



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

(11) PI 0105049-4 B1

(22) Data do Depósito: 31/08/2001

(45) Data de Concessão: 21/11/2017



(54) Título: MÉTODO PARA PRODUÇÃO DE MAPAS POR TÉCNICA DE RADAR

(51) Int.Cl.: G01S 13/89

(73) Titular(es): BRADAR INDÚSTRIA S/A

(72) Inventor(es): JOÃO ROBERTO MOREIRA NETO

MÉTODO PARA PRODUÇÃO DE MAPAS POR TÉCNICA DE RADAR

Campo da Invenção

[001] Refere-se a presente invenção ao campo da elaboração de mapas topográficos e/ou temáticos, mais particularmente mediante o emprego de radares aerotransportados.

Descrição do Estado da Técnica

[002] A produção de mapas pode ser feita por trabalho de campo ou por sensoriamento remoto. A solução por sensoriamento remoto pode ser feita por fotogrametria, por laser de varredura ou por radar. O sensoriamento remoto pode ser executado por aeronaves diversas como também por satélites. Os radares utilizados baseiam-se na técnica de radares interferométricos de abertura sintética. Radares de abertura sintética são radares de visada lateral que produzem imagens de duas dimensões de alta resolução.

[003] Para a projeção dessa imagem com geometria de visada lateral para um sistema cartográfico qualquer, ou seja, a geração de uma imagem ortorretificada, é necessária a informação da altura. A informação da altura ou da terceira dimensão é obtida através de interferometria, onde o radar é equipado com duas ou mais antenas, que visam a área a ser mapeada em direções diferentes.

[004] O processo da interferometria compreende os seguintes passos:

I) Cálculo da diferença de fase entre duas antenas. Nesse caso a fase tem uma ambiguidade de múltiplos de 360 graus. Essa fase é denominada de "fase dobrada".

II) Desdobramento da fase dobrada, ou seja, eliminação da ambiguidade de múltiplos de 360 graus.

III) Conversão da fase desdobrada em distância e cálculo da altura do solo. Para esse cálculo necessita-se a posição absoluta das duas antenas. Isso requer uma precisão alta do sistema de navegação, que é composto de uma plataforma inercial e do sistema GPS (global positioning system).

[005] Realizando essa sequência para todos os pontos, obtém-se o modelo do terreno em geometria de visada lateral. Para projetá-lo no sistema cartográfico executa-se a geocodificação, que necessita, além do modelo do terreno em geometria de visada lateral, a posição absoluta das antenas. O uso de mais do que duas antenas no processo interferométrico aumenta a qualidade do processo de desdobramento. Caso seja impossível

a instalação de duas ou mais antenas na aeronave ou no satélite, pratica-se a interferometria de duas ou múltiplas passagens ao invés da interferometria de uma passagem. Assim o radar interferométrico de abertura sintética, em inglês "Interferometric Synthetic Aperture Radar" ou Interferometric SAR ou InSAR, produz tanto imagens ortorretificadas como também o modelo digital do terreno .

[006] A execução do mapeamento por radar compreende os seguintes passos básicos:

IV) definição da área e qualidade da imagem a serem mapeados;

V) execução do voo e gravação dos dados brutos em mídia magnética ou ótica ;

VI) processamento dos dados crus;

VII) pós-processamento dos dados processados; e

VIII) geração de mapas topográficos ou temáticos.

[007] A qualidade das imagens e da topografia proveniente do radar aumentou extraordinariamente na última década, provocando a substituição do mapeamento até então feito pela fotogrametria e laser de varredura pelo mapeamento por radar. Uma frequência de transmissão popular é em torno de 8 a 12 GHz que é chamada de banda X e tem um comprimento de onda de 3 cm.

[008] A banda X permite a geração de ortoimagens preto e branco em alta resolução espacial, por exemplo, com 30 cm a 50 cm. A banda X penetra por nuvens sem problema algum e permite o mapeamento independente das condições atmosféricas. A banda X pouco penetra na vegetação. Com a banda X obtêm-se o modelo de superfície de altíssima precisão em áreas sem vegetação e o modelo de altura das copas das árvores com precisão moderada. A banda L, que tem o comprimento de onda de 24 cm, penetra com muito mais facilidade a vegetação que a banda X. A banda L tem uma sensibilidade elevada pela morfologia e é utilizada para classificação automática dos tipos de terreno da área mapeada, principalmente quando a medida é polarimétrica. Em uma medida polarimétrica, o sinal do radar é transmitido com a mesma frequência, mas com polarizações diferentes. A polarização vertical, ou "V", indica que o campo elétrico da onda a ser transmitida tem direção vertical. A polarização de recepção pode ser a mesma ou cruzada. "VV" indica que as polarizações de transmissão e recepção do sinal são as mesmas ou copolares. "HV" indica que a polarização do sinal de transmissão é vertical e a de recepção é horizontal. A polarimetria aumenta sensivelmente a capacidade de classificação da banda L. Utilizando a banda P, que tem um comprimento de onda de 70 cm, o radar pode mapear

por baixo da vegetação, imageando objetos naturais como rios e lagos, objetos artificiais como casas e máquinas e a topografia do solo. Mesmo objetos cobertos densamente pela floresta amazônica puderam ser mapeados com sucesso. Para o mapeamento de objetos ocultos na floresta ou vegetação, a polarimetria na banda P é mandatária. Para a medida da topografia do solo da floresta ou vegetação, pode-se utilizar somente P-HH (frequência na banda P e polarização horizontal tanto na transmissão como na recepção) em forma interferométrica para obter-se uma precisão moderada de altura. Para uma precisão de altura alta, utilizam-se todas as combinações de polarizações da banda P, ou seja, VV, VH e HH. As combinações VH e HV têm o mesmo resultado. Para a medida da altura da copa da floresta ou vegetação utiliza-se a banda X em forma interferométrica e obtém-se uma precisão moderada de altura.

[009] Para uma precisão alta, utilizam-se todas as combinações de polarizações da banda P em forma interferométrica. A interferometria mais comum na banda X é de uma passagem enquanto a das bandas L e P é de duas ou múltiplas passagens.

[010] A presente invenção se relaciona com o mapeamento por radar nas bandas P e/ou L e/ou X para produção de mapas topográficos ou temáticos de alta qualidade.

[011] Os problemas técnicos maiores estão resumidos a seguir:

IX) na automatização e no controle de qualidade de todos os passos de execução do mapeamento por radar;

X) na automatização e na inflexibilidade do sistema de controle de voo do radar;

XII) na interpretação das imagens para produção de mapas de alta qualidade e na geração de imagens coloridas semelhantes as imagens óticas; e

XIII) na precisão dos modelos do solo e de superfície.

[012] Atualmente, os mapas são produzidos mediante três técnicas básicas: fotogrametria, radar e laser de varredura.

[013] **Fotogrametria** - pode ser analógica ou digital. A analógica utiliza filmes. Depois da revelação química, os filmes são lidos e convertidos em forma digital para permitir um pós-processamento computadorizado. A digital utiliza um sensor ótico digital de alto contraste e permite diretamente o pós-processamento digital. A fotogrametria é o método mais usado para a geração de mapas topográficos e temáticos.

