

Procura de local para um radiotelescópio na ilha da Madeira

Pedro Augusto^{1,2}

1. Centro de Competências das Ciências Exactas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Caminho da Penteada, 9000-390 Funchal

2. Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa, Observatório Astronómico, Tapada da Ajuda, 1349-018 Lisboa

augusto@uma.pt

Resumo

Um radiotelescópio na ilha da Madeira é uma grande oportunidade para aumentar a qualidade das observações em *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), as do European VLBI Network (EVN) em particular. Permitirá reduzir a antiga e infame “falha do meio-Atlântico” que está presente em observações atuais com o VLBI. Entre 2003 e 2007 estudámos em detalhe a meteorologia, interferência rádio e horizonte de três locais candidatos. Dois destes têm um excelente potencial para a instalação de uma antena VLBI.

1. Introdução

Ainda antes do advento da radioastronomia, descobriram-se as ondas rádio, como parte do espectro eletromagnético. Maxwell, em 1864, previu a existência de ondas eletromagnéticas, as quais, entre outras (e.g. visível), incluem as ondas rádio. A produção e deteção destas foram conseguidas por Hertz (entre 1885 e 1889) – e.g. [1].

1.1 Os primórdios

A radioastronomia (e.g. [2]) é uma área técnica da astronomia iniciada “por acidente” por Karl Jansky em 1931 ([3]) quando este detetou o centro da galáxia (comprimento de onda $\lambda=15$ m), ao tentar minimizar o ruído (interferência de rádio-frequência, RFI) em comunicações rádio transatlânticas¹. Foi a primeira vez que sinais fora da Terra foram detetados, mais de 40 anos depois das experiências de Hertz, graças a equipamentos de receção rádio bem mais sensíveis e à escancarada “janela rádio” de mais de três ordens de grandeza em comprimento de onda (1 cm a 20 m; cf. ótico apenas 400–700 nm; Figura 1). As restantes bandas do espectro eletromagnético teriam de esperar mais meio

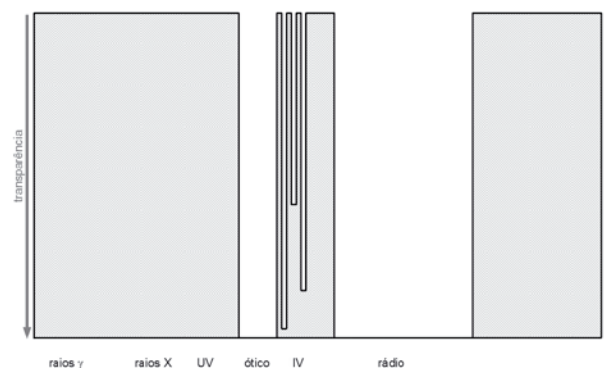


Fig. 1 – A opacidade da atmosfera da Terra ao espectro eletromagnético só permite observar, da sua superfície (linha inferior), as bandas do ótico (visível, 400 a 700 nm) e do rádio (1 cm a 20 m); em montanhas altas é também possível observar algumas bandas dentro do infravermelho. Quanto ao resto, só do espaço, acima da atmosfera.

século para serem exploradas, através de satélites no espaço – e.g. [1,4].

A forte ligação da radioastronomia à tecnologia de ponta levou a mais “acidentes”, o mais famoso dos quais deu direito a um Prémio Nobel: a descoberta do ruído cósmico de fundo por Penzias e Wilson em 1965 [5]. Aliás, quatro Prémios Nobel já foram atribuídos à radioastronomia.

Nas bandas rádio do espectro eletromagnético há fenómenos não detetáveis em nenhuma outra banda². Por isso, a descoberta do “rádio Universo” abriu novas fronteiras à Física. A primeira publicação em radioastronomia data de 1940 [6], mas esta só se afirmou como uma nova ciência em 1951 aqun-

¹ A Física homenageia-o com a unidade fundamental de densidade de fluxo, o Jansky (Jy) que vale 10^{-26} W/m²/Hz.

² A radioastronomia é, por excelência, a ciência dos objetos não-térmicos do Universo (por oposição ao ótico (visível), por exemplo, onde o domínio é térmico, sendo o Sol o objeto mais eloquente) – e.g. [1].

do da publicação da primeira detecção da risca de hidrogénio atómico (21 cm) [7].

