

Dinâmica e Controle de Veículos Espaciais

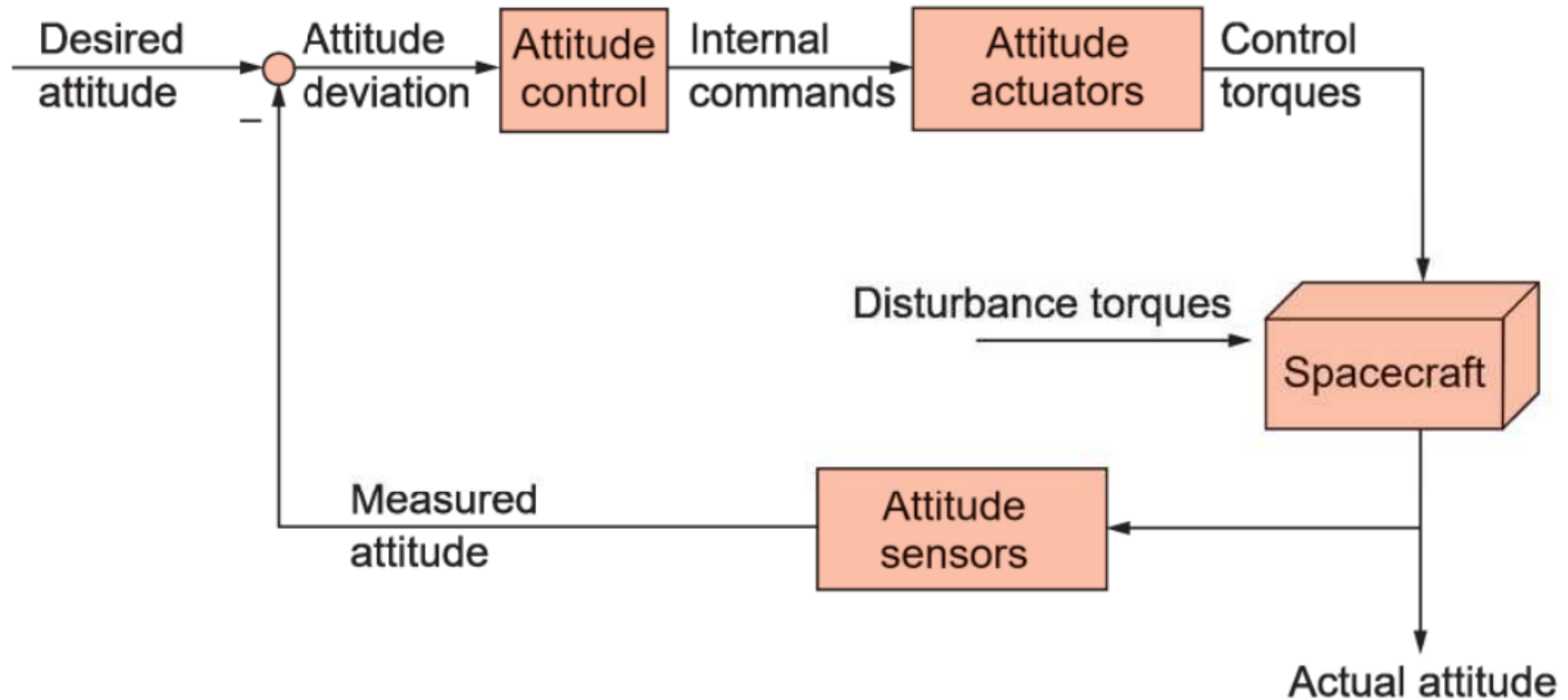
Aula 1

Malha de controle de atitude
Sensores de medida de atitude

Referências

- [1] Ley, W.; Wittman, K.; Hallmann, W. Handbook of Space Technology. West Sussex: Wiley, 2009.
- Seções 4.5.5 e 4.5.6
- [2] Sidi, M. J. Spacecraft Dynamics and Control: a practical engineering approach. Revised edition, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- Apêndice B

Controle de Atitude



Controle de Atitude

- Uma malha de controle de atitude é determinada a partir de diversos requisitos:
 - Objetivos da missão do veículo espacial (VE);
 - Fase da missão do VE;
 - Estabilização, regulação ou rastreamento;
 - Precisão do apontamento;
 - Número de eixos: um, dois ou três;
 - Sensores disponíveis;
 - Atuadores disponíveis.

