

ESTIMAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO, POTÊNCIA E DIREÇÃO DE RADIAÇÃO DE TRANSMISSORES DO SERVIÇO FIXO TERRESTRE A PARTIR DE MEDIDAS FEITAS POR SATÉLITE NÃO-GEOESTACIONÁRIO

José Antonio B. L. Seiblit e José Mauro P. Fortes

Resumo - Os satélites de um sistema de comunicações que opera numa determinada faixa de frequências utilizando satélites não-geoestacionários podem sofrer interferências indesejáveis provocadas por transmissores do Serviço Fixo Terrestre (FS) que operam nessa mesma faixa. Para o operador do sistema não-geoestacionário é importante identificar quais as áreas da superfície da Terra que contêm os transmissores responsáveis por essas interferências indesejáveis, o que seria um primeiro passo na tentativa de resolver o problema através de negociações bilaterais com as estações transmissoras do FS envolvidas (coordenação). O presente trabalho apresenta a modelagem matemática do problema, e propõe que a identificação dessas áreas seja feita por meio da estimação das potências e apontamentos (ângulos de azimute e elevação) das antenas transmissoras do FS com base em medidas de potência tomadas nos diversos feixes de recepção de um satélite de teste. O trabalho analisa aspectos específicos do problema e propõe a utilização do Filtro de Kalman Estendido (EKF) para a estimação das potências e apontamentos das antenas transmissoras do SF.

Palavras-chave: Estimação de potência; estimação de apontamento; Filtro de Kalman Estendido

Abstract - Satellites of a non-geostationary communication system may be victims of harmful interference produced by terrestrial fixed service (FS) transmitting stations operating in the same frequency band. It is important to the satellite system operator to identify the specific areas on Earth's surface containing the FS stations that are responsible for such interference. This would be a first step for solving the problem via bilateral coordination with each of the involved FS operators. This work presents a mathematical model for the problem and proposes that the identification of these areas be made through the estimation of the transmitted power and the antenna pointing (azimuth and elevation angles) of the various FS stations, based on received power measurements taken on the beams of a test non-GSO satellite. This work also investigates the particular aspects of the problem and proposes the Extended Kalman Filter (EKF) as the algorithm for estimation.

Keywords: Power estimation; pointing estimation; Extended

Este trabalho teve suporte financeiro da PUC-Rio através da Bolsa de Isenção do Programa de Mestrado de José Antonio B. L. Seiblit. Atualmente José Antonio B. L. Seiblit é aluno do Programa de Doutorado da PUC-Rio (seiblit@cetuc.puc-rio.br) e José Mauro P. Fortes é professor do Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (jmfortes@cetuc.puc-rio.br)

Kalman Filter

1. INTRODUÇÃO

A idéia de se usar satélites como meio de telecomunicações surgiu no final da década de 50, logo após os primeiros satélites artificiais terem sido postos em órbita terrestre. Inicialmente, foi a órbita geoestacionária (GSO) que proporcionou o enorme crescimento nas comunicações por satélite, pois o fato de o satélite estar fixo¹ implica que a área de cobertura é bem determinada e que o apontamento das antenas é um processo relativamente simples. Em relação ao problema de interferências com outras estações transmissoras, particularmente as do serviço fixo terrestre², foi definida em normas internacionais uma “zona de exclusão”, ou seja, uma região do céu para onde nenhuma antena transmissora pode apontar, com exceção das pertencentes ao próprio sistema satélite.

Embora a comunicação por satélite tenha tido seu grande impulso com base no serviço GSO, seu uso não fica restrito a ele. Quando se trata, por exemplo, de sistemas de telefonia móvel (de pouca potência de transmissão), ou quando os requisitos de retardo do sinal são mais rigorosos, a órbita geoestacionária não é a melhor. Mais adequadas são as órbitas baixa ou média. Para os serviços por satélite em órbitas de média altitude (MEO – 10.000 a 20.000 km) e baixa altitude (LEO – 750 a 1500 km), as antenas podem ser menores e o sinal sofre menor retardo. Também os veículos lançadores podem ser menores, ao mesmo tempo que é possível alocar maior carga útil no satélite. Entretanto, o satélite em órbita baixa ou média não ocupa uma posição fixa em relação à Terra, tornando necessário o contínuo rastreamento do satélite e a transferência de operação entre satélites (*handover*), dado que estes entram e saem do campo de visibilidade das estações terrenas.

Por conta do deslocamento do satélite em relação à Terra, o ambiente interferente em torno dele varia ao longo do tempo. Não há como definir uma região de exclusão e as interferências prejudiciais ocorrem mais freqüentemente e com maior intensidade. Assim, pode haver regiões no espaço em que, por causa de baixa relação sinal-interferência, o serviço venha a ser oferecido com qualidade abaixo da desejável ou

¹O emprego de termos como “fixo”, “deslocar-se” e outros se refere neste contexto à posição do satélite em relação à superfície da Terra.

²chamadas neste trabalho de estações terrestres ou estações do FS

José Antonio B. L. Seiblit e José Mauro P. Fortes
Estimação da Localização, Potência e Direção de Radiação de Transmissores do Serviço Fixo Terrestre a partir de Medidas feitas por Satélite Não-Geostacionário

até mesmo interrompido. Surge a necessidade de se conhecer o conjunto de posições do satélite onde este é vítima de interferências indesejáveis e de determinar a probabilidade de o satélite vir a ocupar tais regiões. Um método para o cálculo dessa probabilidade é proposto em [1].

Pode ocorrer ainda que algumas dessas zonas de interferência indesejável estejam em posições onde as correspondentes áreas de cobertura sejam regiões economicamente interessantes para o serviço por satélite. É então interessante que sejam tomadas providências no sentido de se eliminar ou diminuir a interferência pela via da negociação junto ao operador responsável pela interferência indesejada. A questão é: Com quem negociar?

Para se saber quem são os operadores que causam a interferência indesejada, é necessário associar suas estações transmissoras às posições em que o satélite se torna vítima dessa interferência. Este trabalho tem como finalidade identificar a localização, potência e apontamento de estações transmissoras interferentes do serviço fixo terrestre (estações terrestres que possam causar interferência indesejável a sistemas de comunicação por satélite que operem na mesma faixa de frequência). Para tanto, supõe-se um satélite em uma órbita não-geostacionária que recebe o sinal interferente vindo de um conjunto de regiões na superfície da Terra. Esse conjunto constitui o universo de localizações para as estações terrestres. Cada região do conjunto é discretizado em uma grade³ em cujos nós são posicionadas as possíveis estações terrestres. Para cada uma delas são estimadas a potência transmitida e a direção de apontamento, determinada pelos ângulos de azimute e elevação. Estações terrestres cuja potência estimada esteja abaixo de certo valor são supostas inexistentes. A variável medida para a estimação é a potência instantânea do sinal interferente em cada feixe de recepção do satélite, à medida que este se desloca em sua órbita. Essa medição é feita a intervalos regulares de tempo, formando um conjunto de medidas para as quais se conhecem, além de seu valor, todos os elementos que descrevem a geometria do problema no instante de sua obtenção. A estimação é feita pelo uso do Filtro de Kalman Estendido. Neste trabalho serão utilizados os dados do sistema ICO segundo apresentado em [2], fazendo-se a geração em computador das medidas ruidosas para os estudos de casos.

2. MODELO MATEMÁTICO

O problema da estimação de vetores consiste em obter-se uma estimativa \hat{x} para um vetor x com base em uma medida y , de forma a minimizar uma *função custo* $C(\cdot)$ que depende do erro de estimação $e = x - \hat{x}$, ou seja, $C = C(x - \hat{x})$. No problema em questão, as observações y podem ser escritas como

$$y = C(x) + n, \tag{1}$$

onde n é o ruído de medida $C(\cdot)$ é a função que exprime a dependência – conhecida – entre x e y , conforme ilustra a Figura 1.

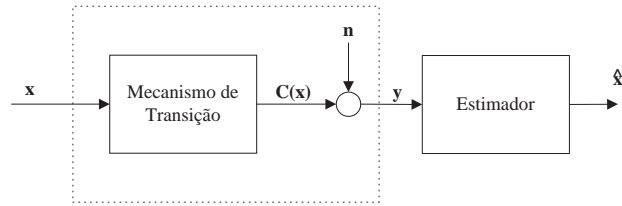


Figura 1. Diagrama do problema geral de estimação

Neste trabalho, x é formado dos valores dos seguintes parâmetros, ilustrados a Figura 2:

- *Potência da Estação do Serviço Fixo Terrestre (P_{out}):* Potência do sinal na entrada da antenna transmissora;
- *Azimute ou Ângulo de Azimute do Apontamento (μ):* Ângulo entre o norte verdadeiro da Terra e a projeção da direção de apontamento sobre o plano horizontal que contém o foco da antenna – $\mu \in (-\pi, \pi]$;
- *Elevação ou Ângulo de Elevação do Apontamento (ν):* Menor ângulo entre a direção de apontamento e o plano horizontal que contém o foco da antenna – $\nu \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$;

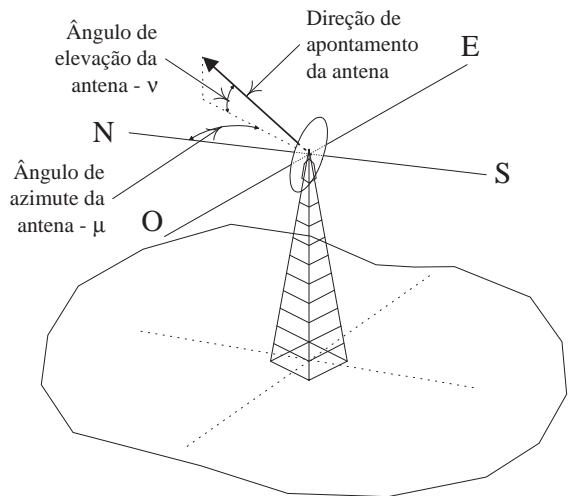


Figura 2. Parâmetros estimados em cada estação do serviço fixo terrestre.