1.2 Radiotelescópios

Um radiotelescópio consiste em três partes: antena³, detetor e linha de transmissão (que os liga) – e.g. [1,2]. A antena mais simples é o dipolo de Hertz (e.g. antenas de automóvel; [8]) mas só permite a detecção num único comprimento de onda. Um pouco mais complicada é uma antena do tipo Yagi, como as que ainda se vêem nos telhados de muitas casas, definitivamente “mortas” pela Televisão Digital Terrestre. Estas já detetam vários comprimentos de onda, por disporem de dipolos a variadas distâncias entre si. Redes de milhares/milhões de dipolos são adequadas para a observação em comprimentos de onda longos (Figura 2). O pico de complexidade teórico atinge-se com uma antena de forma parabólica⁴. Mas esta permite detetar quaisquer comprimentos de onda, tão pequenos quanto 20 vezes as imperfeições da sua superfície (a “regra $\lambda/20$ ”, que no ótico corresponde a 92% da radiação chegar ao foco – critério de Rayleigh) – e.g [8]. Hoje em dia é o tipo de radiotelescópio mais comum, devido à sua enorme versatilidade.

Uma parabólica explora o céu em mais detalhe do que os outros tipos pois concentra as ondas rádio incidentes num foco (Figura 3). À capacidade com que o faz chama-se *resolução*, aproximadamente dada (em radianos) pela divisão do comprimento de onda observado (λ) pelo diâmetro (D) da antena parabólica (e.g. [1,8,9]). Como temos 2π radianos numa volta completa, também medida como 360° , obtemos a resolução, em segundos de arco ($''$), dada por $\alpha \approx 206265 \lambda/D$. Este ângulo α é a mínima separação angular que devem ter dois objetos pontuais⁵ no céu para que o radiotelescópio os possa ver separados. O olho humano no seu melhor, com cerca de 8 mm de diâmetro máximo da pupila, resolve objetos no verde (550 nm) desde que $\alpha \geq 14''$. Um telescópio com 8 cm de diâmetro, requer $\alpha \geq 1,4''$. Um dos telescópios do VLT (8 m) com $\alpha \geq 0,014''$. Mas uma parabólica de 8 m, a observar em $\lambda = 5,5$ cm, será cem mil vezes pior, com $\alpha \geq 1400'' \approx 0,4^\circ$. Foi este, durante quase 50 anos, o dilema da radioastronomia, até à chegada em pleno da interferometria (Secção 1.3).

A *sensibilidade* de um radiotelescópio está relacionada com o ruído do sistema (antena, detetor e linha-de-transmissão), e resulta da soma de três ruídos. O detetor e o grosso da linha-de-transmissão colocam-se a temperaturas muito baixas para minimizar os seus ruídos (4 K nos melhores



Fig. 2 - Uma rede de dipolos do observatório de Puschino (Rússia), com 70000 m² de área coletora.

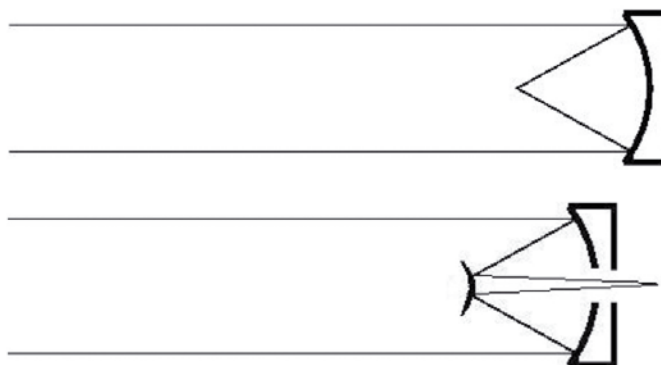


Fig. 3 - Embora nos seus primórdios quer os telescópios parabólicos óticos (séc. XVII, até Newton perto do seu final), quer os radiotelescópios (boa parte da segunda metade do séc. XX) utilizassem o foco primário (ilustração de cima), por questões práticas é hoje bem mais popular refletir a radiação via um sub-refletor hiperbólico colocado perto do foco e enviá-lo para um detetor, atrás do disco parabólico (ilustração de baixo) que tem de ser furado. A este tipo de foco chama-se Cassegrain, o nome do seu primeiro construtor em 1672, embora já antes idealizado por Merseenne, em 1636.

sistemas) e, assim, o valor crítico é o ruído da antena – e.g. [2,9]. A sensibilidade é diretamente proporcional à largura de frequência de banda e ao poder coletor (e.g. [1,2,8,9]). Este, por sua vez, é proporcional ao quadrado do diâmetro da antena (ou seja, à sua área).