[014] **Radar** - os sistemas existentes no mercado são: Star-3i da empresa Intermap no Canadá, Geosar do centro de pesquisas NASA nos Estados Unidos e o AeS-1 da empresa Aero-Sensing na Alemanha. O sistema Star-3i tem uma resolução

espacial de 3 m e só possui a banda X. Com duas antenas, o Star-3i realiza interferometria de uma passagem. Ele é transportado por um Lear Jet, uma aeronave a jato de pequeno porte. O sistema Star-3i é operacional desde 1997. O sistema Geosar tem uma resolução espacial de 1 m e trabalha com as frequências X e P. A banda P não tem as combinações polarimétricas cruzadas VH e HV. Somente as copolares VV e HH. O sistema tem duas antenas nas bandas X e P, podendo realizar a interferometria de uma passagem em ambas frequências. A linha de base na banda P é de 25 m, pois as antenas estão fixadas nas pontas de asa da aeronave. Ele é transportado por um Gulfstream, uma aeronave a jato de médio porte. O sistema Geosar está ainda em fase experimental e deve entrar na fase operacional em 4 anos. O sistema AeS-1 tem uma resolução espacial de 0,5 m e trabalha com as frequências X e P. A banda P tem todas as combinações polarimétricas. O sistema tem duas antenas na banda X e uma na P, podendo realizar a interferometria de uma passagem na banda X e de duas passagens na banda P.

[015] A linha de base na banda P varia de 25 a 100m dependendo da altura de voo. Ele é transportado por um Aero-Commander, uma aeronave turboélice de pequeno porte. O sistema AeS-1 é operacional na banda X desde 1997 e na banda P desde 2000.

[016] **Laser de varredura** - utiliza a técnica laser com feixe de direcionamento controlável. A largura de faixa é abaixo de 1 km. Determina a topografia do terreno. Caso a vegetação não seja densa pode determinar tanto o modelo do solo como também o modelo da copa da vegetação. Ele é aerotransportado por aeronaves pequenas a pistão que sobrevoam a área com uma altura de 500 a 1500 m acima do solo. Os sistemas a laser são operacionais desde 1990.

[017] Segue um breve resumo das desvantagens dos sistemas existentes.

[018] **Fotogrametria:**

- a) é impossível executá-la com cobertura de nuvens e sem iluminação solar suficiente;
- b) é impossível medir a topografia do solo de áreas cobertas pela vegetação;
- c) a topografia não tem uma amostragem regular, pois a escolha dos pontos de medida de altura depende do contraste local; e
- d) impossível a detecção de objetos cobertos pela vegetação.

[019] **Laser:**

- a) não gera ortoimagens, só determina a topografia;
- b) é impossível executá-la com cobertura de nuvens;
- c) é impossível medir a topografia do solo de áreas densamente cobertas pela

vegetação; e

d) pela estreita faixa de mapeamento, o custo para mapear áreas grandes é muito elevado.

[020] **Radares** na banda X (exemplo: Star-3i):

a) gera somente imagens em preto e branco. Star-3i tem ainda uma resolução espacial baixa que dificulta a interpretação das imagens para a produção de mapas;

b) inviável medir a topografia do solo da floresta com precisão;

c) inviável descobrir objetos cobertos pela vegetação; e

d) baixa capacidade de classificação e imprecisão na medida das densidade da vegetação como tipo, idade e biomassa.

[021] **Radares** nas bandas P e X (exemplos: Geosar e AeS-1):

a) a geração do modelo do solo da floresta é calculada do canal P HH, ou seja, banda P combinação polarimétrica HH. A precisão de altura do modelo cai com o aumento da densidade da vegetação . Para áreas muito densas essa precisão pode ter uma degradação de até 5 vezes em comparação a áreas de baixa densidade de vegetação.

b) a geração do modelo da copa da floresta é calculada do canal X. A precisão de altura da copa da floresta cai com a diminuição da densidade da vegetação. Para áreas pouco densas ou com densidades variadas essa precisão pode ter uma degradação de até 10 vezes em comparação com áreas de alta densidade de vegetação.

c) o método de obtenção do modelo do solo e da copa da vegetação através da banda P polarimétrica existente, tem um problema severo de ambiguidade . Ele separa as duas fases correspondentes ao solo e à copa. Porém não se consegue identificar qual delas é a do solo e qual é a da copa.

d) o sistema Geosar não possui as polarizações cruzadas na banda P, ou seja, só fornece as polarizações VV e HH. Isso impede a determinação precisa do modelo do solo e da copa da vegetação. Além disso, a falta da polarização cruzada, dificulta extremamente a detecção de objetos artificiais cobertos pela vegetação.

e) não há fusão dos modelos obtidos pelas bandas X e P. A banda X gera o modelo do solo das áreas sem vegetação com uma precisão muito alta , por exemplo , de até 5 cm de precisão de altura. A banda P polarimétrica apresenta uma precisão de altura do solo e da copa da vegetação em torno de 1 metro e em áreas sem vegetação em torno de 2 a 3 metros.

[022] Problemas comuns a todos os radares (exemplos: Star-3i, Geosar e AeS-1:

a) não há uma base e controle de dados que interligue administrativamente todos os passos entre o plano de voo até o mapa final. Para controle são utilizados formulários, que são preenchidos manualmente.

b) não há um controle automático de qualidade que verifique todos os resultados intermediários e finais. Uma equipe de técnicos faz a verificação manualmente e documenta o processo através do preenchimento de formulários.

c) não há um controle de precisão na execução das linhas de voo. Nenhum dos sistemas permite uma alteração da altura planejada de voo durante o voo de execução. Um requerimento de alteração de altura de voo durante a execução do mapeamento é praticado com frequência pelas autoridades aeronáuticas.

d) não existe uma interligação entre os passos de processamento e de geração de mapas topográficos ou temáticos. O passo de pós processamento é muito precário e praticamente não existente.

e) a interpretação das imagens preto e branco da banda X é difícil, por não ser colorida como as das imagens óticas ou espectrais.

[023] Um documento representativo do estado da técnica é a patente DE19703736 intitulada *Verfahren zur Automatisierung eines Radars mit synthetischer Apertur (SAR) und der Flugführung eines Trägers* (Método para a automação de um radar de abertura sintética (SAR) e orientação de voo de um transportador) que trata do controle de radar para mapeamento de área sobrevoada por aeronaves tripuladas ou não tripuladas. O plano de voo e os parâmetros do radar são definidos em solo por um computador e copiados ao radar através de mídia física ou rádio-enlace. Um dos parâmetros definidos já em solo é a altitude, que deve permanecer inalterada durante toda a operação. Caso o controle de tráfego aéreo solicite alteração na altitude devido a congestionamento de rotas aéreas a sequência de execução das linhas de voo deverá ser alterada, o que somente pode ser feito no solo. Além disso, essa patente não cuida da gestão, caso o piloto desvie muito da linha de voo programada. Neste caso ele ficará sabendo desse erro apenas após a conclusão da linha de voo, desvantagem que consome tempo e custo desnecessários.

[024] Assim, o sistema descrito nesse documento não faz a gestão automática da alteração dos parâmetros de voo, caso a altitude tiver que ser alterada. Outra limitação desse documento se refere à ausência de qualquer descrição do processamento, no solo, dos dados adquiridos durante o voo, principalmente no concernente à geração dos modelos planialtimétricos quando houver variações na densidade da cobertura vegetal do terreno. Aliás, essa referência sequer discute as características dos sinais radar das diversas bandas, tais

como a capacidade de penetração na folhagem, a precisão das medições, e muito menos, a combinação dos diversos modelos de solo e superfície.

