



FACULDADE • DE • CIÊNCIAS UNIVERSIDADE • DE • LISBOA



VLBI



V. B. Mendes

1. INTRODUÇÃO



A técnica de interferometria remonta ao início da radioastronomia, nos anos 1930, com a descoberta de sinais de rádio extraterrestres. As primeiras antenas direccionais construídas para localizar fontes de rádio tinham uma resolução angular de 30° , mas já permitiam a identificação dos

centros galácticos, que emitem sinais de rádio. Para comparar as observações rádio com observações ópticas era necessário melhorar o poder de resolução dos sistemas receptores para um nível semelhante ao dos telescópios ópticos. A dificuldade inerente a esta tarefa foi desde logo notória: a resolução angular de um radiotelescópio, em radianos (ε), é aproximadamente igual à razão entre o comprimento de onda dos sinais a serem recebidos (λ) e o diâmetro da antena (d) desse sistema:

$$\varepsilon \cong \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

Dado que os comprimentos de onda dos sinais de rádio utilizados variam entre poucos centímetros e alguns metros, enquanto que os comprimentos de onda ópticos são da ordem dos 5×10^{-7} m, para receber uma radiação de 3 cm de comprimento de onda, com a mesma resolução de um telescópio óptico de 15 cm, a antena rádio teria que ter 10 km de diâmetro, um problema de difícil resolução.

A solução para tal problema veio a estar na interferometria. Com a interferometria, a resolução angular é indirectamente conseguida utilizando sinais de rádio obtidos em duas antenas separadas por uma grande distância. Desta forma, a principal limitação à resolução angular é a distância entre as antenas e não o tamanho de cada antena.

A próxima dificuldade viria a estar relacionada com o estabelecimento da comunicação entre as antenas. Os interferómetros necessitavam do estabelecimento de comunicação em “tempo real”, para transmissão dos sinais de uma antena para a outra; os problemas técnicos associados a estas ligações limitavam a separação das antenas às dezenas de quilómetros. Estes primeiros sistemas constituíram a interferometria rádio com elementos de ligação (CERI – *Connected Element Radio Interferometry*).

O problema da limitação da separação das antenas só viria a ser ultrapassado com a **interferometria de bases muito longas** (VLBI – *Very Long Baseline Interferometry*). Com a técnica VLBI, a dificuldade da transmissão em tempo real dos sinais de uma estação para outra é ultrapassada utilizando relógios atómicos em cada uma das estações.

Os relógios atómicos controlam os osciladores locais que são responsáveis pela conversão dos sinais de rádio para uma frequência intermédia, que é usada para registo das observações em sistemas de gravação digital. Assim, em vez de transmitir sinais de rádio de uma antena para outra em tempo real, torna-se apenas necessário transportar os registos magnéticos obtidas em cada estação para um centro de análise e processamento.

As primeiras medições com VLBI foram feitas em 1967, simultaneamente por duas equipas de investigação dos EUA e uma do Canadá. Inicialmente usada para estudo da estrutura das fontes das ondas de rádio, foi rapidamente adoptada para posicionamento (quer das fontes de rádio quer de pontos à

superfície terrestre), movimento do pólo, duração do dia e marés terrestres. A VLBI é reconhecida como sendo a técnica espacial mais precisa e exacta, em estudos globais de geodinâmica.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um sistema VLBI consiste essencialmente de um conjunto de pelo menos dois radiotelescópios, que observam simultaneamente a mesma fonte de rádio, dois relógios atómicos e duas unidades de registo. As antenas podem estar separadas vários milhares de quilómetros, dado que não necessitam qualquer ligação física.

Em cada estação, o radiotelescópio recebe o sinal de uma fonte de rádio – quasar (fontes de rádio quase-estelares) ou outra fonte extragaláctica-, que é depois convertido para uma frequência inferior (frequência intermédia). Dado que o do sinal das fontes rádio utilizadas é extremamente fraco, a VLBI requer a utilização de telescópios de grande diâmetro (que variam entre a dezena e as centenas de metros).

