



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 1105332-1 B1



(22) Data do Depósito: 22/12/2011

(45) Data de Concessão: 15/03/2022

(54) Título: ANTENA COM AGRUPAMENTO ATIVO COM VARREDURA ELETRÔNICA DO FEIXE, MÉTODO PARA CALIBRAR UMA ANTENA COM AGRUPAMENTO ATIVO COM VARREDURA ELETRÔNICA DO FEIXE, MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR E SISTEMA DE RADAR

(51) Int.Cl.: H01Q 21/06.

(30) Prioridade Unionista: 22/12/2010 IT TO2010A001039.

(73) Titular(es): SELEX SISTEMI INTEGRATI S.P.A.

(72) Inventor(es): STEFANO MOSCA; MASSIMO MARCHETTI.

(57) Resumo: CALIBRAGEM DE ANTENA COM AGRUPAMENTO ATIVO COM VARREDURA ELETRÔNICA DO FEIXE. A presente invenção se refere a uma antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2), compreendendo: um agrupamento ativo (25) configurado para irradiar/receber sinais em radio frequência (RF) através de primeiras aberturas irradiantes (21a) que ficam sobre um plano de massa (22) ("ground plane") ; e uma cobertura dielétrica (23) disposta a uma dada distância (D) do plano de massa (22), de modo tal que entre a cobertura dielétrica (23) e o plano de massa (22) esteja presente um espaço de ar (24). A dita antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe compreendendo, além disto, um ou mais dispositivos de calibragem (3) acionáveis para calibrar a dita antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2), cada dispositivo de calibragem (3) compreendendo uma respectiva porção radiante (31) disposta entre a cobertura dielétrica (23) e o plano de massa (22) e configurada para receber sinais em radio frequência (RF) irradiados através das correspondentes primeiras aberturas radiantes (21a) e para irradiar sinais em radio frequência (RF) no espaço de ar (24) na direção de ditas correspondentes primeiras aberturas radiantes (21a).

**ANTENA COM AGRUPAMENTO ATIVO COM VARREDURA ELETRÔNICA DO FEIXE,
MÉTODO PARA CALIBRAR UMA ANTENA COM AGRUPAMENTO ATIVO COM VARREDURA
ELETRÔNICA DO FEIXE, MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR E SISTEMA DE RADAR**

Campo Técnico Da Invenção

[001] No geral, a presente invenção é relativa a calibragem de antena com agrupamento ativo e com varredura eletrônica do feixe ("Active Electronically Scanned Array (AESA)").

[002] Em particular, a presente invenção se refere a uma antena AESA a qual compreende um dispositivo de calibragem, especificamente uma antena de calibragem, e um método para calibrar uma antena AESA.

Estado Da Arte

[003] Como é sabido, uma antena AESA, para poder funcionar corretamente, necessita de um de calibragem para poder ser calibrada, isto é, para poder ajustar periodicamente a fase e a amplitude dos respectivos módulos de transmissão/recepção ("Transmit/Receive Module(s)" - TRM(s)) de modo tal a satisfazer as solicitações necessárias de irradiação. Em particular, nos sistemas de radar baseados em antenas AESA o termo "calibragem" é empregado para descrever as medições e as regulagens feitas automaticamente pelos sistemas de radar nos TRMs, especialmente durante o início de operação de modo a garantir os resultados de irradiação necessários.

[004] Para tanto, na figura 1 é mostrado um esquema de blocos que representa uma arquitetura típica de uma antena AESA indicada em seu conjunto por 1.

[005] Em particular, a antena AESA 1 inclui uma rede de formação do feixe ("beam forming network"), ou coletor 11 ("manifold") que compreende, em uma primeira extremidade, uma porta de entrada/saída 12 ("input/output port") e que está conectada, em uma segunda extremidade, a uma pluralidade de TRMs 13, cada um dos quais estando conectado a um correspondente elemento radiante 14.

[006] Em detalhes, a rede de formação do feixe 11 permite:

- na transmissão, a propagação dos sinais em radiofrequência (RF) da porta de entrada/saída 12 para os TRMs 13 a fim de que tais sinais em RF sejam amplificados e dispersados por ditos TRMs 13 e, portanto, transmitidos pelos elementos radiantes 14; e
- na recepção, a propagação dos TRMs 13 na porta de entrada/saída 12 dos sinais em RF

recebidos pelos elementos radiantes 14, bem como amplificados e defasados por ditos TRMs 13.

[007] Convenientemente, a porta de entrada/saída 12 é conectada a meios de retransmissão (não mostrados na figura 1) da antena AESA 1, os quais são configurados para:

- na recepção, receber e elaborar os sinais em RF recebidos pelos elementos radiantes 14, amplificados e defasados por ditos TRMs 13 e propagados através da rede de formação do feixe 11 pelos TRMs 13 até a porta de entrada/saída 12; e
- na transmissão, fornecer na entrada na porta de entrada/saída 12 os sinais em RF que a antena AESA 1 deve transmitir, os quais, portanto, se propagam através da rede de formação do feixe 11 desde a porta de entrada/saída 12 até os TRMs 13, são amplificados e defasados pelos TRMs 13 e, por fim, são transmitidos pelos elementos radiante 14.

[008] A fim de que uma antena AESA alcance as solicitações radioativas devidas, é necessário que para cada percurso entre todos os elementos do agrupamento sejam predefinidas relações de fase e de amplitude. A inserção da fase e da amplitude de cada elemento radiante depende de componentes passivos (redes de formação do feixe, cabos, etc.) e de componentes ativos (TRMs). O objetivo da calibragem é o de regular a amplificação, especificamente através de um atuador variável, e a fase de cada TRM para obter-se a distribuição de fase e de amplitude desejada no frontal, ou melhor na superfície, do agrupamento ativo.

[009] Normalmente, a calibragem deve ser repetida periodicamente uma vez que o envelhecimento e/ou as variações de temperatura causam variações na inserção da fase e da amplitude nos TRMs.

[0010] A fim de realizar a calibragem, uma antena AESA deve ser dotada de um sistema de calibragem, ou seja, de elementos de *hardware* e de *software* adicionais que permitam à antena AESA medir e regular a inserção da fase e da amplitude de cada percurso em RF que compreende um TRM (nas antenas AESA, de fato, cada elemento radiante é acoplado a um respectiva TRM).

[0011] Em particular, relativamente a calibragem de uma antena AESA, através de um sistema de calibragem deve ser possível injetar um sinal em RF em cada percurso em RF da antena AESA que compreende um TRM e medir tal sinal em RF após o TRM, isto é, medir a amplitude e a fase dos sinais em RF que se propagam em cada percurso em RF que inclui um TRM. Além disto, quando o sinal em RF injetado é medido, tal sinal em RF deve apresentar uma

relação sinal/ruído ("Signal to Noise Ratio" - SNR) a mais alta possível a fim de que se obtenham medidas precisas.

[0012] Por exemplo, e de acordo com o pedido de patente norte-americano US 2004032365 (A1), com a finalidade de calibrar uma antena AESA, um sinal em RF pode ser injetado utilizando uma rede em RF suplementar que injeta o sinal em RF em cada percurso da antena AESA através de um acoplador, ou então empregando antenas externas para injetar o sinal em RF diretamente em cada elemento radiante. Esta segunda solução requer uma quantidade de elementos de *hardware* aditivos inferior com relação a primeira solução, mas requer o posicionamento das antenas externas para além da estrutura da antena AESA, aumentando assim a sua complexidade. Esta é uma desvantagem, sobretudo para as antenas AESA utilizadas em sistemas de radar transportáveis nos quais as dimensões externas das antenas AESA devem ser as menores possíveis, mesmo que compatíveis com as exigências da antena (abertura do feixe, ganho, etc.)

[0013] Além disso, também a publicação US 2010/0253571 A1 se refere à calibração de antenas para antenas de matriz em fase ativas. Especificamente, a US 2010/0253571 A1 se refere a um aparelho embutido para calibração autônoma de antena. Em particular, a US 2010/0253571 A1 divulga um arranjo de antenas que compreende: uma pluralidade de antenas de calibração montadas em torno do arranjo; em que as antenas de calibração têm faixas de sobreposição de modo que toda a face da matriz da antena esteja dentro da faixa de pelo menos uma calibração e cada par de antenas de calibração está na faixa de uma área comum da face da matriz.

[0014] Além disso, a US 7215298 B1 também se refere à calibração da antena para um conjunto de antenas coagindo com um plano de terra para radiação. Em particular, de acordo com US 7215298, a calibração da matriz é realizada com o auxílio de um ou mais elementos de calibração de antena extensíveis, tais como elementos de antena monopolo. Cada monopolo de calibração é normalmente retraído abaixo do plano do solo e não é energizado. Quando a calibração é desejada, ela é estendida para se projetar acima do plano de massa de modo a obter acoplamento mútuo com um ou mais dos elementos da antena de matriz. Os sinais de calibração podem ser transmitidos em qualquer direção. A antena de calibração pode ser estendida / retraída por vácuo, dispositivo mecânico ou motor elétrico.

[0015] Além disso, também a US 2008/0129613 A1 se refere à calibração para antenas

ativas reconfiguráveis. Em particular, a US 2008/0129613 A1 divulga um método para calibrar uma antena, que compreende um primeiro e um segundo elemento de antena arranjado em uma matriz, usando uma sonda de calibração que está fixamente localizada substancialmente em um centro de fase do primeiro e segundo elementos de antena. A fase e a amplitude de um sinal em cada um dos primeiro e segundo elementos da antena são medidas na sonda de calibração. Um erro de fase é determinado a partir de uma diferença entre as fases medidas e um erro de amplitude é determinado a partir de uma diferença entre as amplitudes medidas. Para recepção, o erro de fase e amplitude é aplicado para alinhar as fases e amplitudes dos sinais recebidos no primeiro e segundo elementos da antena. Para transmissão, o erro de fase e amplitude é aplicado a um sinal antes de transmitir sinais paralelos de ambos os elementos da antena.

[0016] Finalmente, a US 6208287 B1 também divulga um aparelho e um método para calibração independente e detecção de falha em uma antena de matriz de fase tendo uma rede de formação de feixe. A rede de formação de feixe inclui uma pluralidade de portas de matriz e uma pluralidade de portas de feixe ou um sistema alimentado por espaço. Uma pluralidade de elementos de antena e uma pluralidade de módulos de transmissão / recepção estão incluídas. Cada um dos módulos é acoplado entre um correspondente dos elementos da antena e um correspondente das portas da matriz. É fornecido um sistema de calibração com: uma porta de entrada RF; uma porta de detector de RF; um detector de RF acoplado à porta do detector de RF; e uma porta de elemento de antena. Uma seção de comutação é incluída para acoplar sequencialmente cada um dos elementos de antena através da rede formadora de feixe / alimentada por espaço e um dos módulos de transmissão / recepção acoplado seletivamente a: (a) a porta do detector durante um modo de calibração de recepção ; ou, (b) para a porta de entrada RF durante um modo de calibração de transmissão. A seção de interruptor inclui um interruptor para acoplar seletivamente um determinado dos elementos de antena, ou seja, um elemento de antena de calibração, seletivamente a: (a) a entrada de teste de RF do sistema de calibração durante o modo de calibração de recepção através de um caminho isolado do rede formadora de feixes; ou, (b) para a porta do detector durante o modo de calibração de transmissão através de um caminho isolado da rede de formação de feixe.