[025] A patente US5430445 intitulada *Synthetic Aperture Radar Guidance System and Method of Operating Same* (Sistema de governo mediante radar de abertura sintética e método de operação) descreve um sistema composto por dois radares SAR, um numa aeronave e outro num míssil. O da aeronave tem abrangência maior e dá subsídios para um operador localizar um alvo, enquanto o do míssil dá suporte à navegação até atingir o alvo. Trata-se de um sistema com objetivos puramente bélicos, que nada tem a ver com cartografia. Aliás, é necessário fornecer ao sistema um gabarito de referência (“reference template”) produzido antecipadamente com base em sobrevoos da região do alvo e fotografias ópticas substancialmente verticais desse alvo e arredores (como descrito na coluna 45, linhas 20 a 29). O sistema e método descritos nessa patente não se aplica a levantamentos topográficos ou cartográficos.

[026] Diante do exposto acima, foi criado o presente MÉTODO PARA PRODUÇÃO DE MAPAS POR TÉCNICA DE RADAR cujo aperfeiçoamento tem como objetivos justamente a eliminação dos inconvenientes acima e, para tanto, existem quatro problemas básicos a serem solucionados:

[027] 1) A solução do problema de administração, de verificação dos dados e de controle de qualidade na realização dos voos, gravação dos dados brutos, processamento dos dados brutos, pós-processamento e geração de mapas, é dada pela implementação de uma base de controle de dados que controla todos os passos e dados gerados diretamente e de forma digital, eliminando o uso de formulários.

[028] 2) A solução dos problemas na execução das linhas de voo, apresentados pela não indicação da precisão necessária para a execução da linha ao piloto e pela inflexibilidade da alteração da altura média de voo das linhas durante a execução de uma missão, é realizada por alterações tanto no sistema de plano de voo como também no de controle de voo.

[029] 3) O problema da interpretação das imagens do radar, para a produção de mapas topográficos e temáticos, é solucionado pela introdução da banda L polarimétrica, pelo pós-processamento dedicado aos produtos das bandas L, P e X e pela interface ao sistema de informação cartográfica e/ou geográfica. A banda polarimétrica permite a geração de imagens em cores semelhantes à imagem ótica. Nesse caso a banda X é utilizada como canal de luminância e com as combinações polarimétricas da banda L, se geram os

canais de crominância. O pós-processamento fornece as informações necessárias com os formatos requeridos pelo sistema de informação cartográfica e/ou geográfica.

[030] 4) O problema de precisão tanto no modelo do solo como no modelo de superfície, é solucionado utilizando:

- todas as polarizações da banda P (VV, VH e HH).
- os canais HH ou VV da banda X e o HH da banda P para eliminar as ambiguidades do processo de extração do modelo do solo e da copa da vegetação, que utiliza a banda com todas as polarizações.
- um método de fusão entre os modelos do solo e da copa da vegetação extraídos da banda e o modelo de superfície da banda X. Esse método selecciona o modelo da banda X para áreas sem vegetação e os modelos do solo e da copa da vegetação provenientes da banda P para as áreas com vegetação.

Descrição dos desenhos.

[031] Para melhor compreensão da presente invenção, é feita em seguida uma descrição detalhada de uma concretização preferida e não limitativa da mesma, fazendo-se referências aos desenhos anexos, onde:

[032] a FIGURA 1 apresenta o diagrama em blocos de todo o processo de mapeamento, incluindo a base e controle de dados (1), o passo de planejamento do voo de mapeamento (2), a realização do voo de mapeamento e gravação dos dados brutos ("crus") (3), o processamento dos dados brutos (4), o pós processamento (5) e o sistema de informação cartográfica e/ou geográfica (6);

[033] a FIGURA 2 apresenta o diagrama de fluxo detalhado do planejamento do voo de mapeamento (2) e da realização do voo de mapeamento e gravação dos dados brutos (3);

[034] a FIGURA 3 apresenta o diagrama em blocos detalhado do processamento dos dados brutos (4), composto do processamento SAR (41), do cálculo da fase dobrada da copa ou solo da vegetação (42), da geocodificação da amplitude e coerência (43), do método de decisão (44), das 3 unidades de desdobramento e geocodificação (45) e da fusão das topografias (46);

[035] FIGURA 4 apresenta o diagrama em blocos detalhado do método de decisão (44); e

[036] a FIGURA 5 apresenta o diagrama em blocos detalhado do método de fusão das topografias (46).

Descrição de um exemplo de realização preferido da invenção

[037] A descrição do exemplo de realização será realizada na sequência do processo de mapeamento. Para o voo de medidas (Figuras 1 e 2), são necessários os seguintes dados para o respectivo planejamento:

- 1 - resolução espacial;
- 2 - precisão da topografia ou do modelo do terreno;
- 3- tipo de topografia, ou seja, se o terreno a ser mapeado é acidentado ou não;
- 4- bandas desejadas, por exemplo, P e/ou L e/ou X; e
- 5- largura da faixa de mapeamento.

[038] Esses dados são introduzidos no sistema de planejamento do voo de mapeamento (2). Através dos dados acima, as linhas de voo são calculadas e a configuração do radar para a execução de cada linha é determinada. Os dados números 1, 2, 4 e 5 têm influência direta na configuração do radar como: bandas e polarizações a serem utilizadas, banda de passagem do sinal de transmissão do radar e a configuração do subsistema de aquisição do sinal de retorno. Os dados números 3, 4 e 5 têm influência direta no posicionamento e na precisão de execução das linhas. A execução de uma linha que inclui a aquisição na banda P para interferometria de duas passagens tem que ser muito mais precisa do que a execução de uma linha que inclua somente a banda X para interferometria de uma passagem. Como a linha de base das duas passagens na banda P varia entre 25 a 100 m, o piloto tem que executar as linhas com um desvio lateral e de altura de no máximo de 5 a 20 m respectivamente. Por outro lado, o desvio lateral e de altura na banda X pode ser de até 30 m, pois a banda X opera com interferometria de uma passagem, onde a linha de base é fixa. Em um plano de voo complexo, é mandatória a indicação automática da precisão da execução da linha para o piloto, antes de ele começá-la. Por isso, o cálculo da precisão da execução das linhas é feito no plano de voo e enviado ao sistema de controle de voo (300 a 309) para ser reportado ao piloto durante a execução da missão.

[039] O posicionamento das linhas é calculado e projetado na altitude do solo. Essa informação é gravada no plano de voo e enviada ao sistema de controle de voo (blocos 300 a 309 na figura 2) através da respectiva mídia. Durante a execução da missão, o piloto seleciona o projeto a ser executado e informa ao sistema a altura média de operação. Essa altura pode ser a altura atual da aeronave, uma altura sugerida pelo plano de voo ou a altura exigida pelas autoridades aeronáuticas. A altura média de operação pode ser introduzida no sistema a qualquer momento, inclusive durante a execução de um projeto. Após a definição da altura da aeronave (300), as linhas de voo são calculadas considerando a geometria do

radar e da altura atual da aeronave (301) e assim a nova sequência de execução das linhas é calculada e indicada ao piloto (302). A escolha da linha pode ser realizada manualmente ou automaticamente (303) podendo assim a linha selecionada ser executada com a precisão necessária (304). A gravação de dados brutos do radar é controlada pelo sistema de controle de voo e ativada no começo da linha e finalizada no término da mesma. Durante a execução da linha a sua precisão é verificada continuamente (305). Caso o piloto passe além do limite lateral e vertical permitido, a gravação dos dados é interrompida e o estado da linha continua sendo como "não executada" (307). Caso a linha seja executada com precisão, os dados brutos do radar são verificados no término de execução desta (306).