Um relógio atómico (maser de hidrogénio) fornece uma frequência de referência precisa para os osciladores dos receptores locais. Os sinais recebidos são combinados com um sinal gerado pelo oscilador do receptor, de frequência próxima do sinal que se pretende receber, de modo a gerar a frequência de batimento. As amostras digitalizadas da frequência intermédia são registadas em fita magnética, e devidamente identificadas com o tempo de referência dado pelo relógio atómico. Posteriormente, as fitas magnéticas gravadas nas diversas antenas são enviadas para um centro de análise e processamento (ver Figura 1).

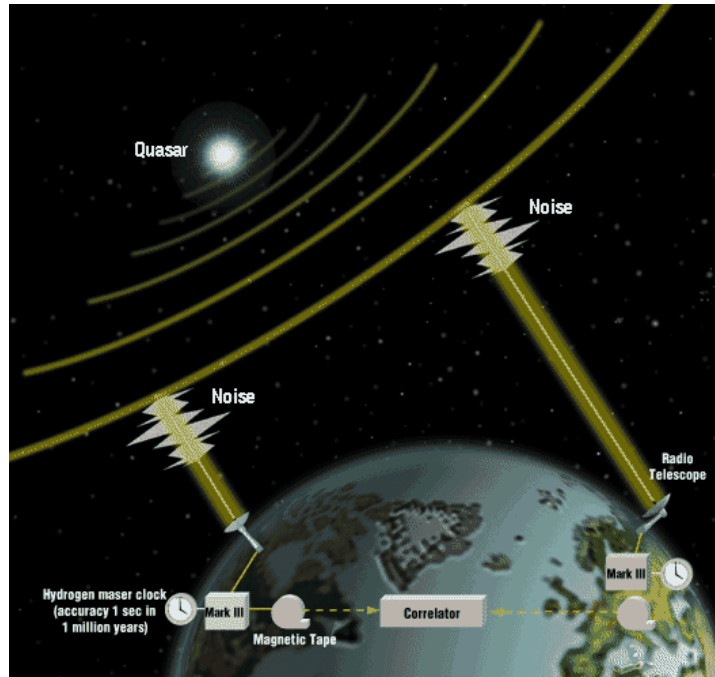


Figura 1 – Princípio de funcionamento da técnica VLBI.

Ao longo do tempo, têm sido utilizados vários tipos de **sistemas de aquisição de dados VLBI**: Mark-I, Mark-II, Mark-III, Mark-IV e Mark-V.

Os centros de análise VLBI possuem geralmente um terminal de aquisição e registo de dados, sistema de pré-processamento por correlação cruzada (correlador), bases de dados e sistema interactivo de análise por computador.

O terminal de aquisição de dados é um sistema de digitalização, formatação e registo de dados de banda muito larga. Associado ao terminal de aquisição de dados encontra-se um maser de hidrogénio.

O correlador (Figura 2) é responsável pela correlação dos dados das fitas magnéticas. Este processo é controlado por computador, que mantém a sincronização das fitas magnéticas. Os dados de calibração e da correlação cruzada gravados em disco são finalmente utilizados no sistema interactivo de análise por computador.

O sistema interactivo de análise por computador faz a análise do atraso de grupo e variação do atraso de grupo (ver observáveis VLBI) e dos dados de calibração, para produzir os valores dos parâmetros geodésicos e astrométricos de interesse.

O sistema **Mark-I** foi usado durante 1972-1978 e é caracterizado pelo registo de frequência única (banda X) e uma largura de banda de registo de 360 kHz.

O sistema **Mark-II** registava observações em ambas as bandas e podia gravar numa largura de banda de 2 MHz.

O sistema **Mark-III** foi introduzido em 1978 e tem a capacidade de registar em 28 canais diferentes de 2 MHz de largura de banda.

