



FACULDADE • DE • CIÊNCIAS UNIVERSIDADE • DE • LISBOA



SLR



V. B. Mendes

1. INTRODUÇÃO



A medição de distâncias para satélites (incluindo a Lua) usando laser, designadas abreviadamente SLR (*Satellite Laser Ranging*) e LLR (*Lunar Laser Ranging*), consoante o alvo é um satélite artificial ou a Lua, consiste basicamente na medição do tempo gasto por um pequeno pulso de

energia para percorrer o trajecto de ida e volta entre uma dada estação terrestre e um satélite equipado com espelhos retroreflectores. O sucesso desta técnica deve-se essencialmente às características particulares da fonte de luz utilizada (laser), em termos de coerência, intensidade, direccionalidade e largura de banda, entre outras.

O que se convencionou designar por laser, e que constitui um acrónimo anglo-saxónico para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou seja, amplificação da luz por emissão estimulada de radiações, é um instrumento que produz um feixe intenso e estreito de luz coerente (i.e., os fotões emitidos pela fonte estão em fase) monocromática.

A acção de um laser baseia-se na mecânica quântica. Um fotão pode ser absorvido por um átomo se e só se a sua energia corresponde à diferença de energia entre um nível de energia do átomo e um do estado excitado disponível. Se o átomo já estiver no estado excitado, ele pode saltar espontaneamente para o estado de energia inferior com a emissão de um fotão. Contudo, se um fotão com a mesma frequência ataca o estado excitado, pode estimular o átomo para fazer a transição para o estado inferior (emissão estimulada). Como resultado, para além de termos ainda o fotão original, teremos ainda um segundo fotão com a mesma frequência, exactamente em fase.

De um modo geral, a maioria dos átomos está num estado inferior, pelo que os fótons incidentes serão normalmente absorvidos. Para obter luz coerente a partir de emissões estimuladas é necessário: (1) que os átomos do material usado num laser sejam excitados para um estado de maior energia; (2) que este estado seja metaestável. Por outras palavras, para obter uma emissão mais intensa que a absorção é necessário “inverter a população”, isto é, elevar os electrões para um nível superior de forma a que a emissão de fótons predomine sobre a absorção e os electrões deverão manter-se neste nível superior mais tempo do que o normal, de modo que a transição para um estado inferior se faça por emissão estimulada, em vez de espontaneamente.

A excitação de átomos num laser pode ser feito de formas diferentes. Num laser de rubi, o material usado é uma barra de rubi que consiste de Al_2O_3 , com uma pequena percentagem de átomos de Alumínio substituída por átomos de Crómio. Os átomos de Crómio são excitados por *flashes* de luz fortes (com um comprimento de onda de 550 nm), através de um processo conhecido por bombeamento óptico. Num laser de Hélio-Néon, o material usado é um gás, uma mistura de cerca de 15% Hélio e 85% Néon. Neste tipo de laser, os átomos são excitados através da aplicação de uma voltagem elevada, de modo a originar uma descarga eléctrica dentro do próprio gás. Durante este processo, alguns dos átomos de Hélio são elevados ao estado metaestável. A excitação dos átomos pode ser feita continuamente ou por pulsos. Num laser de pulsos, os átomos são excitados através do fornecimento periódico de energia; a multiplicação de fótons continua até que todos os átomos tenham sido estimulados e transferidos para o nível de energia inferior, sendo este processo repetido por cada pulso. Num laser contínuo, a entrada de energia é contínua, de modo que, à medida que são estimulados para serem transferidos para o nível de energia inferior, sofram de nova excitação que os devolva ao nível superior. Em qualquer dos casos, o laser converte parte da energia que é introduzida num feixe estreito intenso de luz coerente de frequência única (ou de várias frequências distintas).

A Geodesia Espacial utilizou inicialmente laser de rubi, que equipava os sistemas SLR da primeira e segunda geração, e depois os laser de Nd-YAG (Neodímio – Ítrio-Alumínio-Granada).

