



FACULDADE • DE • CIÊNCIAS UNIVERSIDADE • DE • LISBOA



DORIS



V. B. Mendes

1. INTRODUÇÃO



O sistema DORIS (acrónimo comum à designação francesa *Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite* e à correspondente designação inglesa *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) é um sistema de posicionamento radioelétrico de comunicação ascendente desenvolvido pelo *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES), em cooperação com o *Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale* (GRGS) e o *Institut Géographique National* (IGN), com o objectivo de proporcionar uma determinação muito precisa das órbitas dos veículos espaciais das missões a que está associado e do posicionamento dos radiofaróis (balizas) que constituem a rede DORIS. São vários os satélites que transportam receptores DORIS a bordo, sendo de salientar os satélites de observação da Terra (SPOT2, SPOT3 e SPOT4) e o satélite oceanográfico TOPEX/Poseidon (<http://topex-www.jpl.nasa.gov>), o ENVISAT (satélite dedicado ao estudo do meio ambiente terrestre <http://www.envisat.esa.int>), o SPOT5 e o JASON 1 (<http://www.jason.oceanobs.com>).

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O sistema DORIS é constituído por um pacote de hardware a bordo de um satélite (receptor, antena omnidireccional e oscilador), uma rede de radiofaróis emissores em Terra, um centro de controlo e um centro de processamento de dados.

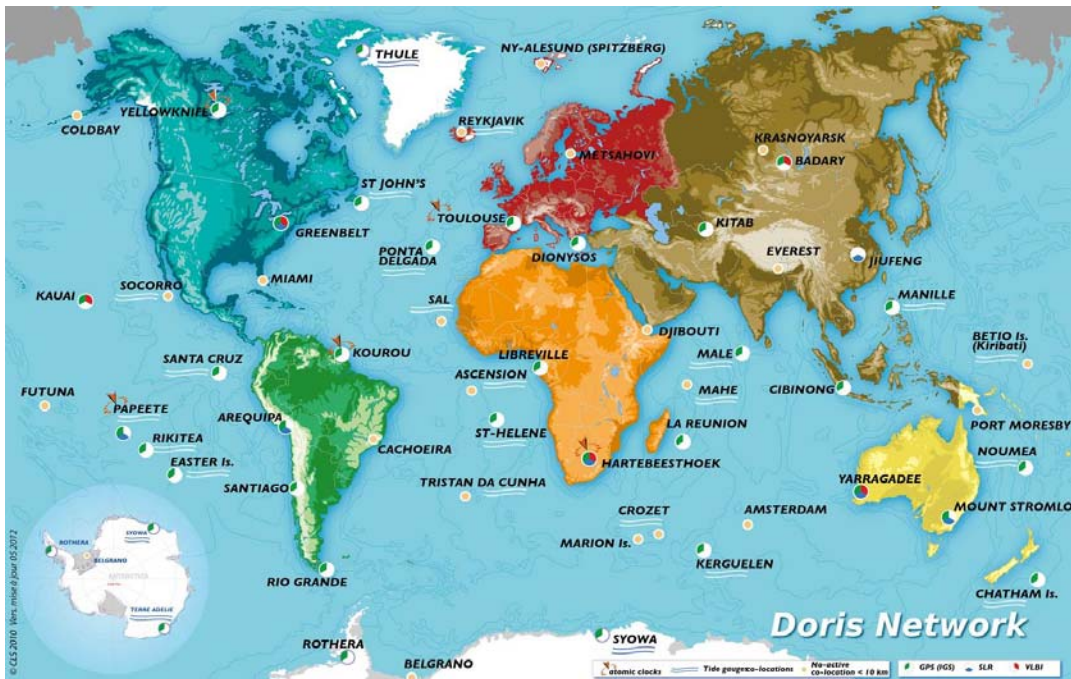


Figura 1 - Rede DORIS

A primeira diferença assinalável relativamente a outros sistemas de posicionamento (nomeadamente o GPS) reside no facto de que o DORIS é um sistema de comunicação ascendente: os receptores estão localizados a bordo de um satélite e os transmissores estão localizados em terra. Tal facto conduz a um sistema centralizado, em que o conjunto completo de observações é enviado pelo satélite para o centro de processamento de dados DORIS, sendo este responsável pela sua disseminação, após revisão e processamento prévio.