Uma versão melhorada do sistema Mark-III, denominada **Mark-IIIA** foi introduzida em 1985. Este sistema possui um gravador de fita de alta densidade, que reduz significativamente a quantidade de fita necessária ao registo de observações, permitindo uma maior taxa de gravação de dados para obter uma melhor relação sinal-ruído.



Figura 2 – Correladores VLBI.

O sistema **Mark-IV** constitui uma evolução do sistema Mark-III, permitindo melhor compatibilidade de dados com outros sistemas e um aumento significativo na taxa de gravação de dados. O sistema **Mark V** é o sistema mais recente. Este sistema é baseado em componentes de baixo custo utilizados em PCs, com suporte de taxas de dados até 1024 Mbps, registados em discos do tipo IDE, de baixo custo.

3. OBSERVÁVEIS VLBI

As observáveis básicas da técnica VLBI são: (1) a diferença nos tempos de chegada em duas antenas do sinal de uma fonte rádio (geralmente um quasar ou outra fonte extragaláctica), denominado **atraso de grupo**; (2) a variação temporal desta diferença de tempo, denominada **variação do atraso**. A variação temporal do atraso de tempo é devida inteiramente ao movimento da terra, dependendo, no entanto, da localização da fonte e do vector base formado pelos dois radiotelescópios.

A medição do **atraso de fase** pode também ser obtida, mas tal como no caso do GPS, é uma medição ambígua. Dadas as características dos sinais usados em VLBI, a resolução das ambiguidades é de difícil concretização, pelo que o atraso de grupo é usado quase em exclusivo.

Para obter uma boa precisão na medição do atraso de grupo é necessário fazer medições simultâneas de atraso de fase numa banda de frequências larga, dado que a incerteza do atraso de grupo é inversamente proporcional a esta largura de banda. Na prática, apenas uma banda relativamente estreita de frequências pode ser gravada. Contudo, esta banda pode ser dividida em bandas mais estreitas, que podem por sua vez ser distribuídas numa banda mais larga, técnica conhecida por **síntese de largura de banda** (*bandwidth-synthesis*). As bandas de frequência utilizadas em VLBI são centradas em $\cong 8.4$ GHz (banda X das microondas, $\lambda \cong 4$ cm) e $\cong 2.3$ GHz (banda S das microondas, $\lambda \cong 15$ cm).

Dentro de cada banda de frequências, os dados são obtidos em 4 a 8 canais, com larguras de banda de 2 MHz. Os canais das bandas S e X são úteis na elaboração de combinações lineares que eliminem o efeito de primeira ordem do atraso ionosférico, de forma idêntica à descrita para o GPS.

As observações VLBI de atraso de grupo são compostas de três componentes. A componente principal é o **atraso geométrico**, dado pelo seguinte produto interno:

$$\tau_g = -\frac{\mathbf{B}}{c} \cdot \mathbf{s} \quad (2)$$

onde \mathbf{B} é o vector base que liga dois radiotelescópios, \mathbf{s} é o vector unitário na direcção da fonte rádio e c a velocidade de propagação da luz no vácuo. Esta componente é devida à geometria da localização das estações e da fonte rádio e contém, por isso, toda a informação geodésica e astrométrica de interesse.

A segunda componente é devida aos diversos efeitos instrumentais, em particular os associados aos erros dos relógios.

A terceira componente é devida aos efeitos do meio de propagação, em particular a troposfera. Assim, a equação de observação pode ser escrita sob a forma:

$$\tau_g = -\frac{\mathbf{B}}{c} \cdot \mathbf{s} + d\tau_{\text{inst}} + d\tau_{\text{trop}} \quad (2)$$

A equação de variação do atraso de grupo será:

$$\dot{\tau}_g = -\frac{\dot{\mathbf{B}}\mathbf{s} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{s}}}{c} \quad (4)$$

4. FONTES DE ERRO

Os erros que afectam as observações VLBI incluem os erros nos sistemas de aquisição e os erros de propagação do sinal.

