

1. Publicação nº <i>INPE-3616-PRE/802</i>	2. Versão	3. Data <i>Agosto, 1985</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DTL</i>		Programa <i>ESPAC/TMTC</i>	
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>COMUNICAÇÕES ESPACIAIS TELECOMANDO</i> <i>MODULAÇÃO EM FASE TELEMETRIA</i> <i>ÍNDICES DE MODULAÇÃO RASTREAMENTO</i>			
7. C.D.U.: <i>621.398:629.783(81)</i>			
8. Título <i>INPE-3616-PRE/802</i>  <i>CARACTERIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE MODULAÇÃO DAS COMUNICAÇÕES DE SERVIÇO DO PRIMEIRO SATÉLITE BRASILEIRO</i>		10. Páginas: <i>13</i>	11. Última página: <i>10</i>
9. Autoria <i>Aydano B. Carleial</i> <i>Max H.M. Costa</i>		12. Revisada por  <i>Carlos E. Santana</i>	
Assinatura responsável <i>Aydano Carleial</i>		13. Autorizada por  <i>Marco Antonio Raupp</i> <i>Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas  <i>Descreve-se neste trabalho o sistema de modulação que será usado nas comunicações de rastreamento, telemetria e telecomando do primeiro satélite feito no Brasil. São determinados índices de modulação para as portadoras ascendente e descendente que permitem realizar as três funções de forma adequada, com economia de potência no satélite, e são apresentados resultados de uma análise de margens.</i>			
15. Observações <i>Submetido para apresentação no 3º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, a realizar-se em São José dos Campos, de 2 a 4 de setembro de 1985.</i>			

ABSTRACT

*The modulation system for the telecommand, telemetry and ranging communications of the first satellite made in Brazil is described. Modulation indexes are found for the uplink and downlink carriers such that the three communication functions are adequately performed, with power savings at the satellite. Results of a tolerance analysis are presented.*



CARACTERIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE MODULAÇÃO DAS  
COMUNICAÇÕES DE SERVIÇO DO PRIMEIRO SATÉLITE BRASILEIRO

Aydano B. Carleial

Max H. M. Costa

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Caixa Postal 515, São José dos Campos, SP

RESUMO

Descreve-se neste trabalho o sistema de modulação que será usado nas comunicações de rastreamento, telemetria e telecomando do primeiro satélite feito no Brasil. São determinados índices de modulação para as portadoras ascendente e descendente que permitem realizar as três funções de forma adequada, com economia de potência no satélite, e são apresentados resultados de uma análise de margens.

1. INTRODUÇÃO

O primeiro satélite artificial construído no Brasil será colocado em órbita aproximadamente circular, inclinada entre 20 e 25 graus em relação ao plano do equador, a cerca de 700 km de altitude. O satélite funcionará como um repetidor de informações coletadas em terra sobre o meio ambiente e transmitidas para o espaço, em 401 MHz, por centenas de plataformas coletoras de dados (PCDs). Os equipamentos de bordo que têm a função de receber e retransmitir os sinais das PCDs para a terra constituem a carga útil do satélite.

Faz parte do satélite um outro sistema, inteiramente independente da carga útil, cuja finalidade é assegurar, em conjunto com as estações terrenas rastreadoras, as comunicações necessárias à operação do próprio satélite. Este sistema de comunicações de serviço, projetado de acordo com os padrões internacionais da atualidade para satélites de órbita baixa, usará o princípio da transmissão unificada de sinais na faixa S de microondas.

Apresenta-se inicialmente neste trabalho uma descrição do sistema de modulação empregado nas comunicações de serviço do satélite. Em seguida, desenvolve-se cálculo de índices de modulação para atender às diversas funções concomitantes de forma balanceada e com economia de potência no satélite. No final do trabalho, apresentam-se resultados do dimensionamento dos enlaces e da análise das margens decorrentes dos índices de modulação adotados e suas tolerâncias.

## 2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODULAÇÃO

O sistema de comunicações de serviço do satélite atende a três funções essenciais à sua missão: rastreamento, telemetria e telecomando. As informações de telemetria, geradas a bordo e transmitidas para terra, referem-se ao estado dos diversos subsistemas do satélite. As mensagens de telecomando são transmitidas no sentido contrário, da terra para o satélite. O rastreamento é feito com sinais transmitidos em ambos os sentidos.