O **segmento terrestre** (Figura 1) é constituído por uma rede de rastreio permanente de cerca de 60 radiofaróis autónomos (incluindo um nos Açores, inicialmente localizado em Santa Maria e actualmente em funcionamento em Ponta Delgada), sendo essa rede partilhada por todas as missões com receptores DORIS a bordo. Os radiofaróis utilizados na determinação de órbitas constituem assim uma rede global bastante densa, cuja instalação e manutenção se encontra a cargo do instituto francês IGN. O tempo de referência utilizado

pelo sistema DORIS é determinado por dois radiofaróis principais, equipados com relógios atômicos, localizados em Toulouse, Kourou (Guiana Francesa) e Harthebeesthoek (África do Sul). A estação de Toulouse constitui o centro de processamento de dados e é ainda responsável pelo controlo do sistema (rede de radiofaróis e pacotes de bordo), programação dos receptores, aquisição e pré-processamento dos dados, determinação precisa de órbitas e posicionamento dos radiofaróis. Para além dos radiofaróis permanentes e principais, podem ser instalados radiofaróis ocasionais, para aplicações específicas no âmbito da Geodesia e Geofísica (por exemplo, para estudos de glaciares).

Cada radiofarol é constituído por um oscilador de quartzo (com uma estabilidade de 5×10^{-13} , para períodos entre 10 s e 100 s), uma antena de dupla frequência, uma unidade electrónica com interface e fonte de alimentação de reserva e sensores meteorológicos para controlo de temperatura, pressão e humidade relativa. A mensagem radiodifundida omnidireccionalmente pelos radiofaróis (de 10 em 10 segundos) inclui o conjunto de dados meteorológicos, a identificação do radiofarol e um sinal de sincronização. Existem já 3 gerações diferentes de radiofaróis.

As antenas omnidireccionais a bordo dos veículos espaciais recebem a informação proveniente dos radiofaróis, que é posteriormente utilizada no cálculo da contagem Doppler integrada.

Os receptores a bordo da primeira geração não têm a capacidade de processar a informação proveniente de vários radiofaróis em simultâneo, pelo que aqueles são previamente programados de modo a permitir a multiplexagem dos sinais recebidos dos radiofaróis visíveis em cada instante. A segunda geração de receptores tem dois canais de recepção, permitindo sintonizar dois radiofaróis em simultâneo.

3. POSICIONAMENTO DORIS

Tal como acontece com outras técnicas espaciais, o posicionamento dos radiofaróis pode ser efectuado utilizando o método (quasi-) geométrico ou o método dinâmico. No primeiro caso, o processamento dos dados afectos a um determinado radiofarol é efectuado com o conhecimento das órbitas dos satélites utilizados, quer em “tempo-real” (utilizando as órbitas processadas pelo pacote a bordo) ou *a posteriori* (utilizando órbitas pós-processadas). No segundo caso, os dados são processados de modo a permitir a estimação simultânea da posição dos radiofaróis, das órbitas e de outros parâmetros dinâmicos. A posição dos radiofaróis DORIS é conhecida com uma precisão média de 1-2 cm (dados relativos a 1998).

4. DETERMINAÇÃO DE ÓRBITAS

O sistema DORIS proporciona 3 tipos de órbitas: “tempo-real”, operacional e de precisão.

Os receptores DORIS mais recentes, tais como os que equipam o SPOT4, incluem software para determinação de órbitas em “tempo-real”, denominado *DIODE (Détermination Immédiate d'Orbite par Doris Embarqué)*. A incerteza deste tipo de órbitas é inferior a 4 m (r.m.s.), para qualquer das componentes do vector de posição e inferior a 0.4 cm/s (r.m.s.) para o vector de velocidade. Este tipo de órbitas é essencialmente utilizado pela instrumentação e/ou em experiências a bordo do satélite, que não necessitem de grande rigor de posicionamento.

As órbitas do tipo operacional são calculadas pelo centro de controlo e processamento de dados (CNES). A incerteza para a componente radial proporcionada por este tipo de órbitas é inferior a 10 cm (emq), com base em 3-4 horas de dados e inferior a 4 cm (emq) para 3 dias de dados.

As órbitas de precisão são calculadas pelo Serviço de Determinação de Órbitas Precisas, localizado no CNES. Têm uma incerteza interna inferior a 2.5 cm (emq), para a componente radial, mas só estão disponíveis cerca de um mês após o dia de observações (este atraso é devido essencialmente à necessidade de obtenção de parâmetros de fluxo solar e parâmetros de orientação da terra). Tendo como base estudos comparativos com SLR, pode-se afirmar que a exactidão das órbitas determinadas para o satélite TOPEX/Poseidon é de cerca de 2-3 cm. As órbitas SPOT têm uma incerteza superior (5-6 cm).

5. APLICAÇÕES

Embora o sistema DORIS tenha sido desenvolvido com o objectivo principal de determinar órbitas de precisão para satélites de baixa altitude, a grande cobertura global e qualidade de posicionamento permite a sua aplicação em muitas outras áreas científicas, tais como a modelação da atmosfera (ionosfera e troposfera), o controlo de fenómenos naturais (deslizamentos de terra, vulcões, glaciares), a geodinâmica (controlo de movimentos intra-crustais e de placas tectónicas) e o controlo do movimento de rotação da Terra. O DORIS faz parte do grupo de técnicas espaciais adoptadas pelo IERS no estabelecimento e manutenção dos sistemas de coordenadas terrestres (muitos dos radiofaróis DORIS foram posicionados em colocação com outras técnicas espaciais). O sistema DORIS contribui ainda uma melhor compreensão do campo gravítico terrestre, dado que é utilizado por muitos satélites de baixa altitude.