O vetor x e de sua estimativa \hat{x} têm a forma dada por

$$x = \left(P_{out_0}, \mu_0, \nu_0, \dots, P_{out_{N_T-1}}, \mu_{N_T-1}, \nu_{N_T-1} \right)^T \tag{2}$$

e

$$\hat{x} = \left(\hat{P}_{out_0}, \hat{\mu}_0, \hat{\nu}_0, \dots, \hat{P}_{out_{N_T-1}}, \hat{\mu}_{N_T-1}, \hat{\nu}_{N_T-1} \right)^T \tag{3}$$

onde N_T é o número total de possíveis estações interferentes do serviço fixo terrestre.

O vetor de medidas y é formado do conjunto de observações da potência recebida através de cada feixe do satélite para cada uma das posições consideradas. Define-se *potência recebida* como a potência do sinal na saída da antena receptora do satélite, ou seja, na entrada do guia de onda

³chamada neste trabalho de “grade de estimação”

que liga a antena ao *transponder*. A forma de \mathbf{y} é dada por

$$\mathbf{y} = (P_{00}, \dots, P_{0N_{beam}}, \dots, P_{N_{sat}N_{beam}})^T \quad (4)$$

onde N_{beam} é o número de feixes de recepção do satélite e N_{sat} é o número de posições que este ocupa. O produto $N_{obs} = N_{sat} \times N_{beam}$ representa o número total de observações. Uma vez que o satélite pode ocupar um número muito grande de posições no espaço, a ordem de grandeza de N_{obs} é também muito grande. Nesse caso, o Filtro de Kalman é um algoritmo que se mostra bastante adequado, dado que ele possibilita particionar o vetor de observações e tratá-lo de forma iterativa, o que reduz substancialmente a carga computacional.

2.1 FUNÇÃO OBJETIVO

Não há perda de generalidade em se admitir que $\mathcal{C}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})$ é simétrica e não decrescente em $x_i - \hat{x}_i \in [0, \infty)$, $i = 1, \dots, N_T$. Sob tais condições, pode ser demonstrado (por exemplo, em [3]) que o estimador minimizante é o *estimador de mínimo erro médio quadrático*. A função custo $\mathcal{C}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})$ associada à estimação é, portanto, o erro quadrático médio ϵ , definido como

$$\epsilon = \mathcal{C}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) = \mathbb{E}[(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})^T (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})] \quad (5)$$

Em condições normais de operação, o apontamento das antenas é fixo e a potência transmitida é aproximadamente constante, podendo-se admitir que os parâmetros estimados são invariantes no tempo. Além disso, tais parâmetros podem ser vistos como estados de um processo regido por uma Cadeia de Markov, para a qual o ruído de processo é igual a zero com probabilidade 1 e a matriz de transição é a matriz identidade. O ruído da medida \mathbf{n} – ver (1) – decorre exclusivamente da incerteza a respeito dos diagramas de radiação das antenas transmissoras das estações do serviço fixo terrestre, desprezando-se os ruídos introduzidos pelo meio de propagação e pelo receptor. Essa incerteza é modelada em dBW como um ruído aditivo à medida, cuja função densidade de probabilidade pode ser aproximada por uma curva gaussiana de média zero. Sob certas hipóteses, pode-se admitir que o ruído é branco [4].

No caso de estimação de parâmetro, a expressão geral para o estimador de mínimo erro médio quadrático se converte na expressão para o estimador de máxima verossimilhança, dada por

$$\hat{\mathbf{x}} = \min_{\mathbf{X}}^{-1} \ln [p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}=\mathbf{X}}(\mathbf{Y})]. \quad (6)$$

O vetor de observações \mathbf{y} está relacionado ao vetor de parâmetros \mathbf{x} por (1). Para ruído de medida gaussiano branco, a expressão geral para o estimador se converte em

$$\hat{\mathbf{x}} = \min_{\mathbf{X}}^{-1} \frac{1}{2\sigma_n^2} (\mathbf{Y} - \mathbf{C}(\mathbf{X}))^T (\mathbf{Y} - \mathbf{C}(\mathbf{X})) + A, \quad (7)$$

onde A é um termo constante, σ_n^2 é a variância de cada elemento do vetor \mathbf{n} correspondente ao ruído de medida e $\mathbf{C}(\mathbf{X})$ é o vetor das funções não lineares apresentadas na Subseção 2.3, que relacionam as potências de transmissão das estações interferentes à potência recebida no satélite. O termo A e o

fator $1/2\sigma_n^2$ são constantes e não influem na minimização. Assim sendo, (7) se reduz a

$$\hat{\mathbf{x}} = \min_{\mathbf{X}}^{-1} \xi \quad (8)$$

onde ξ é a função objetivo para o problema dada por

$$\xi = (\mathbf{Y} - \mathbf{C}(\mathbf{X}))^T (\mathbf{Y} - \mathbf{C}(\mathbf{X})) = \|\mathbf{Y} - \mathbf{C}(\mathbf{X})\|^2 \quad (9)$$

2.2 GEOMETRIA

A dependência entre \mathbf{x} e \mathbf{y} se traduz num problema de propagação em função das posições relativas entre o satélite e as estações e das direções de apontamento das antenas do satélite e das estações. Para o cálculo da potência recebida no satélite admite-se que o percurso do sinal se dá em linha reta, com atenuação unicamente de espaço livre. A Terra é considerada esférica, com raio R_T , perante o qual as alturas das antenas das estações do serviço fixo terrestre são desprezíveis. O satélite é considerado como um ponto em órbita circular de raio R_{orb} , invisível pela estação terrestre se estiver abaixo do horizonte. como “horizonte” considera-se o plano tangente à Terra no ponto onde se localiza a estação terrestre.

As grandezas geométricas são ilustradas na Figura 3. Para a estação situada na posição i da grade de estimação e para o satélite na posição j , a linha de visada é dada pelo raio vetor \mathbf{r}_{ij} cujo comprimento é a distância que determina a atenuação do sinal. Os ângulos ϕ_{ij} e ψ_{ijk} determinam os ganhos da antena da estação e do satélite na direção da interferência.

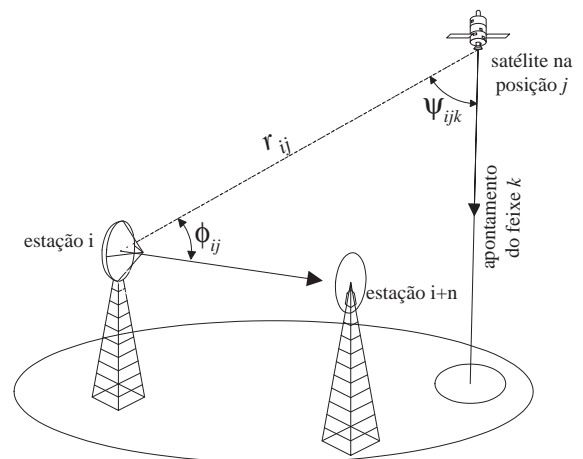


Figura 3. Geometria do problema de propagação.

Considerando o sistema de coordenadas geostacionário ilustrado pela Figura 4, denota-se \mathbf{u}_{sat_j} o vetor unitário que expressa a posição j do satélite e \mathbf{u}_{T_i} o vetor unitário que expressa a localização da estação i . O raio vetor \mathbf{r}_{ij} é então dado por

$$\mathbf{r}_{ij} = R_{orb} \mathbf{u}_{sat_j} - R_T \mathbf{u}_{T_i} \quad (10)$$

A distância $r_{ij} = \|\mathbf{r}_{ij}\|$ entre o satélite e a estação terrestre e dada por $\sqrt{\mathbf{r}_{ij}^T \mathbf{r}_{ij}}$ e os ângulos ϕ_{ij} e ψ_{ijk} são obtidos a partir do vetor unitário $\mathbf{u}_{sight_{ij}} = \mathbf{r}_{ij}/r_{ij}$ por

$$\begin{aligned} \phi &= \cos^{-1}(\mathbf{u}_{sight_{ij}}^T \mathbf{u}_{ink_i}) \\ \psi &= \cos^{-1}(-\mathbf{u}_{sight_{ij}}^T \mathbf{u}_{beam_{jk}}) \end{aligned} \quad (11)$$

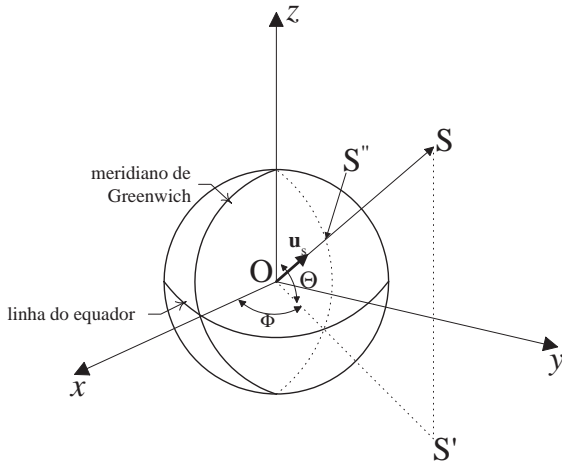


Figura 4. Sistema de coordenadas geostacionário

onde \mathbf{u}_{link_i} é o vetor unitário na direção do apontamento da i -ésima estação terrestre e $\mathbf{u}_{beam_{jk}}$ é o vetor unitário na direção do apontamento do k -ésimo feixe do satélite, quando este ocupa a posição j .