[040] Caso os dados brutos passem pelo controle de qualidade, a linha ganha o estado de "executada" (308). Caso contrário, ela continua com o estado de "não executada" (307). No término do plano de voo (309), os dados brutos do radar adquiridos durante o voo são gravados em uma mídia adequada para o arquivo a longo prazo (310). Os dados são então encaminhados para o processamento (4).

[041] Para administração, verificação e controle de qualidade de todo o processo, partindo do planejamento de voo e finalizando com a entrega do mapa topográfico, é necessário o uso de uma base de controle de dados indicada como (1) na Figura 1. A base de controle de dados (1) recebe a informação completa sobre as linhas planejadas de voo (2) e controla o arquivo e o estado de todos os planos de voo. Durante a execução do voo de mapeamento, o estado e a qualidade das linhas fornecidas por (3) são também controlados por (1). O controle das linhas é feito tanto remoto como também central. O controle remoto é necessário, caso a localidade da execução de (3) não seja a mesma de (4, 5 e 6). A base de controle de dados (1) é instalada em todas as localidades e interligada eletronicamente entre si. A gravação dos dados gera uma grande quantidade de unidades magnéticas e/ou óticas cujo arquivo também é controlado pela base (1), de tal forma que o acesso entre (3) e o processamento dos dados brutos (4) seja otimizado. O processamento dos dados brutos (4) gera tanto os modelos do solo e superfície, como também as ortofotos e imagens de coerência. Esses produtos, podendo ser ao mesmo tempo finais, são encaminhados ao pós-processamento (5). O controle da execução e qualidade do processamento de (3) também é realizado por (1) como também o controle do arquivo dos produtos de (3). O pós-processamento (3) e o sistema de informação cartográfica e/ou geográfica (6) como também os respectivos produtos são controlados por (1). O acesso a todos os passos, ou seja, de (2) até (6), é realizado pela interface ao operador e/ou usuário em (1). A estrutura de (1) permite a eliminação do preenchimento manual de formulários e o controle automático

e confiável de todos os passos do processo de produção de mapas.

[042] A unidade de processamento dos dados brutos (4), ver Figura 3, recebe os dados de (3), onde são enviados ao processamento SAR e interferométrico (41). O processamento SAR gera a imagem complexa dos canais das diversas bandas. Considerando as bandas P, L e X, sendo P e L polarimétricas, são gerados os pares em X, P-HH, P-HV, P-VV, L-HH, L-HV e L-VV. A amplitude de uma das imagens de cada par é calculada e é representada como a saída de "amplitude" de (41). Executando o processamento interferométrico dos pares, obtêm-se as respectivas fases dobradas e as coerências. As fases dobradas dos canais polarimétricos da banda P são enviadas a (42), onde o cálculo da fase dobrada da copa e do solo da vegetação é realizado. Porém esse método não consegue distinguir qual das duas fases calculadas pertence a fase do solo e a fase da copa. Por isso as duas fases são enviadas ao método de decisão (44), que com ajuda da fase dobrada de P-HH e X, identifica, de maneira confiável, cada uma delas.

[043] O método de decisão (44) é apresentado pela Figura 4 e esclarecido a seguir. As saídas de (44) são as fases dobradas do solo e da copa da vegetação. Essas e a fase dobrada da banda X são desdobradas e geocodificadas por (45), onde se obtêm os seguintes modelos: topografia do solo e da copa provenientes da banda P e a topografia proveniente da banda X. Para obter os modelos topográficos do solo e da superfície com máxima precisão, a fusão dos modelos da banda P e X é feita por (46), que é apresentado pela Figura 5 e detalhada a seguir.

[044] Os modelos do solo e da superfície podem ser utilizados diretamente a muitas aplicações e também são enviados ao pós-processamento (5). As imagens de amplitude e coerência de (41) ainda têm a geometria de visada lateral e são assim geocodificadas por (43), gerando as ortofotos e as coerências ortoretificadas dos canais polarimétricos das bandas P e L e da banda X. Essas imagens são utilizadas na fusão das topografias (46) e para o pós-processamento (5).

[045] O método de decisão para a fase dobrada proveniente da banda P (44) descobre a identidade das duas fases calculadas por (42). O cálculo da fase dobrada da copa ou solo da vegetação (42) é um método já conhecido e publicado, segundo descrito por Cloude, S.R. e Papathanassiou, K.P. em *Polarimetric SAR Interferometry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol 36, Issue 5, Sep 1988.

[046] Todavia, esse método não consegue identificar qual das duas fases é a fase da copa e do solo da vegetação. Assim as saídas de (42) são complementares: uma delas é a fase dobrada do solo ou copa e a outra é a fase dobrada da copa ou solo. A Figura 4

descreve o método de identificação sugerido. A fase dobrada de P-HH é muito próxima da fase dobrada proveniente do solo da vegetação. Em muitas aplicações utiliza-se a fase dobrada de P-HH para o cálculo direto da topografia do solo da vegetação. Esse método é preciso até certa densidade de vegetação. Mas a fase P HH pode ser aqui usada como referência para identificação das fases provenientes de (42). O mesmo faz-se com a fase dobrada da banda X. Para uma vegetação densa, ela se aproxima muito da fase dobrada proveniente da copa da floresta. A banda X é usada com frequência para geração da topografia da superfície. Sobre a vegetação densa a precisão obtida com a banda X é alta e sobre a vegetação mais escassa essa precisão se degrada, podendo ser mesmo assim utilizada em muitas aplicações. Assim a fase dobrada P-HH nos fornece uma referência do solo e a fase da banda X uma referência da copa da vegetação e são assim utilizadas para identificarmos as fases provenientes de (42).

[047] Para a identificação das fases faz-se primeiramente a diferença delas com as duas fases de referência de P-HH e X através dos subtratores (441). Os dois resultados da subtração das fases de (42) da fase de P-HH são enviados ao bloco (442). Este bloco (442) primeiramente extrai a ambiguidade de 360 graus das diferenças, ou seja, extrai o valor $N \times 360$ graus, onde N é um número inteiro, de tal forma que o valor da fase seja o menor possível. Assim é determinado qual dos canais, ou seja, solo/copa ou copa/solo, que tem a menor diferença com P-HH. O canal de preferência e sua respectiva diferença são enviados para a unidade de decisão (443). O mesmo acontece com a comparação das fases de (42) com a fase da banda X.

[048] A decisão da relação dos canais solo/copa e copa/solo com P-HH e X é feita da seguinte forma:

a) caso a decisão seja clara, pois a proximidade de uma das fases com a fase de P-HH e da outra fase com a fase de X é óbvia, utiliza-se um método de arbitragem por comparação para as escolhas das saídas da fase dobrada do solo e da copa da vegetação; e

b) caso a decisão não seja clara, pois a proximidade de uma das fases solo/copa e copa/solo entre as fases de P-HH e de X não é óbvia, utiliza-se métodos estatísticos como o de máxima verossimilhança ("maximum likelihood") ou a técnica de "fuzzy logic", ambos bem conhecidos na literatura, para a arbitragem da semelhança.