Os sistemas de aquisição VLBI apresentam, tal como qualquer sistema receptor, um ruído associado, proveniente de perdas resistivas em circuitos e perdas por absorção, entre outras causas. Este **ruído do receptor**, é actualmente bastante reduzido (poucos mm) e poderá vir a tornar-se desprezável em sistemas futuros. É usual distinguir do ruído do receptor o **erro instrumental**, de características quasi-aleatórias, que está relacionado com o processo de correlação e intermodulação. Este erro é da ordem dos 2-4 mm.

Nas antenas de maiores dimensões há que ter em consideração **variações na localização da intersecção dos eixos**, devido a expansão das torres. De um modo geral, estas modificações podem ser modeladas rigorosamente.

O tempo é o factor mais importante no processo de observação e processamento VLBI e os **erros dos relógios** deverão ser extremamente pequenos. A correlação dos dados gravados e o relacionamento das observações a uma época única só é possível graças à estabilidade dos relógios atómicos usados.

O comportamento de um maser de hidrogénio é normalmente estimado com os parâmetros geodésicos. De um modo geral, a determinação dos coeficientes de um polinómio de primeiro ou segundo grau é suficiente para representar o comportamento relativo dos relógios nas diferentes estações, visto que as variações relativas dos dois relógios são bastante regulares:

$$d\tau_{\text{inst}} = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2. \quad (5)$$

O quadro seguinte compara a estabilidade dos diferentes relógios atómicos que suportam as diferentes técnicas espaciais.

Tabela 1 – Estabilidade de alguns relógios atômicos.

| Relógio | Estabilidade 1 dia | estabilidade 10 dias |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Rubídio | 10^{-12} | 10^{-11} |
| Césio | 10^{-13} | 10^{-13} |
| Maser de Hidrogénio | 10^{-14} | 10^{-13} |

Tal como o GPS, a VLBI usa sinais de rádio (da banda das microondas) como fonte de informação (neste caso como fonte de “ruído”, dado não existir nenhum código modulado). Desta forma, as técnicas de modelação descritas para o GPS são válidas para a VLBI. A **ionosfera** é corrigida usando combinações lineares de observações em ambas as bandas de frequência (S e X). A modelação da **troposfera** constitui o factor mais limitativo na precisão da VLBI, tal como acontece com o GPS. A técnica mais utilizada na modelação da troposfera é a determinação estocástica do atraso troposférico zenital. As funções de mapeamento usadas são as mesmas usadas em GPS.

5. APLICAÇÕES

A técnica VLBI constitui a técnica espacial mais precisa. A precisão obtida em aplicações de rotina pode ser descrita pela equação seguinte:

$$\sigma = 5 \text{ mm} + 2 \times 10^{-9} B \quad (6)$$

onde B é o comprimento da base.

As **aplicações** mais usuais da VLBI são as seguintes:

- medições globais do movimento de placas tectónicas
- medição de deformações associadas a sismos
- rotação da terra
- variações diurnas e semi-diurnas da rotação da terra

As **vantagens** inerentes à utilização da VLBI podem resumir-se da seguinte forma:

- proporciona uma ligação rigorosa entre os sistemas de referência terrestre e o sistema quasi-inercial associado aos quasares extragalácticos. A VLBI é a única técnica que possui esta característica, o que a torna essencial no controlo a longo prazo da rotação da terra (UT1)
- a VLBI e a SLR são as técnicas mais precisas na medição de bases muito longas (maiores do que 1000 km)
- flexível na selecção da geometria das observações, de modo a satisfazer condições geométricas específicas
- operação independente das condições atmosféricas

As principais **desvantagens** são:

- precisão afectada pelo comportamento do vapor de água (atraso troposférico)
- não pode medir o campo gravítico da terra
- custos do sistema e da sua operação muito elevados

6. SOFTWARE

Existem hoje em dia vários programas para análise de dados VLBI: CALC/SOLV (GSFC/NASA), MODEST (desenvolvido pelo JPL), OCCAM (Universidade Técnica de Viena), entre outros.