2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO SLR

A medição de distâncias para satélites começou nos anos 1960s, atingindo precisões da ordem de alguns metros, e tem-se desenvolvido nas últimas décadas de modo surpreendente, alcançando hoje precisão milimétrica (Figura 1).

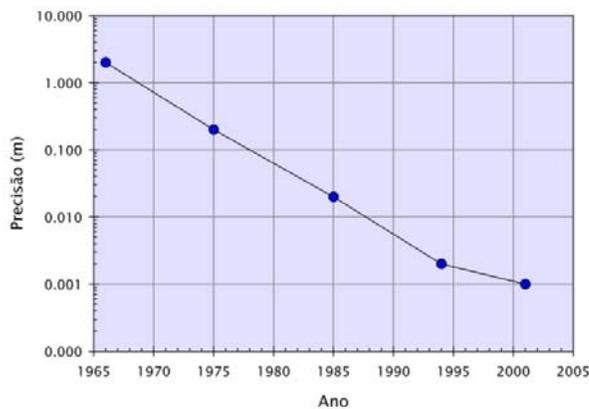


Figura 1 – Evolução da precisão SLR

A primeira série de medições SLR foi feita em 1965 para o satélite *Explorer-B*, com precisão métrica. Estas medições eram cerca de uma ordem de magnitude mais precisas que qualquer outra técnica então existente para medições globais de distâncias. Com o lançamento do satélite LAGEOS-1 (*Laser Geodynamics Satellite*) surgem os primeiros resultados de grande interesse para a geodinâmica. Em 1979, todas as estações SLR apresentavam precisões decimétricas. Em 1980 surge o primeiro SLR móvel, desenvolvido pela Universidade do Texas. Desde o lançamento do LAGEOS-1, em 1976, têm-se

3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O pulso laser, cujo disparo é accionado por um relógio atómico, é emitido através da óptica de transmissão. Parte do pulso é desviado para um fotodíodo que, por sua vez, faz iniciar um sistema de controlo do intervalo de tempo. Detecta-se o centróide do pulso transmitido e regista-se no computador a posição desse centróide. O pulso de retorno é recolhido por um telescópio receptor que, após amplificação num fotomultiplicador, faz parar o sistema de controlo do intervalo de distância (Figura 3). Simultaneamente é necessário analisar a forma da onda, dado que o pulso foi modificado em amplitude e forma, com grandes flutuações em intensidade. A posição do centróide é determinada recorrendo a um digitalizador.

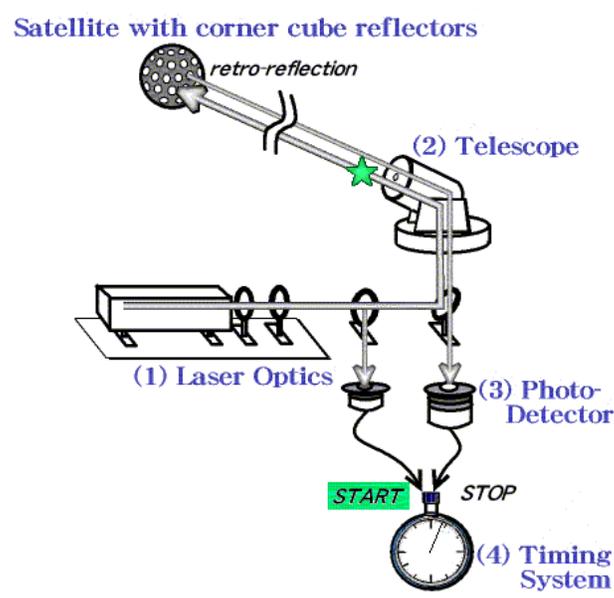


Figura 3 – Princípio de funcionamento do SLR.

A **equação de observação** para observações SLR e LLR é dada por:

$$d = \frac{\Delta t}{2} c \quad (1)$$

onde Δt é o tempo de trajecto do pulso laser (ida e volta) e c a velocidade de propagação da luz.