Para economizar espectro e limitar a complexidade do equipamento de bordo, o sistema emprega uma única portadora RF em cada sentido de transmissão. A portadora ascendente, transmitida da estação terrena rastreadora para o satélite em 2033,2 MHz, é modulada em fase (PM) pela soma de três sinais:

- Subportadora senoidal em 8 kHz, modulada em BPSK por dados NRZ-L de telecomando à taxa de 2000 bit/s.
- Tom senoidal não-modulado, chamado *tom menor*, usado no rastreamento para eliminação de ambiguidades na medida da distância ao satélite. Este tom assume sucessivamente as frequências de 20 kHz, 16 kHz, 16800 Hz, 16160 Hz e 16032 Hz durante o processo de medida.
- Tom senoidal não-modulado de 100 kHz, chamado *tom maior*, usado no rastreamento para efetuar a medida de distância com máxima precisão.

A portadora é adquirida e regenerada no satélite por um PLL de faixa estreita (800 Hz). Quando se introduz a modulação, a portadora é suprimida apenas parcialmente. A manutenção da trava do PLL sobre a portadora residual é facilitada pela ausência de raias espectrais abaixo de 16 kHz. A portadora regenerada permite recuperar, à saída de um misturador e filtro passa-baixas, a componente fundamental do conjunto dos três sinais moduladores (primeira faixa lateral). A subportadora de telecomando é então demodulada e os dados são passados a um decodificador.

A portadora descendente é gerada a bordo, a partir da portadora ascendente, por intermédio de uma conversão que mantém coerência de fase entre as duas portadoras. A relação (exata) entre as frequências é 240/221, de acordo com o padrão internacional para sistemas que operam na faixa S, de sorte que o enlace satélite-terra se faz em 2208 MHz. O uso do transponder coerente permite, no rastreamento, estimar com grande precisão a componente da velocidade do satélite na direção da estação terrena, pelo efeito Doppler.

Além de medir essa componente radial da velocidade (*range rate*), a estação terrena rastreadora mede diretamente a distância ao satélite (*range*) por comparações de fase entre os tons modulantes transmitidos pela estação e os mesmos tons recebidos de volta do satélite. A retransmissão dos tons é feita modulando a fase da portadora descendente com o conjunto dos sinais extraídos da primeira faixa lateral da portadora ascendente, aos quais se acrescenta mais um:

- Subportadora de telemetria, onda quadrada de 65536 Hz chaveada a cada 32 ciclos por sinal NRZ-L (2048 bit/s).

A subportadora de telecomando é incluída na modulação PM da portadora descendente apenas porque sua eliminação por filtragem perturbaria de forma inaceitável a fase dos tons de rastreamento. Cabe ainda notar que o ruído que acompanha os sinais recuperados a bordo também participa da modulação da portadora descendente.

Na recepção, a estação terrena, a exemplo do satélite, emprega um PLL de faixa estreita para adquirir e regenerar a portadora. Pela mixagem síncrona dessa portadora residual regenerada com a portadora modulada recuperam-se as faixas laterais da modulação, das quais se aproveita apenas a componente fundamental para extrair o tom menor, a subportadora de telemetria e o tom maior.

O enlace satélite-terra é severamente limitado em potência. A principal vantagem da técnica de demodulação descrita é permitir a recepção de sinal RF de faixa razoavelmente larga (da ordem de 350 kHz no presente caso) com nível extremamente baixo de relação sinal/ruído, muito inferior ao do limiar para demodulação convencional, desde que a relação sinal/ruído da portadora residual dentro da faixa do PLL seja adequada (~10 dB). Naturalmente os índices de modulação PM devem ser tais que as subportadoras e tons de rastreamento predominem sobre o ruído nas porções relevantes do espectro de RF (primeira faixa lateral de cada sinal).

Entre as modulações de envoltória constante, a modulação de fase é singularmente apropriada para este tipo de comunicação. Em PM as subportadoras aparecem nas faixas laterais com suas características de banda básica inalteradas, ao contrário do que ocorre em FM [Ref. 1, Seções 2.3 e 5.4]. A demodulação das subportadoras pode ser feita imediatamente após sua recuperação pelo processo descrito.