Objeto e Síntese da Invenção

[0017] O escopo da presente invenção é, portanto, o de fornecer um dispositivo e um

método para calibrar uma antena com agrupamento ativo que, em geral, permita reduzir, ao menos em parte, as desvantagens dos dispositivos e dos métodos conhecidos de calibragem e que, em particular, não levem a um aumento nas dimensões externas da antena com agrupamento ativo.

[0018] O escopo supra é alcançado pela presente invenção uma vez que esta é relativa a uma antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe, e a um sistema de radar compreendendo a dita antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe, e a um método para calibrar uma antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe e a um programa de computador ou *software* para implementar o dito método de calibragem, de acordo com o quanto definido a partir das reivindicações em anexo.

Breve Descrição dos Desenhos

[0019] Para uma melhor compreensão da presente invenção, algumas formas preferidas de realização, fornecidas a puro título de exemplo explicativo e não limitativo, serão ora ilustradas com referência aos desenhos em anexo (fora de escala), nos quais:

- a figura 1 ilustra esquematicamente uma arquitetura típica para uma antena de agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe;
- a figura 2 é uma vista esquemática de uma secção transversal de uma antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe, de acordo com uma forma preferencial de realização da invenção;
- a figura 3 é uma vista esquemática de uma secção transversal de uma antena de calibragem para a antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe da figura 2;
- a figura 4 é uma vista esquemática em perspectiva de uma segunda porção da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe da figura 2;
- a figura 5 é uma vista em perspectiva de uma terceira porção da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe das figuras 2 e 4;
- a figura 6 é uma vista frontal de toda a antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe mostrada parcialmente nas figuras 2, 4 e 5;
- a figura 7 ilustra esquematicamente medidas de amplitude da inserção entre os elementos radiantes da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe e seis antenas de calibragem mostradas na figura 6;

- a figura 8 ilustra esquematicamente um método de calibragem e uma antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe de acordo com uma forma preferencial de realização da presente invenção; e
- a figura 9 ilustra esquematicamente um sinal obtido durante a fase do método de calibragem da figura 8.

Descrição Detalhada das Formas Preferencias de Realização da Invenção

[0020] A presente invenção será ora descrita em detalhes e com referência as figuras anexo de modo a permitir que um perito possa realizá-la e utilizá-la. Diversas modificações nas formas de realização descritas ficarão imediatamente evidentes aos peritos na arte e os princípios genéricos descritos poderão ser aplicados em outras formas de realização e de aplicação da invenção sem com isto fugir do âmbito de proteção da presente invenção, tal como definido nas reivindicações em anexo. Portanto, a presente invenção não deve ser considerada como estando limitada às formas de realização descritas e ilustradas, mas a esta deve ser considerado o âmbito de proteção mais amplo conforme os princípios e as características aqui descritas e reivindicadas.

[0021] Ademais, a presente invenção pode atuar por meio de um programa de computador ou software compreendendo porções de código aptas a implantar, quando o software é carregado em uma memória de uma unidade de controle e de processamento ("*processing, control unit*") de uma antena com agrupamento ativo e com varredura eletrônica do feixe, de acordo com a presente invenção, e executado pela unidade de controle e de processamento, o método de calibragem que será descrito a seguir.

[0022] Para simplificação da descrição e sem perder-se o seu caráter genérico, a seguir será descrita a calibragem de uma antena AESA principalmente em relação ao funcionamento em recepção da antena AESA, estando certo e firme que os mesmos princípios e conceitos que serão descritos a seguir são aplicáveis, *mutatis mutandis*, também para o funcionamento em transmissão da antena AESA simplesmente invertendo a direção dos sinais em RF considerados.

[0023] De acordo com um primeiro aspecto da presente invenção, o qual é descrito a seguir, um dispositivo de calibragem para calibrar antenas com agrupamento ativo ("*active array antennas*"), e em particular uma antena de calibragem para calibrar agrupamentos ativos de guias de onda ("*active waveguide arrays*") dispostas sobre um plano de massa ("*ground plane*") e revestidas com uma cobertura dielétrica ("*dielectric cover*") a qual atua como um adaptador de

impedancia para angulos grandes de varredura ("Wide Angle Impedance Matching" - WAIM), seja como proteção do ambiente ao redor. Com o objetivo de realizar as funções WAIM, a cobertura dielétrica é solidamente posicionada a distâncias da ordem de cerca de $\lambda/10$ do plano de massa do agrupamento ativo, onde λ indica o comprimento de onda operacional da antena com agrupamento ativo. Portanto, entre a cobertura dielétrica e o plano de massa da antena com agrupamento ativo encontra-se presente um espaço vazio ("air gap"). A antena de calibragem, de acordo com a presente invenção apresenta dimensões tais de modo a poder ser posicionada no interior de tal vão de ar entre o plano de massa e a cobertura dielétrica da antena com agrupamento ativo e é configurada de modo a injetar nos elementos radiantes da antena com agrupamento ativo sinais em RF possuindo um SNR suficiente para efetuar medidas precisas de calibragem.

[0024] Em relação a tanto, na figura 2 é mostrada esquematicamente uma secção transversal de uma primeira porção de uma antena AESA de acordo com uma forma preferencial de realização da presente invenção, na figura 2 a dita antena AESA sendo indicada com 2 na sua totalidade.

[0025] Em particular, e tal como mostrado na figura 2, a antena AESA 2 compreende agrupamento ativo de elementos radiantes 21 em guia de onda em cada um dos quais se propagam, paralelamente a uma primeira direção Z , sinais em RF que a antena AESA 2 em uso deve transmitir/receber. Cada elemento radiante 21 é acoplado a uma extremidade de um correspondente TRM (não mostrado na figura 2) e termina na outra extremidade com uma abertura radiante (não mostrada na figura 2) que jaz sobre um plano de massa 22 da antena AESA 2 e que apresenta dois primeiros lados orientados paralelamente em relação a uma segunda direção Y perpendicular a primeira direção Z e dois segundos lados orientados paralelamente em relação a uma terceira direção X perpendicular a primeira direção Z e a segunda direção Y . O plano de massa 22 se estende na segunda direção Y e na terceira direção X , ou seja o plano de massa 22 é ortogonal a primeira direção Z .

[0026] Além disto, e tal como descrito anteriormente, a antena AESA 2 compreende também uma cobertura dielétrica 23 paralela ao plano de massa 22 e posicionada a uma dada distância D de dito plano de massa 22 de modo tal que entre a dita cobertura dielétrica 23 e o dito plano de massa 22 esteja presente um espaço vazio 24.

[0027] Preferivelmente, a cobertura dielétrica 23 compreende uma estrutura multi camadas realizada com um ou mais materiais dielétricos.

[0028] Convenientemente, a data distância D é igual a $\lambda/10$, onde λ indica o comprimento da onda operacional da antena AESA 2. Sempre como descrito precedentemente, a cobertura dielétrica 23 opera tanto como adaptador de impedância para ângulos grandes de varredura (WAIM), quanto como proteção da antena AESA 2 contra o ambiente circundante.

[0029] Ainda fazendo referência a figura 2, a antena AESA 2 compreende um dispositivo de calibragem, ou antena de calibragem, 3 que inclui uma porção radiante 31 ("radiating portion") em guia de onda que está compreendida entre o plano de massa 22 e a cobertura dielétrica 23 da antena AESA 2 e na qual os sinais em RF que a antena de calibragem 3 em uso deve irradiar/receber se propagam paralelamente em relação a segunda direção Y.

[0030] Em particular, a porção radiante 31 da antena de calibragem 3 termina, em uma primeira extremidade, em uma abertura radiante (não mostrada na figura 2) que fica de frente para o espaço vario 24 compreendido entre a cobertura dielétrica 23 e o plano de massa 22 da antena AESA 2, especificamente na direção das aberturas radiantes dos elementos radiantes 21 da antena AESA 2, e apresenta dois primeiros lados orientados paralelamente em relação a primeira direção Z e dois segundos lados orientados paralelamente em relação a terceira direção X.

[0031] De forma detalhada, a porção radiante 31 apresenta uma dimensão pré definida ao longo da primeira direção Z, entre o plano de massa 22 e a cobertura dielétrica 23 da antena AESA 2, que é menor, ou igual, que a dada distância D.

[0032] Além disto, e ainda com relação a figura 2, a antena de calibragem 3 inclui também:

- uma porção de transição 32 ("transition portion") em guia de onda na qual os sinais em RF que a antena de calibragem 3 em uso deve irradiar/receber se propagam paralelamente em relação a primeira direção Z; e
- uma porção de meio 33 ("middle portion") em guia de onda que fica compreendida entre a porção radiante 31 e a porção de transição 32 e na qual os sinais e RF que a antena de calibragem 3 em uso deve irradiar/receber se propagam de/para a porção de transição 32 para/da porção radiante 31.

[0033] Em particular, a porção de transição 32 está conectada, em uma primeira extremidade, a um conector coaxial SMA 34 e, em uma segunda extremidade, com uma

extremidade da dita porção de meio 33, a qual, por sua vez, está conectada na outra extremidade com uma segunda extremidade da porção radiante 31.

[0034] Em uso, a antena de calibragem 3 irradia, mediante a abertura radiante da porção radiante 31, um sinal em RF sobre a periferia do agrupamento ativo de forma paralela ao plano de massa 22. Desta forma, o sinal em RF irradiado se propaga como uma onda superficial por sobre o plano de massa 22 da antena AESA 2, ou seja, sobre a face do agrupamento ativo. A propagação de tal onda superficial sobre o plano de massa 22, ou seja sobre a superfície do agrupamento ativo, é facilitada pela presença da cobertura dielétrica 23.

[0035] Em particular, a antena de calibragem 3 é uma antena de guia de onda truncada cuja porção radiante 31 apresenta uma dimensão pré definida ao longo da primeira direção Z muito reduzida de modo a poder ser inserida no espaço vazio 24 e é configurada para irradiar principalmente em uma direção paralela ao plano de massa 22 na direção das aberturas radiantes dos elementos radiantes 21. De fato, e tal como supra descrito, a abertura radiante da porção radiante 31 da antena de calibragem 3 fica de frente com as aberturas radiantes dos elementos radiantes 21.

[0036] Além disto, e para uma melhor compreensão da presente invenção:

- na figura 3 é mostrada uma vista esquemática de uma secção transversal somente da antena de calibragem 3;
- na figura 4 é mostrada uma vista em perspectiva esquemática da antena de calibragem 3 e em transparência, para uma melhor compreensão da ilustração, uma segunda porção da antena AESA 2; e
- na figura 5 é mostrada uma vista em perspectiva da antena de calibragem 3 e de uma terceira porção da antena AESA 2 sem, para uma melhor visualização da ilustração, da cobertura dielétrica 23.