Os sistemas operacionais SLR são geralmente classificados em gerações, de acordo com a nível de precisão proporcionado e a própria concepção do sistema.

A **primeira geração** de sistemas usavam pulsos de 10 a 40 ns, a que correspondia uma precisão de 1-6 m na medição de distância. Usavam quase em exclusivo laser de rubi.

A **segunda geração** usava comprimentos de pulso de 2 a 5 ns, a que correspondia uma precisão de 30 a 100 cm na medição de distância.

A **terceira geração** usa pulsos de 0.1 a 0.2 ns e possui a possibilidade de detectar um único fóton. Contrariamente às gerações anteriores, o laser usado é o Nd-YAG.

4. SATÉLITES EQUIPADOS COM REFLECTORES LASER

Actualmente existe um grande número de satélites equipados com **retroreflectores**, reflectores especialmente concebidos para devolver o pulso recebido exactamente na direcção de incidência (ver Figura 4). No entanto, o número de satélites criados com a finalidade de suportar a técnica SLR é mais reduzido (ver Tabela 1; uma lista completa de satélites com ligação à técnica SLR está disponível em http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_list.html).



Figura 4 – retroreflector usado no satélite ENVISAT.

O satélite **STARLETTE** foi lançado em 1975 pelo Centro Nacional de Estudos Espaciais (CNES - *Centre National d'Études Spatiales*), localizado em Toulouse, França. O STARLETTE possui um raio de 12 cm e um núcleo de Urânio, apresentando deste modo uma alta relação massa/área. Estas propriedades minimizam a influência das forças perturbadoras (pressão de radiação solar directa e indirecta, resistência do ar, etc) que actuam sobre o satélite e permitem que estas possam ser modeladas de forma precisa. É coberto por 60 retroreflectores.

O satélite **LAGEOS-1** (*LAser GEOdynamics Satellite*) foi lançado pela NASA em 1976. As propriedades deste satélite são muito semelhantes às do STARLETTE. Devido à sua maior altitude, a órbita do LAGEOS é menos sensível à resistência atmosférica do que o STARLETTE. O satélite é esférico (raio de 30 cm) e de alta densidade, pesando 411 kg. É coberto com 426 reflectores laser. Um segundo satélite da série LAGEOS, LAGEOS-2 (Figura 5), apresentando características idênticas às do LAGEOS-1 foi lançado em 1992, numa iniciativa conjunta NASA/Agência Espacial Italiana.

Com o objectivo de permitir não só a medição de distâncias mas também medições de direcções fotográficas, o Japão lançou em 1986 o satélite **AJISAI**. Este satélite esférico, de 107 cm de raio e uma massa de cerca de 685 kg, transporta 120 retroreflectores laser e apresenta uma relação massa/área menos favorável que o LAGEOS ou STARLETTE.