Expressos no sistema de coordenadas geostacionário, \mathbf{u}_{sat_j} e \mathbf{u}_{T_i} são dados por

$$\mathbf{u}_{sat_j} = \begin{pmatrix} \cos\Theta_j \cos\Phi_j \\ \cos\Theta_j \sin\Phi_j \\ \sin\Theta_j \end{pmatrix} \quad (12)$$

e

$$\mathbf{u}_{T_i} = \begin{pmatrix} \cos\Theta_i \cos\Phi_i \\ \cos\Theta_i \sin\Phi_i \\ \sin\Theta_i \end{pmatrix} \quad (13)$$

onde Φ_i e Θ_i são a longitude e a latitude da estação terrestre i e Φ_j e Θ_j são a longitude e a latitude da posição j do satélite.

2.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA RECEBIDA NO SATÉLITE

Conforme ilustra a Figura 5, a potência P_{jk} em dBW recebida por um satélite em uma certa posição j através de seu k -ésimo feixe é dada por

$$P_{jk} = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=0}^{N_{ter}-1} 10^{\frac{P_{ijk}}{10}} \right] \quad (14)$$

sendo P_{ijk} é a contribuição de cada uma das i estações, que é determinada pela equação de espaço livre

$$P_{ijk} = P_{out_i} + G_T(\phi_{ij}) + G_{sat}(\psi_{ijk}) - \alpha(r_{ij}), \quad (15)$$

onde P_{out_i} é a potência transmitida pela i -ésima estação terrestre, $G_T(\phi_{ij})$ é o ganho da antena da estação terrestre na direção de \mathbf{r}_{ij} , $G_{sat}(\psi_{ijk})$ é o ganho da antena do k -ésimo feixe do satélite na direção de \mathbf{r}_{ij} e $\alpha(r_{ij})$ é a atenuação de

espaço livre, dada por

$$\alpha(r_{ij}) = 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi r_{ij}} \right), \quad (16)$$

sendo λ o comprimento de onda da portadora transmitida pelas estações terrestres, suposto igual para todas as estações. Admite-se que os diagramas de radiação das antenas tenham simetria de revolução em relação a seus eixos, de modo que $G_T = G_T(\phi_{ij})$ e $G_{sat} = G_{sat}(\psi_{ijk})$. As equações

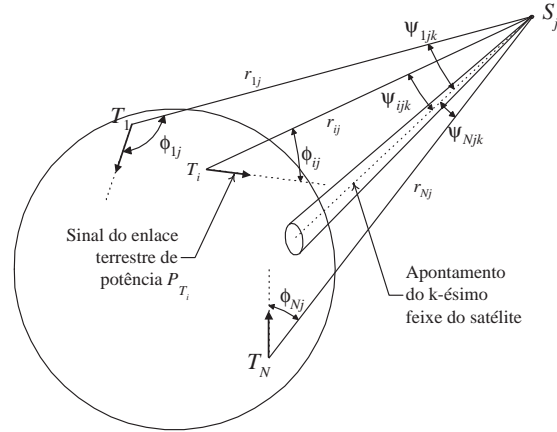


Figura 5. Potência total recebida pelo satélite através de seu k -ésimo feixe

(14) a (16) definem o modelo matemático que modela a dependência de y com x . O uso do Filtro de Kalman Estendido demanda a determinação dos valores das derivadas parciais da potência recebida no satélite em relação aos parâmetros estimados. Esses valores são obtidos a partir de (14) [4].

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_{T_i}} = 10^{\frac{P_{ijk}-P_{jk}}{10}}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \mu_i} = -10^{\frac{P_{ijk}-P_{jk}}{10}} g(\phi_{ij}) \frac{1}{\sin\phi_{ij}} \mathbf{u}_{sight_{ij}}^T \times M_i \begin{pmatrix} \cos\nu_i \cos\mu_i \\ -\cos\nu_i \sin\mu_i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

e

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \nu_i} = -10^{\frac{P_{ijk}-P_{jk}}{10}} g(\phi_{ij}) \frac{1}{\sin\phi_{ij}} \mathbf{u}_{sight_{ij}}^T \times M_i \begin{pmatrix} -\sin\nu_i \sin\mu_i \\ -\sin\nu_i \cos\mu_i \\ \cos\nu_i \end{pmatrix} \quad (19)$$

onde $g(\phi_{ij}) = \frac{dG_T(\phi_{ij})}{d\phi_{ij}}$ (ver seção 3) e M é a matriz de transformação de coordenadas do sistema de coordenadas da local à estação para o sistema geostacionário (ver figuras 2 e 4).

2.4 ASPECTO DA FUNÇÃO OBJETIVO

Seja um exemplo simples, que consiste de uma única estação terrestre cuja potência transmitida é conhecida, ou

seja, cujos parâmetros a estimar sejam apenas o azimute μ e a elevação ν . Admite-se que diagrama de radiação da antena transmissora é conhecido sendo, portanto, o ruído de medida igual a zero. Neste caso, a função objetivo $\xi_m = \xi_m(\nu, \mu)$ calculada para uma única medida no satélite tem a forma apresentada na Figura 6. Nela se verifica que o mínimo não ocorre para um valor único de (μ, ν) , mas sobre uma curva onde está contido o ponto (μ_S, ν_S) correspondente aos valores reais do azimute e da elevação. Isso ocorre porque existe uma infinidade de apontamentos da antena terrestre que formam o mesmo ângulo ϕ com a linha de visada estação-satélite. Os vetores que representam esses apontamentos formam um cone cujo eixo é a linha de visada, como ilustra a Figura 7. A cada apontamento corresponderá um valor do par (μ, ν) . Tais valores, quando mapeados no gráfico da função ξ , produzem a curva dos mínimos apresentada na parte inferior da Figura 6

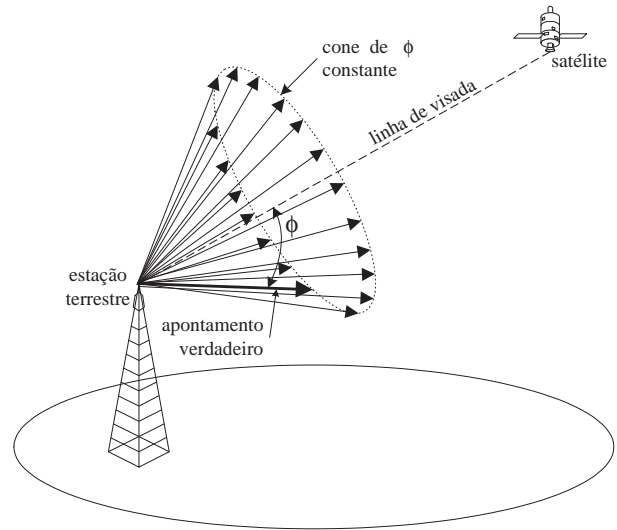


Figura 7. Apontamentos possíveis para ξ_m mínimo para uma dada posição do satélite

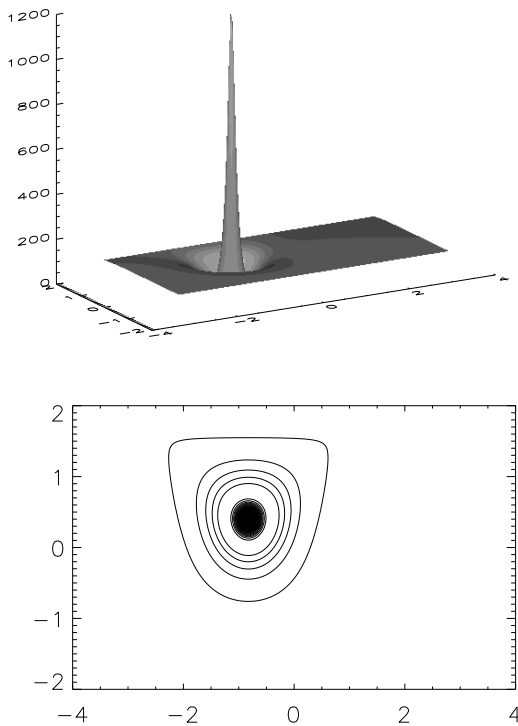


Figura 6. Exemplo da função $\xi_m(\mu, \nu)$ para uma dada posição do satélite.

Para diversas medidas, tem-se $\xi(\mu, \nu) = \sum_{m=0}^{N_{Obs}} \xi_m(\mu, \nu)$ cuja forma está ilustrada na Figura 8. Uma vez que os mínimos de cada função individual $\xi_m(\mu, \nu)$ contêm o ponto (μ_S, ν_S) , e que cada função $\xi_m(\mu, \nu)$ é não-negativa, o mínimo absoluto da função objetivo $\xi(\mu, \nu)$ é único. Entretanto, não há garantia da inexistência de mínimos locais⁴, que claramente constituem um obstáculo para a fidelidade da estimação. O único método que dá garantia de superar esse obstáculo é o Método da Força Bruta. Porém, seu uso se torna inviável tendo em vista o grande número de parâmetros a estimar e o grande número de medidas. O Filtro de Kalman Estendido é suscetível a erros causados por mínimos locais, o que impõe cuidados a serem tomados no seu uso. Não

obstante, isso não significa necessariamente que o algoritmo não funcione a contento.