[0037] Nas figuras 3-5, os componentes da antena AESA 2 e da antena de calibragem 3 já mostrados na figura 2 e precedentemente descritos são identificados pelos mesmos números de referência já empregados na figura 2.

[0038] Em particular, como descrito precedentemente e como mostrado nas figuras 2-5, a antena de calibragem 3 compreende três porções principais ligadas em cascata: a porção radiante 31, a porção de meio 33 que apresenta uma curva em 90° e a porção de transição 32.

[0039] De forma detalhada, a porção radiante 31 é inserida no espaço vazio 24 da antena AESA 2, é responsável pela radiação na direção dos elementos radiantes 21 da antena AESA 2 e pode ser convenientemente realizada com uma guia de onda com perfil baixíssimo ("Ultra Low Profile" - ULP) que apresenta uma primeira dimensão ao longo da direção Z (que a seguir será indicada, por uma questão de simplificação da descrição, de altura H) igual a 3,5 mm (ou seja, $H=3,5$ mm).

[0040] De forma ainda mais detalhada, a guia de onda com a qual é realizada a porção radiante 31 pode convenientemente apresentar uma segunda dimensão ao longo da terceira dimensão X (que a seguir será indicada, por uma questão de simplificação da descrição, de largura W) igual a 40,4 mm (ou seja, $W=40,4$ mm).

[0041] Além disto, a porção de meio 33 pode ser convenientemente realizada com uma guia de onda ULP curvada em 90° que liga a guia de onda da porção radiante 31 com a guia de onda da porção de transição 32. Para otimizar a adaptação da curva esta última pode ser convenientemente chanfrada.

[0042] Além disto, a porção de transição 32, que é conectada através do conector coaxial SMA 34 a uma fonte externa de sinais ("external signal source") (não mostrada em nenhum das figuras 2-5) para receber desta última o sinal em RF a ser irradiado, ou seja, na propagação para o interior da antena de calibragem 3 do sinal em RF a ser irradiado, uma primeira transição de suporte de propagação de coaxial para guia de onda e, em cascata, uma segunda transição de suporte de propagação da guia de onda de perfil baixo ("Low Profile" - LP), por exemplo possuindo uma altura de 6,5 mm e uma largura de 40,4 mm, tipo guia de onda de baixíssimo perfil (ULP).

[0043] Em particular, é imperativo fazer notar que, como a largura das guias de onda da antena de calibragem 3, por exemplo 40,4 mm, depende da frequência operacional da antena de calibragem 3, ou seja, da frequência dos sinais em RF que a antena de calibragem 3 em uso deve irradiar/receber. Portanto, uma vez definida tal frequência operacional, a largura das guias de onda resultam também estas definidas não podem então serem variadas. Ao contrário, a altura das guias de onda da antena de calibragem 3, em particular a altura das guias de onda da porção radiante 31, não influencia a frequência operacional da antena de calibragem 3 e pode, portanto, ser reduzida por razões de complexidade do conjunto, em particular pode ser reduzida de modo tal que a porção radiante 31 possa ser inserida no espaço vazio 24 entre a cobertura dielétrica 23

e o plano de massa 22 da antena AESA 2.

[0044] Ademais, com o escopo de adaptar a impedância de radiação da abertura radiante da porção radiante 31 com a impedância da guia de onda da porção radiante 31 para assim minimizar o coeficiente de reflexão, é empregada uma íris, ou septo, indutivo 35 inserido na porção radiante 31. Dita íris indutiva 35 se comporta como uma indutância em paralelo que compensa o comportamento capacitivo da abertura radiante da porção radiante 31, a dita abertura radiante sendo indicada com 31a nas figuras 4 e 5.

[0045] Em particular, a dita íris indutiva 35 permite que a antena de calibragem 3 funcione entre a cobertura dielétrica 23 e o agrupamento ativo adaptando a impedância da abertura radiante 31a com relação àquela da guia de onda da porção radiante de 31. Deste modo, a antena de calibragem 3 pode irradiar ondas superficiais sobre a superfície, ou seja sobre o plano de massa 22, do agrupamento ativo da antena AESA 2.

[0046] Por outro lado, com o objetivo de alinhar, ou seja adaptar, o quanto possível a polarização da antena de calibragem 3 com aquela dos elementos radiantes 21 em guia de onda da antena AESA 2, a antena de calibragem 3 é posicionada de modo tal que o plano E da porção radiante 31 resulte paralelo ao plano E dos elementos radiantes 21. Deste modo, de fato, a antena de calibragem 3 está em grau de receber os sinais em RF transmitidos pela antena AESA 2 e a antena AESA 2 está em grau de receber os sinais em RF irradiados da antena de calibragem 3.

[0047] Em particular, como é sabido, o plano E de uma antena que transmite/recebe sinais em RF polarizados é representado pelo plano que contém o vetor campo elétrico $\vec{E}$ dos sinais em RF transmitidos/recebidos. Em outras palavras, o plano E individualiza as polarizações ou orientações das ondas de rádio transmitidas/recebidas pela antena. No caso da antena AESA 2 a polarização dos sinais em RF transmitidos/recebidos é orientada ao longo da segunda direção Y e, portanto, o plano E resulta orientado paralelamente em relação a segunda direção Y. Tudo isto implica em que os segundos lados (ou seja, os lados orientados paralelamente em relação a terceira direção X) da abertura radiante 31a da porção radiante 31 são paralelos em relação aos segundos lados das aberturas radiantes (indicadas com 21a na figura 5) dos elementos radiantes 21, os quais, de fato, como descrito anteriormente, são também estes orientados paralelamente em relação a terceira direção X.

[0048] Além disto, a abertura radiante 31a da porção radiante 31 da antena de calibragem

3 apresenta um diagrama de radiação cujo máximo se encontra na direção ortogonal em relação a abertura radiante 31a, ou seja na segunda direção Y. Isto implica em que a perda de inserção entre a antena de calibragem 3 e os elementos radiantes 21 da antena AESA 2 é baixa para os elementos radiantes 21 dispostos de frente para a abertura radiante 31a da porção radiante 31 da antena de calibragem 3 e é maior para os elementos radiantes 21 que não estão de frente para a abertura radiante 31a da porção radiante 31 da antena de calibragem 3.

[0049] Além disto, a d perda de inserção é proporcional a distância entre a abertura radiante 31a da porção radiante 31 da antena de calibragem 3 e as aberturas radiantes 21a dos elementos radiantes 21 da antena AESA 2.

[0050] De preferência, e com o objetivo de manter a perda de inserção o quanto possível constante em todos os elementos radiantes 21 da antena AESA 2, em particular com o objetivo de manter a perda de inserção em cada elemento radiante 21 compreendida entre um valor mínimo e um valor máximo, podem ser utilizadas uma pluralidade de antenas de calibragem 3 dispostas sobre o plano de massa 22 da antena AESA 2 de modo tal que cada uma das antenas de calibragem 3 esteja destinada a irradiar/receber sinais em RF para/de os respectivos elementos radiantes 21 da antena AESA 2.

[0051] Neste sentido, na figura 6 é mostrada uma vista frontal de toda a antena AESA 2 livre, para uma maior clareza da ilustração, da cobertura dielétrica 23.

[0052] Em particular, e como mostrado na figura 6, a antena AESA 2, em sua totalidade, compreende um agrupamento ativo 25 que apresenta os elementos radiantes 21 dispostos ao longo de dezesseis linhas e cinquenta e quatro colunas, cada um dos elementos radiantes 21 estando acoplando a um correspondente TRM (não mostrado na figura 6).

[0053] Ademais, sobre o plano de massa 22 da antena AESA 2, em particular externamente a área do plano de massa 22 ocupada pelo agrupamento ativo 25, são instaladas seis antenas de calibragem 3, das quais três estão posicionadas ao longo de um primeiro lado do agrupamento ativo 25 e três estão posicionadas ao longo de um segundo lado do agrupamento ativo 25, oposto ao primeiro lado. Cada antena de calibragem 3 é empregada para irradiar/receber sinais em RF para/de uma correspondente região do agrupamento ativo 25, em particular cada antena de calibragem 3 é utilizada para irradiar/receber sinais em RF para/de os elementos radiantes 21 que se encontram mais próximos da dita antena de calibragem 3.

[0054] Convenientemente, e como ilustrado por meio das linhas tracejadas mostradas na figura 6, as regiões do agrupamento ativo 25 correspondentes, para a calibragem, às seis antenas de calibragem 3 podem ser retangulares e apresentarem dimensões de oito linhas por dezoito colunas. Através de tal disposição é possível manter a perda de inserção medida entre as antenas de calibragem 3 e os elementos radiantes 21 compreendida entre -20 dB e -50 dB, tal como ilustrado no gráfico mostrado in Figura 7. De forma mais precisa, cada antena de calibragem 3 é usada para transmitir/receber para/de os elementos radiantes 21 posicionados no retângulo tracejado na figura 6 imediatamente em frente. Em particular, no gráfico da figura 7 são representadas medidas da amplitude de inserção (em dB) entre as seis antenas de calibragem 3 e os elementos radiantes 21 do agrupamento ativo 25. De acordo com o quanto mostrado na figura 6, também na figura 7 as regiões do agrupamento ativo 25 correspondentes, para a calibragem, às seis antenas de calibragem 3 são individualizadas por meio de linhas tracejadas.

[0055] De acordo com um segundo aspecto da presente invenção, a seguir é descrito um método de calibragem de uma antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe.

[0056] Em particular, em relação a este aspecto, na figura 8 é mostrado um diagrama de fluxo que representa um método de calibragem 8 de acordo com uma forma preferida de realização da presente invenção destinado a ser empregado para calibrar uma antena AESA mediante o uso do dispositivo de calibragem de acordo com a presente invenção.

[0057] Em particular, e objetivando simplificar a descrição e sem perder o caráter de generalidade, o método de calibragem 8 será descrito a seguir em relação a calibragem da antena AESA 2 mostrada na figura 6 e precedentemente descrita, por meio do uso de seis antenas de calibragem 3, também estas descritas anteriormente.

[0058] Além disto, e como também já dito, sempre objetivando simplificar a descrição e sem perder o caráter de generalidade, o método de calibragem 8 será descrito em seguida somente em relação ao funcionamento em recepção da antena AESA 2, estando certo que os mesmos princípios e conceitos que serão descritos a seguir são aplicáveis, *mutatis mutandis*, também para o funcionamento em transmissão da antena AESA 2 simplesmente invertendo a direção dos sinais em RF considerados.

[0059] De acordo com o quanto mostrado na figura 8, o método de calibragem 8 compreende principalmente uma fase de medição (bloco 83) na qual são realizadas as medições

de calibragem e uma pluralidade de fases de processamento baseadas nas medições de calibragem executadas.