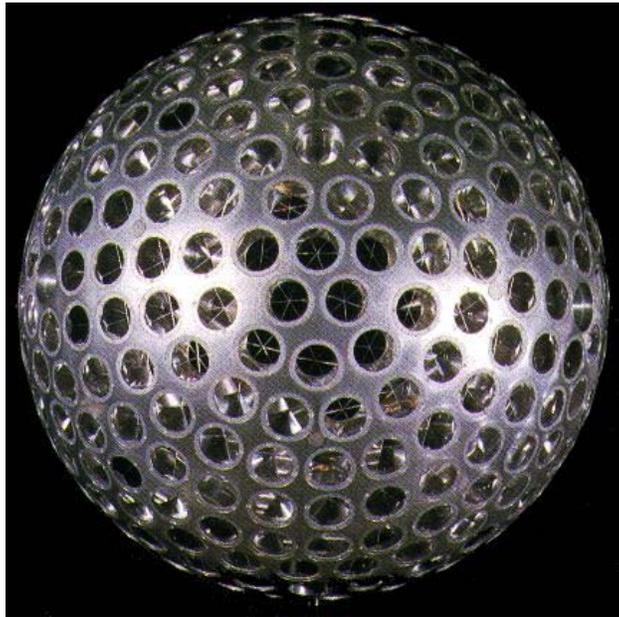


Figura 5- LAGEOS II

Com o objectivo principal de determinar a pressão de radiação solar, necessária ao controlo orbital para os satélites GLONASS, a ex-URSS lançou em 1989 dois satélites equipados com retroreflectores, o **ETALON-1** e **ETALON-2**. Estes satélites estão colocados em órbitas mais altas do que os restantes satélites SLR, são bastante maiores (raio de 0.647 m) e têm uma massa de 1415 kg.

Em 1993 foi lançado um satélite de características semelhantes ao STARLETTE, o STELLA.

Tabela 1 - Satélites equipados com retroreflectores SLR.

SATÉLITE	Raio (m)	Massa (kg)	Nº ref.	Ano	a (km)	e	I (°)
STARLETTE	0.12	47.25	60	1975	7331	0.021	49.8
LAGEOS-1	0.30	411	426	1976	12270	0.004	109.8
AJISAI	1.07	685	120	1986	7869	0.001	50.0
ETALON-1	0.647	1415	2000	1989	25500	0.001	64.9
ETALON-2	0.647	1415	2000	1989	25500	0.001	65.4
LAGEOS-2	0.30	405	426	1992	12270	0.004	52.6
STELLA	0.12	48.98	60	1993	7371	0.001	98.0

5. FONTES DE ERRO

O SLR é afectado por erros instrumentais, relacionados com o sistema emissor e reflector, e por erros de propagação das ondas.

A precisão de uma medição SLR depende muito da precisão de calibração do sistema e da capacidade de medir a posição do pulso de retorno.

A **calibração** dos atrasos electrónicos dentro do transmissor e receptor é geralmente feita numa distância conhecida, antes e após a passagem do satélite. Os sistemas modernos apresentam uma estabilidade de calibração inferior a 1 ns. Em alguns sistemas, os atrasos electrónicos são constantemente controlados durante a passagem do satélite.

Uma medição de tempo de trajecto ida e volta com a precisão de 1 ns resulta numa medição equivalente de distância com precisão equivalente de 15 cm. O tamanho do pulso transmitido é geralmente da ordem dos poucos

nanossegundos, mas se o pulso mantiver a sua forma durante o trajecto, é possível medir o tempo de trajecto com uma precisão de cerca de 0.1 ns. Para satélites próximos da Terra, o número de fótons no pulso de retorno é usualmente bastante grande, de modo que a forma geral do pulso deverá permanecer bastante estável de uma medição para a outra. No entanto, **distorções da forma do pulso**, introduzidas pelo ruído da electrónica do transmissor e receptor poderá contribuir algumas décimas de um nanossegundo ao erro de observação do tempo de trajecto. O efeito destas distorções tem sido reduzido introduzindo sistemas de processamento do pulso, para os quais o tempo de trajecto é referido aos centros dos pulsos em vez dos extremos. Alternativamente, a duração do pulso de energia pode ser reduzido e alguns dos lasers mais recentes têm pulsos da ordem dos picossegundos..

Os conjuntos de cubos reflectores que equipam os satélites SLR têm a propriedade de reflectir a luz incidente directamente para o transmissor. As características do sinal de retorno dependem da energia incidente nos reflectores (que por sua vez depende da energia transmitida), do número e área coberta pelos reflectores e da divergência do feixe transmitido. A área do telescópio receptor é obviamente um factor importante. Uma outra dificuldade é o chamado **efeito de aberração de velocidade**, provocado pelo movimento do satélite. Devido a este facto, o raio reflectido é ligeiramente deslocado em relação ao raio transmitido. Isto pode ser atenuado com uma escolha criteriosa do tamanho individual de cada cubo reflector.