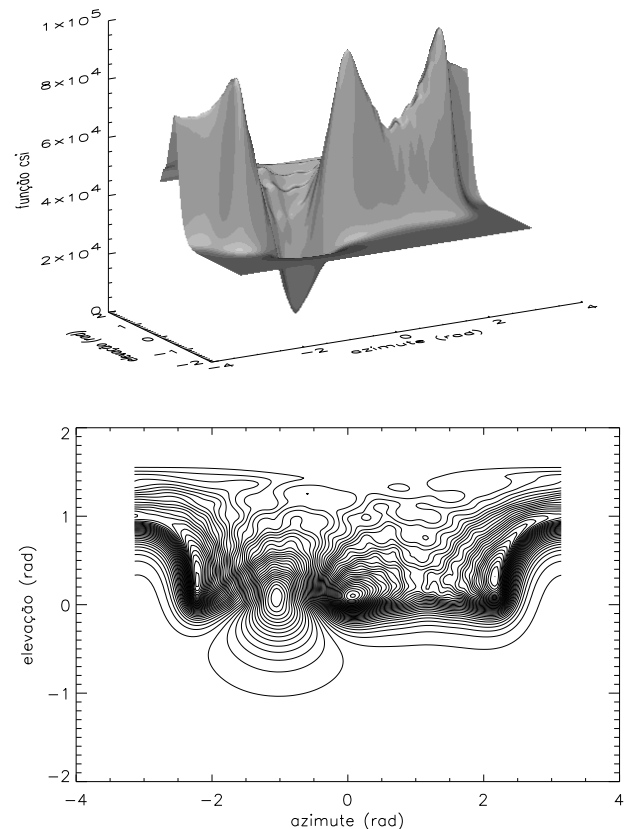


Figura 8. Superfície da função objetivo $\xi(\mu, \nu)$ para todas as medidas. Note-se que o mínimo absoluto é único no domínio da função.

⁴Por conta da topologia da função objetivo, optou-se por realizar a estimativa em dBW em vez de W[4].

3. PARÂMETROS CONHECIDOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÓRBITA DO SATÉLITE

Na caracterização da órbita do satélite não geoestacionário, foram considerados os seguintes valores:

- raio da Terra: $R_T = 6.378$ km;
- excentricidade da órbita do satélite: $e = 0$ (órbita circular);
- altitude da órbita do satélite: 10.355 km;
- inclinação do plano orbital: $\delta_{orb} = 45^\circ$;
- longitude inicial do nó de ascensão: $\Omega_0 = 0^\circ$.

3.2 DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO DAS ANTE-NAS

O diagrama de radiação das antenas transmissoras do serviço fixo terrestre foi obtido a partir de informações fornecidas por operadores brasileiros, considerando-se o ganho máximo de 45,4 dBi. Entretanto, esse diagrama apresenta patamares de valores que são inconvenientes para algoritmos de estimação iterativos, pois são regiões de derivada nula. É mais adequado ter-se um diagrama de radiação estritamente decrescente com o ângulo ϕ . Desse modo, foi utilizada neste trabalho uma versão modificada do diagrama, em que os patamares foram eliminados. As duas formas do diagrama estão mostradas na Figura 9. Para

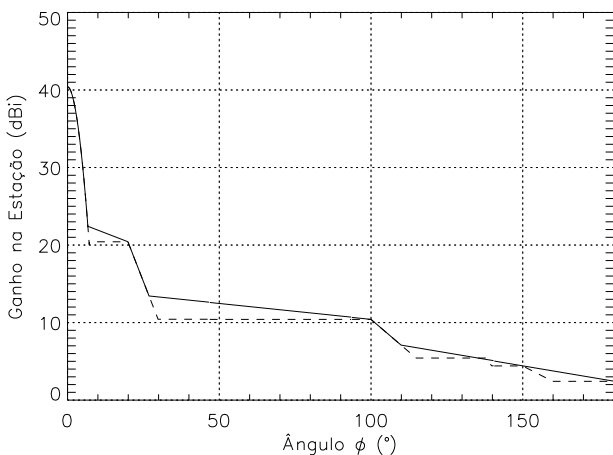


Figura 9. Diagramas de radiação das antenas das estações do serviço fixo terrestre na forma adotada neste trabalho (em linha cheia) e na forma adotada pelos operadores brasileiros (em linha tracejada).

cada feixe de recepção do satélite adotou-se o diagrama de radiação contido no Apêndice 30B do Regulamento de Radiocomunicações [5], admitindo-se não ocorrer saturação

da entrada do receptor do satélite. Considerou-se o caso particular de antenas do tipo *fast roll-off*, simplificado para feixe circular, com largura de feixe de 3 dB de $0, 8^\circ$. Esse diagrama é mostrado na Figura 10.

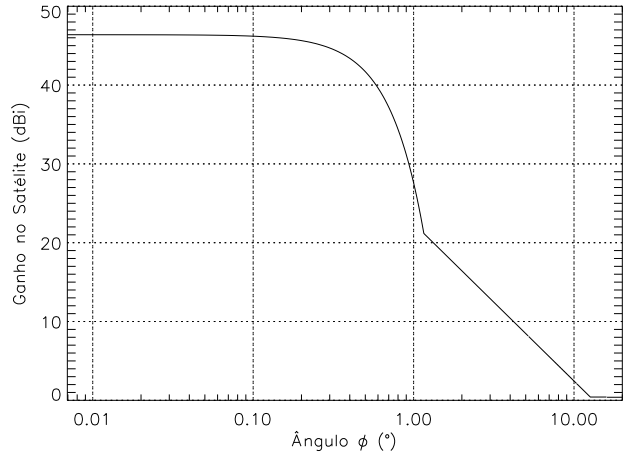


Figura 10. Diagrama de radiação da antena de cada feixe do satélite

3.3 ESTRUTURA DOS FEIXES DE RECEPÇÃO DO SATÉLITE

Neste trabalho, considerou-se uma antena de recepção no satélite contendo 163 feixes, com uma estrutura de distribuição de feixes idêntica à do sistema ICO [2]. Na Figura 11, é mostrada a disposição dos feixes dos satélites em função dos ângulos de deflexão em relação à direção do nadir⁵ nas direções Norte-Sul (δ_N) e Leste-Oeste (δ_E). À esquerda é mostrada a numeração dos feixes e à direita são apresentados os limites de 3 dB de cada feixe. Em linha pontilhada, são mostrados os limites definidos para o serviço móvel por satélite segundo [2], e, em linha cheia, os limites que resultam do diagrama de radiação das antenas. A Figura 12 ilustra um esquema típico da obtenção das medidas interferentes. Sendo o ângulo ϕ da situação A menor que o da situação B, e sendo as antenas fortemente direcionais, simulações em computador indicam que as medidas obtidas pelos feixes internos (situação B) são insignificantes frente às medidas nos feixes de borda (situação A). Deste modo, foram utilizadas no trabalho apenas as medidas obtidas através dos feixes de borda, cuja área de cobertura é ilustrada na Figura 13.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Em razão da existência de mínimos locais no domínio da função ξ , a determinação de condições iniciais é primordial para o bom desempenho do Filtro Estendido de Kalman. Para o vetor de estimativas inicial faz-se $\hat{x}_0 = \mathbb{E}[x(1)]$, conforme sugerido em [6]. Das características físicas do problema, espera-se que boa parte dos nós da grade de estimação

⁵ direção aposta ao azimute

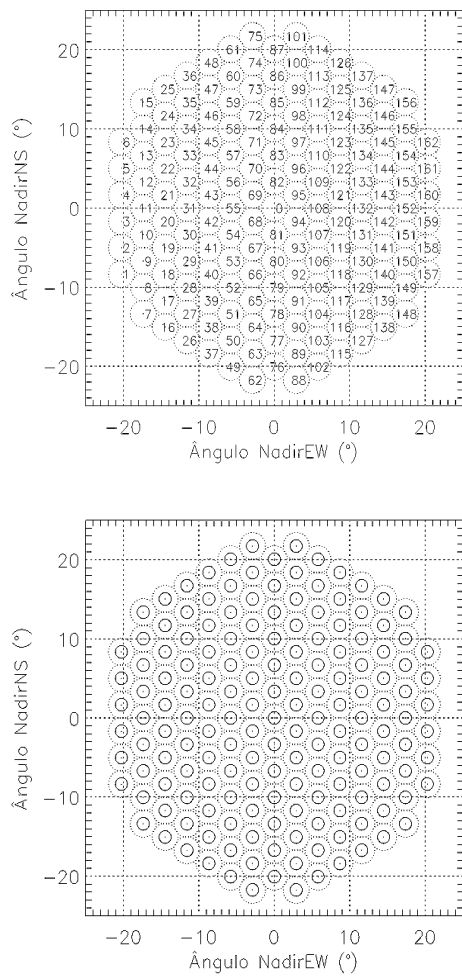


Figura 11. Disposição dos feixes do satélite: Na parte superior, a numeração adotada para os feixes; na parte inferior, os limites de 3dB (linha cheia) e entre células (linha pontilhada)

não corresponda a nenhuma estação do serviço fixo terrestre. Com base nessa premissa, as condições iniciais em cada pixel para as estimativas são potências de transmissão = -20dB, ângulo de azimute = 180° e ângulo de elevação: 1°. Essa escolha de condições iniciais mostrou-se eficiente nos casos analisados.

