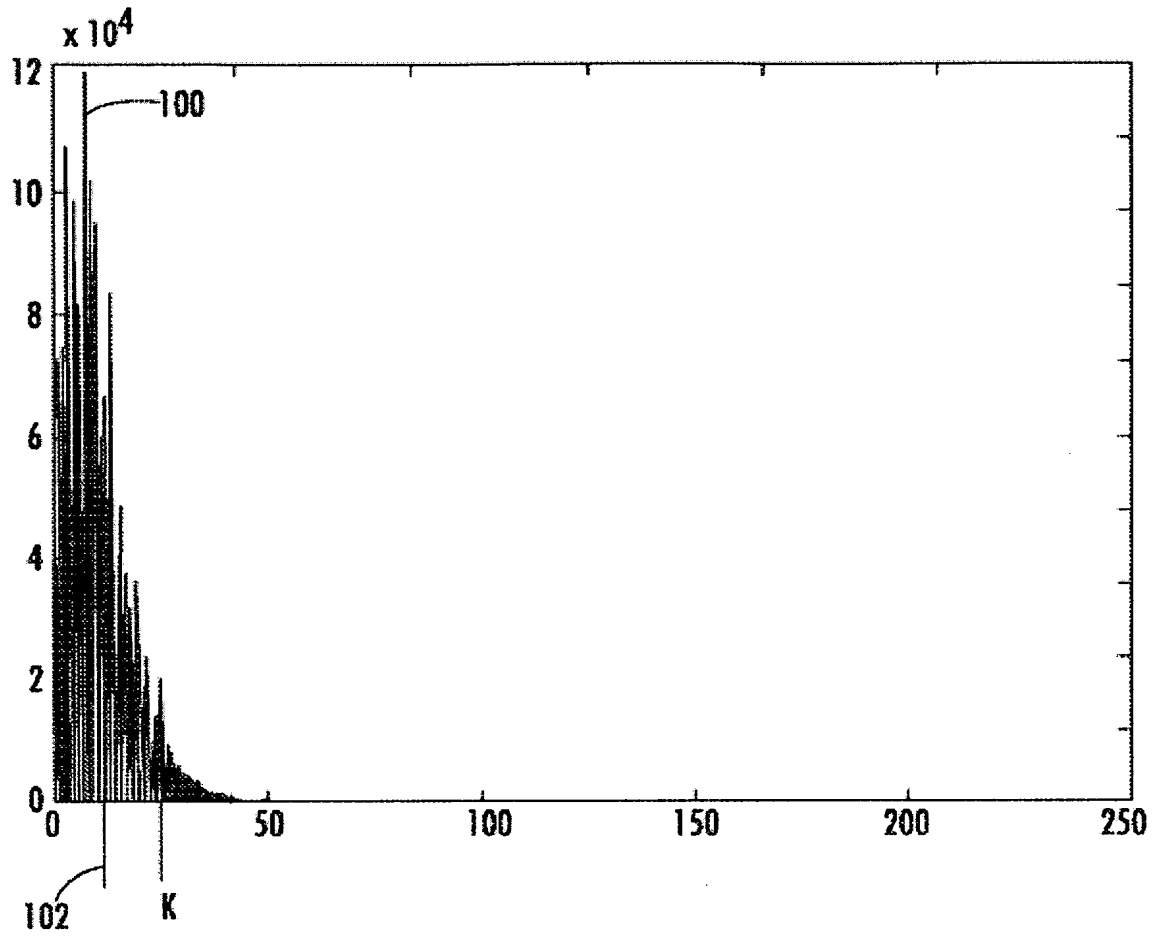
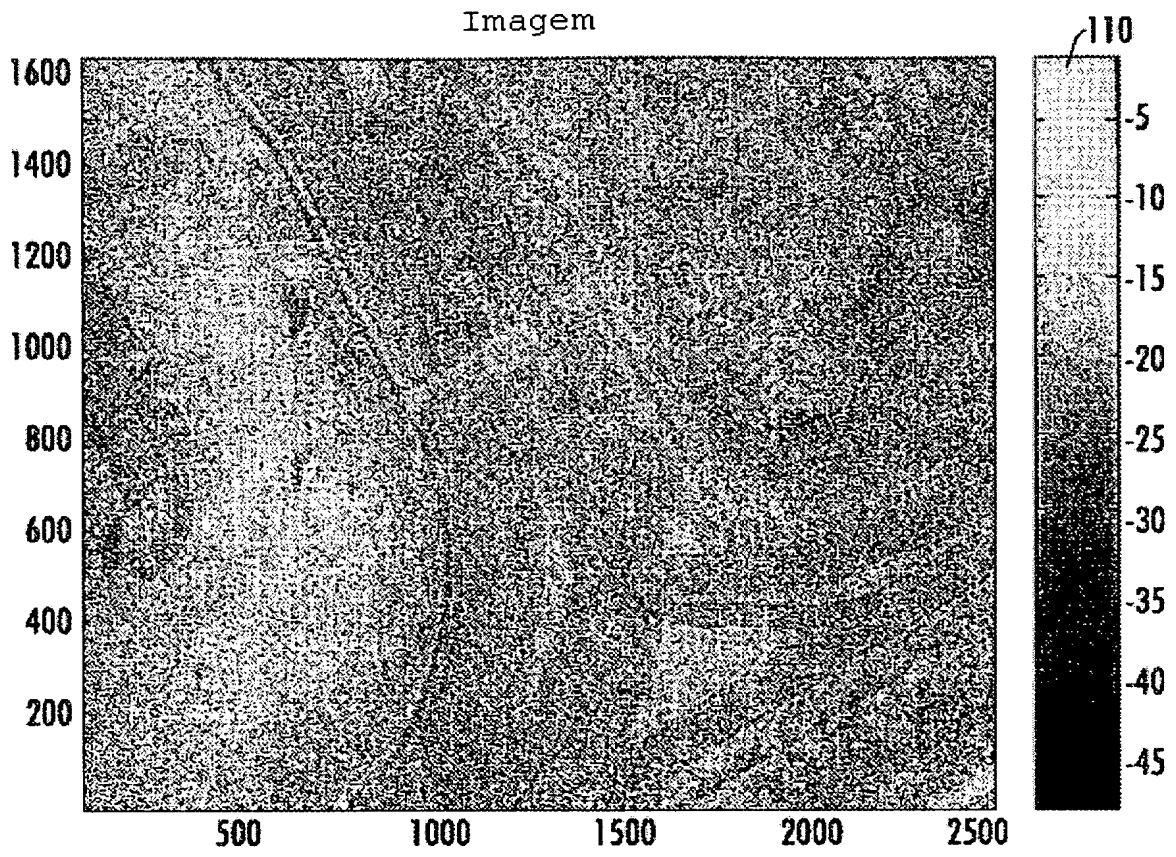


FIG. 3



**FIG. 4**

Imagem dos gradientes

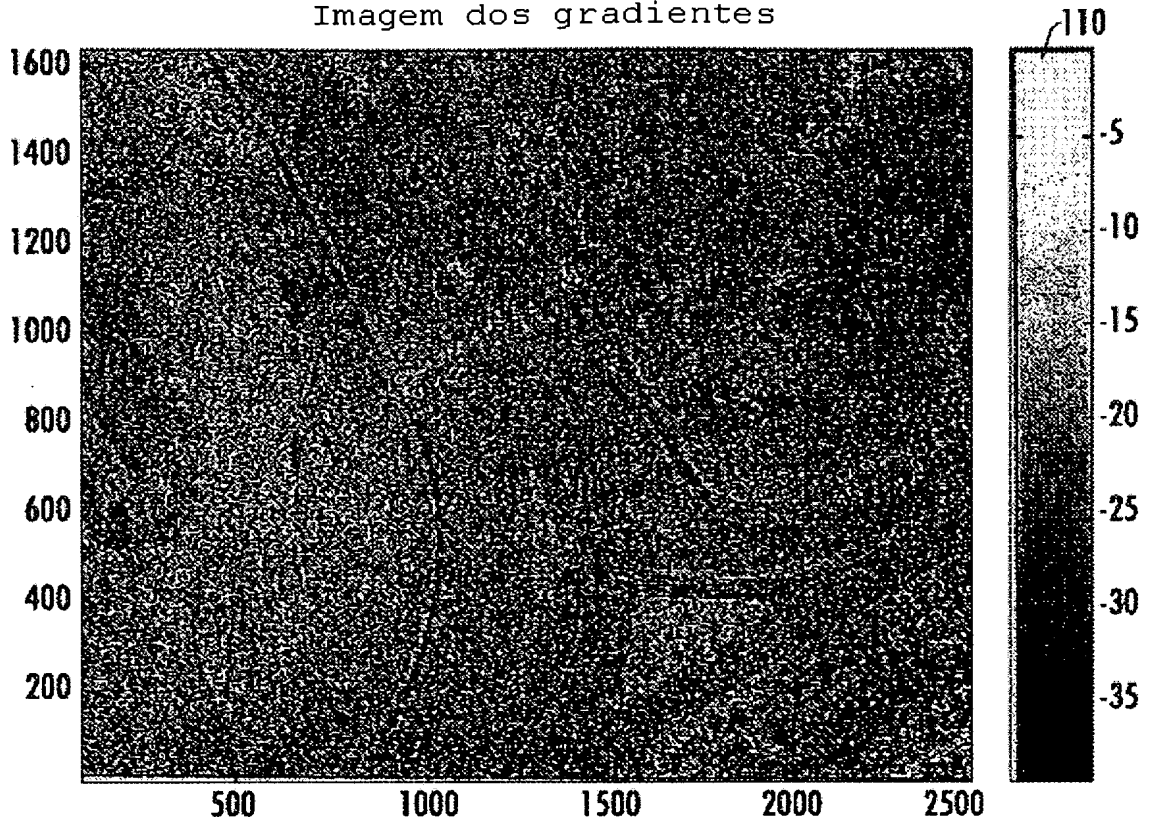
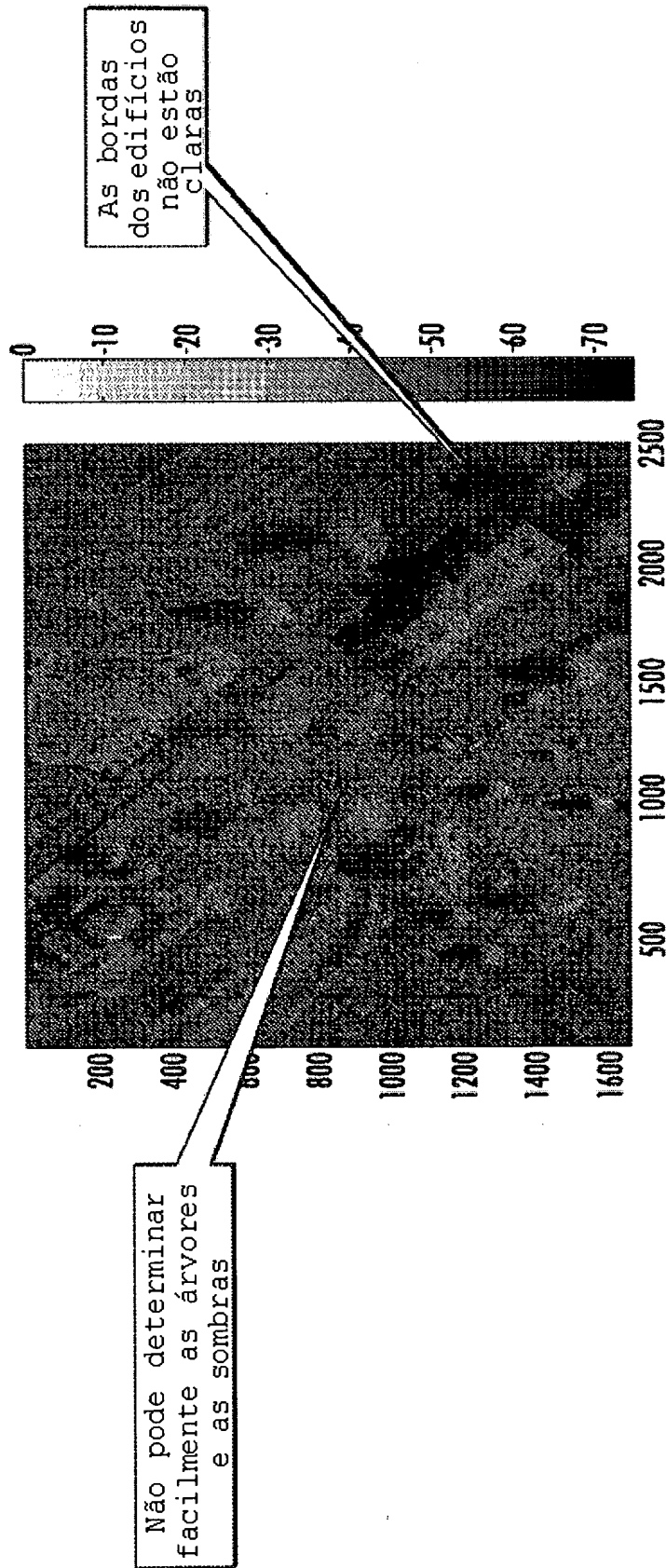