É também necessário efectuar uma correcção adicional para referir as observações ao centro de massa do satélite; a **correcção ao centro de massa** é dependente da geometria do conjunto de reflectores e da orientação deste relativamente à direcção do pulso. Esta correcção é bastante exacta e independente da orientação para os satélites geralmente usados em SLR (como o LAGEOS e o STARLETTE, por exemplo).

Tal como noutras técnicas espaciais, o **atraso troposférico** é o principal factor limitativo na precisão da técnica SLR. No entanto, para esta técnica, o principal erro advém da componente seca do atraso troposférico (que é um meio dispersivo para a região óptica do espectro electromagnético). As frequências usadas (banda óptica) são relativamente insensíveis às componentes mais dinâmicas da atmosfera: ionosfera e vapor de água. O modelo usado quase em exclusivo pela comunidade SLR para corrigir o atraso troposférico é o de Marini-Murray [1973]. A Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa propôs recentemente novas funções de mapeamento, que conduzem a melhores soluções [Mendes et al., 2002; Mendes and Pavlis, 2004]. A próxima geração de sistemas SLR poderão determinar directamente o atraso de propagação atmosférica usando tecnologia de duas cores laser (dois comprimentos de onda diferente), o que irá certamente contribuir numa redução significativa do erro associado à determinação do atraso atmosférico.

6. APLICAÇÕES

O lançamento do STARLETTE e LAGEOS marcaram o início de uma nova era na geodesia espacial. A maior parte da informação geodésica obtida via SLR é proveniente de medições para estes dois satélites, em particular para o LAGEOS. Desde finais da década de 1980 que a generalidade dos sistemas SLR operacionais têm obtido precisões de disparo único entre 7 e 10 mm (emq) para estes satélites. Esta precisão aumenta para 1 - 3 mm, quando se usam os chamados **pontos normais**. Os pontos normais constituem amostras (médias temporais), geralmente abrangendo intervalos de 2 minutos de dados de disparo único, e são concebidos de forma a reduzir estatisticamente os erros aleatórios e o tempo de cálculo computacional.

Actualmente existem várias dezenas de estações que efectuem regularmente medições SLR. Esta técnica fornece a principal ligação entre o ITRF e as várias missões altimétricas aerotransportadas, destinadas a estudar a topografia

oceânica. A combinação de dados de microondas, geralmente utilizadas nestas missões, com as órbitas de precisão derivadas de SLR, permitem a calibração do altímetro a bordo e exprimir os dados topográficos no contexto do ITRF, melhorando significativamente a capacidade de controlo da circulação geral dos oceanos, nível médio dos mares, etc. A SLR suporta as missões ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite 1*), TOPEX/Poseidon e GEOSAT.

Para além das estações fixas, foram desenvolvidos 7 sistemas transportáveis (EUA (4), Alemanha, Holanda e Japão).

A SLR tem contribuído significativamente nos seguintes **domínios de aplicações**:

- Modelos de força (GM, campo gravítico terrestre, marés, etc)
- Estabelecimento de sistemas de referência
- Rotação da Terra (movimento do pólo, duração do dia (UT1), precessão e nutação)
- Posicionamento

Relativamente às outras técnicas espaciais, a SLR apresenta as seguintes **vantagens**:

- capacidade de proporcionar medições rápidas, comparativamente ao VLBI, por exemplo, que necessita software complicado para produzir as medições de atraso de tempo. Este facto torna a técnica muito útil para observações do movimento do pólo;
- estabilidade de medições a longo prazo relativamente ao centro de massa da terra;
- pouca sensibilidade à generalidade dos componentes dinâmicos da atmosfera (ionosfera e vapor de água troposférico);
- medições usando várias cores (comprimentos de onda) permitirá medir directamente a atmosfera seca para correcção da refacção;

- medições de longo período e variações seculares do campo gravítico terrestre;
- longevidade dos satélites reflectores.

As principais **desvantagens** são:

- estimativas dos parâmetros geodésicos sensíveis aos erros das órbitas dos satélites;
- custos de operação elevados;
- medições seriamente dependentes das condições atmosféricas, limitando a localização e tempo de ocupação das estações.