[0060] Em particular, durante a fase de medição (bloco 83) é medida a inserção de fase e amplitude de cada TRM da antena AESA 2, enquanto que as fases de processamento os valores determinados durante a fase de medição (bloco 83) são processadas e modo a calcular coeficientes da calibragem de fase e amplitude a serem carregados nos TRMs com o objetivo de obter uma distribuição desejada de fase e amplitude sobre a face do agrupamento ativo 25 da antena AESA 2.

[0061] De forma detalhada, o escopo da calibragem dos TRMs da antena AESA 2 é o de corrigir as variações de amplitude e a fase através de cada percurso de recepção/transmissão no interior de todo o agrupamento ativo 25. Por percurso de recepção/transmissão se entende um percurso em RF entre um elemento radiante 21 e a entrada dos meios de retransmissão da antena AESA 2. Um percurso de recepção/transmissão inclui, em geral, um TRM, a rede de formação do feixe da antena AESA 2, etc. Especificamente, e fazendo novamente referência a figura 1, um percurso de recepção/transmissão está compreendido entre a porta de entrada/saída 12 e um elemento radiante 14.

[0062] Com o objetivo de obter a distribuição desejada de fase e amplitude sobre a face do agrupamento ativo 25 da antena AESA 2, o objetivo da calibragem dos TRMs, cada um dos quais é dotado de um respectivo atenuador digital e de um respectivo defasador digital, é o de impingir:

- os atenuadores digitais nos TRMs com respectivos coeficientes específicos de atenuação de modo a garantir a distribuição desejada da amplitude na face do agrupamento ativo 25 da antena AESA 2; e
- os defasadores digitais nos TRMs com respectivos coeficientes específicos de fase de modo a garantir que a fase de cada percurso de recepção/transmissão seja igual a um valor de fase de referência.

[0063] Avançando de forma mais detalhada na descrição do método de calibragem 8 e fazendo referência a figura 8, dito método de calibragem 8 compreende realizar uma calibragem completa dos TRMs da antena AESA 2 para cada forma do feixe em RF que a antena AESA 2 deve transmitir/receber. Cada forma do feixe em RF corresponde a uma respectiva distribuição de amplitude e fase sobre a face do agrupamento ativo 25 da antena AESA 2. Como mostrado na

figura 8, às formas do feixe em RF é associado um índice do feixe em RF c que, para cada forma do feixe em RF, assume um correspondente valor compreendido entre 1 e C_{MAX} , ou seja, usando de um formalismo matemático, resulta que $1 \leq c \leq C_{MAX}$, onde C_{MAX} é o número de formas do feixe em RF transmissíveis/recebíveis pela antena AESA 2.

[0064] Além disto, a antena AESA 2 pode transmitir/receber sinais em RF com diversas frequências e, como mostrado na figura 8, às frequências é associado um índice de frequência f que, para cada frequência assume um correspondente valor compreendido entre 1 e F_{MAX} , ou seja, usando um formalismo matemático, resulta que $1 \leq f \leq F_{MAX}$, onde F_{MAX} é o número de frequências operacionais da antena AESA 2. Em particular, para cada forma do feixe em RF a calibragem é realizada uma frequência por vez.

[0065] De acordo com o quanto mostrado na figura 8, após ter selecionado as formas do feixe em RF e a frequência, são realizadas todas as medições (bloco 83) para recolher os dados relativos aos TRMs com o objetivo de avaliar se uma nova calibragem é necessária. Os dados relativos aos TRMs são recolhidos, ou seja medidos, utilizando a calibragem atual, ou seja utilizando os coeficientes de calibragem atuais. Em particular, quando a antena AESA 2 é calibrada da primeira vez, a calibragem atual corresponde à antena AESA 2 não calibrada, ou seja todos os coeficientes de atualização dos atenuadores digitais dos TRMs e todos os coeficientes de fase dos defasadores digitais dos TRMs são levados aos valores iniciais de *default*. Preferivelmente, a fase de medição (bloco 83) compreende processar os valores medidos de modo tal a eliminar qualquer contribuição proveniente de radiação de fundo.

[0066] Sucessivamente os dados relativos aos TRMs são usados para avaliar se a calibragem atual ainda é aceitável ou não (bloco 85). Para poder avaliar se a calibragem atual ainda é ancora aceitável ou menos, são calculados índices de prestação da calibragem (bloco 84) os quais compreendem um índice de prestação para a amplitude e um índice de prestação para a fase. Os índices de prestação da calibragem calculados são confrontados com índices de prestação de referência de forma a avaliar se a calibragem atual é aceitável ou não (bloco 85).

[0067] Então, se a calibragem atual não é aceitável, são calculados novos coeficientes de calibragem (bloco 86) que depois são carregados nos TRMs (bloco 87) de modo que as medições sucessivas de calibragem (bloco 83) são realizadas com base nos novos coeficientes de calibragem calculados. Em particular, os novos coeficientes de calibragem calculados são usados para inferir

os novos valores para os coeficientes de atenuação dos atenuadores digitais dos TRMs e dos coeficientes de fase dos defasadores digitais dos TRMs (bloco 87).

[0068] Por fim, se para uma dada frequência e uma dada forma do feixe em RF novos coeficientes de calibragem devem ser calculados por mais de três vezes sem se obter índices de prestação da calibragem aceitáveis, passa-se para a frequência sucessiva (bloco 89) e/ou para a forma do feixe em RF sucessivo (bloco 91). Este erro na calibragem pode ser convenientemente assinalado como uma informação de "Built In Test" (BIT). Preferivelmente, um índice de ciclo de processamento *ciclo* é utilizado para contar o número de vezes que os coeficientes de calibragem foram calculados para cada frequência e cada forma do feixe em RF.

[0069] Avançando de forma ainda mais detalhada, e como mostrado na figura 8, o método de calibragem 8 compreende:

- selecionar uma primeira forma do feixe em RF assinalando ao índice do feixe em RF c o valor um (ou seja impor $c=1$) que é portanto associado a primeira forma do feixe em RF (bloco 80);
- selecionar uma primeira frequência assinalando ao índice de frequência f o valor um (ou seja, impor $f=1$) que é associado com a primeira frequência (bloco 81);
- assinalar ao índice do ciclo de processamento *ciclo* um valor inicial igual a zero (ou seja, impor $ciclo=0$) (bloco 82);
- realizar as medições de calibragem usando as seis antenas de calibragem 3 (bloco 83);
- calcular os índices de prestação da calibragem com base nas medições de calibragem realizadas (bloco 84); e
- controlar se os índices de prestação da calibragem calculados satisfazem uma condição predefinida com relação aos índices de prestação de referência e se o índice de ciclo de processamento *ciclo* é igual a três (ou seja, controlar se $ciclo=3$) (bloco 85).

[0070] Então, se os índices de prestação da calibragem calculados não satisfazem uma condição predefinida com relação aos índices de prestação de referência e o índice de ciclo de processamento *ciclo* não é igual a três (Em particular $ciclo < 3$), então o método de calibragem 8 compreende:

- calcular novos coeficientes de calibragem (bloco 86);
- carregar os novos coeficientes de calibragem calculados nos TRMs (bloco 87);

- incrementar em um o índice de ciclo de processamento *ciclo* (ou seja impor $ciclo=ciclo+1$) (bloco 88); e
- repetir parte do método de calibragem 8 começando com a execução de novas medições de calibragem (bloco 83).

[0071] Ao contrário, se os índices de prestação da calibragem calculados satisfazem uma condição predefinida com relação aos índices de prestação de referência ou então se o índice de ciclo de processamento *ciclo* é igual a três (ou seja, se $ciclo=3$), então o método de calibragem 8 compreende:

- incrementar em um o índice de frequência f (ou seja impor $f=f+1$) (bloco 89); e
- controlar se o índice de frequência f é maior que F_{MAX} (ou seja, controlar se $f > F_{MAX}$) (bloco 90).

[0072] Então, se o índice de frequência f não é maior que F_{MAX} (ou seja se $f \leq F_{MAX}$), repete-se parte do método de calibragem 8 começando com a assinalação ao índice de ciclo de processamento *ciclo*, de novo, o valor inicial igual a zero (ou seja, é novamente imposto $ciclo=0$) (bloco 82).

[0073] Ao contrário, se o índice de frequência f é maior que F_{MAX} (ou seja, se $f > F_{MAX}$), o método de calibragem 8 compreende:

- incrementar em um o índice de feixe em RF c (ou seja, impor $c=c+1$) (bloco 91); e
- controlar se o índice de feixe em RF c é maior que C_{MAX} (ou seja, controlar se $c > C_{MAX}$) (bloco 92).

[0074] Então, se o índice de feixe em RF c não é maior que C_{MAX} (ou seja, se $c \leq C_{MAX}$), repete-se parte do método de calibragem 8 começando com a assinalação para o índice de frequência f o valor um (bloco 81).

[0075] Ao contrário, se o índice do feixe em RF c é maior que C_{MAX} (ou seja, se $c > C_{MAX}$), a calibragem termina (bloco 93).

[0076] A seguir serão descritas, em detalhes, as fases principais do método de calibragem 8, ou seja a fase de medição (bloco 83), a fase de cálculo dos índices de prestação da calibragem (bloco 84) e a fase de cálculo dos novos índices de calibragem (bloco 86), fazendo referência explícita, para simplificação da descrição e sem perda do seu caráter genérico, à antena AESA 2 e as seis antenas de calibragem 3 mostradas na figura 6 e precedentemente descritas.

[0077] Em particular, a fase de medição (bloco 83) compreende:

- ativar em transmissão uma das seis antenas de calibragem 3, ligar um único TRM por vez entre os $M \times N$ TRMs da antena AESA 2, onde, fazendo referência ao quanto descrito precedentemente em relação a figura 6, $M=16$ e $N=54$, e obter, com base nos correspondentes sinais recebidos pelos meios de recepção e transmissão da antena AESA 2, um correspondente sinal medido $x_{m,n,f,c}^{MIS}$ possuindo um componente em fase $I_{m,n,f,c}^{MIS}$ e um componente em quadratura $Q_{m,n,f,c}^{MIS}$, sendo que os índices f e c indicam, respectivamente, a frequência e a forma do feixe em RF considerados e o par de índices (m,n) identifica o TRM ligado (com $1 \leq m \leq M$ e $1 \leq n \leq N$); especificamente entre as seis antenas de calibragem 3 é ativada em transmissão aquela correspondente à região do agrupamento ativo 25 que compreende o elemento radiante 21 acoplado ao TRM (m,n) ligado; e

- desligar todos os TRMs da antena AESA 2, selecionar em atenuação máxima os atenuadores digitais de todos os TRMs da antena AESA 2, ativar em transmissão uma única antena de calibragem 3 por vez e obter, com base no correspondente sinal recebido dos meios de recepção e transmissão da antena AESA 2, um correspondente sinal de fundo $x_{p,f,c}^{BACK}$ possuindo um componente em fase $I_{p,f,c}^{BACK}$ e um componente em quadratura $Q_{p,f,c}^{BACK}$, sendo que o par p identifica a antena de calibragem 3 ativada em modo de transmissão (com $1 \leq p \leq 6$).