FIG. 5



**FIG. 6**

(Técnica Anterior)

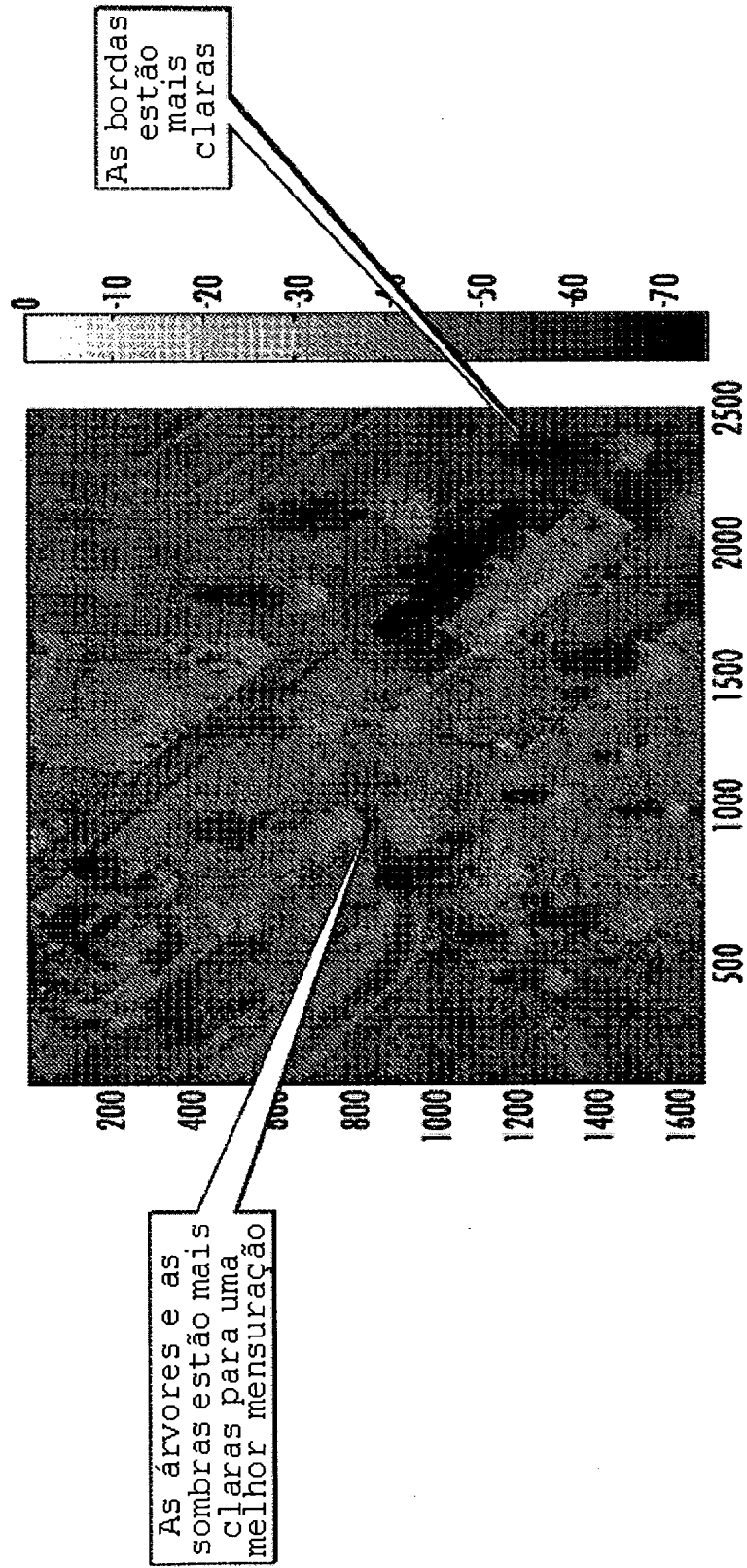
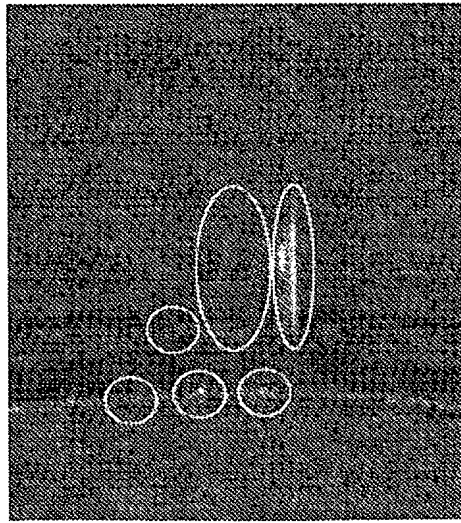
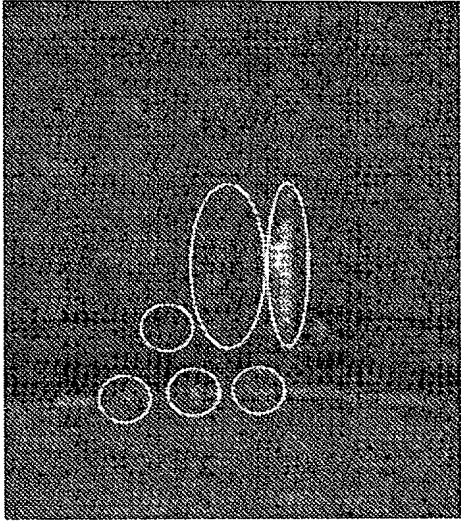


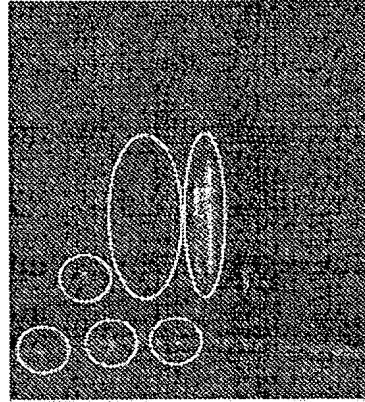
FIG.7



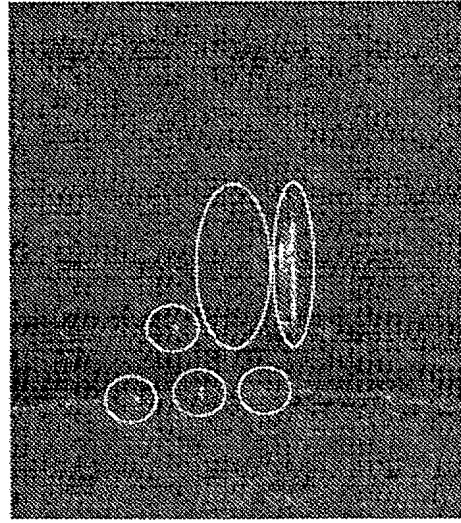
**3x3 FIG. 9**  
(Técnica Anterior)



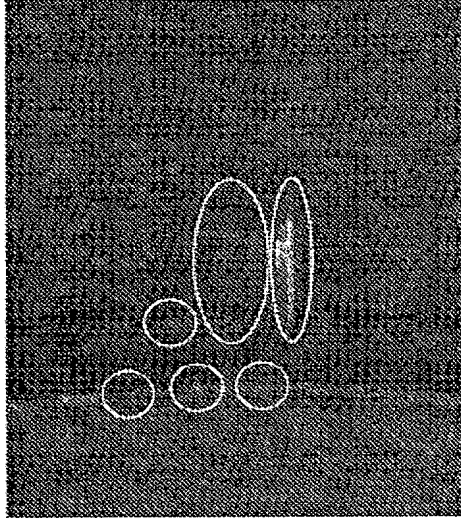
**De Gauss FIG. 10**  
(Técnica Anterior)