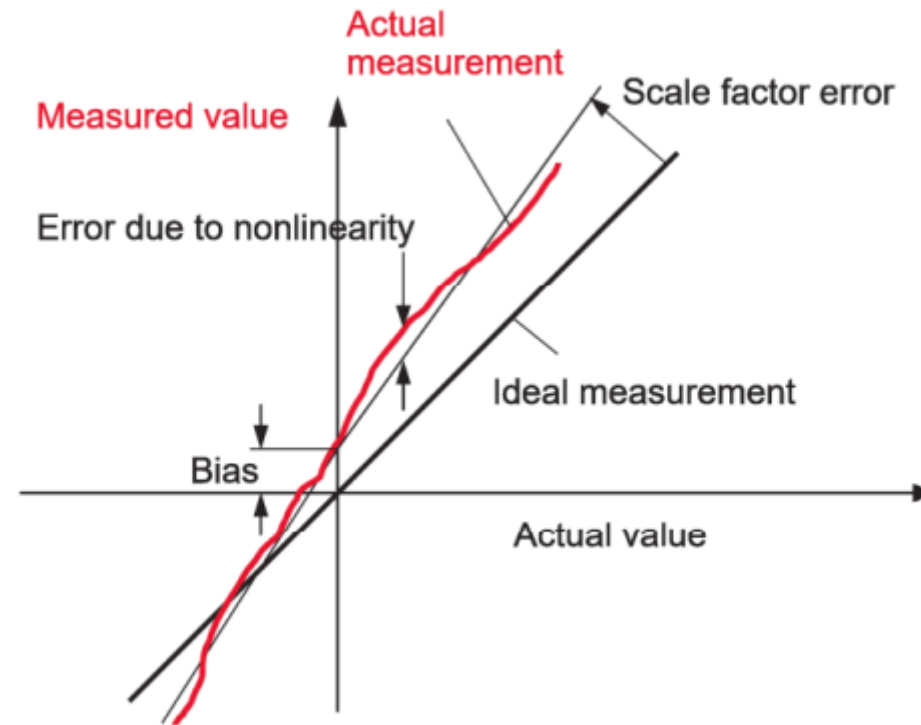
Controle de Atitude

- O foco do curso é:
 - Modelagem da mecânica de atitude (cinemática e dinâmica);
 - Algoritmos clássicos de controle de atitude.
- Embora seja de fundamental importância para o processo, a determinação de atitude não será investigada em profundidade;
- Somente na aula de hoje, uma pequena introdução ao assunto de determinação de atitude é realizado;
- Apresenta-se uma breve idéia do processo de determinação de atitude, a seguir, apresenta-se os principais métodos de medida, com foco nos conceitos de operação e escopo de aplicação.

Determinação de Atitude

- Métodos:
 - Observação vetorial;
 - Propagação de atitude;
 - Filtros.
- Observação vetorial:
 - Determinação da matriz de atitude a partir de dois vetores não colineares;
 - Medidas destes vetores no referencial do corpo são comparadas com valores conhecidos destes vetores em um referencial externo.
- Propagação de atitude:
 - Medida de velocidade angular é integrada em equações de cinemática de atitude;
- Filtros:
 - Combinam observação vetorial e propagação de atitude;
 - A observação vetorial é usada para corrigir o erro acumulado inerente à propagação.

Determinação de Atitude



Determinação de Atitude

- Para determinação de atitude, são necessários dois sistemas de referência:
 - Do corpo: determina as direções referenciais do veículo;
 - Externo: determina a referência com respeito à qual o veículo é orientado.Exemplos:
 - LVLH – local vertical, local horizontal;
 - PCPF – centrado e fixo ao planeta;
 - ICP – inercial centrado no planeta.
- A medida de atitude é feita no sistema de referência do corpo. Mas precisamente, no sistema de referência do sensor, cuja orientação com respeito ao corpo é conhecida.