[049] Mostra-se na prática que essa metodologia de decisão é muito robusta.

[050] A fusão das topografias (46) tem como objetivo aumentar a qualidade e a precisão dos modelos do solo e da superfície. Para muitas aplicações, como por exemplo, para a geração de curvas de nível para mapas topográficos, o modelo do solo é requisitado.

Porém para aplicações como na telefonia celular, o modelo de superfície é mais importante. O método de fusão é esclarecido em detalhes pela Figura 5.

[051] A topografia da banda X tem as seguintes propriedades:

a) a precisão de altitude é extremamente alta em áreas sem vegetação, inclusive se obtêm precisões de até 5cm de altura; e

b) por não penetrar na vegetação, a banda X fornece a altura da copa da vegetação, porém, caso a densidade da vegetação não seja constante ou muito baixa, a precisão de altura da copa da vegetação é degradada a valores de até 5 a 10 m.

[052] As topografias do solo e da copa provenientes da banda P têm as seguintes propriedades:

a) a precisão de altura do solo e da copa da vegetação e é em torno de 1 m; e

b) a precisão de altura em áreas sem vegetação é aproximadamente de 2 a 3 m.

[053] Para geração de modelos ótimos do solo e da superfície, a fusão das melhores propriedades altimétricas das bandas P e X é executada.

[054] Basicamente a fusão seleciona o modelo da banda X para áreas sem vegetação e os modelos do solo e da copa da vegetação proveniente da banda P para as áreas com vegetação. Para isso, é necessário definir as áreas de vegetação. As áreas de vegetação são obtidas através de uma classificação automática executada pelo bloco (461) ver Figura 5. As imagens ortoretificadas provenientes de (43) são classificadas automaticamente e uma máscara de vegetação é gerada. Os métodos de classificação utilizados são conhecidos e publicados, e se baseiam na técnica de máxima verossimilhança ou de redes neurais. A máscara de vegetação, representada em (461) por K , tem o valor 1 para áreas com vegetação e o valor 0 para áreas sem vegetação. O bloco (461) gera também uma saída complementar, ou seja, $1-K$. Para a geração do modelo do solo, a topografia do solo da banda P proveniente de (45) é multiplicada com K pelo bloco multiplicador (462), a topografia da banda X proveniente de (45) é multiplicada com $(1-K)$ pelo bloco multiplicador (462) e os resultados dos dois multiplicadores são somados pelo somador (463). Assim o modelo do solo contém a topografia da banda X para as áreas sem vegetação e a topografia do solo da banda P para as áreas com vegetação.

[055] Para a geração do modelo da superfície, a topografia da copa da banda P proveniente de (45) é multiplicada com K pelo multiplicador (462), a topografia da banda X proveniente de (45) é multiplicada com $(1-K)$ pelo multiplicador (462) e os resultados dos dois multiplicadores são somados pelo somador (463). Assim o modelo da superfície contém a topografia da banda X para as áreas sem vegetação e a topografia da copa da banda P para

as áreas com vegetação.

[056] O pós-processamento (5) é a interface entre o processamento de dados brutos (4) e o sistema de informação cartográfica e/ou geográfica (6). A sua função principal é preparar os dados processados do radar de tal forma que sua compatibilidade com o sistema de informação (6) seja a melhor possível, garantindo assim a mais alta interpretabilidade das informações do radar no processo de produção dos mapas.

[057] As informações principais no processo de produção de mapas topográficos e temáticos são:

- 1) ortofoto de alta resolução com coloração artificial temática ;
- 2) curvas de nível ;
- 3) delineação em forma vetorial das classes temáticas existentes (ex. vegetação , áreas livres, áreas urbanas , água, rodovias e ferrovias);
- 4) delineação em forma vetorial de objetos naturais (rios, lagos, ...) e artificiais (casas) sob a vegetação; e
- 5) delineação em forma vetorial das classes da vegetação com informação da biomassa.

[058] Para a geração desse conjunto de informações, o pós-processamento (5), tal como mostrado na figura 1, é composto pelos respectivos subsistemas (51 até 55):

- geração da ortofoto a cores (53) - nesse caso a banda X é utilizada como canal de luminância e com as combinações polarimétricas da banda L geram os canais de crominância.

- cálculo das curvas de nível pela unidade (51) - essa unidade converte a topografia que é representada por um *raster* em uma representação por vetores. A equidistância e o formato das linhas e dos atributos de altura são fornecidos pelo usuário através da base e controle de dados (1). Os algoritmos para essa aplicação são conhecidos.

- classificação e delineação geral de classes (55) - utilizando o método de "maximum likelihood" ou de redes neurais .

- detecção e delineação de objetos naturais e artificiais na vegetação (54) - utilizando o método de "maximum likelihood" ou de redes neurais.

- classificação da vegetação e cálculo da biomassa (52) - utilizando métodos de regressão, de "maximum likelihood" ou de redes neurais.

[059] Através do sistema de informação cartográfica e/ou geográfico (6), geram-se os mapas topográficos e/ou temáticos. Com a informação estruturada fornecida

pelo pós-processamento (5), realizam-se os seguintes passos:

a) Edição manual e estruturação dos objetos (61). O operador detecta e corrige manualmente os erros de vetorização e de geodificação.

b) Os dados corrigidos provenientes de (61) são totalmente assimilados e arquivados no banco de dados principal (62).

c) Um subgrupo de objetos de (62) é escolhido por (63) para uma determinada escala e forma pré-definidas para geração do mapa.

d) O layout do mapa de acordo ao conjunto de símbolos pré definido é gerado por (64).

e) Finalmente o corte da folha de acordo a definição do usuário é realizado por (65) e o mapa final , composto de uma parte vetorial e eventualmente de uma parte em *raster*, é gerado.

[060] A metodologia ora descrita pode ser empregada também em radares de visada frontal.

REIVINDICAÇÕES

1. MÉTODO PARA PRODUÇÃO DE MAPAS POR TÉCNICA DE RADAR compreendendo o planejamento do voo de mapeamento (2), realização do voo de mapeamento e gravação dos dados brutos (3), processamento dos dados brutos (4), pós-processamento (5) bem como um sistema de informação cartográfica e/ou geográfica (6), caracterizado pelo fato de compreender, em conjunto com uma base de controle de dados (1), a administração, verificação e controle de qualidade de todo o processo, desde o planejamento do voo de mapeamento (2) até o sistema de informação cartográfica e/ou geográfica (6), dito controle compreendendo a verificação contínua e em tempo real da precisão da execução de cada linha compreendida no voo de mapeamento, e pela utilização dos dados obtidos através das bandas de radar P, L e X para o cálculo dos modelos de solo e de superfície através de processamento que compreende a fusão das propriedades altimétricas correspondentes às bandas P e X, compreendendo dito cálculo a decisão entre as fases dobradas da banda P correspondentes à copa e ao solo da vegetação.