[0078] O sinal de fundo $x_{p,f,c}^{BACK}$ é o sinal recebido pelos meios de recepção e transmissão da antena AESA 2 quando a p -ésima antena de calibragem 3 injeta um sinal e todos os TRMs da antena AESA 2 estão desligados. Se o isolamento de cada TRM fosse infinito o sinal de fundo $x_{p,f,c}^{BACK}$ seria desprezível, mas posto que tal isolamento não é infinito então o sinal de fundo $x_{p,f,c}^{BACK}$ é a soma vetorial das contribuições de todos os TRMs desligados, seja como

$$x_{p,f,c}^{BACK} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n,p,f,c}^{OFF}.$$

[0079] Quando apenas um TRM é ligado, o sinal medido $x_{m_0,n_0,f,c}^{MIS}$ é a soma dos pequenos sinais através de todos os TRMs desligados mais o sinal através do TRM ligado $x_{m_0,n_0,f,c}^{ON}$, ou seja

$$x_{m_0,n_0,f,c}^{MIS} = x_{m_0,n_0,f,c}^{ON} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n,p,f,c}^{OFF} \cong x_{m_0,n_0,f,c}^{ON} + x_{p,f,c}^{BACK},$$

na qual o par de elementos (m_0, n_0) identifica o TRM ligado.

[0080] Para uma maior compreensão da fase de medição (83), na figura 9 é mostrado, no plano complexo, um vetor complexo 100 relativo ao sinal medido $x_{m_0,n_0,f,c}^{MIS}$ (representado por uma flecha em linha contínua) que pode ser decomposto em um primeiro componente 101 relativo ao

signal através do TRM ligado $x_{m_0, n_0, f, c}^{ON}$ (representado por uma flecha tracejada) e em um segundo componente 102 relativo ao sinal de fundo $x_{p, f, c}^{BACK}$ (representado por uma flecha pontilhada). Na figura 9 dois círculos representam a incerteza da medição ligada a relação sinal/ruído (SNR).

[0081] Portanto, para se obter apenas a contribuição do TRM ligado (ou seja o primeiro componente 101 mostrado na figura 9), o sinal de fundo deve ser subtraído da medição, ou seja

$$x_{m_0, n_0, f, c}^{ON} = x_{m_0, n_0, f, c}^{MIS} - x_{p, f, c}^{BACK}.$$

[0082] Portanto, ao final da fase de medição (bloco 83) obtém-se um conjunto de valores de impedância $S_{m, n, f, c}^{amp}$ e um conjunto de valores de fase $S_{m, n, f, c}^{phase}$ para cada TRM (m, n) . Estes valores são então utilizados para calcular os índices de prestação da calibragem (bloco 84) e, se necessário, os novos coeficientes de calibragem (bloco 86).

[0083] Em particular, os índices de prestação da calibragem representam uma medição de quão boa é a calibragem. Com base nestes índices, o sistema de calibragem pode decidir se um novo ciclo de calibragem é necessário ou não (bloco 85).

[0084] De forma detalhada, os índices de prestação da calibragem compreendem um índice de prestação para a fase $K_{Rx, f, c}^{phase}$, que é a variação da distribuição dos valores de fase $S_{m, n, f, c}^{phase}$, e um índice de prestação para a impedância $K_{Rx, f, c}^{amp}$, que é a variação da distribuição normalizada dos valores de impedância $S_{m, n, f, c}^{amp}$. A variação da distribuição dos valores de fase $S_{m, n, f, c}^{phase}$, ou seja o índice de prestação para a fase é:

$$K_{Rx, f, c}^{phase} = \frac{\sum_{n, m} (S_{m, n, f, c}^{phase} - \phi_{m, n, f, c}^{REF})^2}{N_{TRM}},$$

onde $\phi_{m, n, f, c}^{REF}$ representa o valor da fase de referência para a calibragem do TRM (m, n) na frequência f da forma de feixe em RF c , e N_{TRM} é o número total dos TRMs do agrupamento ativo 25.

[0085] No que tange, ao invés, a variação da distribuição normalizada dos valores de impedância $S_{m, n, f, c}^{amp}$, o cálculo não é direto. Supondo que o erro da impedância é aditivo e é uma variável aleatória U com media zero, a amplitude $S_{m, n, f, c}^{amp}$ pode ser escrita como:

$$S_{m, n, f, c}^{amp} = (1 + U)h_{m, n}d,$$

na qual $h_{m, n}$ é o "taper" do agrupamento ativo 25 (por "taper" se deve entender a distribuição da amplitude dos elementos da antena de modo a realizar um determinado diagrama de radiação) e d é um coeficiente devido a amplitude da inserção da medição.

[0086] Com esta hipótese, d é estimado como:

$$\hat{d} = E \left\{ \frac{s_{m,n,f,c}^{amp}}{h_{m,n}} \right\} = E \left\{ (1 + U_2) d \right\} = \frac{1}{N_{TRM}} \sum_{m,n} \frac{s_{m,n,f,c}^{amp}}{h_{m,n}} \\ \hat{\sigma}^2 = V \{ U \} = E \left\{ \left(\frac{s_{m,n,f,c}^{amp}}{h_{m,n} \hat{d}} - 1 \right)^2 \right\} = \frac{1}{N_{TRM}} \sum_{m,n} \left(\frac{s_{m,n,f,c}^{amp}}{h_{m,n} \hat{d}} - 1 \right)^2$$

$$K_{Rx,f,c}^{amp} = \hat{\sigma}$$

[0087] A calibragem pode ser considerada aceitável (bloco 85) se a seguinte relação é verdadeira:

$$(K_{Rx,f,c}^{phase} \leq K_{Rx,REF}^{phase}) \text{ AND } (K_{Rx,f,c}^{amp} \leq K_{Rx,REF}^{amp}),$$

na qual $K_{Rx,REF}^{phase}$ e $K_{Rx,REF}^{amp}$ são índices de presteza de referência, respectivamente, para a fase e para a amplitude.

[0088] Além disto, e como dito precedentemente, a fase de cálculo dos novos índices de calibragem (bloco 86) compreende calcular novos índices de calibragem com base nos coeficientes de calibragem atuais, ditos novos coeficientes de calibragem compreendendo novos coeficiente de atenuação $A_{m,n,f,c}^{new}$ (quantificados como N_A bit) e novos coeficiente de fase $\Phi_{m,n,f,c}^{new}$ (quantificados como N_P bit). Os novos coeficientes de fase $\Phi_{m,n,f,c}^{new}$ aplicado a cada TRM (m,n) é obtido a partir da soma de um coeficiente de correção em fase $\phi_{m,n,f,c}^{new}$ mais a fase necessária ao apontamento do feixe em RF.

[0089] Em particular, os valores "atuais" dos coeficientes de atenuação e fase para o TRM (m, n) na frequência f e para a forma do feixe em RF c são:

$$a_{m,n,f,c}^{old} = 10^{-\frac{A_{m,n,f,c}^{old} \cdot \Delta A}{20}}; \quad a_{m,n,f,c}^{old} \in [0,1]$$

$$\phi_{m,n,f,c}^{old} \in [0,360)$$

na qual $A_{m,n,f,c}^{old}$ indica o bit de atenuação (no intervalo $[0, 2^{N_A} - 1]$) associado a calibragem precedente e ΔA representa o passo de quantificação da atenuação. Para a primeira calibragem os valores "atuais" dos coeficientes de atenuação e fase são selecionados como os valores iniciais de default indicados a seguir:

$$a_{m,n,f,c}^{old} = h_{m,n}$$

$$\phi_{m,n,f,c}^{old} = 0$$

[0090] Os passos do algoritmo usado para calcular os novos coeficientes de calibragem $A_{m,n,f,c}^{new}$ e $\Phi_{m,n,f,c}^{new}$ são descritos detalhadamente a seguir através do uso de uma pseudo linguagem de programação imediatamente compreensível para as pessoas com conhecimento neste setor.

% Início do cálculo dos coeficientes de calibragem

- ▶ $\phi_{m,n,f,c}^{REF}$ = parâmetro contendo o valor desejado para a fase de cada TRM (m,n) na frequência f considerada e para a forma do feixe em RF c considerada;
- ▶ S_f^{MIN} = valor mínimo permitido para a amplitude do sinal (definido com base nas medições de fábrica) na frequência f em consideração;
- ▶ S_f^{MAX} = valor máximo desejado para a amplitude do sinal (definido com base em medições de fábrica) na frequência f em consideração;
- ▶ $a^{min} = 10^{\frac{0}{20}} = 1$ atenuação mínima inserida pelos TRMs;
- ▶ a^{max} atenuação máxima inserida pelos TRMs;
- ▶ *for* $k=1:N_{TRM}$ (onde N_{TRM} indica o número de TRMS da antena AESA 2 (ou seja $N_{TRM}=16 \times 54=864$) e (m,n) identificam, respectivamente, linha e coluna do k -ésimo TRM)

- correção do sinal de fundo da p -ésima antena de calibragem 3 que foi utilizada para a medição do TRM (m,n) :

$$- s_{m,n,f,c}^{amp,MIS} = \sqrt{(I_{m,n,f,c}^{MIS} - I_{p,f,c}^{BACK})^2 + (Q_{m,n,f,c}^{MIS} - Q_{p,f,c}^{BACK})^2} ; e$$

$$- s_{m,n,f,c}^{phase,MIS} = \arg\{I_{m,n,f,c}^{MIS} - I_{p,f,c}^{BACK} + j(Q_{m,n,f,c}^{MIS} - Q_{p,f,c}^{BACK})\} ;$$

- correção ligada a posição do TRM (m,n) com relação a p -ésima antena de calibragem 3 que foi utilizada para as medições de calibragem relativas a dito TRM (m,n) através dos parâmetros (contidos em um banco de dados predefinido) $S_{m,n,f}^{amp,p}$, que representa uma correção em amplitude na frequência f em consideração, e $S_{m,n,f}^{phase,p}$, que representa uma correção em fase na frequência f em consideração:

$$- S_{m,n,f,c}^{amp} = \frac{S_{m,n,f,c}^{amp,MIS}}{S_{m,n,f}^{amp,p}}, e$$

$$- S_{m,n,f,c}^{phase} = S_{m,n,f,c}^{phase,MIS} - S_{m,n,f}^{phase,p} ;$$

esta correção permite que seja depurada a atenuação e a defasagem devidos ao segmento de ar compreendido entre a p -ésima antena de calibragem 3 e o elemento radiante 21 associado com o TRM (m,n) ; desta forma, $S_{m,n,f,c}^{amp}$ e $S_{m,n,f,c}^{phase}$ representam, por um momento fazendo-se referência a figura 1, a inserção, respectivamente, da amplitude e da fase do percurso de recepção compreendido entre a porta 12 e o elemento radiante 14;