original  
**FIG. 8**



**Anisotrópica FIG. 11**  
(Técnica Anterior)



**Remoção anisotrópica de ruído FIG. 12**

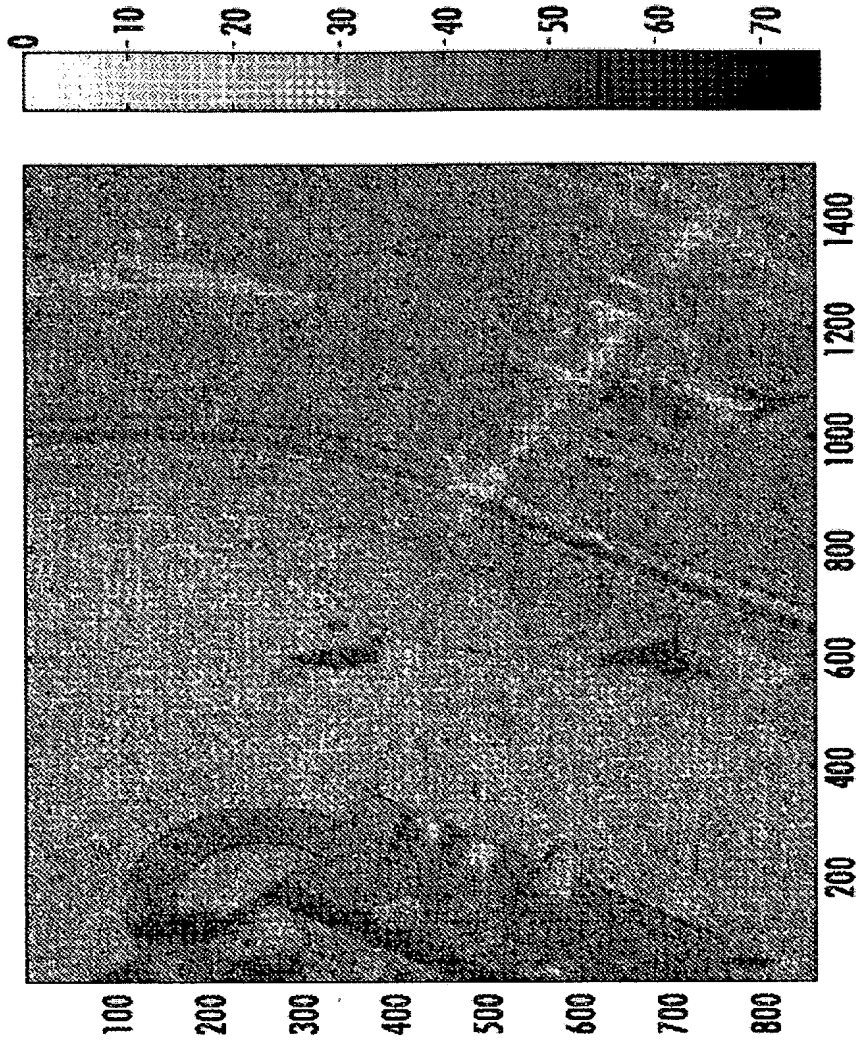


Imagem original

**FIG. 13**

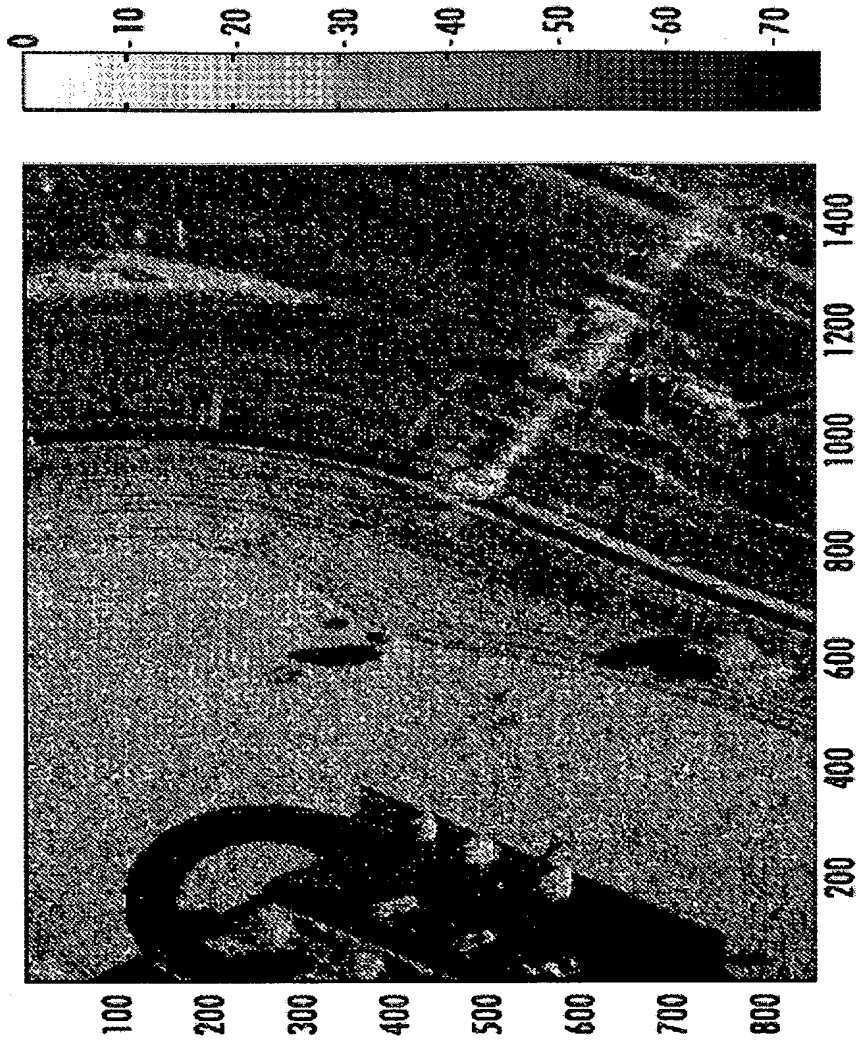
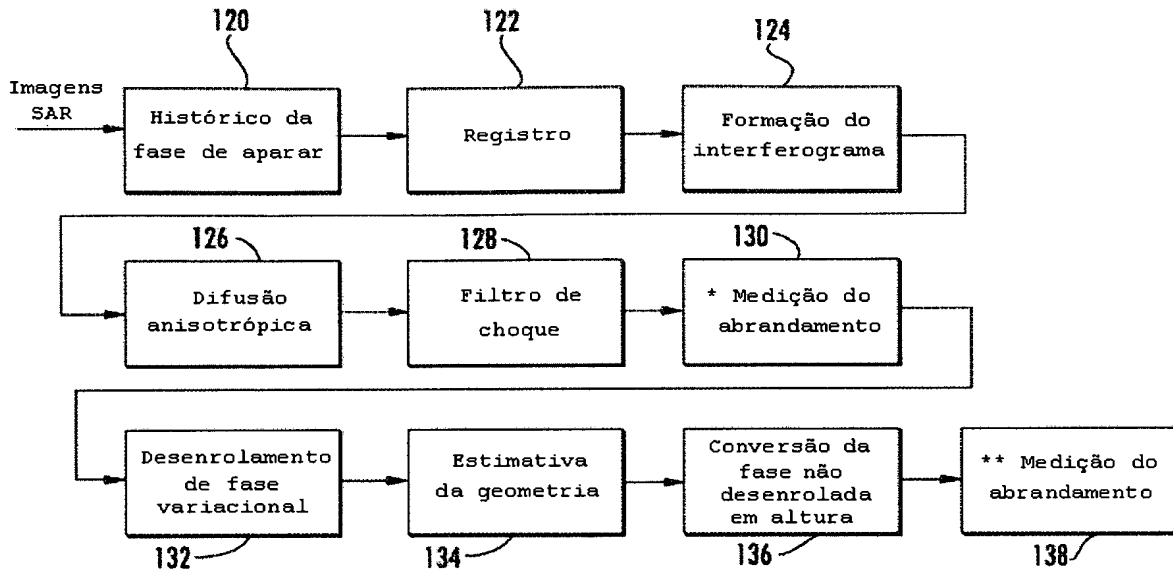


Imagem difusa

**FIG. 14**



\* Se não houver nenhum enrolamento de ambigüidade

\*\* Se houver mudança catastrófica ou enrolamento de ambigüidade

**FIG. 15**

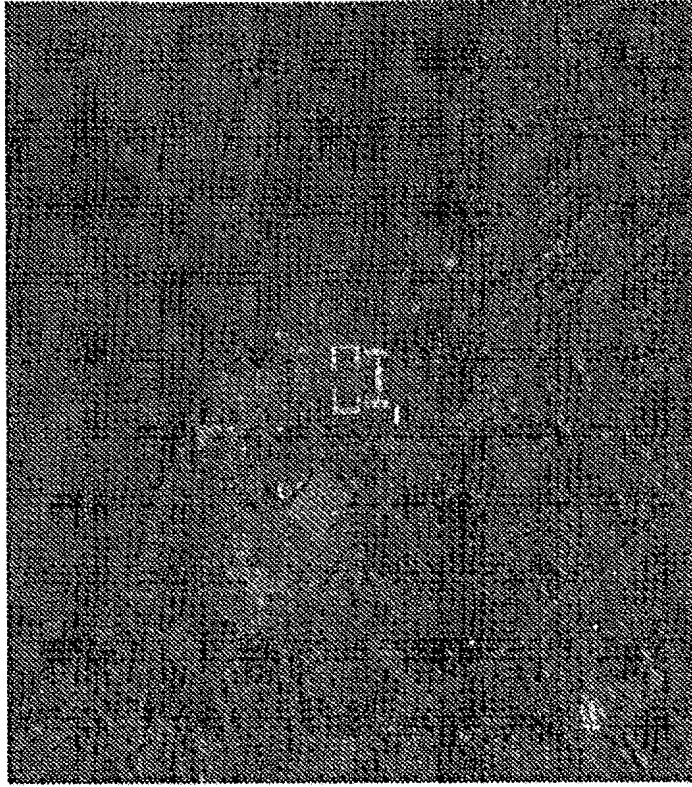


Imagem multi-espectral de  
vetor próximo original

**FIG. 16**

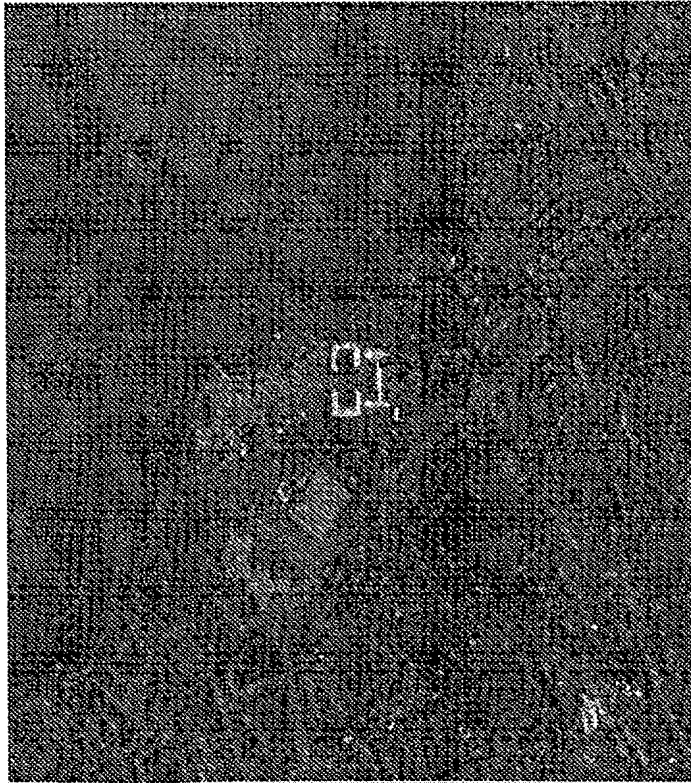


Imagem multi-espectral de vetor  
próximo de filtro de choque

**FIG. 17**

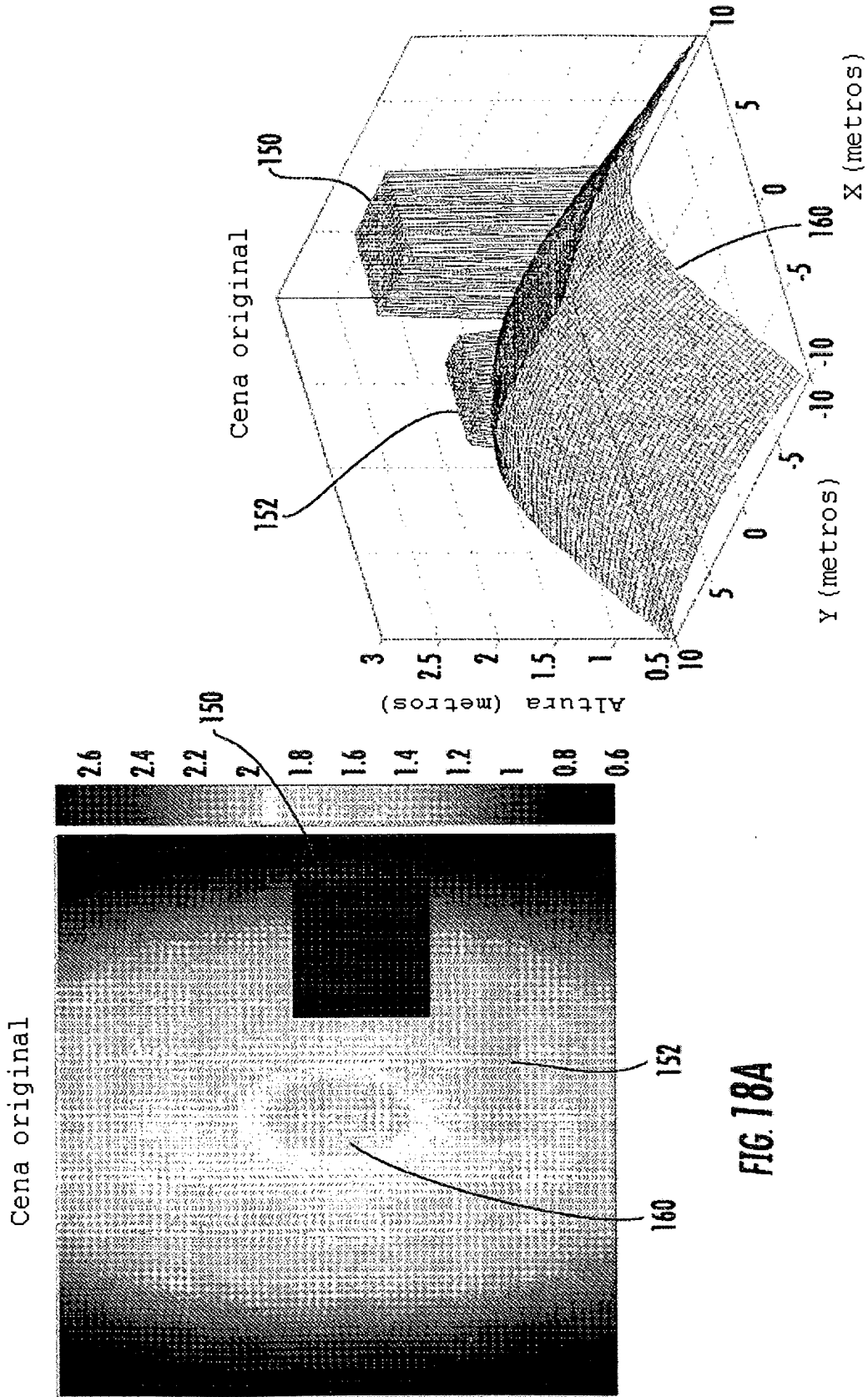
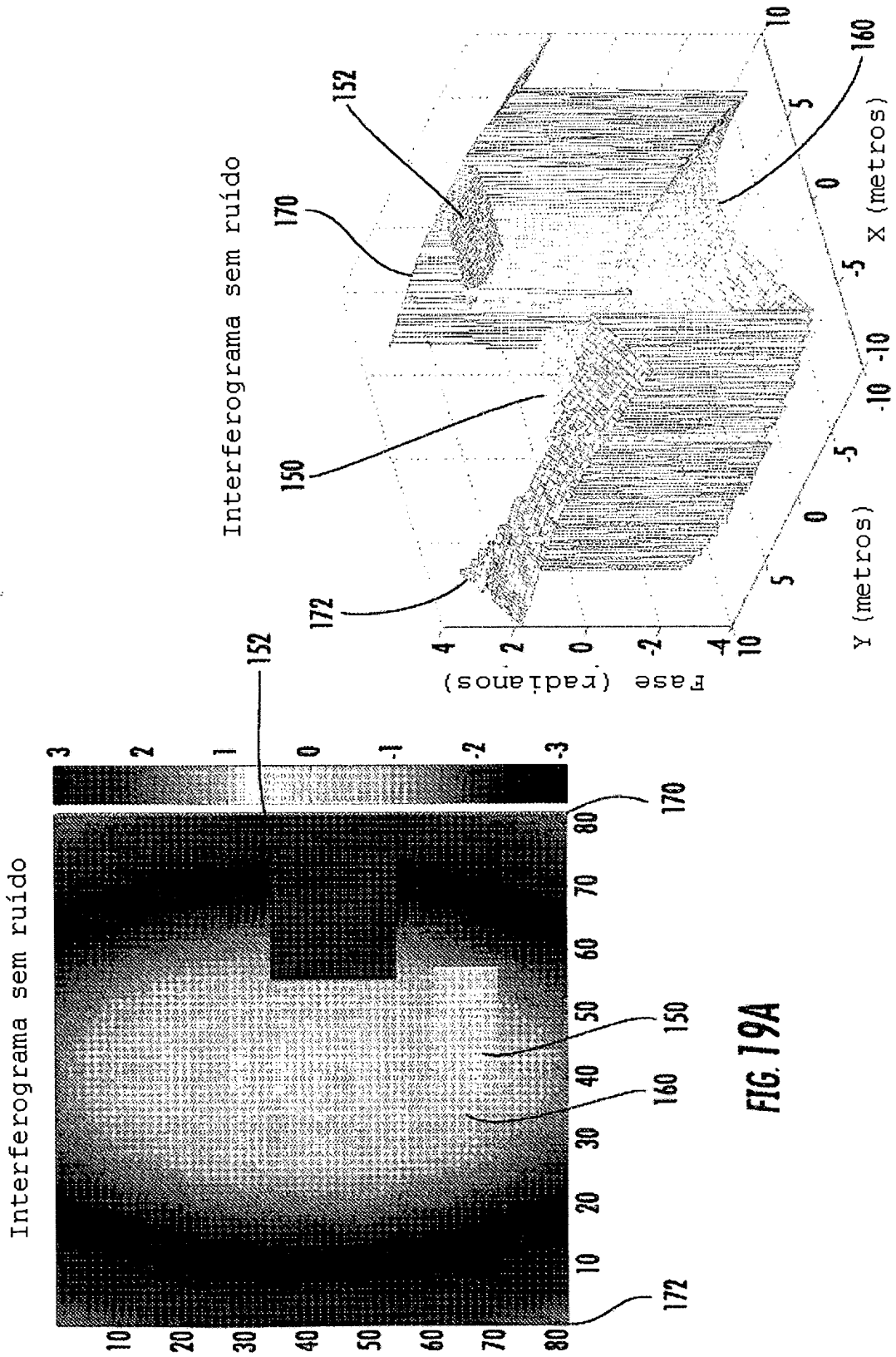