2. MÉTODO PARA PRODUÇÃO DE MAPAS POR TÉCNICA DE RADAR de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de a base (1) de controle de dados:

- receber a informação completa sobre as linhas planejadas de planejamento de voo de mapeamento
- controlar o arquivo e o estado de todos os planos de voo;
- controlar o estado e a qualidade das linhas durante a execução do voo de mapeamento, dito controle sendo feito tanto remotamente como também centralmente;
- controlar o processamento dos dados brutos (4) que geram os modelos do solo e superfície, como também as ortofotos e imagens de coerência, ditos produtos, quando finais, sendo encaminhados ao pós-processamento (5);
- controlar a execução, a qualidade e o arquivo do produto do processamento dos dados provenientes do radar;
- controlar o pós-processamento e o sistema de informação cartográfica e/ou geográfica (6), bem como controlar também os respectivos produtos.

3. MÉTODO PARA PRODUÇÃO DE MAPAS POR TÉCNICA DE RADAR de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de compreender a definição da precisão de execução das linhas de

voo, a definição da altura da aeronave (300), o cálculo das linhas de voo (301), a execução da linha com indicação de precisão (304) e o controle de execução da linha (305).

4. MÉTODO PARA PRODUÇÃO DE MAPAS POR TÉCNICA DE RADAR de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de interromper o estado de execução da linha imediatamente após a constatação de ser extrapolado o limite horizontal ou vertical da precisão de sua execução.

5. MÉTODO PARA PRODUÇÃO DE MAPAS POR TÉCNICA DE RADAR de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de a interpretação das imagens do radar e a geração de mapas, a ortofoto a cores derivada da banda L por (53), as curvas de nível derivadas do modelo do solo por (51), e os vetores das diversas classes e objetos derivados das imagens e coerências das diversas bandas e dos diversos modelos digitais por (55), (54) e (52), serem introduzidos no sistema de informação cartográfica e/ou geográfica (6).

6. MÉTODO PARA PRODUÇÃO DE MAPAS POR TÉCNICA DE RADAR de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de a geração dos modelos do solo e da superfície, o método de decisão (44) das fases dobradas, através das unidades de adição (441), das unidades de extração da ambiguidade e do canal de menor diferença (442) e da unidade de decisão da relação dos canais (443), determinar as fases dobradas correspondentes ao solo e a copa da vegetação; e o método de fusão das topografias (46), através das unidades de multiplicação (462), de adição (463) e de classificação automática (461), calcular os modelos do solo e da superfície.

7. MÉTODO PARA PRODUÇÃO DE MAPAS POR TÉCNICA DE RADAR de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo fato de ser aplicado em radares de visada frontal.