A dimensão N de y_k , $k = 0 \dots N_{obs} - 1$ deve idealmente ser a maior possível. Entretanto, a utilização de medidas com N muito grande torna o processo inviável computacionalmente em virtude da inversão de uma matriz de dimensões $N \times N$ no decorrer do processo. Neste trabalho, o valor de N foi escolhido com base no tempo de processamento e na precisão numérica na inversão de matrizes do *software* utilizado, resultando em $N = 30$.

O intervalo Δt entre instantes de medida deve ser suficientemente pequeno, para evitar grandes saltos entre valores de medidas sucessivas. No entanto, esse mesmo intervalo deve ser suficientemente grande para que se possa considerar as medidas como descorrelatadas entre si. Neste trabalho, adotou-se $\Delta t = 5$ s.

Para os exemplos, dez estações do serviço fixo terrestre foram colocadas em pontos correspondentes a regiões da

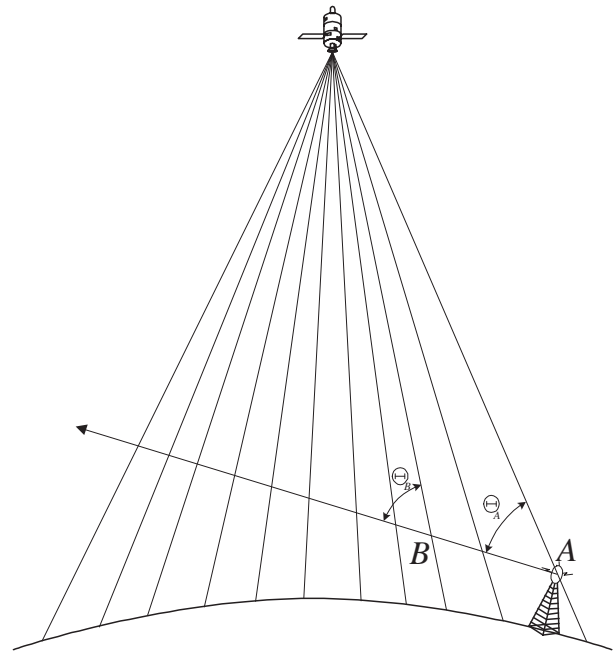


Figura 12. Situações dos feixes do satélite em relação à incidência da portadora interferente de uma estação terrestre. O ângulo Θ_A , de incidência do feixe mais externo do satélite, é menor que os ângulos dos feixes internos (e.g. Θ_B).

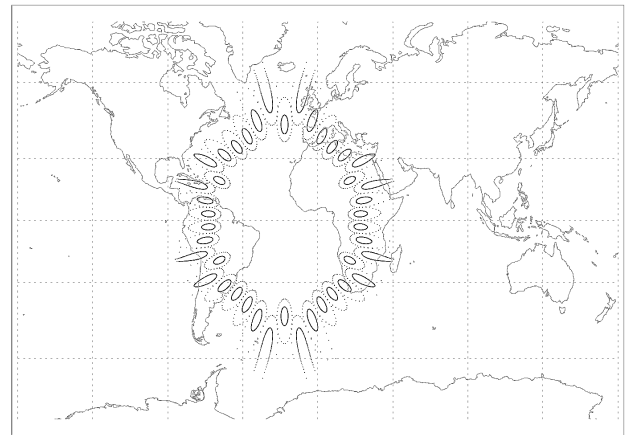


Figura 13. Área de cobertura do satélite correspondente aos feixes de borda.

América do Norte conforme ilustrado pela Figura 14. A geração das potências interferentes foi realizada para 1140 voltas do satélite, resultando em 1.027.211 medidas.

O sinal proveniente das estações transmissoras do serviço fixo dá origem a regiões na casca orbital do satélite onde este é alvo de potências interferentes. Na Figura 15 são mostradas essas regiões (limitadas pelo contorno correspondente a 20 dB abaixo da potência interferente máxima) assim como as trajetórias dos sinais. Os pontos do contorno de 20 dB marcados com "x" correspondem a posições do satélite onde este é invisível pela estação terrestre.

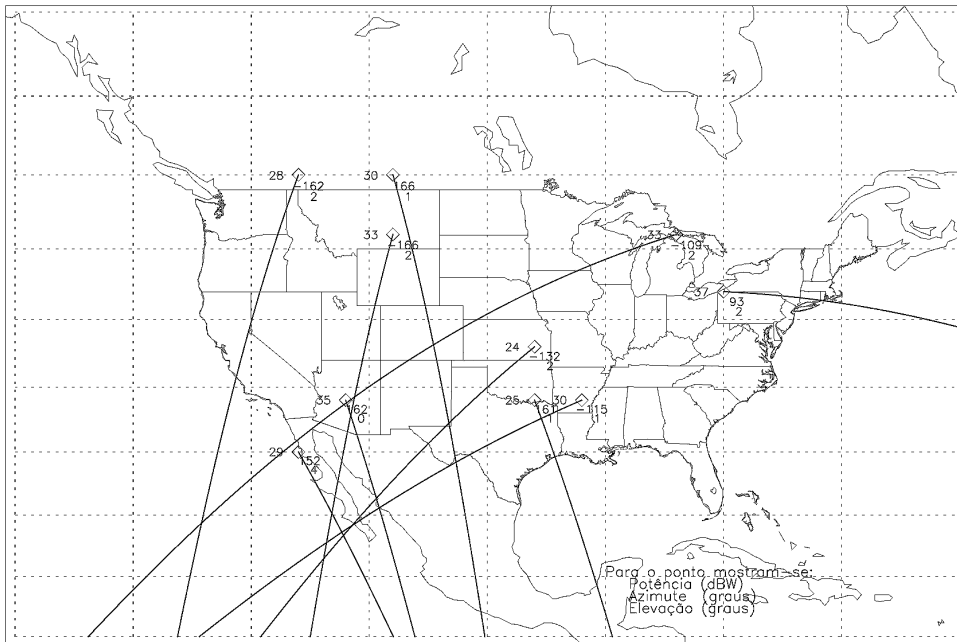


Figura 14. Posicionamento, apontamento e potência das estações FS interferentes

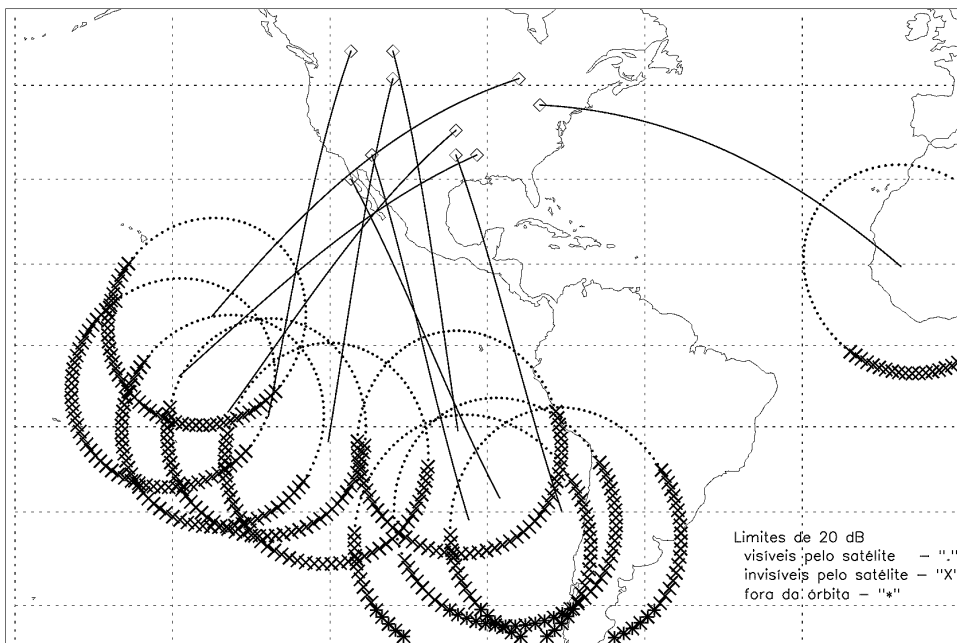


Figura 15. Regiões de interferência na casca orbital do satélite

4.1 GRADE DE ESTIMAÇÃO CONTENDO AS POSIÇÕES DAS ESTAÇÕES REAIS

A grade de estimação foi montada com pixels cujos centros foram espaçados regularmente de 4° em relação tanto à latitude como à longitude, conforme ilustra a Figura 16. Nela estão contidos os nós dos pixels correspondentes às estações interferentes do serviço fixo terrestre apresentadas na Figura 14.

Na estimação, foram obtidos os valores apresentados na Figura 17. Selecionando-se os pontos cujas potências de transmissão estimadas foram iguais ou superiores a 20 dBW,

obteve-se o conjunto de estimativas ilustrado na Figura 18. Verifica-se que as regiões definidas pelos pixels escolhidos indicam razoavelmente as áreas onde existem as estações transmissoras FS interferentes.

Na Figura 19 são mostradas as estimativas para os alvos da interferência indesejável na casca do satélite. Comparando-se essa figura com a Figura 15, verifica-se que as estimativas permitem associações razoáveis entre as regiões de interferência indesejável e as áreas onde se localizam as correspondentes estações causadoras.