FIG. 18B

Cena original

FIG. 18A



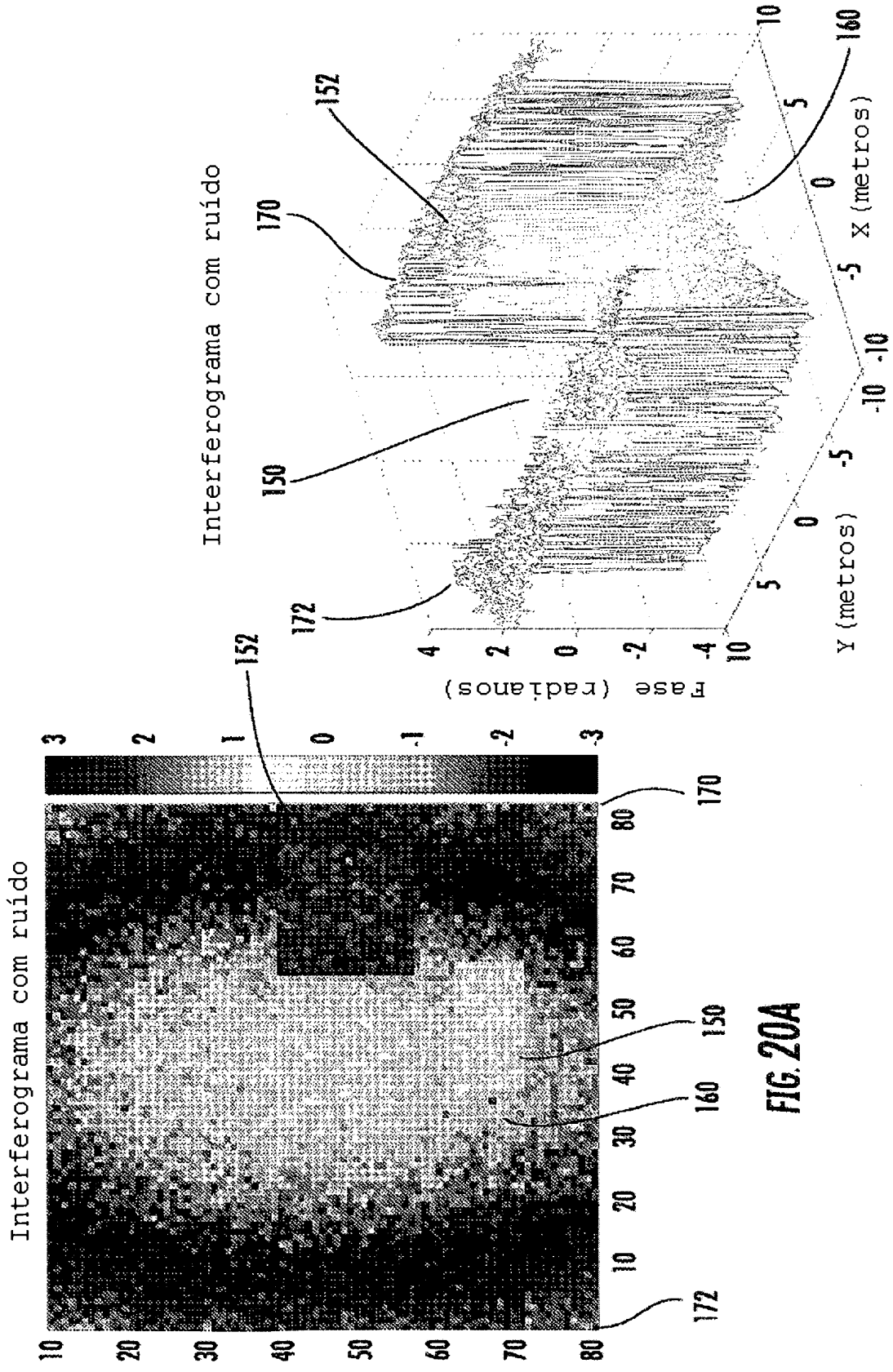


FIG. 20A

FIG. 20B

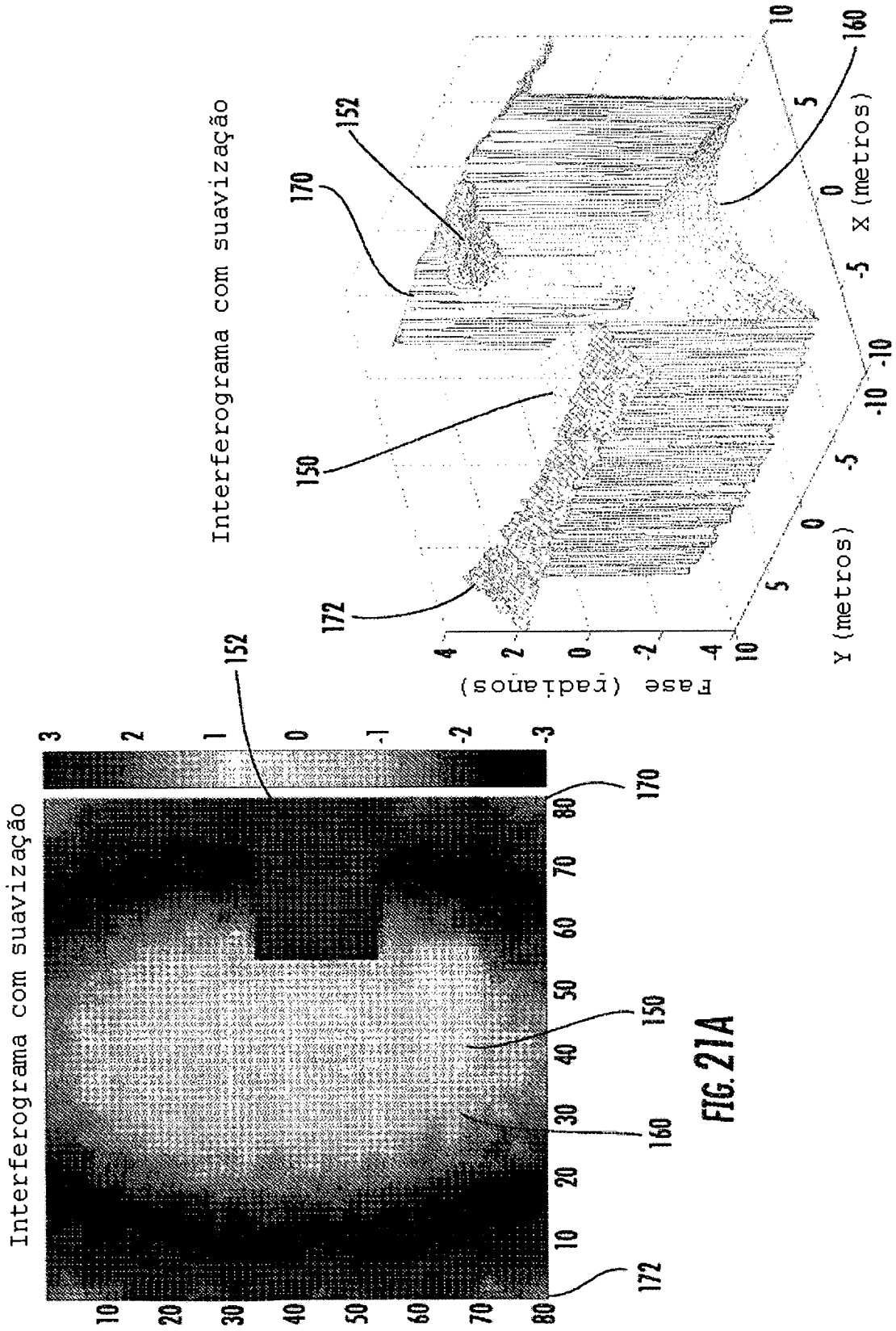


FIG. 21A

FIG. 21B

Interferograma de difusor anisotrópico complejo