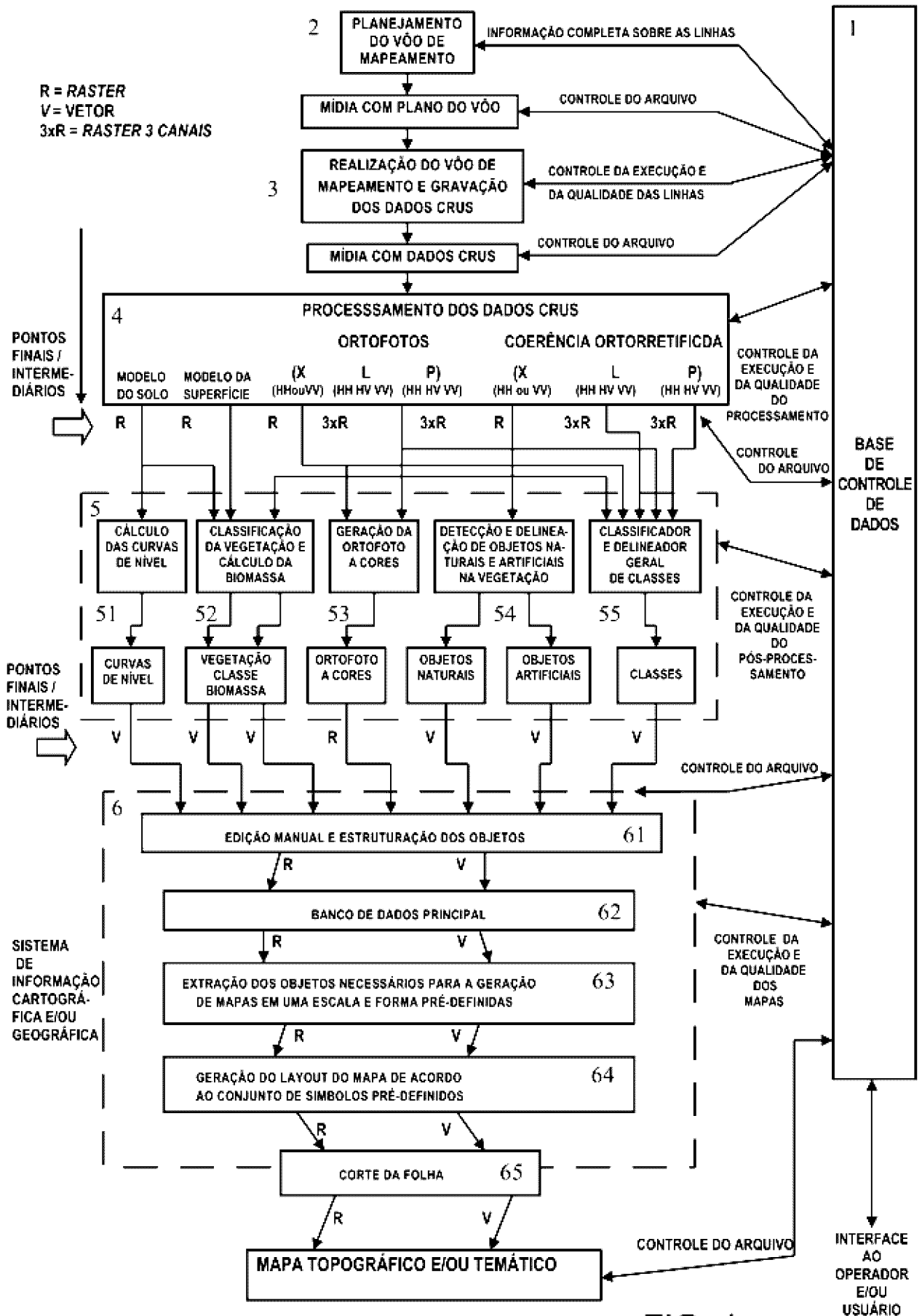


FIG. 1

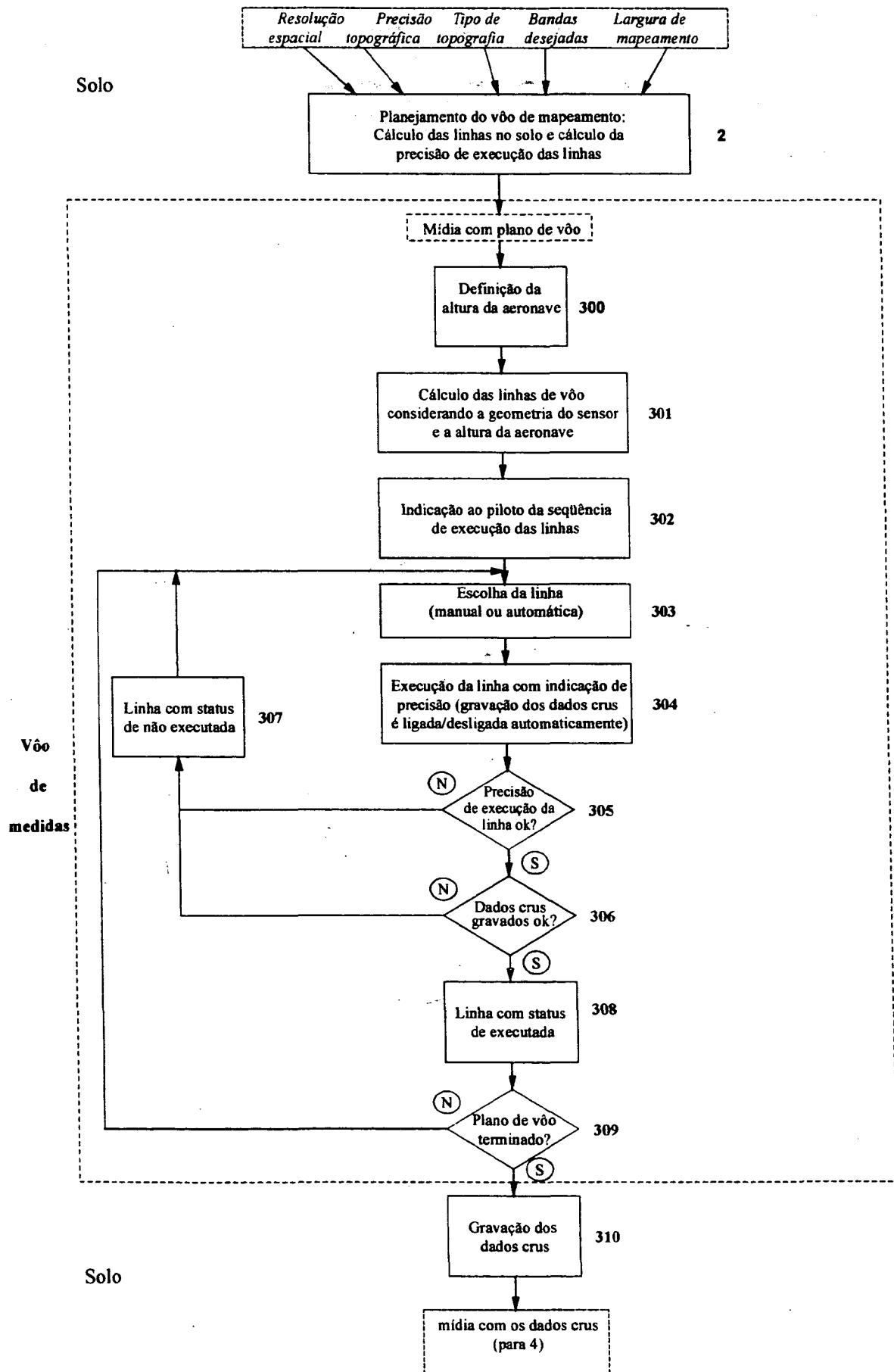


FIG. 2

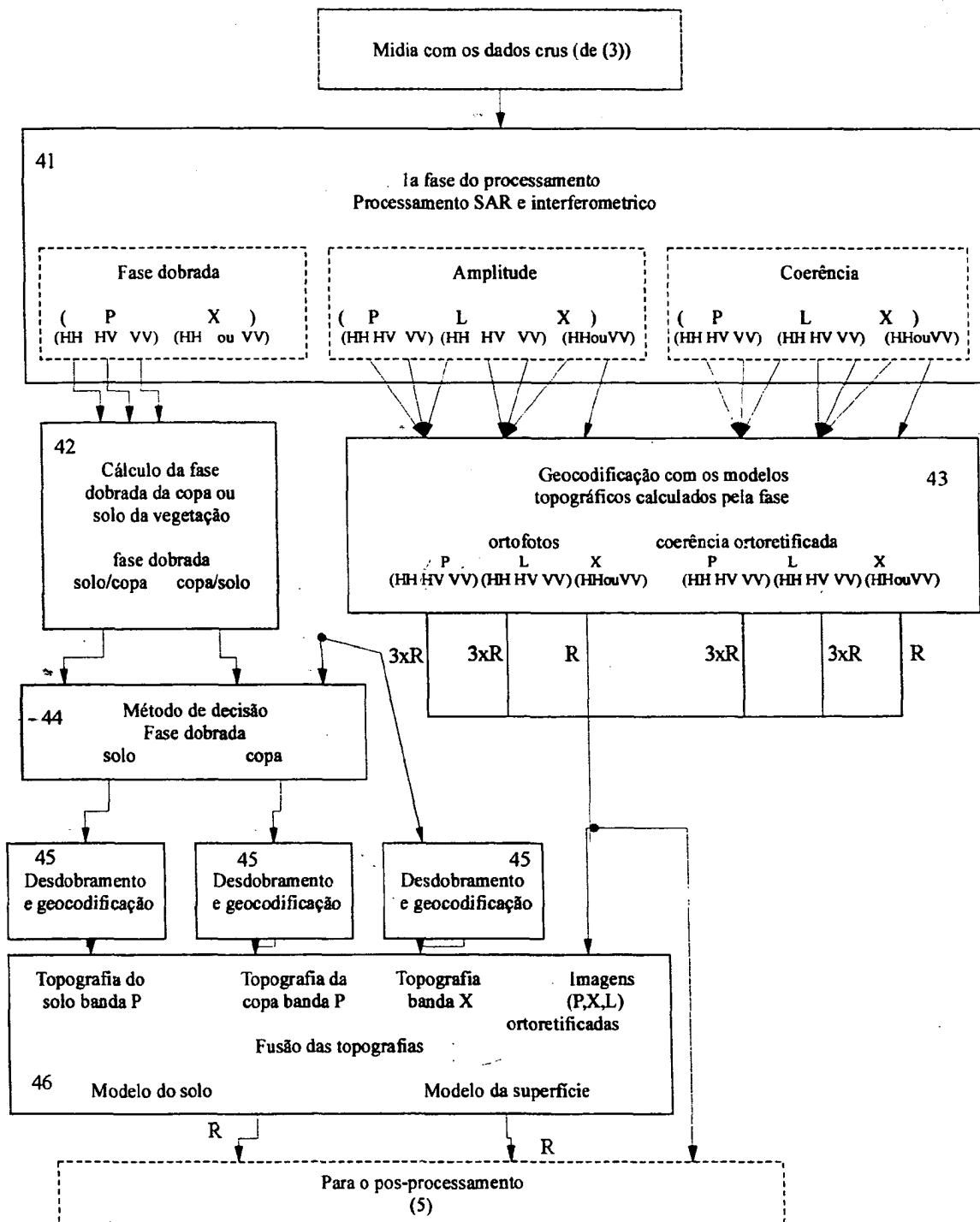