- primeiro coeficiente de calibragem em amplitude:
- $a_{m,n,f,c}^{pre} = \frac{a_{m,n,f,c}^{old}}{S_{m,n,f,c}^{amp}} h_{m,n} \cdot S_f^{MAX} ;$
- sinalização de avaria para identificar um TRM avariado:

$$FD_{m,n,f,c}^{Rx} = \begin{cases} 1, & \text{se } \frac{S_{m,n,f,c}^{amp}}{a_{m,n,f,c}^{old}} \geq S_f^{MIN} \\ 0, & \text{se } \frac{S_{m,n,f,c}^{amp}}{a_{m,n,f,c}^{old}} < S_f^{MIN} \end{cases},$$

os TRMs para os quais resulta $\frac{S_{m,n,f,c}^{amp}}{a_{m,n,f,c}^{old}} < S_f^{MIN}$ sendo considerados como avariados;

- segundo coeficiente de calibragem em amplitude:

$$a_{m,n,f,c}^{new} = \begin{cases} a_{m,n,f,c}^{max}, & \text{se } a_{m,n,f,c}^{pre} < a_{m,n,f,c}^{max} \\ a_{m,n,f,c}^{pre}, & \text{se } a_{m,n,f,c}^{pre} \in [a_{m,n,f,c}^{max}, a_{m,n,f,c}^{min}] \end{cases};$$

- coeficiente de correção em fase:

$$\phi_{m,n,f,c}^{new} = \text{mod}(s_{m,n,f,c}^{phase} - \phi_{m,n,f,c}^{REF} - \phi_{m,n,f,c}^{old}, 360),$$

na qual $\phi_{m,n,f,c}^{new} \in [0, 360]$ e a função $\text{mod}(x, y)$ fornece como resultado o resto da divisão inteira x/y ;

- novo coeficiente de atenuação dos novos coeficientes de calibragem (incluindo o *taper* do agrupamento ativo 25) para o TRM (m, n) na frequência f considerada e para a forma do feixe em RF c considerado:

$$A_{m,n,f,c}^{new} = \text{mod}\left(\text{round}\left(-\frac{20 \log_{10} a_{m,n,f,c}^{new}}{\Delta A}\right), 2^{N_A}\right),$$

na qual $A_{m,n,f,c}^{new}$ indica uma amplitude codificada no intervalo $[0, 2^{N_A} - 1]$ e a função $\text{round}(x)$ fornece como resultado x arredondando para o inteiro mais próximo;

- novo coeficiente de fase dos novos coeficientes de calibragem per o TRM (m, n) na frequência f considerada e para a forma do feixe em RF c considerada:

$$\Phi_{m,n,f,c}^{new} = \text{mod}\left(\text{round}\left(\frac{\phi_{m,n,f,c}^{new}}{\Delta \phi}\right), 2^{N_P}\right),$$

na qual $\Phi_{m,n,f,c}^{new}$ indica uma fase codificada no intervalo $[0, 2^{N_P} - 1]$ e $\Delta \phi = \frac{360}{2^{N_P}}$ é o passo de quantificação da fase;

► fim de ciclo *for*;

% Fim do cálculo dos coeficientes de calibragem.

[0091] Portanto, e com base com quanto ora descrito, ao final da execução da fase de cálculo dos novos índices de calibragem (bloco 86) se obtém:

- o conjunto dos coeficientes de calibragem $A_{m,n,f,c}^{new}$ e $\Phi_{m,n,f,c}^{new}$ para todos os TRMs na frequência f considerada e para a forma do feixe em RF c considerada; e
- o conjunto de todos os parâmetros $FD_{m,n,f,c}^{Rx}$ relativos aos TRMs avariados.

[0092] O valor de $\Phi_{m,n,f,c}^{new}$ é utilizado diretamente para as medições sucessivas de calibragem (bloco 83) se necessário. De outra forma, se a calibragem chega a um final satisfatório, o valor carregado nos TRM é:

$$\Phi_{m,n,f,c}^{new} = \text{mod}\left(\text{round}\left(\frac{\phi_{m,n,f,c}^{new} + \phi_{m,n,f,c}^{array}}{\Delta \phi}\right), 2^{N_P}\right)$$

na qual $\phi_{m,n,f,c}^{array}$ é um parâmetro que compreende as fases de apontamento do feixe em RF.

[0093] Os valores de S_f^{MIN} , que é o limite de amplitude utilizado para decidir se um TRM está avariado ou não, deve ser avaliado durante as medições de calibragem de fábrica.

[0094] Na descrição precedente foi descrita detalhadamente a calibragem de uma antena AESA em termos dos dispositivos de hardware necessários para realizar a calibragem, ou seja a antena de calibragem precedentemente descrita e uma unidade de controle e processamento que é acoplada em dita antena de calibragem e na antena AESA e é configurada para implementar o método de calibragem precedentemente descrito, e em termos do algoritmo implementado para realizar a calibragem, de preferência implementado por um programa ou software executado pela unidade de controle e processamento.

[0095] A partir da descrição precedente se pode compreender imediatamente as vantagens da presente invenção.

[0096] Em particular, é importante ter em evidência o fato de que a antena de calibragem, de acordo com a presente invenção, uma vez que a porção radiante que é instalada entre o plano de massa e a cobertura dielétrica da antena AESA, não comporta um aumento das dimensões externas da antena AESA, ao contrário das antenas de calibragem descritas no US 2004032365 (A1) que, ao contrário, precisam ser projetadas para serem instaladas e para funcionar apenas no exterior da cobertura dielétrica da antena AESA, levam a um aumento das dimensões externas da antena AESA.

[0097] Graças a esta vantagem técnica, a presente invenção encontra uma aplicação particularmente vantajosa nos sistemas de radar móveis ou transportáveis, que são baseados em antenas AESA, nas quais as dimensões externas das antenas AESA devem ser o tanto menor quanto possível.

[0098] Além disto, o método de calibragem, de acordo com a presente invenção, apresenta ótimos resultados em termos de precisão de calibragem, além de custo de computação e tempo de processamento necessários para realizar a calibragem de uma antena AESA.

[0099] Por fim, fica claro que diversas modificações podem ser incluídas na presente invenção, todas pertencentes ao âmbito de tutela da invenção definida nas reivindicações em anexo.

Reivindicações

1. Antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2), compreendendo:

- um agrupamento ativo (25) configurado para irradiar/receber sinais em radio frequência (RF) através de primeiras aberturas irradiantes (21a) que ficam sobre um plano de massa (22);
- uma cobertura dielétrica (23) disposta a uma dada distância (D) do plano de massa (22), de modo tal que entre a cobertura dielétrica (23) e o plano de massa (22) esteja presente um espaço vazio (24);
- uma pluralidade de dispositivos de calibragem (3) acionáveis para calibrar a dita antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2), cada dispositivo de calibragem (3) sendo **caracterizado** por compreender uma respectiva porção radiante (31), uma respectiva porção de transição (32) e uma respectiva porção do meio (33);

em que, para cada dispositivo de calibragem (3):

- a respectiva porção radiante (31) é disposta entre a cobertura dielétrica (23) e o plano de massa (22), e orientada paralelamente ao plano de massa (22), e compreende uma respectiva primeira guia de onda, em uma primeira extremidade, com uma respectiva segunda abertura irradiante (31a) que:
 - fica de frente com o espaço vazio (24) na direção das correspondentes primeiras aberturas irradiantes (21a),
 - é perpendicular ao plano de massa (22), e
 - é configurada para receber os sinais em radio frequência (RF) irradiados através de ditas correspondentes primeiras aberturas radiantes (21a) e para irradiar sinais em radio frequência (RF) no espaço vazio (24) na direção de ditas correspondentes primeiras aberturas radiantes (21a);
- a respectiva porção de transmissão (32) é orientada perpendicularmente em relação à respectiva porção radiante(31) e inclui uma respectiva segunda guia de onda e uma respectiva terceira guia de onda ligadas em cascata;
- a respectiva porção do meio (33) é curvada em 90 graus e inclui uma respectiva quarta guia de onda acoplada, em uma extremidade, na respectiva terceira guia de onda e, na outra extremidade, a uma segunda extremidade da respectiva primeira guia de onda;

– a respectiva primeira guia de onda, a respectiva terceira guia de onda e a respectiva quarta guia de onda apresentam:

- um mesmo dado perfil dependendo da frequência de operação do dispositivo de calibragem (3), e
- uma mesma dada altura de modo a permitir que a respectiva porção radiante (31) seja disposta entre a cobertura dielétrica (23) e o plano de massa (22), e
- o respectivo segundo guia de onda é acoplado através de um respectivo conector SMA (34) com uma fonte de sinal para receber desta os sinais de radiofrequência a serem irradiados, e possui:
 - um dado perfil, e
 - uma altura maior do que a dita dada altura.

2. Antena, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizada** por cada porção radiante (31) compreender um respectivo iris indutivo (35) configurado de modo a adaptar uma impedância de radiação de dita porção radiante (31) com a impedância da respectiva primeira guia de onda.

3. Antena, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, **caracterizada** por cada segunda abertura radiante (31a) apresentar uma respectiva direção de irradiação máxima paralela ao plano de massa (22).

4. Antena, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, **caracterizada** por ser configurada para irradiar/receber primeiros sinais em radio frequência (RF) polarizados, os quais apresentam um primeiro vetor campo elétrico que jaz sobre um primeiro plano de referência; sendo que cada porção radiante (31) é configurada para irradiar/receber segundos sinais em radio frequência (RF) polarizados os quais apresentam um segundo vetor campo elétrico que jaz sobre um segundo plano de referência, e sendo que cada porção radiante (31) fica disposta entre dita cobertura dielétrica (23) e o dito plano de massa (22), de modo tal que o dito segundo plano de referência seja paralelo ao primeiro plano de referência.

5. Método para calibrar uma antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2), conforme definida em qualquer uma das reivindicações de 1 a 4, a dita antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2), o dito método sendo **caracterizado** por

compreender:

- uma fase de medição para uma dada frequência operacional da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) e para uma dada forma do feixe irradiável/recebível da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2), a dita fase de medição incluindo realizar as medições de calibragem relativa a antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) e correspondente à dada frequência operacional e à dada forma do feixe com base nos sinais irradiados/recebidos pelo(s) dispositivo(s) de calibragem (3); e
- calibrar a antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) com base nas medições de calibragem realizadas.

6. Método, de acordo com a reivindicação 5, **caracterizado** por a antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) compreender uma pluralidade de módulos de transmissão/recepção (TRMs);

sendo que realizar as medições de calibragem compreende:

- receber, através da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) ou do(s) dispositivo(s) de calibragem (3), primeiros sinais irradiados do(s) dispositivo(s) de calibragem (3) ou da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2), possuindo a dita frequência operacional e formando um primeiro feixe possuindo a dada forma do feixe;
- após ter imposta uma atenuação máxima nos módulos de transmissão/recepção (TRMs) e desligado os ditos módulos de transmissão/recepção (TRMs), receber, através da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) ou do(s) dispositivo(s) de calibragem (3), segundos sinais irradiados pelo(s) dispositivo(s) de calibragem (3) ou pela antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2), possuindo a dada frequência operacional e formando um segundo feixe possuindo a dada forma do feixe, os segundos sinais recebidos sendo indicativos de um sinal de fundo através dos módulos de transmissão/recepção (TRMs); e
- determinar, com base nos primeiros sinais recebidos e no sinal de fundo, quantidades indicativas da calibragem atual da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) em relação a dada frequência operacional e a dada forma do feixe.