1.3 Interferometria e interferómetros

As ondas eletromagnéticas emitidas por uma fonte pontual propagam-se sob a forma de frente de onda esférica. No entanto, quando a fonte está muito distante (como é o caso de quase todos os objetos astronómicos), a curvatura é quase nula e assume-se, por aproximação, que as ondas incidentes em (rádio) telescópios são planas. Se a onda encontra um obstáculo com dois ou mais orifícios, comporta-se como se cada um destes constituísse uma nova fonte, alterando as frentes de onda (tornando-as mais curvas) e fazendo com que interfiram. Nos pontos do espaço onde duas cristas de onda coincidem há um reforço de onda (interferência construtiva); nos pontos onde uma crista e um

³ Uma antena é um dispositivo de transição entre uma onda que se propaga livremente e uma onda guiada (e.g. [2]).

⁴ O primeiro radiotelescópio com intenções astronómicas foi construído por Grote Reber em 1937: era uma antena parabólica com 9,5 m de diâmetro.

⁵ Em radioastronomia, o antónimo de “objeto pontual” é “objeto estendido” no sentido em que tem estrutura visível, por muito pequena que seja: um objeto pontual para um radiotelescópio não está resolvido por este, por definição.

mínimo coincidem ocorre uma anulação mútua (interferência destrutiva) – Young descobriu estes efeitos em 1803 (e.g. [1,10]). A técnica que recorre a este princípio é a interferometria. Os aparelhos que a concretizam são os interferómetros.

No caso da astronomia, utilizam-se vários telescópios (“orifícios”) para observar uma mesma fonte de luz (e.g. uma estrela). A primeira aplicação astronómica, no ótico, foi feita por Michelson em 1891 [11]. Mas foi o rádio que trouxe os primeiros grandes resultados para a Astronomia, utilizando esta técnica: dez anos antes do Telescópio Espacial Hubble ir para o espaço, resoluções de 0,001” eram já rotina com o VLBI⁶ (cf. Hubble com 0,05”). Aliado a uma boa sensibilidade, a deteção de fontes rádio de todos os tipos, inclusive até ao ruído cósmico de fundo, tornou-se, desde então, possível. Só em 2001 chegou a técnica da interferometria ao ótico em grande escala (no VLT e no Keck).

Na interferometria os vários telescópios unidos são, em *resolução*, equivalentes a outro com o diâmetro da distância máxima entre eles (linha-de-base máxima). De facto, o diâmetro das antenas individuais que compõem o interferómetro não é relevante para tal. No entanto, é relevante para a *sensibilidade*. Esta é agora bem mais complexa do que num radiotelescópio único mas, essencialmente, é proporcional às áreas das antenas que o compõem e também ao número de linhas-de-base. Este é simplesmente dado por $n(n-1)/2$ para n antenas (e.g. [1]; Tabela 1).

A inclinação da fonte observada em relação ao interferómetro tem também um importante papel. De facto, a *resolução* pode ser representada por um “feixe” elíptico que está relacionado com a distribuição geográfica dos radiotelescópios, conforme vistos pela fonte (e.g. [1]). Por exemplo, se estes estão numa linha este-oeste, a resolução vai ser muito má segundo a direção norte-sul, o que quer dizer que a elipse terá o seu eixo menor (melhor resolução) segundo este-oeste. É por isso que os interferómetros têm uma distribuição na Terra sem direção preferencial (e.g. Figura 4). E esta distribuição é também muito relevante para a *sensibilidade*, pela forma como as linhas-de-base rodam consoante a Terra roda como vista da fonte, enquanto esta é observada. O conjunto das elipses assim traçadas retrata, na sua fronteira, exatamente o feixe que nos dá a resolução do interferómetro – e.g. [1]. A sensibilidade, no entanto, virá da percentagem de enchimento de todo o espaço interior à elipse. Quanto mais cheio, mais sensível é o interferómetro. E a largura de frequência de banda das observações, francamente melhorada nos últimos anos com a ligação por fibra ótica dos elementos dos interferómetros, “alarga” os percursos das linhas-de-base dentro da elipse. Foi desenvolvida a técnica da “síntese de abertura” para fazer, precisamente, todas estas contas em pormenor (e.g. [1,9,12]).