FIG. 3

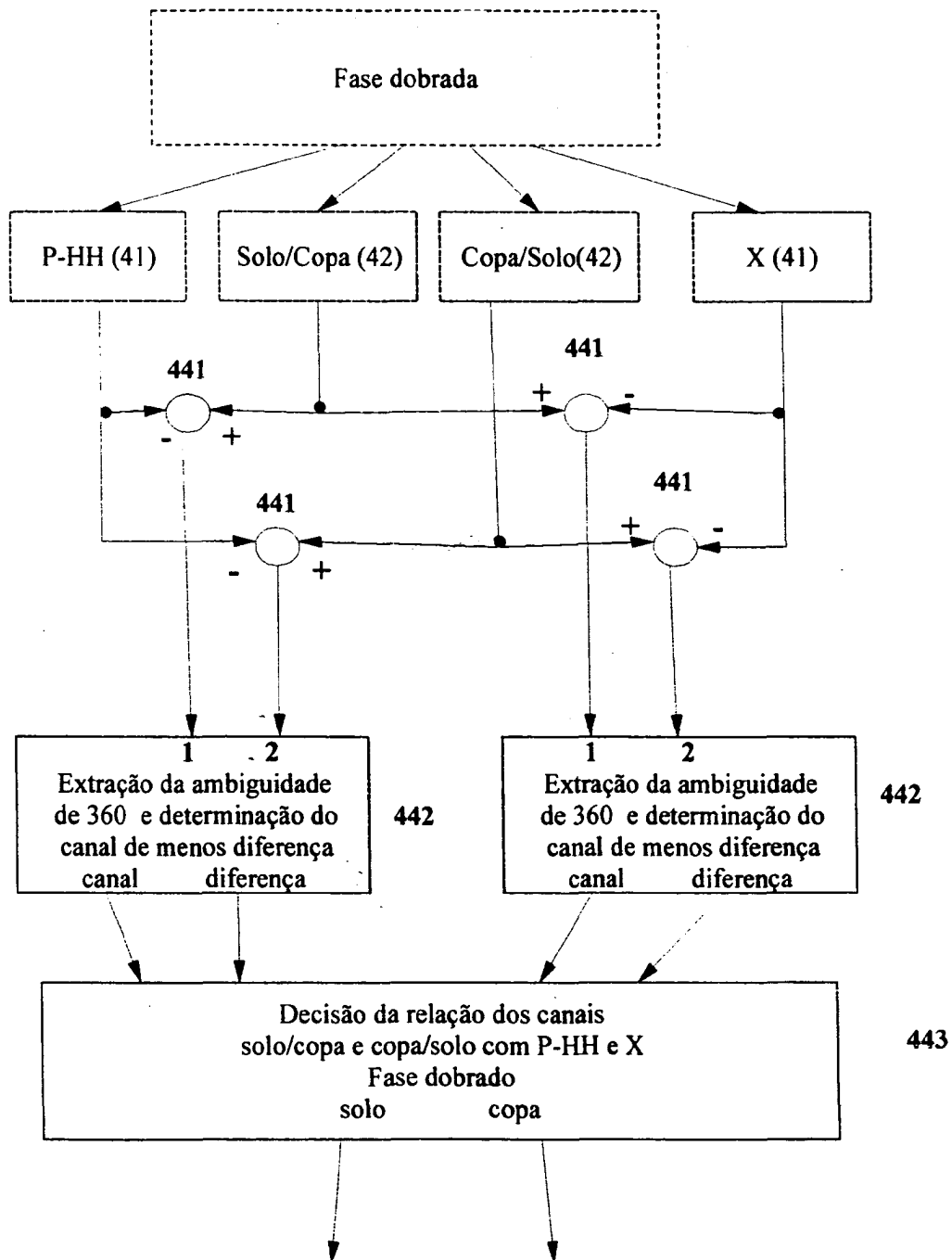


FIG. 4

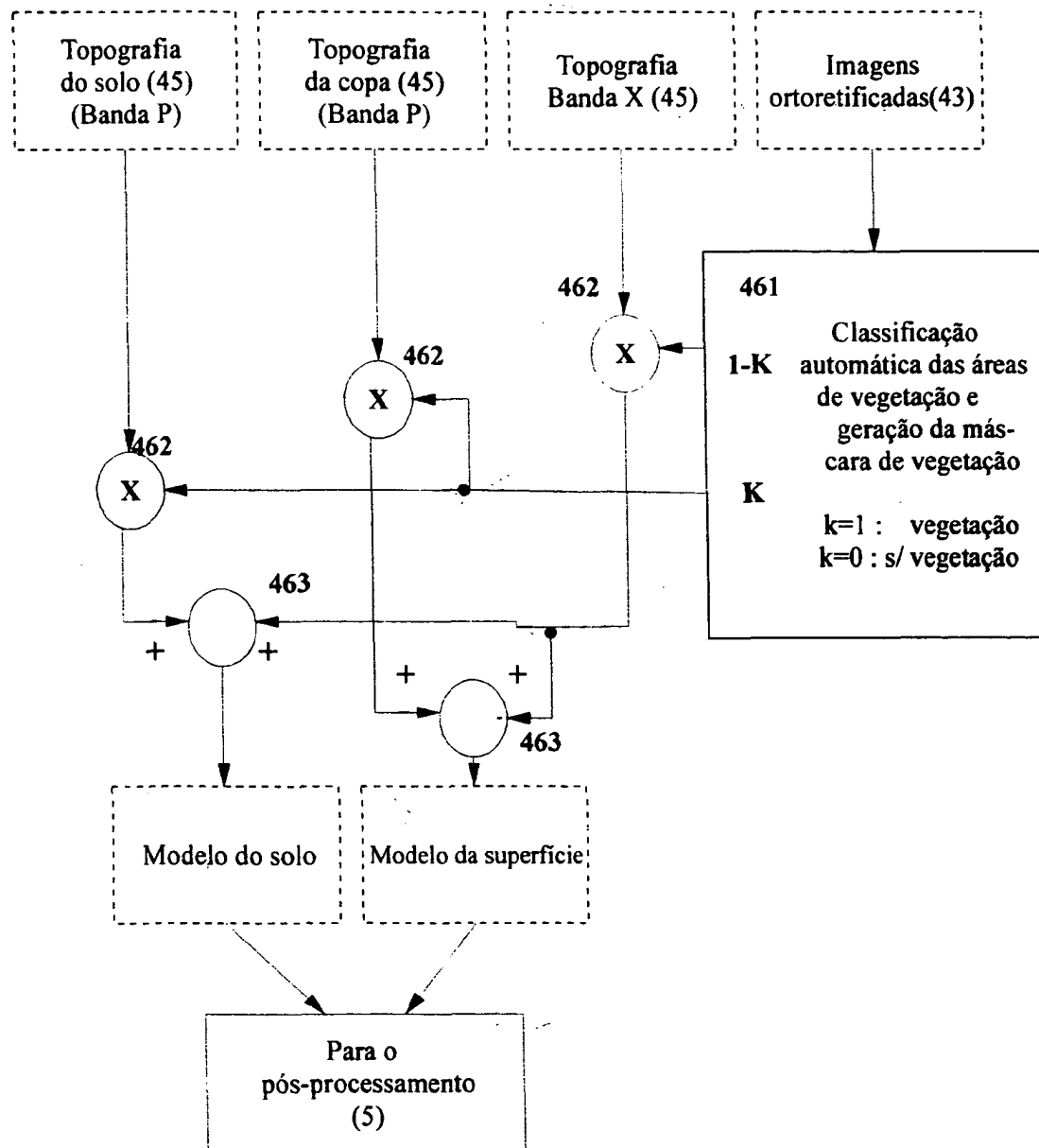


FIG. 5