7. Método, de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado** por calibrar compreender ainda uma fase de cálculo para a dada frequência operacional e para a dada forma do feixe, a dita fase de cálculo incluindo calcular índices de prestação da calibragem atual da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) correspondentes a dada frequência operacional e a dada forma do feixe, com base nas quantidades indicativas da calibragem atual da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) determinadas.

8. Método, de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado** por as quantidades indicativas da calibragem atual da antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) determinadas compreenderem valores de amplitude e valores de fase; e sendo que calcular os índices de prestação da calibragem atual compreende:

- calcular, com base nos valores de amplitude, um índice de prestação para a amplitude o qual é indicativo de uma variação de uma distribuição normalizada dos valores da amplitude; e
- calcular, com base nos valores da fase, um índice de prestação para a fase que é indicativo de uma variação em uma distribuição dos valores de fase.

9. Método, de acordo com a reivindicação 7 ou 8, **caracterizado** por calibrar compreender, além disto:

- uma fase de verificação para a dada frequência operacional e para a dita forma do feixe, dita fase de verificação incluindo verificar se os índices de prestação da calibragem atual calculados para a dita dada frequência operacional e para a dada forma do feixe satisfazem uma dada condição com relação a índices de referência;
- se os índices de prestação da calibragem atual, calculados para a dada frequência operacional e para a dada forma do feixe, não satisfazem a dada condição com relação aos índices de referência, calcular novos coeficientes da calibragem para a dada frequência operacional e para a dada forma do feixe, impor novos coeficientes de calibragem na antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) e realizar novamente a fase de medição, a fase de cálculo e a fase de verificação para a dada frequência operacional e para a dada forma do feixe; e
- se os índices de prestação da calibragem atual, calculados para a dada frequência operacional e para a dada forma do feixe, satisfazem a dada condição com relação aos índices de referência, realizar a fase de medição, a fase de cálculo e a fase de verificação para uma

frequência operacional diferente ou para uma forma de feixe diferente.

10. Meio legível por computador **caracterizado** por executar a configuração da unidade de controle e de processamento para implementar o método de calibragem conforme reivindicado em qualquer uma das reivindicações de 5 a 9.

11. Sistema de radar, **caracterizado** por compreender a antena com agrupamento ativo com varredura eletrônica do feixe (2) tal como reivindicada em qualquer das reivindicações de 1 a 4.

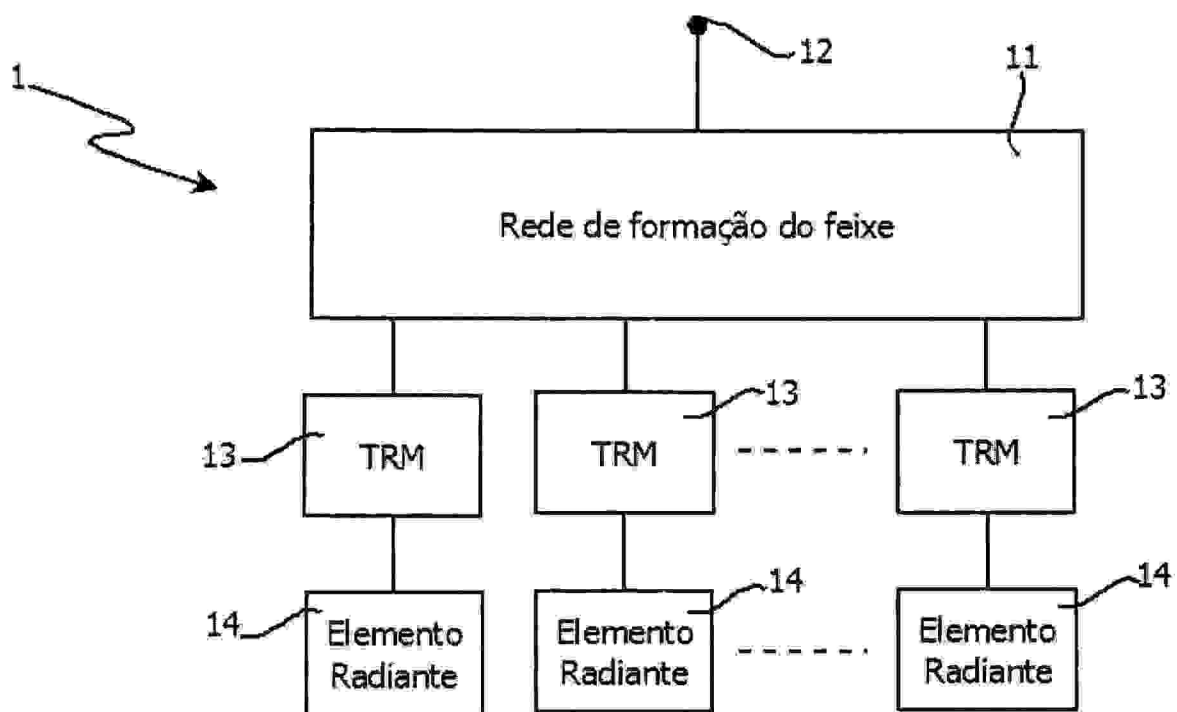


FIG. 1

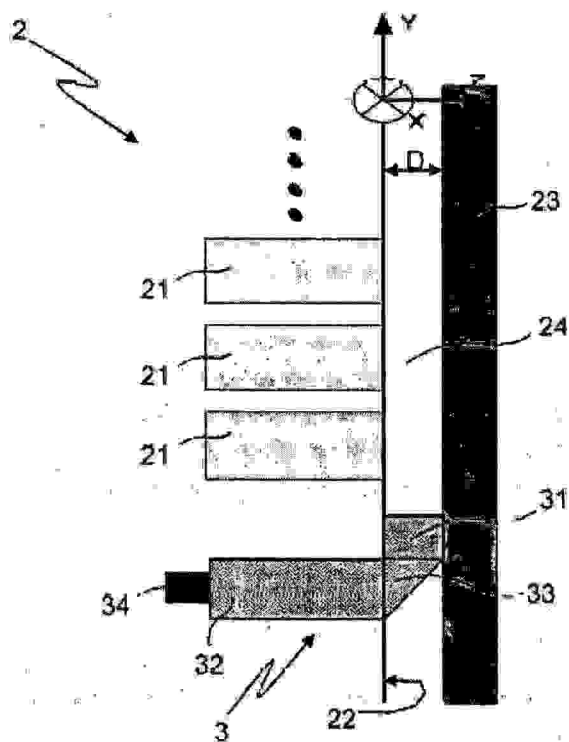
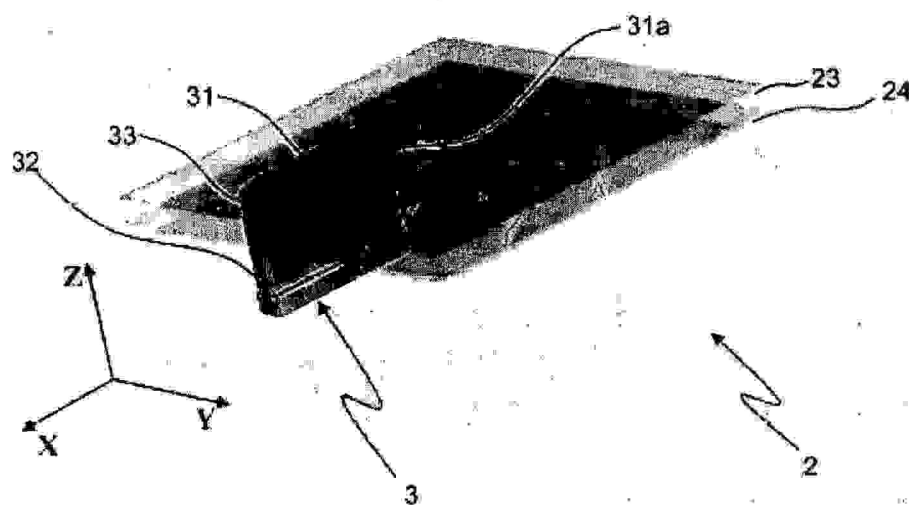
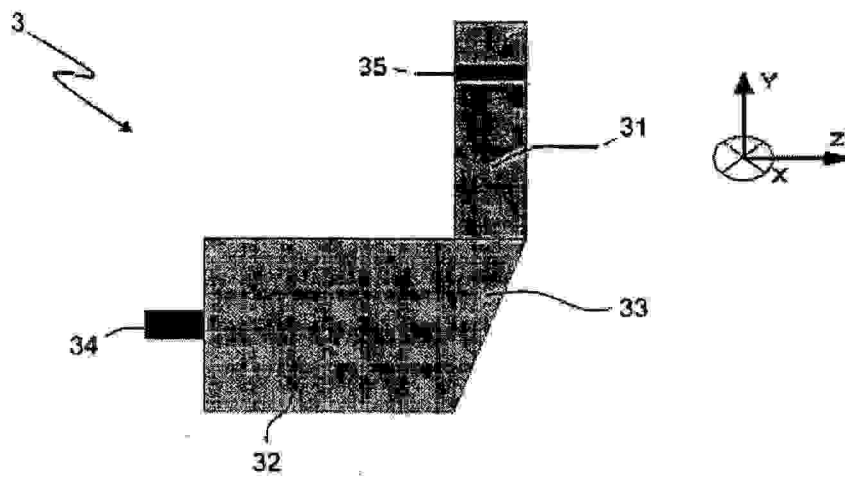