O primeiro interferómetro rádio (ou “radiotelescópio de elementos múltiplos”, como antes era chamado – e.g. [4])

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Nome	Local	Ants.	D (m)	L.b.	L.b.m (km)	Res. (")
VLA	EUA	27	25	351	36	0,04
MERLIN	Inglaterra	7	25-76	21	230	0,02
GMRT	Índia	30	45	435	45	1,4
VLBI	Terra	20-30	25-300	190-435	12 756	0,0005

Tabela 1 - Aqui resumamos os mais importantes rádio-interferómetros atuais: (1) nome; (2) localização; (3) número de antenas; (4) diâmetro das antenas; (5) número de linhas-de-base; (6) linha-de-base máxima; (7) melhor resolução.



Fig. 4 - O EVN tem o grosso das suas 18 antenas na Eurásia. A mais ocidental destas está em Madrid (Ro). Para se chegar à seguinte para oeste tem de se “saltar” o Atlântico, até Porto Rico (Ar). Existe uma antena no Hemisfério Sul, na África do Sul (Hh). Seria muito útil colocar uma antena na Madeira (Ma) para reduzir a infame *mid-Atlantic gap*. (Figura adaptada de http://www.evlbi.org/intro/evn_map_rmc.jpg.)

foi utilizado pelo seu construtor, Ryle, em 1946 em Cambridge (e.g. [1,10]). Mas muito se avançou desde então (Tabela 1).

1.4 European VLBI Network

A rede European VLBI Network (EVN) cobre quase todo o diâmetro terrestre (e.g. [13]; Fig. 4). Está a transformar-se no e-EVN, quando todas as linhas-de-base estarão unidas por fibra ótica permitindo a aquisição de dados em tempo real e o seu processamento quase imediato. Até agora, os dados tinham de ser guardados em cada radiotelescópio e mais tarde correlacionados, por exemplo na Holanda ou nos Estados Unidos.

2. A Madeira

A Madeira é um excelente local para a astronomia ótica (e.g. [14]). No que respeita à radioastronomia, o interesse também é antigo mas mais discreto⁷.

⁶ A técnica de Very Long Baseline Interferometry (VLBI) foi a primeira a “unir” radiotelescópios a centenas ou milhares de km de distância (com o correspondente ganho em resolução - ver Tabela 1). Cada um gravava os seus dados em fita magnética, com marcações de tempo dadas por um relógio atómico. Mais tarde, os dados eram correlacionados em conjunto, correndo as fitas magnéticas juntas como se fosse em tempo real.

⁷ Para o VLBA - Ken Kellermann, comun. priv. Para além do EVN (Secção 1.4) existe uma outra antiga rede integrada na Terra que funciona em VLBI: o *Very Long Baseline Array* (VLBA), consistindo em 10 antenas de 25 m cada, oito das quais espalhadas pelo território continental dos EUA, uma no Havai e outra nas Ilhas Virgens.

Mesmo sem radiotelescópio, em 1999, durante a tempestade de meteoros das Leónidas, fizeram-se observações no rádio na Madeira (utilizando antenas de automóveis!), com resultados publicados em [15-17].

A razão principal para o interesse na Madeira é geográfica: as ilhas atlânticas são especialmente adequadas para encher o feixe de resolução do VLBI, uma vez que entre os EUA (ilhas Virgem – VLBA) e a Europa (Madrid – EVN) não existem radiotelescópios. Essa ausência, já com décadas de VLBI, até levou ao estabelecimento de um “monstro”: a infame *mid-Atlantic gap* que se vê no feixe do VLBI. Uma grande vantagem da Madeira, por exemplo em relação aos Açores, é ser sismicamente estável e vulcanicamente inativa. Além disso, está virtualmente imune a furacões.

O EVN tem, em geral, uma tendência de orientação este-oeste sobre o hemisfério norte da Terra (Fig. 4) o que é especialmente infeliz, tendo em conta que os futuros instrumentos de topo das próximas décadas (ALMA, E-ELT e SKA) se situarão todos no hemisfério sul. A Madeira está em localização privilegiada para ajudar o EVN a aproximar-se mais dos objetos a observar por esses instrumentos.

3. O local ideal para um radiotelescópio

Os radiotelescópios, por serem tão sensíveis, devem ser colocados em locais remotos, longe de interferência (*radio frequency interference*, RFI, causada pela actividade humana). Estes praticamente já só existem em parques naturais ou nacionais. Minimiza-se o impacto ambiental nesses locais⁸ ocupando uma pequena área, mantendo-a com vegetação e vedada com redes de malha grande; fazendo os acessos em gravilha seguindo a orografia e limitando o acesso motorizado.