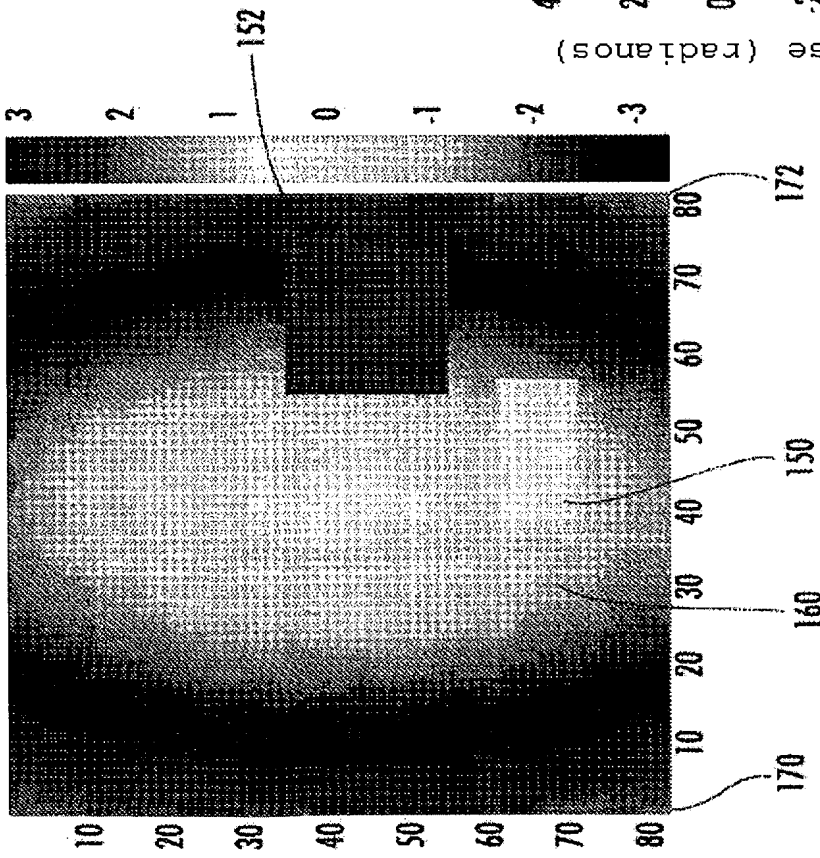


FIG 22A

Interferograma de difusor anisotrópico complejo

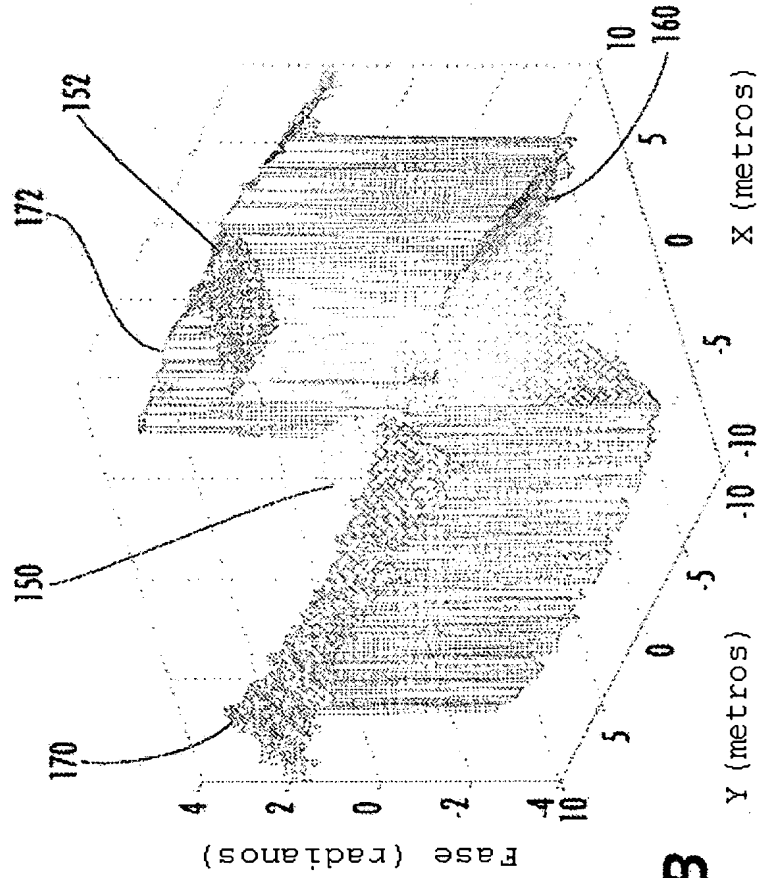
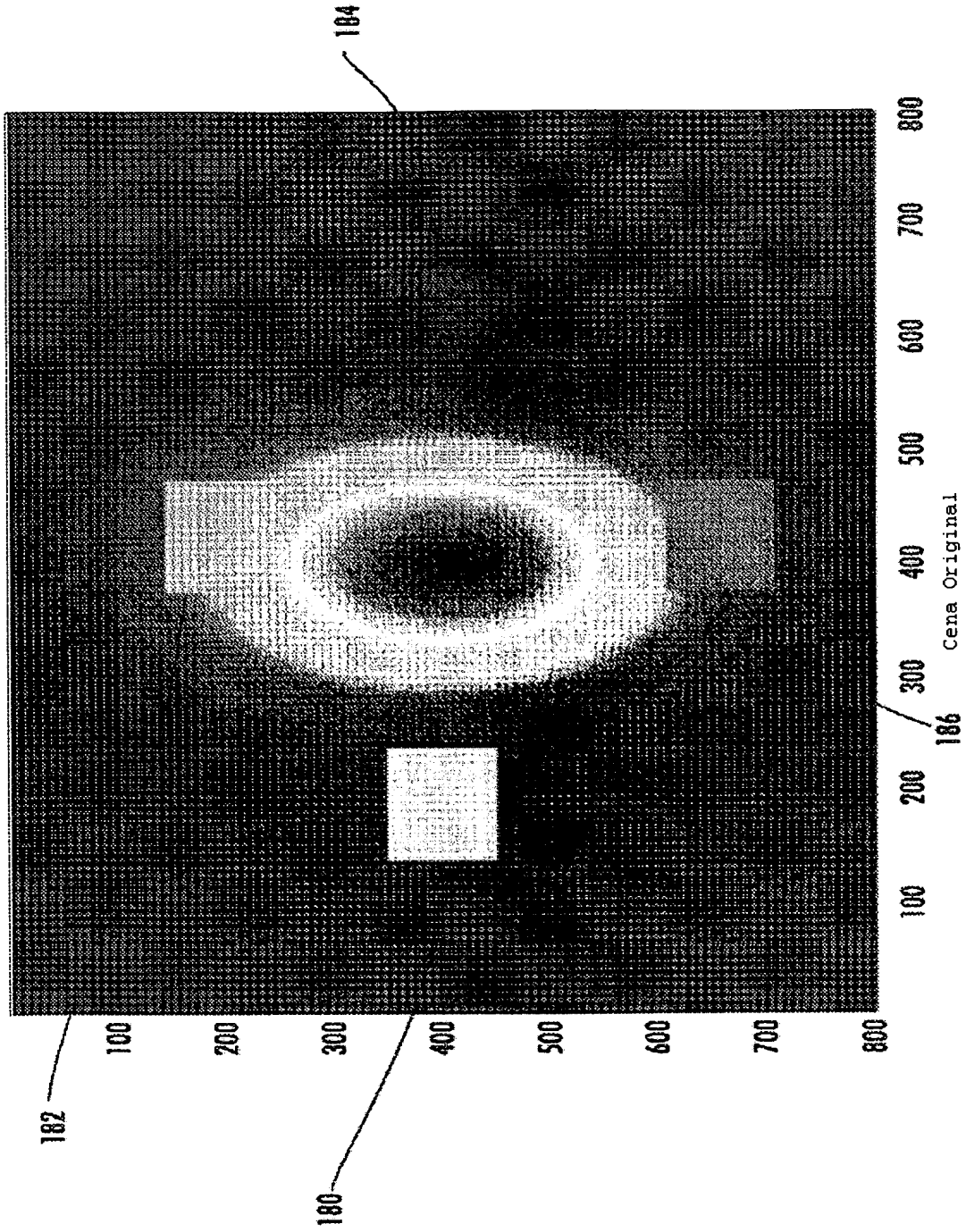
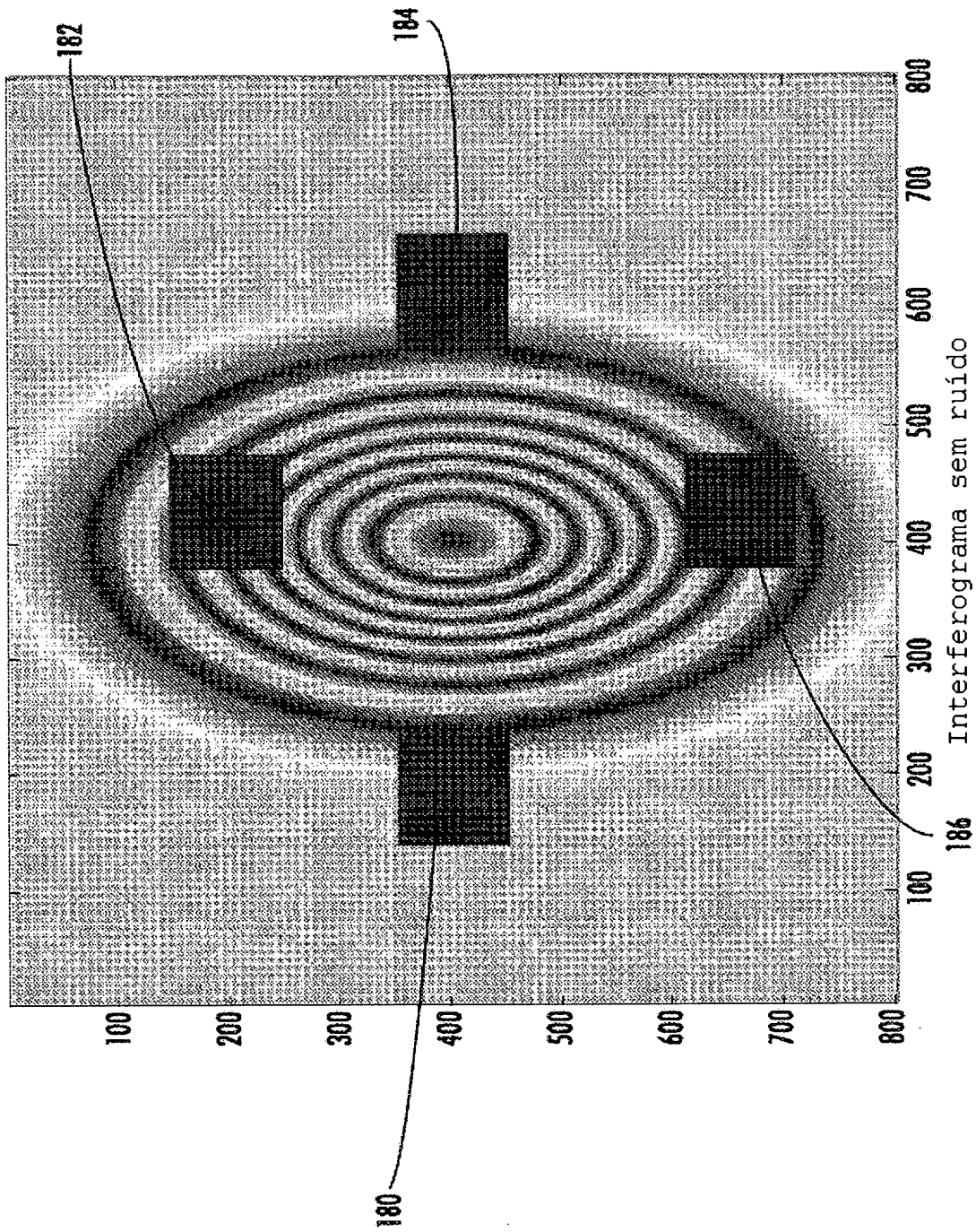