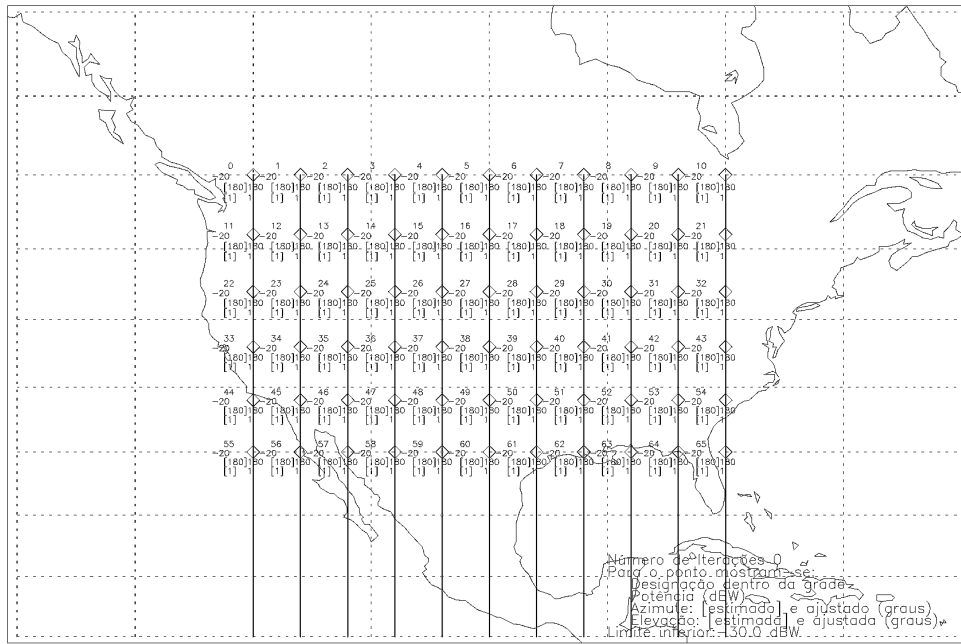


Figura 16. Grade de estimação com as condições iniciais para o Caso 4.1

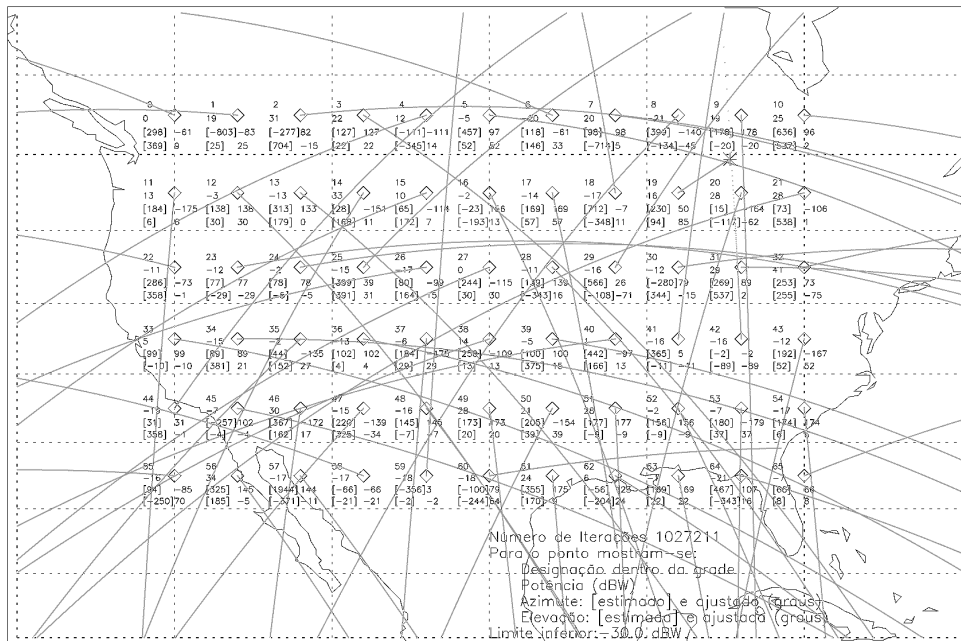


Figura 17. Resultados para o Caso 4.1 – todos os pixels

4.2 GRADE DE ESTIMAÇÃO NÃO CON-TENDO AS POSIÇÕES DAS ESTAÇÕES REAIS

Este exemplo retrata um caso mais prático, em que os locais das possíveis estações transmissoras do serviço fixo terrestre não são conhecidos *a priori*. A grade de estimação – Figura 20 – foi disposta de maneira que a distância entre pixels no sentido leste-oeste fosse de 480 km em qualquer latitude, igual à distância entre linhas de pixels no sentido norte-sul. A grade de estimação não contém as posições das

estações FS reais da Figura 14.

Na estimação, após a seleção dos nós correspondentes a regiões com potência transmitida não menor que 20 dBW, obteve-se o conjunto de estimativas apresentado na Figura 21. Comparando-se os resultados deste caso com os da Figura 18, verifica-se que as mesmas áreas foram indicadas, embora a delimitação dessas áreas tenha sido menos precisa. Quanto às estimativas das regiões alvo de interferência na casca orbital, apresentados na Figura 22, nota-se o mesmo efeito, fruto do fato de não haver coincidência entre os centros dos pixels da grade de estimação e as posições das estações FS reais.

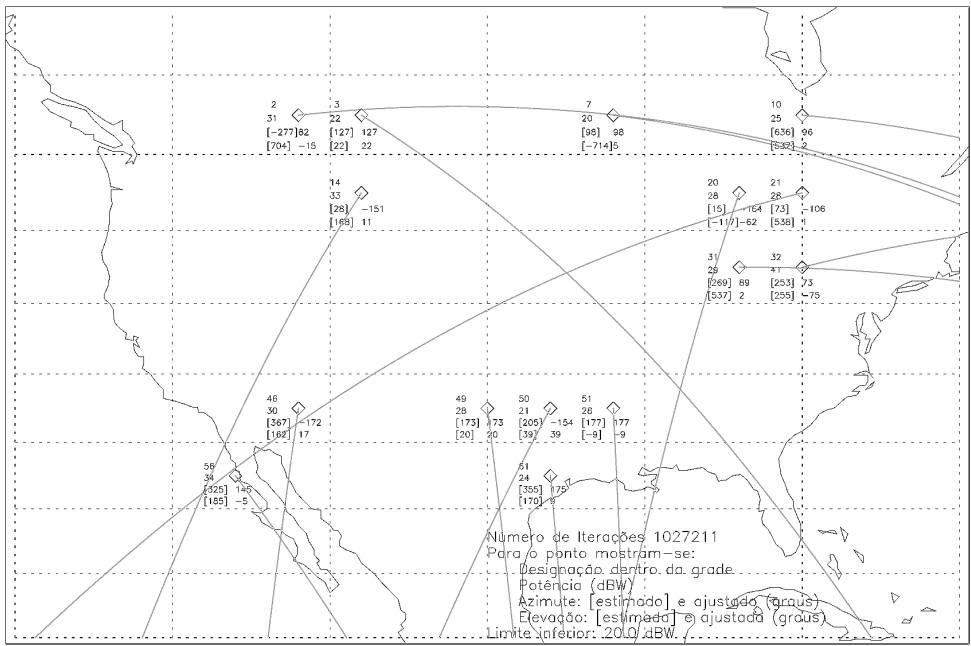


Figura 18. Resultados para o Caso 4.1 – áreas com potência transmitida não menor que 20 dBW

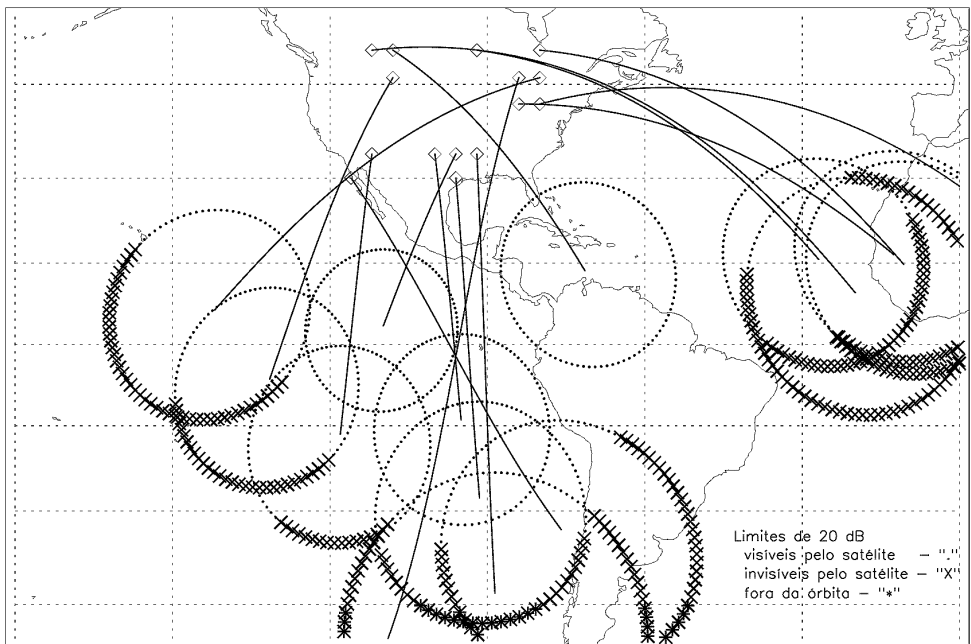


Figura 19. Resultados para o Caso 4.1 – regiões de interferência indesejável no satélite com base nas estimativas

4.3 MESMO CASO ANTERIOR COM PRESCRIÇÃO DO VALOR DO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO

Neste exemplo são utilizados a mesma grade de estimação da Seção 4.2. Impõe-se uma restrição à minimização da função objetivo, por meio da prescrição do valor do ângulo de elevação em 1° para todas as estações. A grade de estimação e as condições iniciais são apresentadas na Figura 23.