### 3. ESCOLHA DOS ÍNDICES DE MODULAÇÃO

#### 3.1 - Distribuição Espectral da Potência

Na modulação da portadora transmitida da estação terrena para o satélite, sejam  $\theta_{TC}$ ,  $\theta_r$  e  $\theta_R$  os valores de pico dos desvios de fase, em radianos, produzidos pela subportadora de telecomando, tom menor e tom maior, respectivamente. Como se sabe, a potência distribui-se no espectro RF entre a componente residual da portadora e uma infinidade de faixas laterais, nas

frequências  $f_c \pm mf_{tc} \pm nf_r \pm pf_R$ , onde  $m, n, p = 0, 1, 2, \dots$  e  $f_c$ ,  $f_{tc}$ ,  $f_r$  e  $f_R$  são as frequências da portadora e dos sinais moduladores. A fração da potência que cabe à portadora é

$$L_c = J_0^2(\theta_{tc}) J_0^2(\theta_r) J_0^2(\theta_R) ,$$

enquanto as frações correspondentes às faixas laterais de primeira ordem ( $m + n + p = 1$ ) são

$$L_{tc} = 2J_1^2(\theta_{tc}) J_0^2(\theta_r) J_0^2(\theta_R) ,$$

$$L_r = 2J_1^2(\theta_r) J_0^2(\theta_{tc}) J_0^2(\theta_R) ,$$

$$L_R = 2J_1^2(\theta_R) J_0^2(\theta_{tc}) J_0^2(\theta_r) ,$$

onde  $J_0$  e  $J_1$  são funções de Bessel. As demais faixas laterais não são aproveitadas na demodulação.

De modo análogo, na transmissão do satélite para a estação terrena, as frações da potência RF total correspondentes à portadora e à primeira faixa lateral de cada um dos sinais de interesse são

$$L'_c = J_0^2(\theta'_{tc}) J_0^2(\theta'_r) \cos^2(\theta'_{tm}) J_0^2(\theta'_R) \exp[-(\theta'_n)^2/2] ,$$

$$L'_r = 2J_1^2(\theta'_r) J_0^2(\theta'_{tc}) \cos^2(\theta'_{tm}) J_0^2(\theta'_R) \exp[-(\theta'_n)^2/2] ,$$

$$L'_{tm} = (8/\pi^2) \sin^2(\theta'_{tm}) J_0^2(\theta'_{tc}) J_0^2(\theta'_r) J_0^2(\theta'_R) \exp[-(\theta'_n)^2/2] ,$$

$$L'_R = 2J_1^2(\theta'_R) J_0^2(\theta'_{tc}) J_0^2(\theta'_r) \cos^2(\theta'_{tm}) \exp[-(\theta'_n)^2/2] ,$$

onde  $\theta'_{tc}$ ,  $\theta'_r$ ,  $\theta'_{tm}$  e  $\theta'_R$  são os índices de modulação (desvios de pico de fase) da portadora descendente produzidos individualmente por cada um dos sinais moduladores, e  $\theta'_n/\sqrt{2}$  é o desvio RMS produzido pelo ruído. Estas expressões refletem o fato de que a subportadora de telemetria (com índice  $\theta'_{tm}$ ) é uma onda quadrada.

### 3.2 - Critérios de Projeto

Na escolha dos índices de modulação é prioritária a otimização do enlace satélite-terra, devido a sua restrição de potência e maior complexidade. O método de cálculo empregado aqui é semelhante ao de Foley, Gaumond e Witherspoon [Ref. 2] e obedece aos seguintes critérios:

1) Todos os sinais moduladores de interesse devem dispor da mesma margem de relação sinal/densidade espectral de ruído ( $S/N_0$ ) na primeira faixa lateral, e essa margem deve ser maximizada.

2) A margem de  $S/N_0$  da portadora residual deve ser no mínimo igual à dos sinais recuperados na demodulação.

3) A presença da subportadora de telecomando e do ruído que modulam a portadora descendente não deve penalizar o enlace em mais de 1 dB.

4) A raiz quadrada da soma dos quadrados dos índices de modulação (Índice RSS) nominalmente não deve exceder 1,4 radianos.

O sistema de comunicações de serviço admite vários modos de operação (e.g. telemetria apenas, telemetria+tom maior apenas etc.), usados de acordo com as necessidades de momento da missão. A presente análise é feita para o modo de operação mais complexo, no qual estão presentes todos os sinais, pois o dimensionamento para este modo garante os demais. Na prática, procura-se evitar sempre que possível a simultaneidade de telecomando e tons de rastreamento.

### 3.3 - Índices da Portadora Descendente

No enlace satélite-terra, as margens de  $S/N_0$  são calculados sobre os seguintes valores, especificados como requisitos mínimos:

- portadora residual	40,0 dBHz ,
- tom menor	16,0 dBHz ,
- subportadora de telemetria	45,7 dBHz ,
- tom maior	25,0 dBHz .