FIG. 2



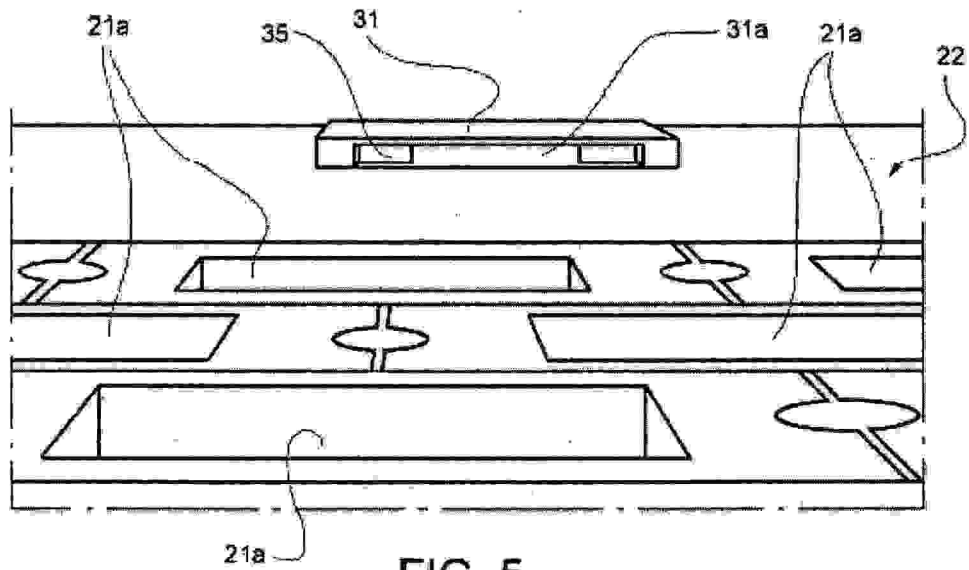


FIG. 5

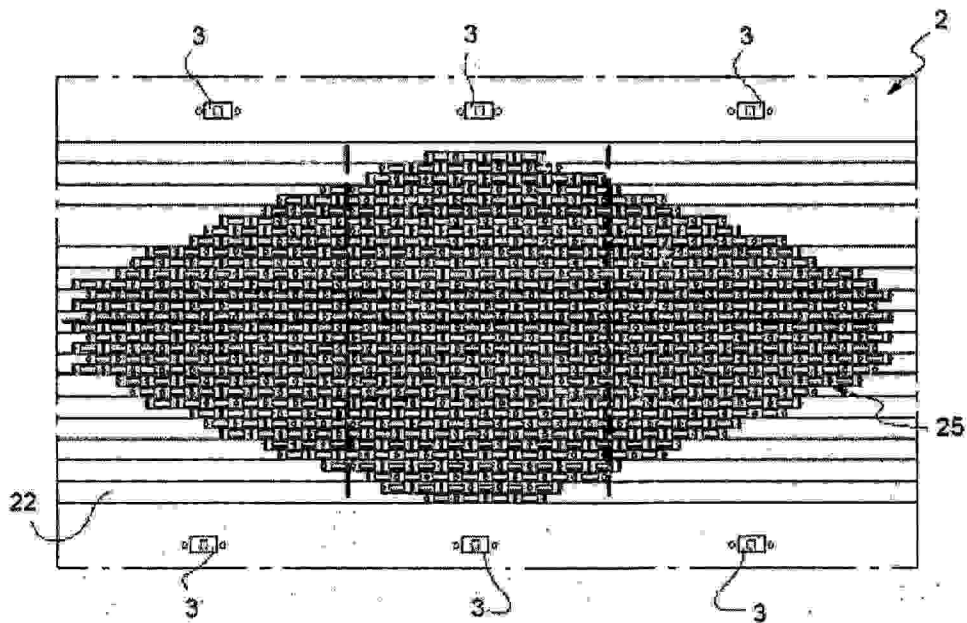


FIG. 6

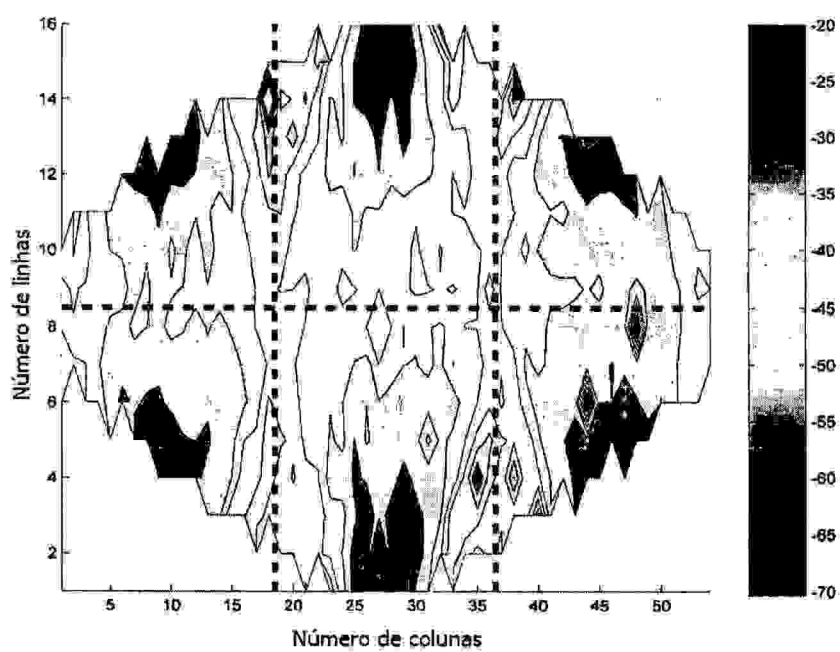


FIG. 7

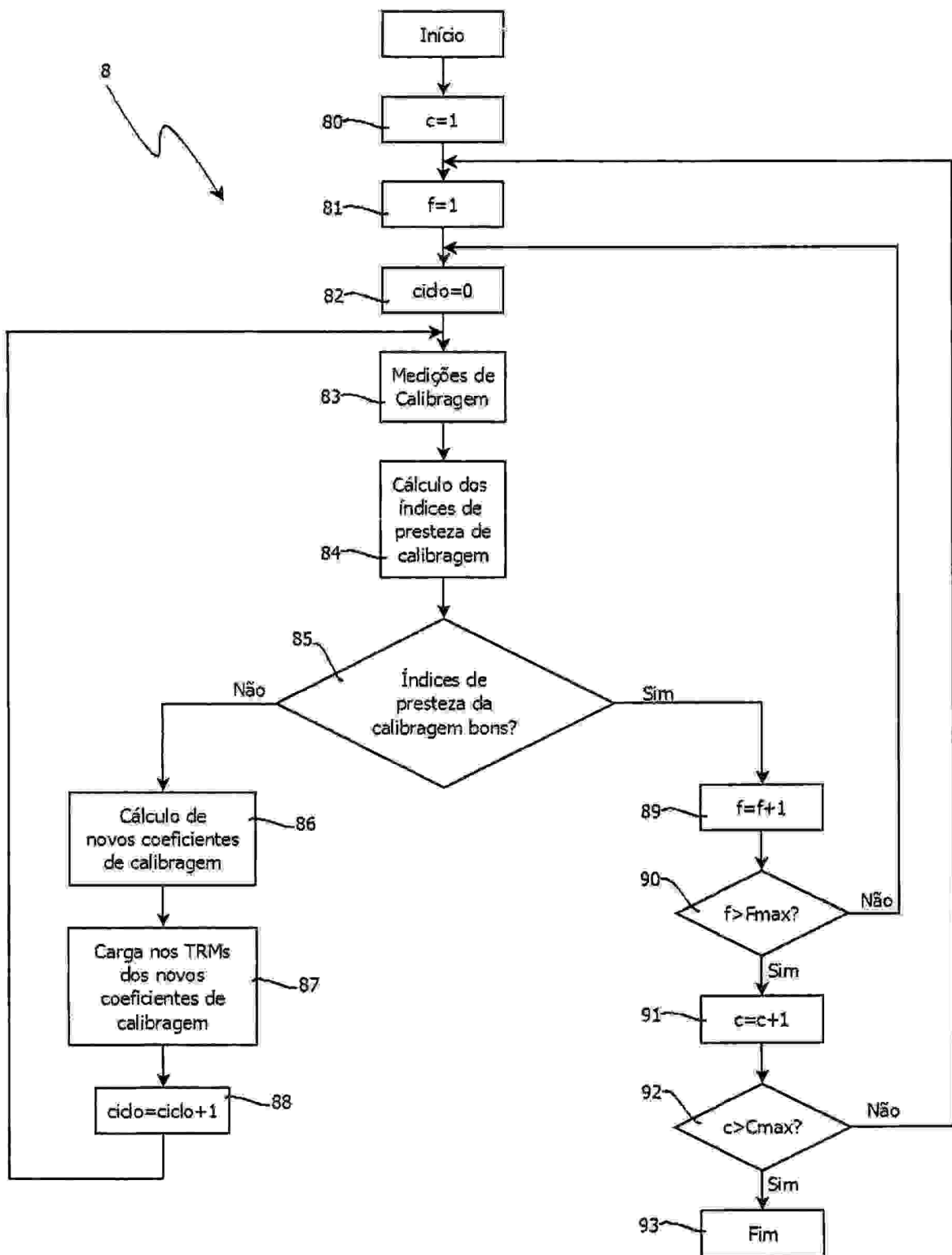


FIG. 8

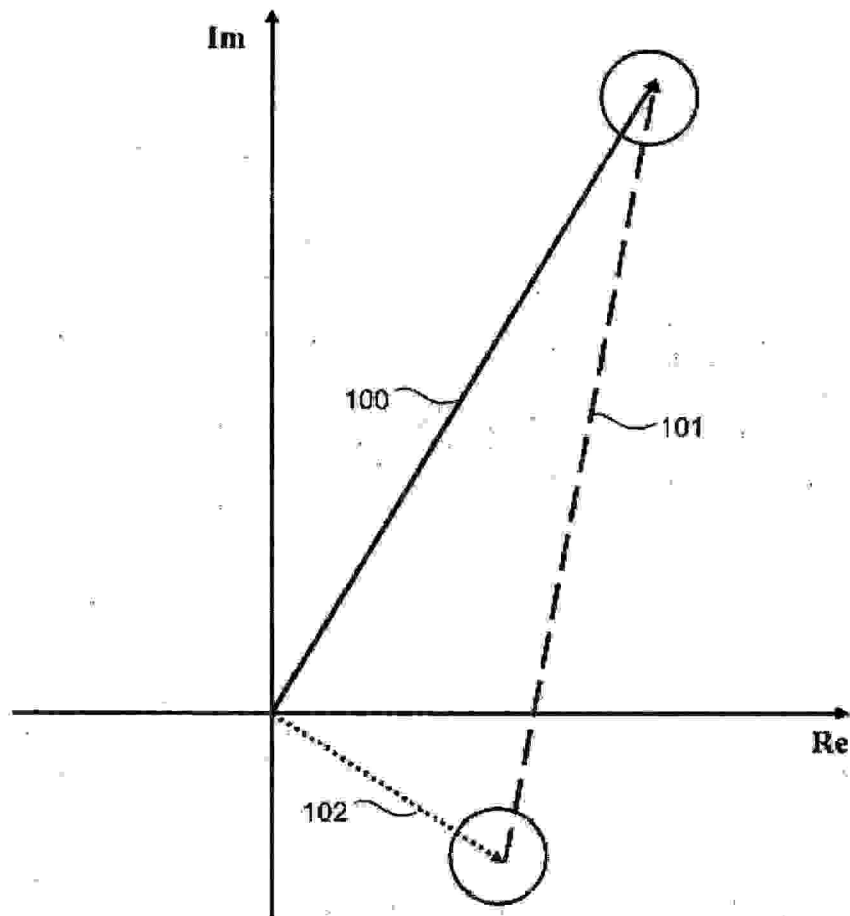


FIG. 9