FIG. 22B

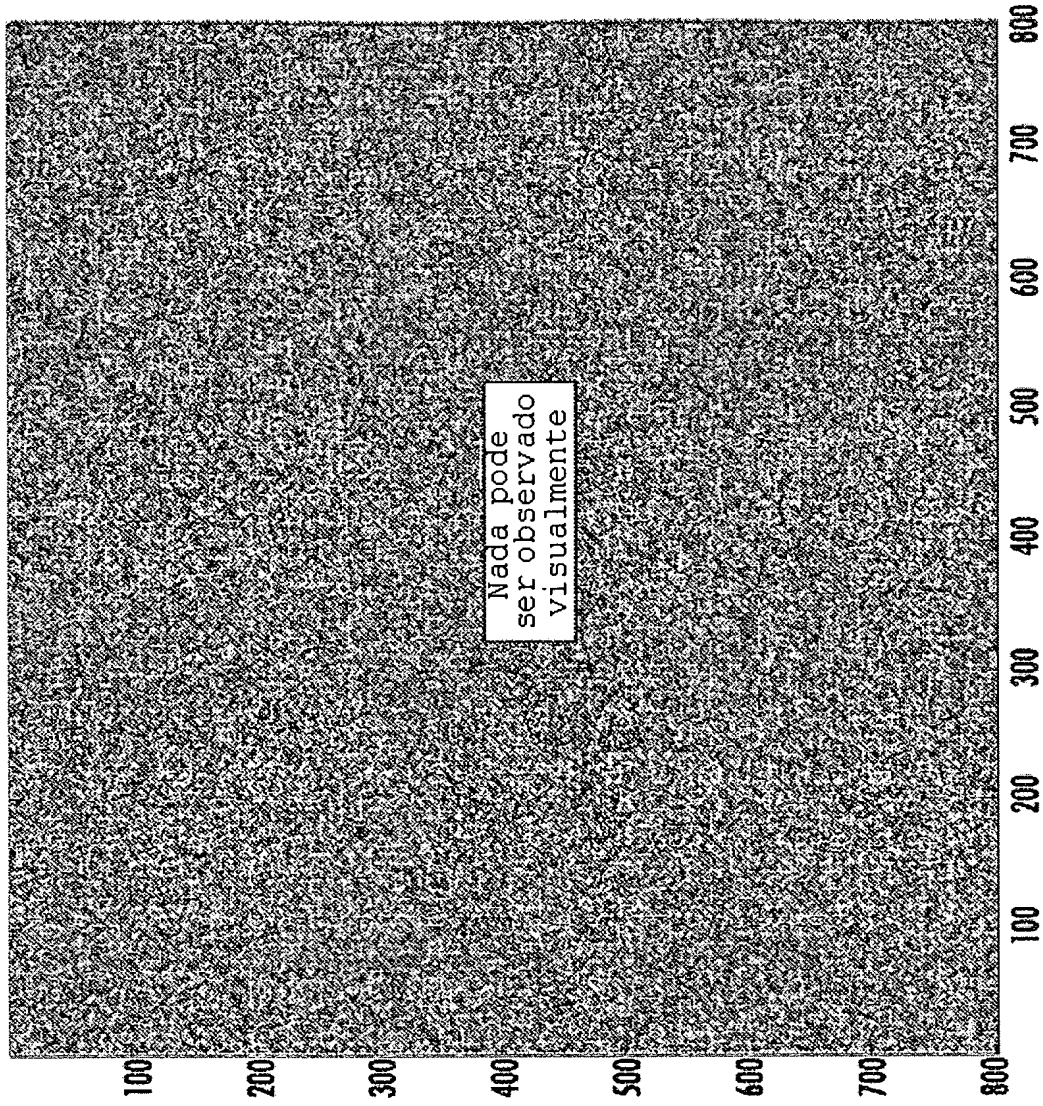


**FIG. 23**



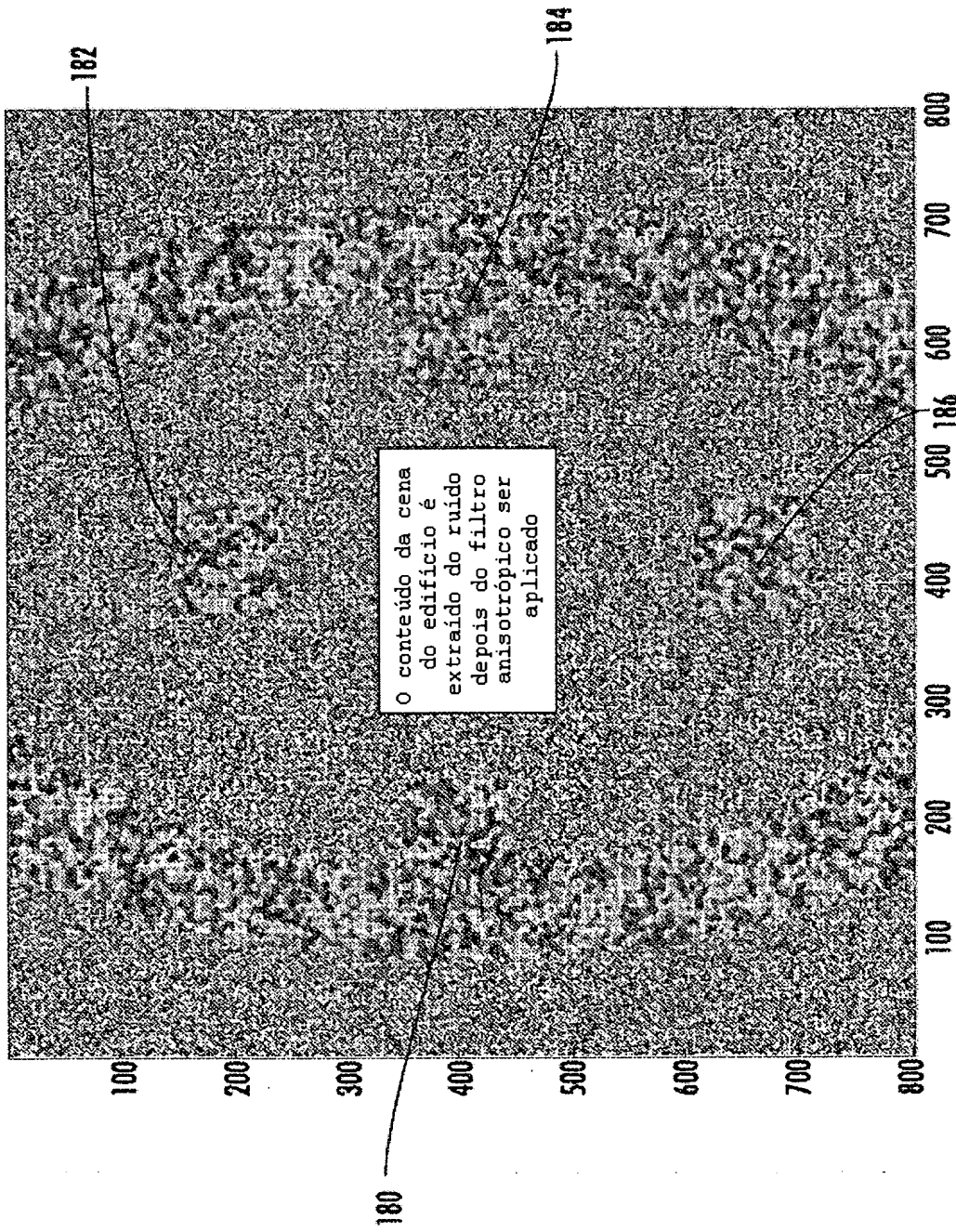
186 Interferograma sem ruído

FIG. 24



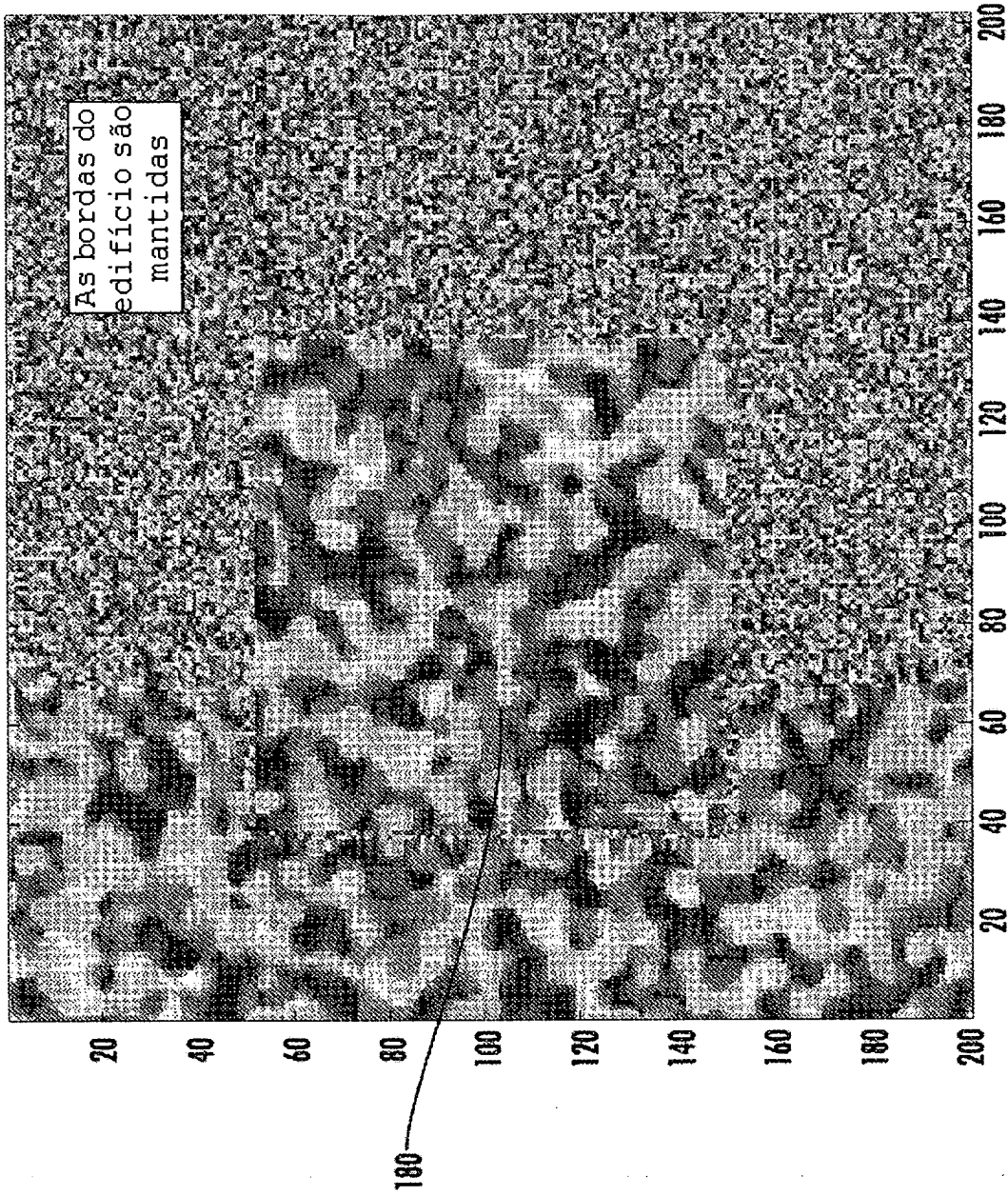
Interferograma extremamente ruidoso

**FIG. 25**



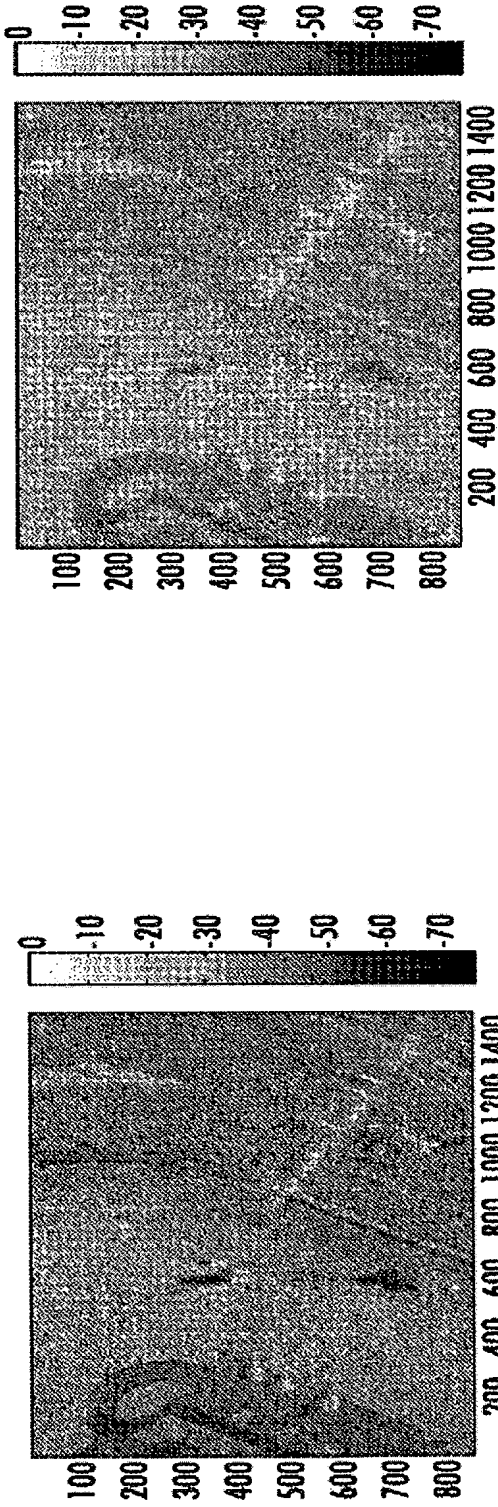
Difusão anisotrópica complexa

**FIG. 26**

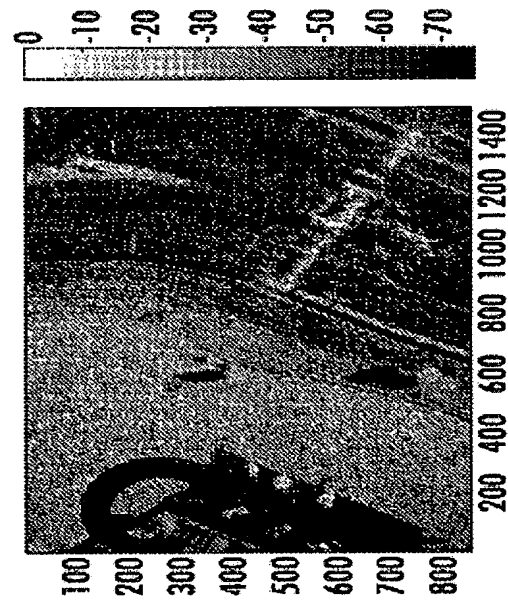


Interferograma difuso anisotrópico aproximado

**FIG. 27**



**FIG. 29**  
(Técnica Anterior)



Vinte interações de difusão completa

**FIG. 30**

Original



FIG. 31

Com filtragem de Gauss

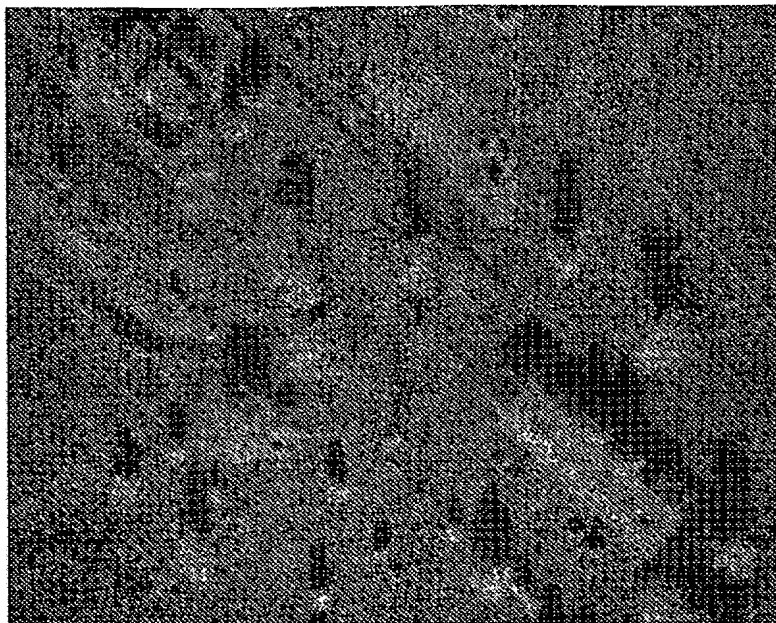


FIG. 32

Anisotropicamente filtrada



FIG. 33



Original

**FIG. 34**

As árvores  
e as  
sombras  
não estão  
bem  
definidas



Compressão de faixa dinâmica  