Estes números referem-se ao ruído térmico do enlace satélite-terra, mas sua especificação já leva em conta a degradação por interferências mútuas, ruído do enlace terra-satélite e limitações da implementação prática. Na telemetria almeja-se uma probabilidade de erro de bit (PEB) de  $10^{-5}$ , para a qual se requer  $E_b/N_0 = 9,6$  dB, e prevê-se degradação de até 3,0 dB. Para comparação, os valores mínimos de  $S/N_0$  admitidos pela Agência Espacial Européia (ESA) são 38 dBHz para a portadora, 13 dBHz para o tom menor e 22 dBHz para o tom maior [Ref. 3].

Para que as margens do tom menor e da subportadora de telemetria sejam iguais à margem do tom maior (critério 1), basta atender às seguintes condições:

$$L'_r/L'_R = J_1^2(\theta'_r)J_0^2(\theta'_R)/[J_0^2(\theta'_r)J_1^2(\theta'_R)] = 10^{(16-25)/10} = 10^{-0,9} ,$$

$$L'_{tm}/L'_R = (4/\pi^2)\tan^2(\theta'_{tm})J_0^2(\theta'_R)/J_1^2(\theta'_R) = 10^{(45,7-25)/10} = 10^{2,07} .$$

Por outro lado, a condição para que a margem da portadora não seja inferior (critério 2) é:

$$L'_c/L'_R = J_0^2(\theta'_R)/[2J_1^2(\theta'_R)] \geq 10^{(40-25)/10} = 10^{1,5} .$$

Resolvendo as expressões acima, verifica-se que os índices que satisfazem as três condições e maximizam  $L'_r$ ,  $L'_{tm}$  e  $L'_R$  (critério 1) são  $\theta'_r = 0,091$ ,  $\theta'_{tm} = 1,134$  e  $\theta'_R = 0,250$ .

O critério 3 é expresso como se segue:

$$J_0^2(\theta'_{tc}) \exp[-(\theta'_n)^2/2] \geq 10^{-0,1} .$$

Para atender a este critério no limite, favorecendo o enlace terra-satélite, faz-se aqui  $\theta'_{tc} = \theta'_n = 0,478$ . A opção por igualar  $\theta'_{tc}$  e  $\theta'_n$ , bastante arbitrária, é compatível com as necessidades daquele enlace, como se verá na seção seguinte.

O critério 4 é atendido, com  $\theta'_{RSS} = 1,347$ .

### 3.4 - Índices da Portadora Ascendente

Os índices de modulação do enlace terra-satélite são ditados essencialmente por vínculos decorrentes do enlace satélite-terra. Com efeito, um sistema de controle automático de ganho (AGC) será usado no satélite para manter constante, a entrada do modulador, o nível conjunto da subportadora de telecomando, tons de rastreamento e ruído; entretanto, as relações entre os níveis desses sinais não podem ser controladas a bordo. Para obter os valores de  $\theta'_{tc}$ ,  $\theta'_r$  e  $\theta'_R$  estipulados acima, é necessário que  $\theta_{tc}$ ,  $\theta_r$  e  $\theta_R$  estejam relacionados como se segue:

$$L_{tc}/L_R = J_1^2(\theta_{tc})J_0^2(\theta_R)/[J_0^2(\theta_{tc})J_1^2(\theta_R)] = (\theta'_{tc})^2/(\theta'_R)^2 = 3,656 \quad ,$$

$$L_r/L_R = J_1^2(\theta_r)J_0^2(\theta_R)/[J_0^2(\theta_r)J_1^2(\theta_R)] = (\theta'_r)^2/(\theta'_R)^2 = 0,1325 \quad .$$

Verifica-se que os índices  $\theta_{tc} = 1,175$ ,  $\theta_r = 0,272$  e  $\theta_R = 0,708$  maximizam a margem de  $S/N_0$  das subportadoras satisfazendo as condições acima e o critério 4 ( $\theta_{RSS} \leq 1,4$ ).

Como no caso da portadora descendente, o requisito de  $S/N_0$  para a portadora residual ascendente é 40 dBHz, que corresponde a 11 dB de relação sinal/ruído na faixa de 800 Hz. Para a subportadora de telecomando, o requisito mínimo é  $S/N_0 = 46,6$  dBHz, tendo em conta  $PEB = 10^{-5}$  e degradação até 4 dB. O critério 2 é satisfeito, pois requer a relação mínima de -6,6 dB entre  $L_c$  e  $L_{tc}$ , ao passo que  $\theta_{tc} = 1,175$  oferece mais de -0,2 dB.