O local ideal para colocar um radiotelescópio é um vale em altitude, não muito cavado, longe de RFI e pouco exposto a ventos fortes (médias superiores a 50 km/h ou rajadas superiores a 70 km/h obrigam ao estacionamento do radiotelescópio). Deve ter um horizonte amplo (obstáculos visuais com altura inferior a 10° a toda a volta). Outros dados, por exemplo sobre a humidade e precipitação, podem ajudar a decidir entre locais, mas nunca são impeditivos. No mesmo sentido, informação sobre a coluna de vapor de água (*precipitable water vapour*, PWV) pode motivar a montagem de um radiotelescópio capaz de observar $\lambda > 1$ mm (o caminho do futuro – e.g. ALMA). Para tal propósito, valores de PWV menores que 5 mm são bons e inferiores a 1 mm são excelentes.



Fig. 5 - O comité de inspeção aos sete locais num momento de repouso (três famosos radioastrónomos: Richard Davis, Roy Booth e Gavril Grueff).

4. Tem a Madeira algum local ideal?

Inicialmente selecionámos sete locais na ilha da Madeira mas, após uma cuidadosa inspeção no terreno em Maio de 1999 (Figura 5), três foram eliminados e dois juntaram-se num. Assim, sobraram três locais designados por A, D e F/G para estudos detalhados posteriores: meteorologia, RFI e perfis de horizonte. A PWV obter-se-ia por dados de satélite.

4.1 Meteorologia

Munidos de uma Estação Meteorológica Automática (EMA – Fig. 6) corremos os três locais, de 2003 a 2007, um ano contínuo em cada, para medir, entre outros, o vento (velocidade e direção), a humidade relativa do ar e a precipitação. Estes dados foram correlacionados com os conhecidos para as seis estações meteorológicas da ilha da Madeira com dados de clima (≥ 30 anos), de forma a normalizarmos os valores obtidos. Recolhemos os (poucos) dados de satélite sobre a PWV.

Como exemplo, os resultados preliminares de vento sugerem que os três locais são excelentes, pois nunca se



Fig. 6 - A EMA no seu último local (D).

⁸ Um rádio-telescópio não é um radar: não emite radiação, apenas a mede.

ultrapassaram sequer os 36 km/h em rajadas. Os resultados são ainda mais poderosos para o local D (o último estudado), onde a EMA esteve durante 4,5 anos. Os três locais têm uma média anual de 80-90% de humidade relativa do ar e elevada precipitação (2,0-2,5 m anuais), embora com céu limpo a maior parte do tempo. Finalmente, os poucos resultados de PWV medidos por satélite (MODIS/TERRA) são encorajadores (entre 1 e 9 mm).

4.2 Medições de RFI

Em Setembro de 2005 medimos a RFI nos três locais, num dia (e hora) útil aleatório para cada um. Um total de 30 varrimentos foi feito para cada, de 15 cm a 3,75 m, em passos inferiores a 5 mm. A duração total das medições foi de 64 minutos para cada local. Os resultados médios deram-nos < -80 dBm para o local A (máximo -40 dBm) e < -90 dBm (máximo -60 dBm) para os locais D e F/G. Estes são 20 vezes melhores que as recomendações mínimas da IAU para um rádio-observatório. Apesar de mais ruidoso, o local A ainda consegue os mínimos da IAU.

4.3 Horizonte

Com um teodolito medimos os perfis de horizonte para cada local ao nível do chão, em Janeiro de 2005. Os locais D e F/G têm o horizonte a toda a volta inferior a 10°, en-

quanto o local A atinge 10°-15° em 1/6 de volta completa.

5. Conclusão

Especialmente devido aos resultados de RFI e horizonte, o local A foi removido da nossa lista. No entanto, sobram-nos dois excelentes locais (D e F/G) e não é claro qual o melhor dos dois. O primeiro localiza-se a 1300 m de altitude, enquanto o segundo está nos 1000-1100 m (encosta virada a oeste). Ambos estão no concelho do Porto Moniz. Vamos mantê-los a ambos no passo que se segue: o estabelecimento de um consórcio nacional e internacional para a submissão de uma proposta de financiamento para a instalação de uma antena VLBI na Madeira.

Agradecimentos

Richard Schillizzi, pela nomeação do comité inspetivo e, claro, ao comité (Figura 5). Don Lawson, pelas medições de RFI. Direção Regional de Cartografia e Cadastro, pelo empréstimo do teodolito. Projeto POCTI/FNU/43733/2001 (Fundação para a Ciência e a Tecnologia).