não-linear e quantificação

**FIG. 35**

As árvores  
e as sombras  
estão  
melhor  
definidas



Descompressão com difusão anisotrópica

**FIG. 36**



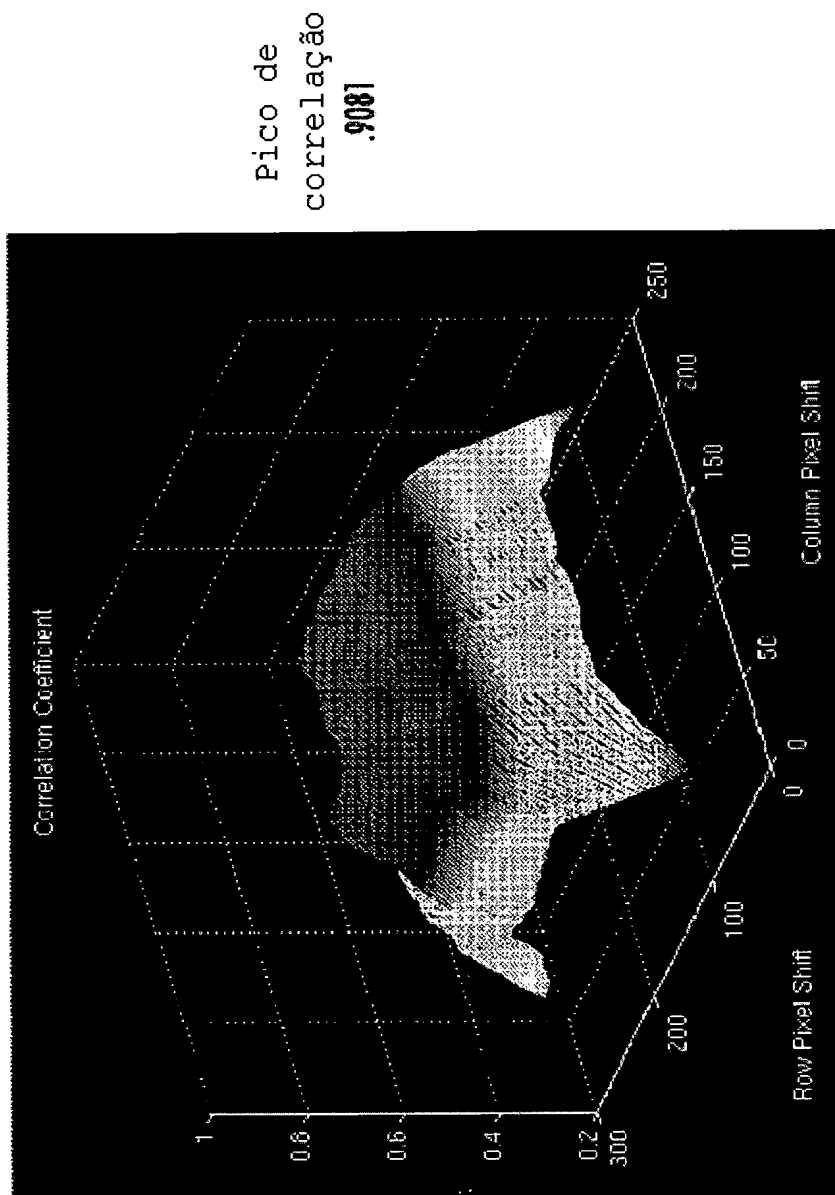
Imagem 1 não registrada

**FIG. 37**



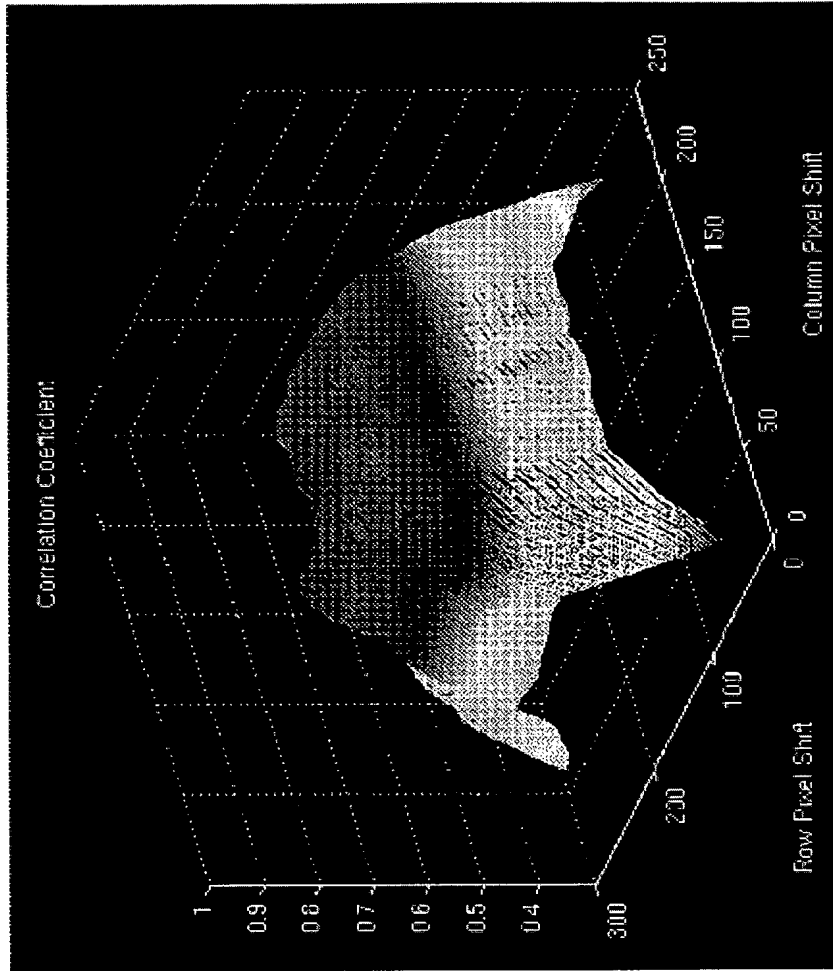
Imagem 2 não registrada

**FIG. 38**



Superfície de correlação não filtrada

**FIG. 39**



Superfície de correlação filtrada

**FIG. 40**



Imagem 1 com pixels  
alterados (não filtrada)

**FIG. 41**

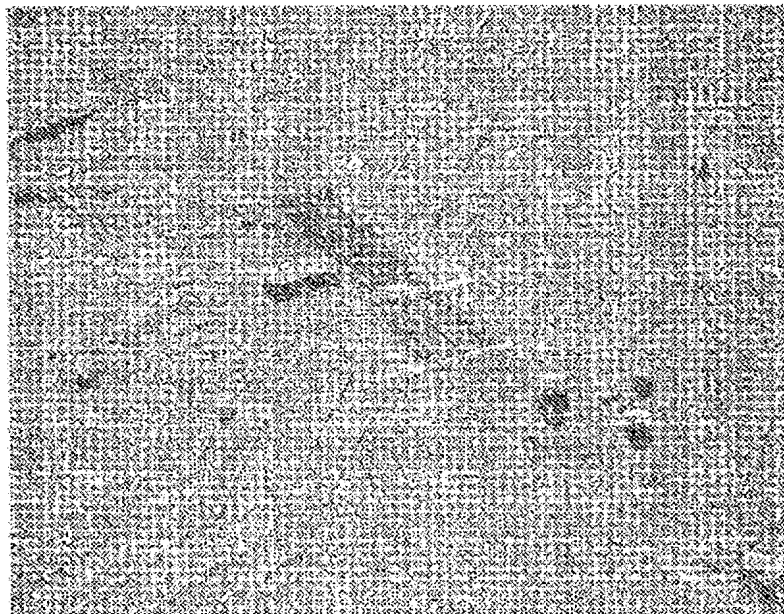


Imagem 2 com pixels  
alterados (não filtrada)

**FIG. 42**

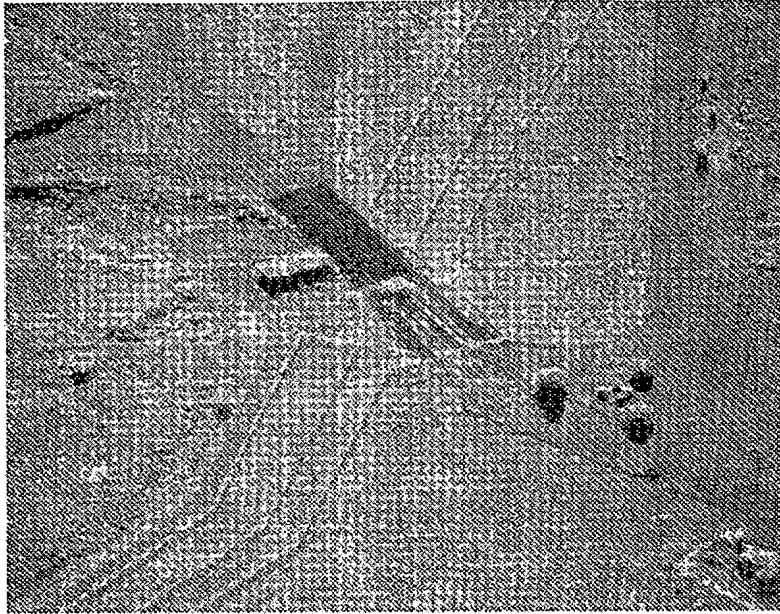


Imagem 1 com pixels  
alterados (filtrada)

**FIG. 43**

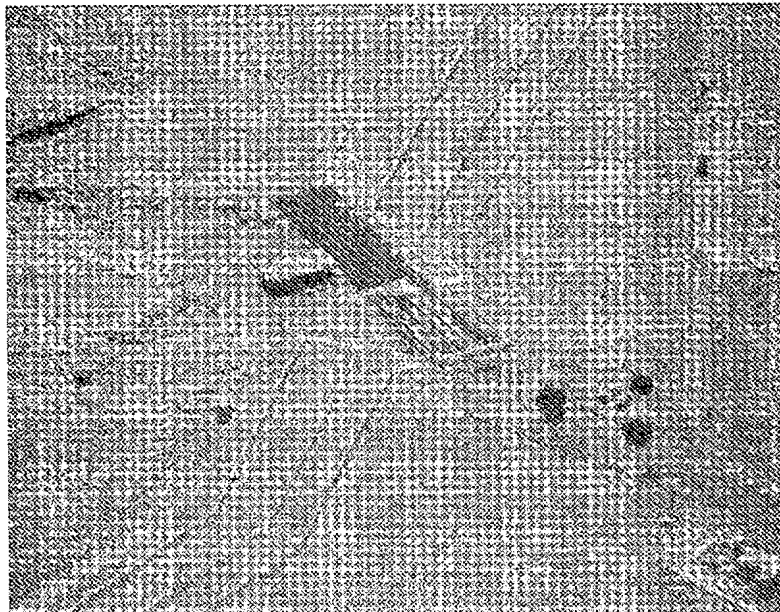


Imagem 2 com pixels  
alterados (não filtrada)