O critério 1 não é aplicado neste enlace porque não há propriamente valores especificados de  $S/N_0$  para os tons de rastreamento. Entretanto, é necessário que os tons tenham  $S/N_0$  muito maior do que no enlace satélite-terra, para que não haja degradação significativa. Isto de fato ocorre, pois com os índices escolhidos tem-se  $L_r/L_{tc} = -14,4$  dB e  $L_R/L_{tc} = -5,6$  dB, de sorte que  $S/N_0 = 46,6$  dBHz para o telecomando implica 32,2 dBHz para o tom menor e 41,0 dBHz para o tom maior.

Na prática, a potência transmitida pela estação terrena será mais elevada do que a necessária para atender ao requisito de desempenho do telecomando. Em virtude de se haver estipulado a igualdade  $\theta_{tc}' = \theta_n'$ , na situação dimensionante do enlace a subportadora de telecomando e o ruído devem chegar com a mesma potência à entrada do modulador do satélite. O fato de a faixa equivalente do ruído ser estimada em 300 kHz implica aproximadamente 54,8 dBHz de  $S/N_0$  para a subportadora.

#### 4. MARGENS E REQUISITOS DE EIRP

Os índices de modulação propostos neste trabalho são apenas valores nominais, sujeitos na prática a variações consideráveis durante o funcionamento dos moduladores. Realisticamente, admite-se que cada um dos índices da portadora ascendente se desvie de até  $\pm 5\%$ . Quanto à portadora descendente, considera-se uma tolerância de  $\pm 10\%$  em  $\theta_{tm}'$  e igual tolerância no índice RSS do conjunto dos demais sinais e ruído, sem esquecer que as relações entre estes últimos são afetadas pelos desvios de  $\theta_{tc}$ ,  $\theta_r$  e  $\theta_R$ .

Calculando as expressões da Seção 3.1 com os índices nominais e, em seguida, com as combinações mais desfavoráveis de índices desviados, verifica-se que  $L_c$  e  $L_{tc}$  não sofrem perda significativa em vista das grandes margens já disponíveis no enlace terra-satélite (Seção 3.4). No enlace satélite-terra, a deterioração de  $L_r'$  e  $L_R'$  pode ser considerável, chegando a 4 dB no caso do tom menor; a portadora não perde mais de 2,8 dB (no pior modo de operação) e a telemetria é ainda menos afetada. De qualquer forma, é necessária uma margem de 4 dB neste enlace apenas para cobrir o efeito das tolerâncias nos índices de modulação. Os requisitos de  $P/N_0$  (potência total RF/densidade espectral de ruído) resultantes são 59,7 dBHz no receptor do satélite e 52,4 dBHz no receptor da estação terrena.

As condições de transmissão mais desfavoráveis levadas em conta no projeto consideram que o satélite está a 800 km de altura e é visto da estação terrena com elevação de  $5^\circ$ . Os requisitos de potência efetiva isotropicamente irradiada (EIRP) para esta situação são estimados como se segue:

Enlace	ascendente	descendente
Requisito de $P/N_0$	59,7 dBHz	52,4 dBHz
Perdas em circuitos	4,3 dB	0,5 dB
Inverso de G/T	37,3 dBK	-21,5 dBK
Constante k de Boltzmann	-228,6 dBJK <sup>-1</sup>	-228,6 dBJK <sup>-1</sup>
Perda no espaço livre	167,5 dB	168,2 dB
Outras perdas	2,0 dB	2,0 dB
Margem livre do enlace	3,0 dB	3,0 dB
<hr/>		
EIRP necessária	45,2 dBW	-24,0 dBW

A EIRP disponível na estação terrena, de pelo menos 54 dBW, será mais que suficiente. No satélite, é necessário um transmissor de 40 mW (-14 dBW) para obter a EIRP de -24 dBW, na direção da estação terrena, após 3,7 dB de perdas nos circuitos de saída e -6,3 dB de ganho da antena transmissora (diagrama tipo cardióide). Pode-se mostrar que, com esta potência, o satélite não excede os limites de fluxo de potência incidente na superfície da terra estipulados pelos regulamentos da União Internacional de Telecomunicações.

#### REFERÊNCIAS

- [1] R. Gagliardi. "Introduction to Communications Engineering". New York: Wiley, 1978.
- [2] T.E. Foley; B.J. Gaumont; J.J. Witherspoon. "Optimum Power Division for Phase-Modulated Deep-Space Communication Links". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 3(3), p. 400-409, May 1967.
- [3] European Space Agency. "Radio Frequency and Modulation Standard". TTC-A-05 Issue 1, May 1981. Noordwijk, The Netherlands.