6. MEDIÇÕES DOPPLER

Um sinal electromagnético transmitido a uma frequência constante, f_T , é recebido por um dado receptor com uma frequência, f_R , que varia consoante a velocidade relativa entre o emissor e o receptor (devido ao efeito Doppler), e que é expressa pela seguinte equação:

$$f_R \approx f_T \left(1 - \frac{1}{c} \dot{s} \right) \quad (1)$$

onde s é a distância transmissor-receptor, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo e $\dot{s} = ds/dt$. Esta aproximação é válida para $\dot{s} \ll c$, e constitui uma aproximação à expressão exacta dada pelas teorias relativistas. Embora a frequência recebida possa ser medida directamente e \dot{s} possa ser determinado – e subsequentemente integrado para se obter a distância transmissor-receptor s – obtêm-se medições Doppler mais precisas (**contagem Doppler**) integrando a diferença entre uma determinada frequência de referência gerada pelo receptor f_0 ($\approx f_R$) e a frequência recebida:

$$D = \int_t^{t+\Delta t} (f_0 - f_R) dt, \quad (2)$$

onde t é a variável tempo, dada numa escala de tempo mantida pelo receptor, e Δt é o período de integração. As medições Doppler podem ser instantâneas, integradas e continuamente integradas.

As medições Doppler instantâneas são pouco utilizadas, uma vez que são pouco precisas. As medições Doppler integradas utilizam os sinais horários emitidos pelos radiofaróis como limites de integração na Equação (2); se adicionarmos contagens consecutivamente obtemos as medições Doppler continuamente integradas.

Consideremos um sinal horário emitido pelo transmissor num dado instante t_j . Esse sinal será detectado no receptor num dado instante τ_j , tal que:

$$\tau_j = t_j + \Delta t_j. \quad (3)$$

onde Δt_j é o tempo de trajecto, ou seja, se \mathbf{s}_j for o vector de posição do emissor na época t_j , \mathbf{s}_i o vector de posição do receptor na época τ_j , a distância s_{ij} envolvida nas medições Doppler é dada por

$$s_{ij} = \|\mathbf{s}_j - \mathbf{s}_i\| \quad (4)$$

e

$$\Delta t_j = \frac{s_{ij}}{c}. \quad (5)$$

Se considerarmos como período de integração duas épocas τ_j e τ_k , tem-se:

$$D_{jk} = \int_{\tau_j}^{\tau_k} (f_0 - f_R) d\tau \quad (6)$$

ou

$$D_{jk} = \int_{\tau_j}^{\tau_k} f_0 d\tau - \int_{\tau_j}^{\tau_k} f_R d\tau. \quad (7)$$

Se assumimos que a frequência de referência é constante, do primeiro integral resulta:

$$\int_{\tau_j}^{\tau_k} f_0 d\tau = f_0 (\tau_k - \tau_j) = f_0 (t_k + \Delta t_k - (t_j + \Delta t_j)) = f_0 (t_k - t_j) + f_0 (\Delta t_k - \Delta t_j). \quad (8)$$

Usando a Equação (5), obtemos:

$$\int_{\tau_j}^{\tau_k} f_0 d\tau = f_0 (t_k - t_j) + \frac{f_0}{c} (s_{ik} - s_{ij}), \quad (9)$$

pelo que

$$D_{jk} = f_0(t_k - t_j) + \frac{f_0}{c}(s_{ik} - s_{ij}) - \int_{\tau_j}^{\tau_k} f_R d\tau. \quad (10)$$

Dado que o número de ciclos recebidos num determinado intervalo é constante (conservação das frentes de onda), o número de ciclos recebidos entre os instantes τ_j e τ_k é igual ao número de ciclos transmitidos entre os instantes t_j e t_k , pelo que o segundo integral na Equação (7) pode ser reformulado:

$$\int_{\tau_j}^{\tau_k} f_R d\tau = \int_{t_j}^{t_k} f_T dt = f_T(t_k - t_j) \quad (11)$$

Substituindo na Equação (10), vem:

$$D_{jk} = (f_0 - f_T)(t_k - t_j) + \frac{f_0}{c}(s_{ik} - s_{ij}), \quad (12)$$

expressão que representa a **contagem Doppler** medida (número de ciclos de desvio Doppler ou frequência de batimento para um determinado intervalo de integração). Nesta expressão, o intervalo de tempo $(t_k - t_j)$ é conhecido (obtido a partir da informação enviada pelos radiofaróis), a diferença de frequências $(f_0 - f_T)$ é constante, D_{jk} é a observável e $(s_{ik} - s_{ij})$ é a variação de distâncias, que se pretende determinar.