**FIG. 44**

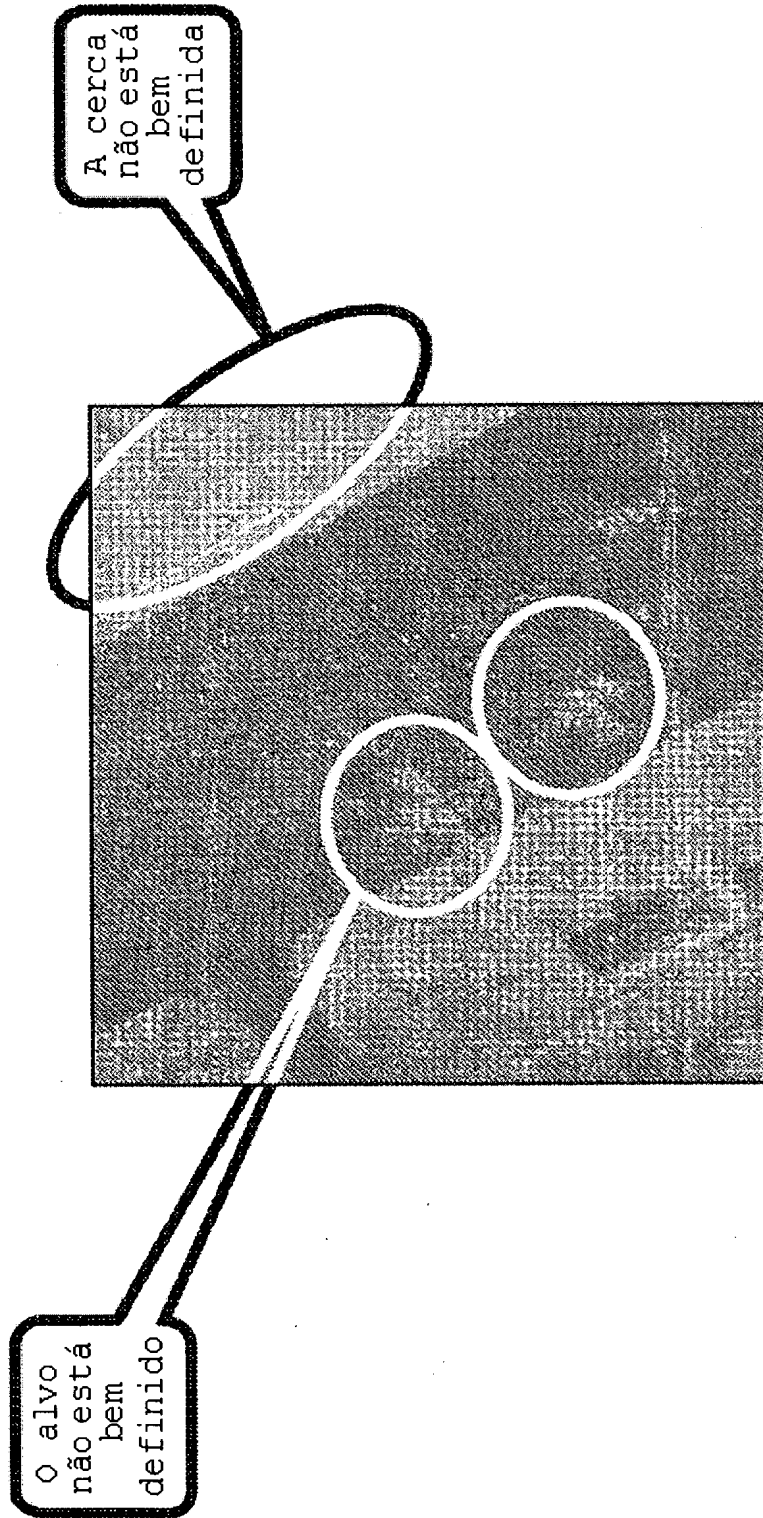
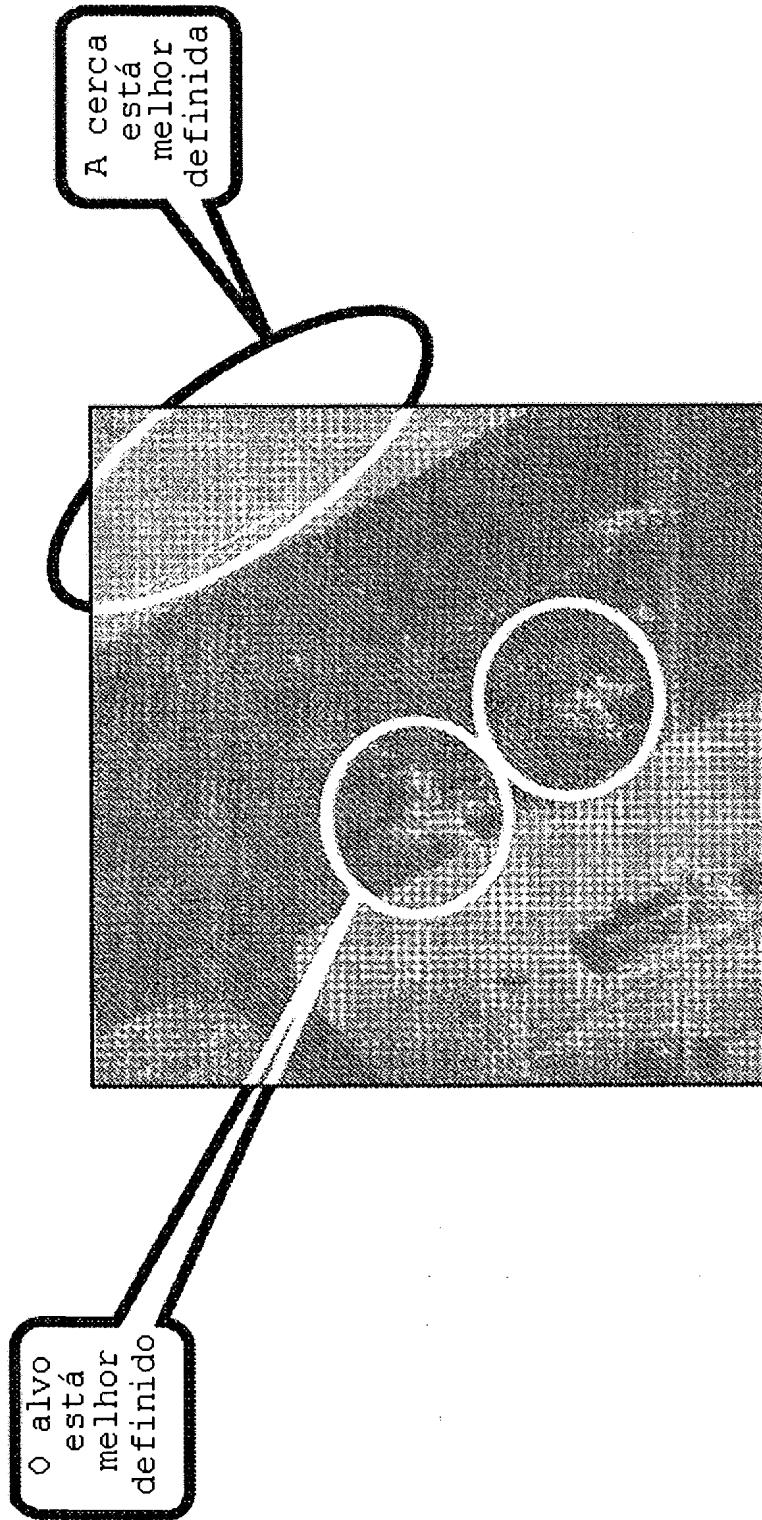


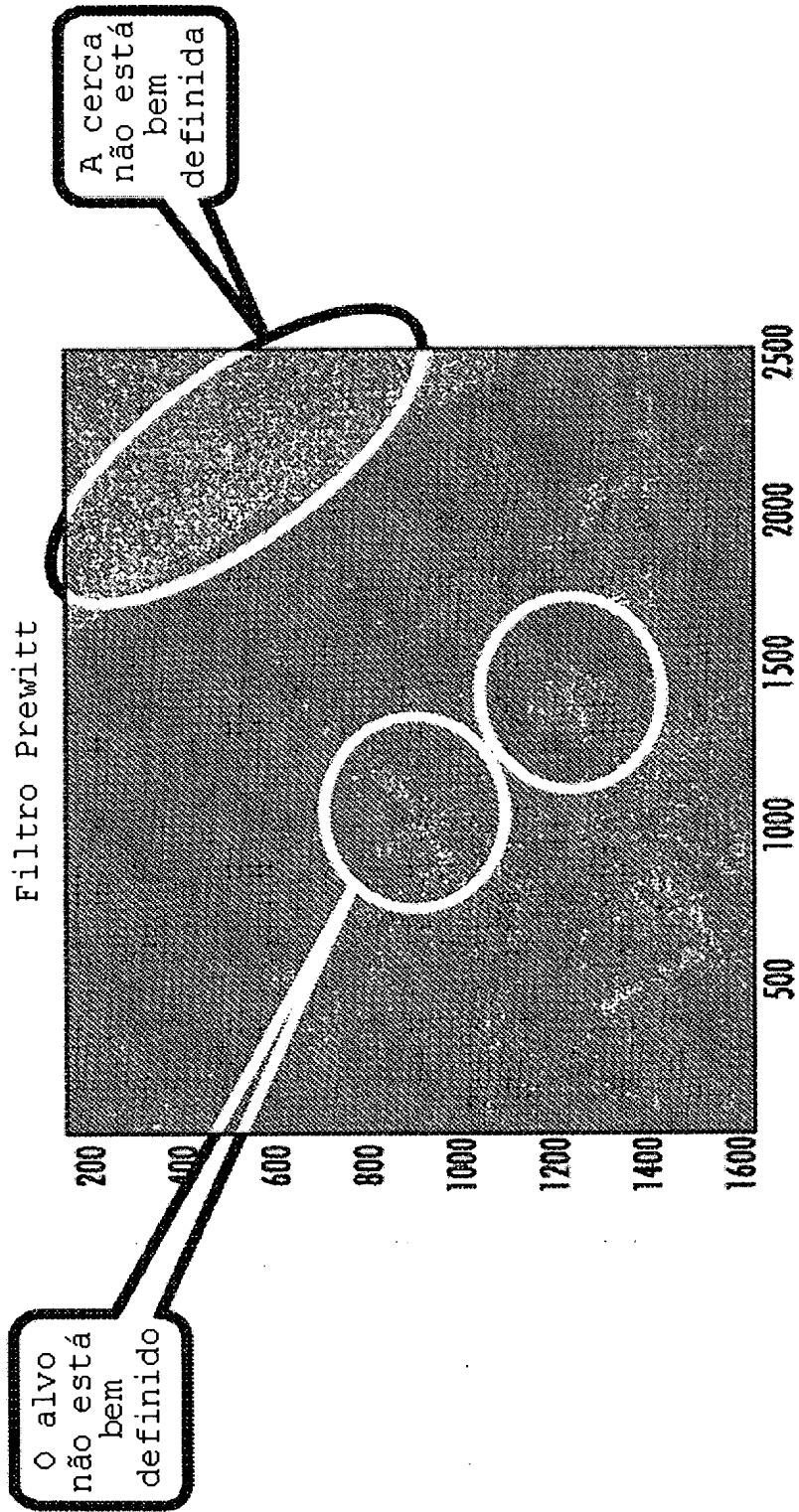
Imagem original

**FIG. 45**



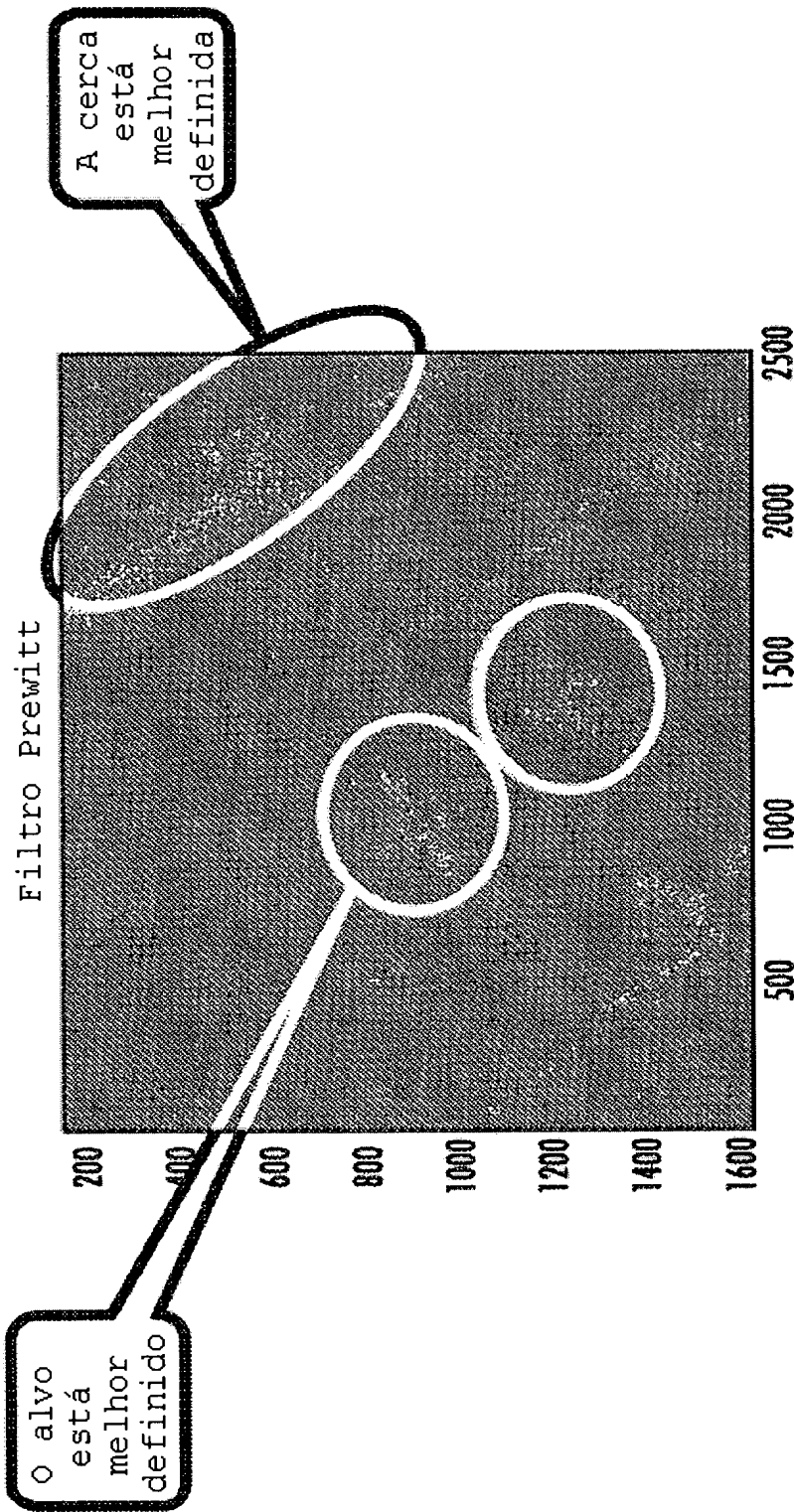
Difusão anisotrópica

**FIG. 46**



Filtro Prewitt da imagem original

**FIG. 47**



Filtro Prewitt de imagem diferente

**FIG. 48**

RESUMO

MÉTODO IMPLEMENTADO EM COMPUTADOR PARA PROCESSAR  
IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR) E SISTEMA  
COMPUTADORIZADO PARA PROCESSAR IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA  
5 SINTÉTICA (SAR) COMPLEXAS

Trata-se de um sistema computadorizado (60) para  
processar imagens de radar de abertura sintética (SAR)  
complexas que inclui um banco de dados para armazenar as  
imagens de SAR complexas a serem processadas, e um  
10 processador (69) para processar uma imagem de SAR complexa do  
banco de dados. O processamento inclui a recepção de um  
conjunto de dados de SAR complexos para uma imagem de SAR que  
compreende uma pluralidade de pixels, e a aplicação de um  
algoritmo de difusão anisotrópico complexo ao conjunto de  
15 dados de SAR complexos. O conjunto de dados de SAR complexos  
inclui uma parte real e imaginária para cada pixel.