Determinação de Atitude

- A medida feita no referencial do corpo é comparada com o valor conhecido do vetor num referencial externo;
- O referencial externo depende da natureza do vetor medido, por exemplo:
 - Direção solar: conhecida no referencial ICP;
 - Campo magnético terrestre: conhecida no LVLH.
- Com base nas relações de transformação conhecidas entre os referenciais, os vetores de referência podem ser convertidos para um único. Por exemplo:
 - Se a atitude é determinada com respeito ao LVLH, a medida de vetor solar no ICP é convertida para o LVLH.

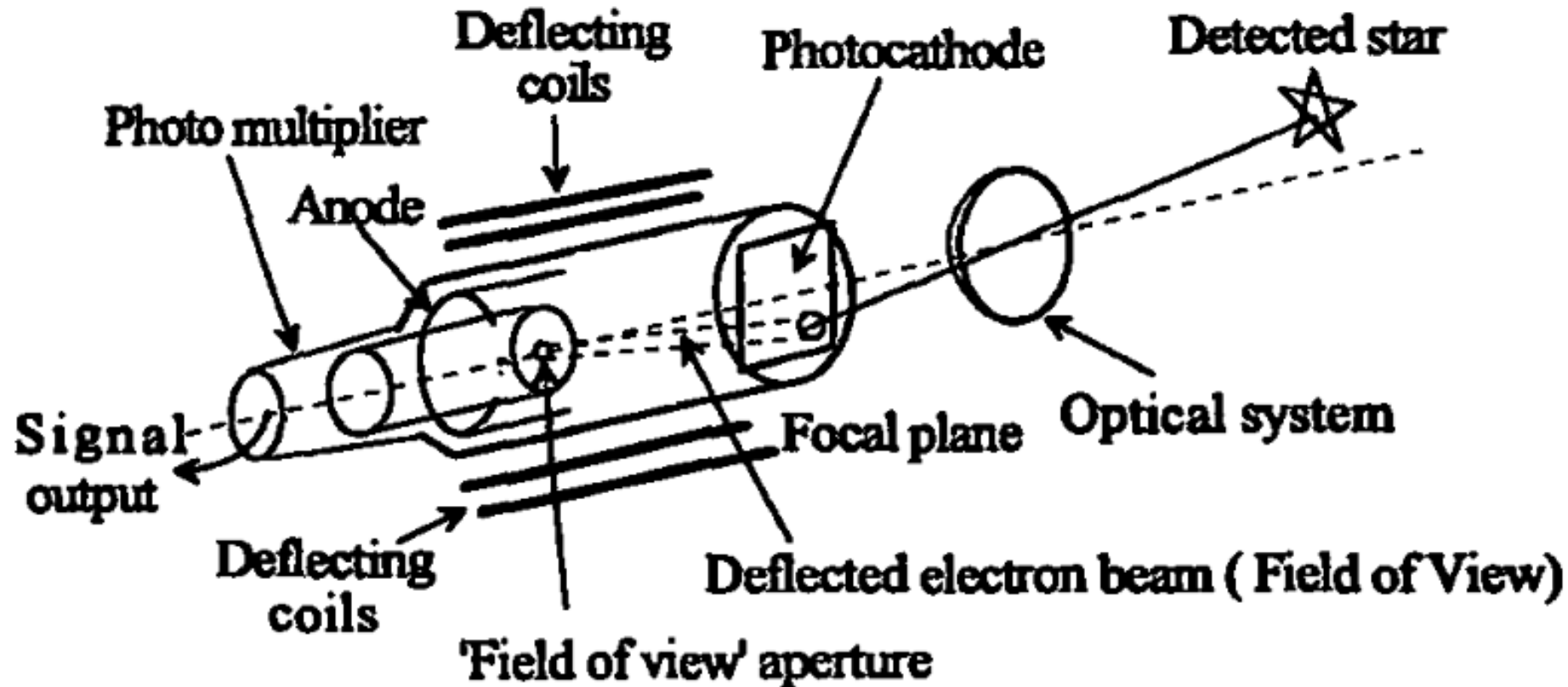
Determinação de Atitude

- Exemplo de método de observação vetorial: noção intuitiva do método. Montagem de sistema de equações;
- Métodos clássicos:
 - TRIAD:
 - F. Landis Markley, ATTITUDE DETERMINATION USING TWO VECTOR MEASUREMENTS, 1999 Flight Mechanics Symposium, 1999.