Referências

- [1] K. Rohlfs, T. L. Wilson, "Tools of Radio Astronomy", 4th ed., Springer (2004).
- [2] J. D. Kraus, "Radio Astronomy", 2nd ed., Cygnus-Quasar books (1986).
- [3] K. Jansky, Nature 132 (no. 3323), 66 (1933).
- [4] R. H. Baker, "Astronomia", Fundação Calouste Gulbenkian (1971).
- [5] A. A. Penzias, R. W. Wilson, Astrophysical Journal 142, 419-421 (1965).
- [6] G. Reber, Astrophysical Journal 91, 621-624 (1940).
- [7] H. I. Ewen, E. M. Purcell, Nature 168 (no. 4270), 356 (1951).
- [8] K. R. Lang, "Astrophysical Formulae" (I and II), 3rd ed., Springer (1999).
- [9] R. C. Smith, "Observational Astrophysics", Cambridge University Press (1995).
- [10] J. S. Hey, "The Radio Universe", Pergamon (1971).
- [11] A. A. Michelson, Publications of the Astronomical Society of the Pacific 3(16), 217-220 (1891).
- [12] A. R. Thompson, J. M. Moran, G. W. Swenson, "Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy", 2nd ed., Wiley-VCH (2004).
- [13] R. W. Porcas, Proceedings of Science, (10th EVN Symposium) 011 (2011).
- [14] B. McInnes, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society 22, 266-271 (1981).
- [15] P. Augusto, N. Gizani, Astronomy & Geophysics 41, 1.4 (2000).
- [16] A. McBeath, Journal of the International Meteor Organization 28, 64-69 (2000).
- [17] N. Gizani, P. Augusto, European Astronomical Society Newsletter 19, 11 (2000).



O autor nasceu no Porto em 29 de Junho de 1971, licenciou-se em 1993 em Física-Matemática Aplicada (ramo de Astronomia) pela Universidade do Porto, doutorou-se em 1996 em Rádio Astronomia pela Universidade de Manchester (Inglaterra) e agregou-se em Física (Rádio Astronomia) em 2007 pela Universidade da Madeira. É, desde 1998, Professor Auxiliar da Universidade da Madeira, após um semestre como Professor Auxiliar Convidado na Universidade do Porto. É, desde 2007, investigador do Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa.

Para saber mais:	
www.nrao.edu	National Radio Astronomy Observatory (EUA)
www.evlbi.org	European VLBI Network
www.merlin.ac.uk	Interferómetro MERLIN
www.atnf.csiro.au	Australia Telescope National Facility
www.gmrt.ncra.tifr.res.in	Giant Metrewave Radio Telescope
www.asc.rssi.ru/radioastron	Space VLBI Mission (RadioAstron)
www.eso.org/projects/alma	Atacama Large Millimeter Array (ESO)
www.skatelescope.org	Square Kilometre Array
www.uma.pt/astro	Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira

Acrónimos	
ALMA	Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
E-ELT	European-Extremely Large Telescope
EMA	Estação Meteorológica Automática
ESO	European Southern Observatory
EVN	European VLBI Network
GMRT	Giant Metrewave Radio Telescope
IAU	International Astronomical Union
MERLIN	Multi-Element Radio-Linked Interferometer Network
SKA	Square Kilometer Array
VLA	Very Large Array
VLBA	Very Long Baseline Array
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VLT	Very Large Telescope

Termos relevantes em radioastronomia

Comprimento de onda – Usualmente designado com a letra λ , corresponde à distância entre duas cristas de uma dada onda eletromagnética.

Dipolo (antena) – O mais simples tipo de antena consiste em dois fios alinhados, com um pequeno espaço entre eles, onde se aplica uma voltagem elétrica.

Feixe – Área elíptica que corresponde à resolução de um interferómetro; nunca é completamente “cheio” e quanto mais espaço vazio houver, pior a sensibilidade.

Largura de frequência de banda – A largura de uma banda do espectro eletromagnético como medida entre duas frequências, cada uma correspondendo a um comprimento de onda.

Linha-de-base – É a tradução literal do termo inglês *baseline* que define a ligação (distância) entre cada par de telescópios num interferómetro.

Poder coletor – Capacidade que tem um telescópio para captar fotões, usualmente proporcional à sua área.

Ruído Cósmico de Fundo – a radiação produzida cerca de 300 mil anos depois do *Big Bang*, quando os fotões se dissociaram da matéria.