Na estimação, após a seleção dos pixels com mínimo de potência em 20 dBW, obteve-se o conjunto de estimativas ap-

resentado na Figura 24. Comparando-se os resultados deste caso com os dos casos 4.1 e 4.2, mostrados nas figuras 18 e 21, verifica-se a indicação das mesmas áreas de estações interferentes, embora sua delimitação tenha sido ainda menos precisa.

Entretanto, na Figura 25, verifica-se que a associação entre regiões críticas da casca orbital e os agentes causadores da interferência indesejável é melhor que a obtida na Seção 4.2. Assim, se, por um lado, a prescrição de valores para o ângulo de elevação fez com que a função objetivo ξ original não fosse de fato minimizada, o que provocou a degradação na precisão das estimativas de potência transmitida, por outro,

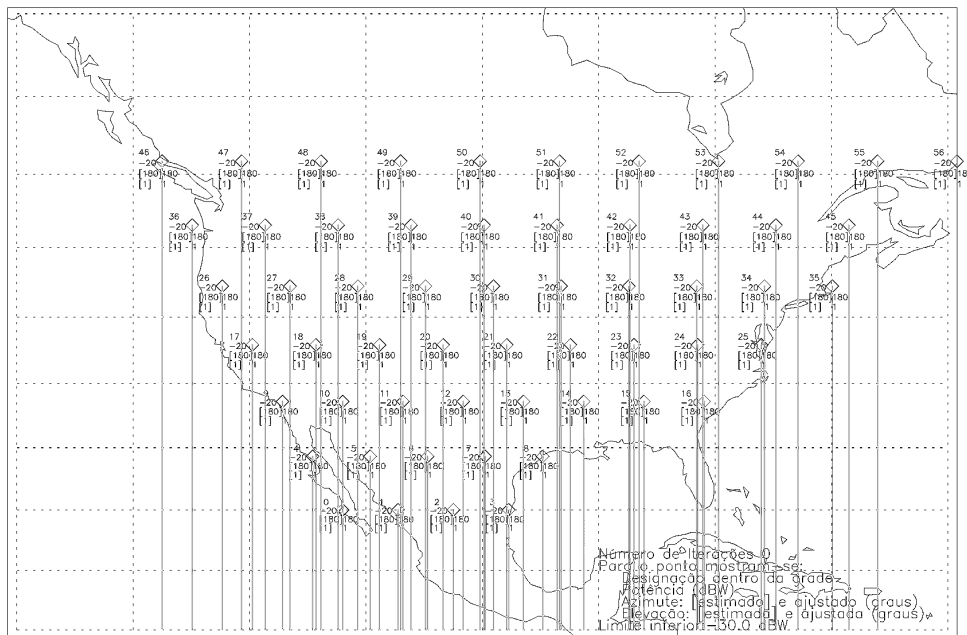


Figura 20. Grade de estimação com as condições iniciais para o Caso 4.2

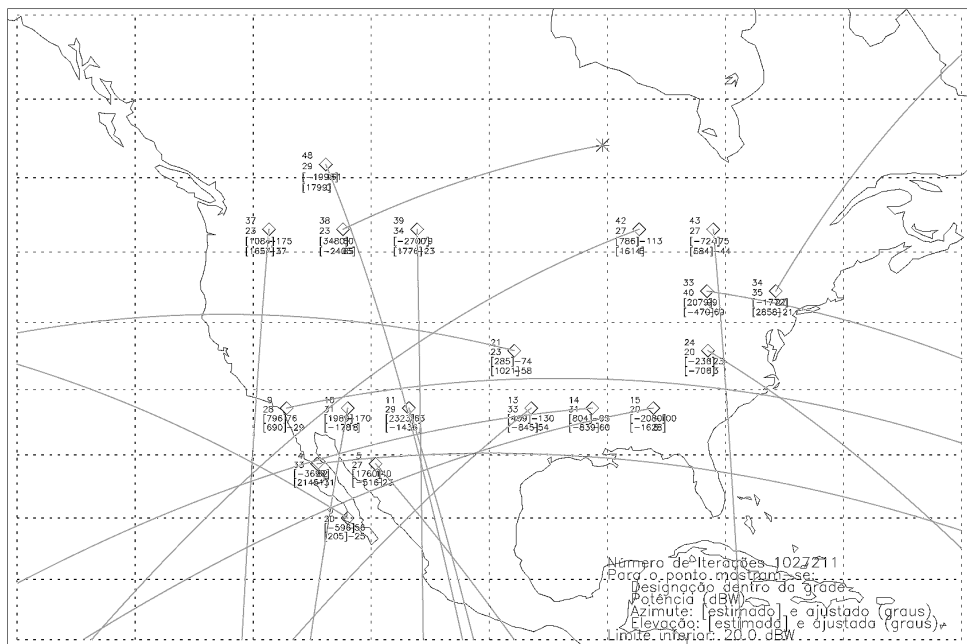


Figura 21. Resultados para o Caso 4.2 – áreas com potência transmitida não menor que 20 dBW

fez com que alguns mínimos locais fossem evitados, o que originou a melhoria na associação entre as regiões de interferência e as estações causadoras.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita a descrição teórica e a análise de casos numéricos relativas ao problema da estimação da localização, da potência de transmissão e da direção de radiação (azimute e elevação) de transmissores interferentes do serviço fixo terrestre a partir de medidas feitas por satélite

não geostacionário. Várias hipóteses simplificadoras foram estabelecidas, entre elas, a suposição de que a propagação se dá em espaço livre através de canal ideal e de que a entrada do satélite não é saturada. O ruído de medida foi considerado gaussiano, aditivo e branco, surgindo como resultado da modelagem da incerteza a respeito dos diagramas de radiação das antenas das estações do serviço fixo terrestre.

Mostrou-se que o modelo matemático do problema é fortemente não linear e verificou-se a existência mínimos locais na função objetivo que poderiam falsear a estimação. Em virtude desses fatores, que constituem uma característica intrínseca do problema, a precisão das estimativas não foi

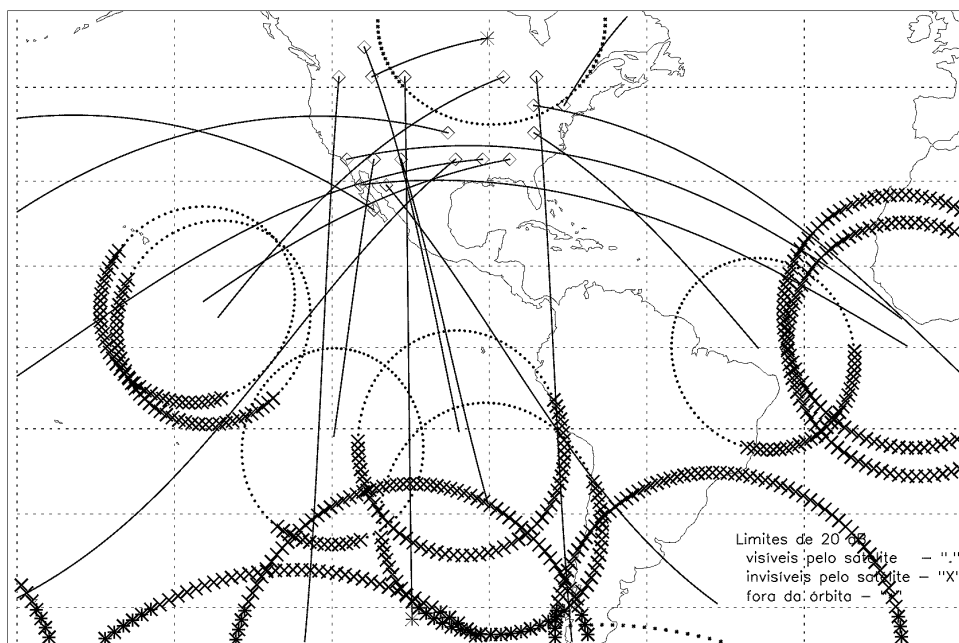


Figura 22. Resultados para o Caso 4.2 – regiões de interferência indesejável no satélite com base na estimação

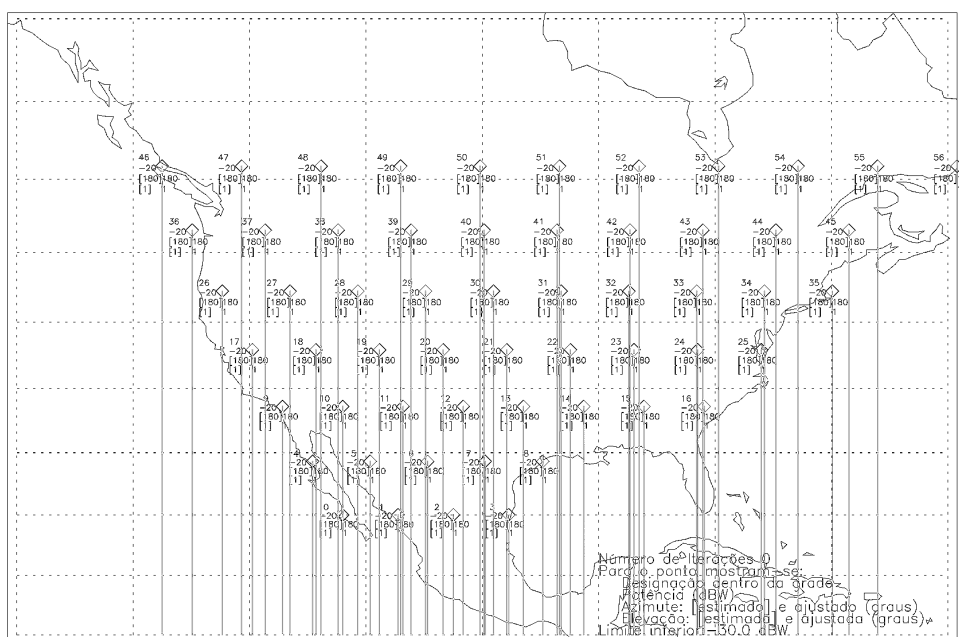


Figura 23. Grade de estimação com as condições iniciais para o Caso 4.3

muito alta, principalmente em relação aos ângulos de azimute e elevação das antenas das estações terrestres.