 - <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990052720/downloads/19990052720.pdf>
 - QUEST:
 - Shuster, M.D. and Oh, S.D. "Three-Axis Attitude Determination from Vector Observations," Journal of Guidance and Control, Vol.4, No.1, Jan.-Feb. 1981, pp. 70-77.
 - <https://ahrs.readthedocs.io/en/latest/filters/quest.html#shuster1981>

Métodos de Medida de Atitude

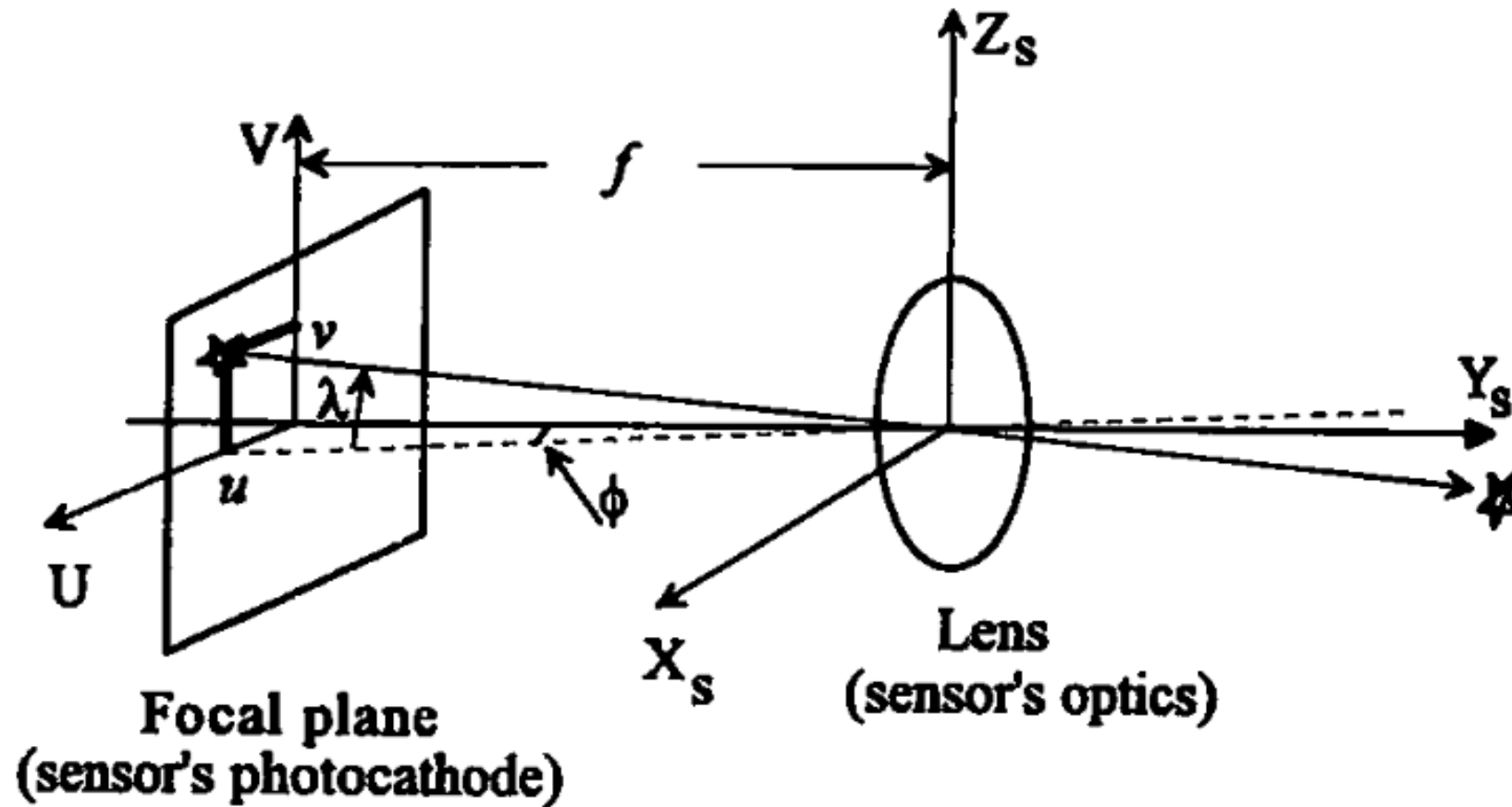
Method	Example	Characteristics
Direct	Star sensor	Three axes, high accuracy
	GNSS attitude measurements	Three axes, medium accuracy
Indirect	Magnetometer	Simple method
	Earth sensor	High reliability
	Sun sensor	Transformation of measurements needed
Inertial	Gyroscope, Gyros	Attitude alignment High accuracy over short periods Very high angular resolution Measurement independent of external sources