Não obstante, o algoritmo mostrou cumprir satisfatoriamente os objetivos propostos, na medida que possibilitou identificar as áreas dentro das quais se localizariam estações do serviço fixo terrestre causadoras de interferência indesejável. Mostrou também responder razoavelmente no que diz respeito à associação entre essas áreas e as regiões da casca orbital onde interferências acontecem.

Os resultados indicaram que, em alguns casos, estimativas melhores são possíveis, porém demandariam um número impraticável de medidas, dado que o tempo para obtê-las

num caso real seria medido em anos. A verificação de casos com grades de estimação mais abrangentes e com pixels menores não foi possível, em decorrência do tempo de processamento extremamente elevado. Neste caso, um trabalho futuro poderia seguir na direção de se obterem algoritmos computacionalmente mais eficientes, uma vez que o escopo deste trabalho não foi o de encontrar formas de se minimizar o esforço computacional e sim o de resolver um problema concreto.

Nas aplicações práticas, é recomendável realizar-se um levantamento rigoroso de dados a partir da verificação das bases de dados referentes às estações do serviço fixo terrestre

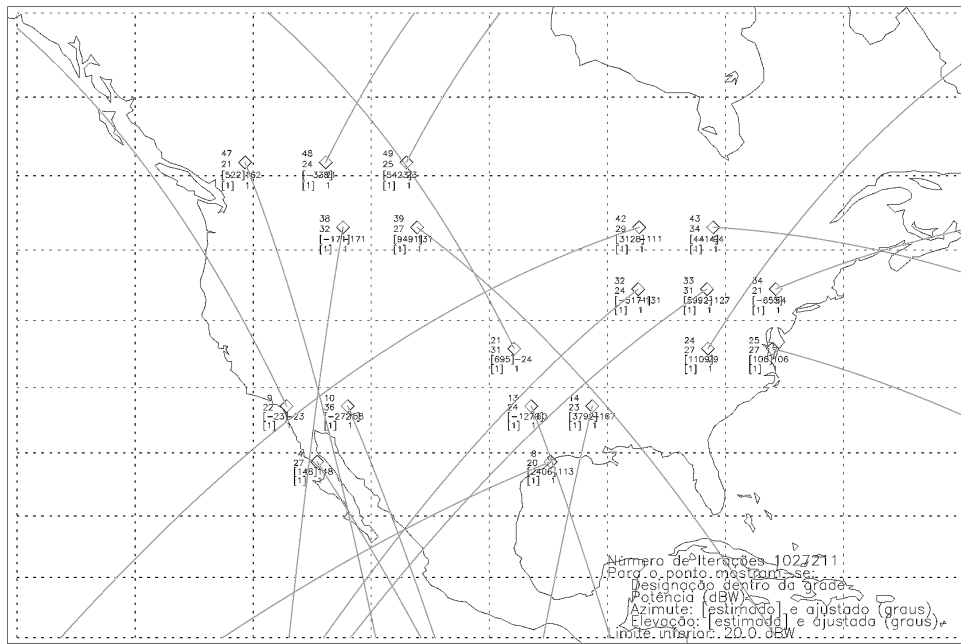


Figura 24. Resultados para o Caso 4.3 – áreas com potência transmitida não menor que 20 dBW

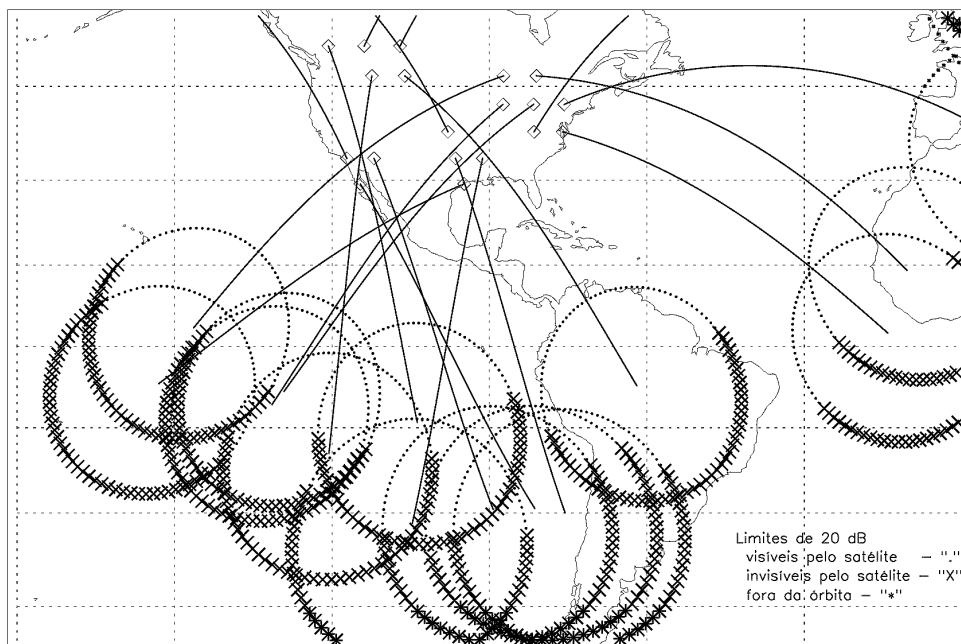


Figura 25. Resultados para o Caso 4.3 – regiões de interferência indesejável no satélite com base na estimacão

junto aos prestadores do serviço. O algoritmo desenvolvido neste trabalho é uma boa ferramenta no sentido de direcionar esses esforços.

REFERÊNCIAS

- [1] J. M. P. Fortes, R. Sampaio Neto, J. A. Maldonado, *An Analytical Method for Assessing Interference in an Interference Environment Involving NGSO Satellite Networks*, International Journal of Satellite Communications Vol.17, Issue 6 , pp 399 - 419, December 1999
- [2] ICO Global Communications, *Submission of Candidate Satellite Radio Transmission Technology for IMT-2000 Radio Interface*, June 1998.
- [3] H. L. Van Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory – Part I: Detection, Estimation and Linear Modulation Theory*, John Wiley and Sons, Inc, 1968.
- [4] J. A. B. L. Seiblit, *Estimacão da Localizacão, Potência e Direção de Radiação de Transmissores do Serviço Fixo Terrestre a partir de Medidas feitas por Satélite Não-Geoestacionário*, Dissertacão de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-RJ. agosto de 2002.
- [5] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R) *Radio Regulations* , Edicão 2001.
- [6] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Third Edition, Prentice-Hall, Inc, 1996.

José Antonio B. L. Seiblitz graduou-se em Engenharia Elétrica (com ênfase em Eletrônica) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999. Obteve o grau de Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica em 2002 pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Atualmente é aluno do Programa de Doutorado em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Suas áreas de interesse incluem comunicação via satélite, teoria das comunicações e transmissão digital.

José Mauro P. Fortes graduou-se em Engenharia Elétrica (Telecomunicações) em 1973 pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Em 1976 obteve, na mesma universidade, o título de Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica. Obteve ainda os títulos de MSc e PhD pela Universidade de Stanford, Califórnia - EUA, em 1978 e 1980, respectivamente. Retornou à PUC-Rio em Junho de 1980, onde é atualmente Professor Associ-

ado do Departamento de Engenharia Elétrica, lotado no Centro de Estudos em Telecomunicações da universidade. Durante o ano de 1992, enquanto em licença sabática, foi pesquisador do General Electric Research and Development Center, em Schenectady - EUA, atuando no Ultrasound Research Group. O Professor Fortes publicou vários artigos em periódicos e conferências nacionais e internacionais. Participou de diversos projetos de pesquisa e prestou consultoria a diversas empresas privadas e agências governamentais. Durante 13 anos foi Vice-Presidente do Grupo de Estudos 4 (Serviço Fixo por Satélite) do Setor de Radicomunicações da União Internacional de Telecomunicações (ITU), em Genebra. Foi ainda Presidente da Sociedade Brasileira de Telecomunicações de Março de 1996 a Fevereiro de 2000, sendo atualmente Sócio Sênior da sociedade. Seus interesses de pesquisa incluem transmissão via satélite, teoria das comunicações, teoria de estimação e transmissão digital.