Sensor de Estrelas



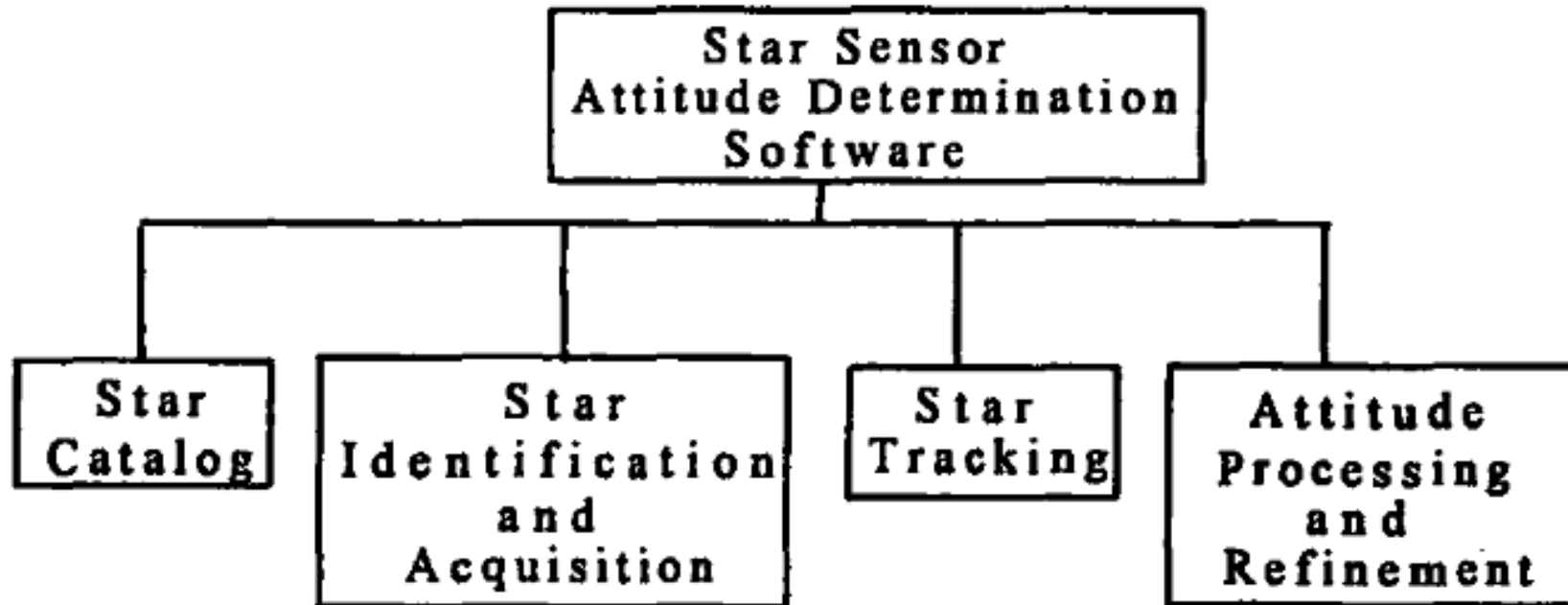
Detector de estrelas por tubo dissecador de imagem. Fonte: ref. [2].

Sensor de Estrelas



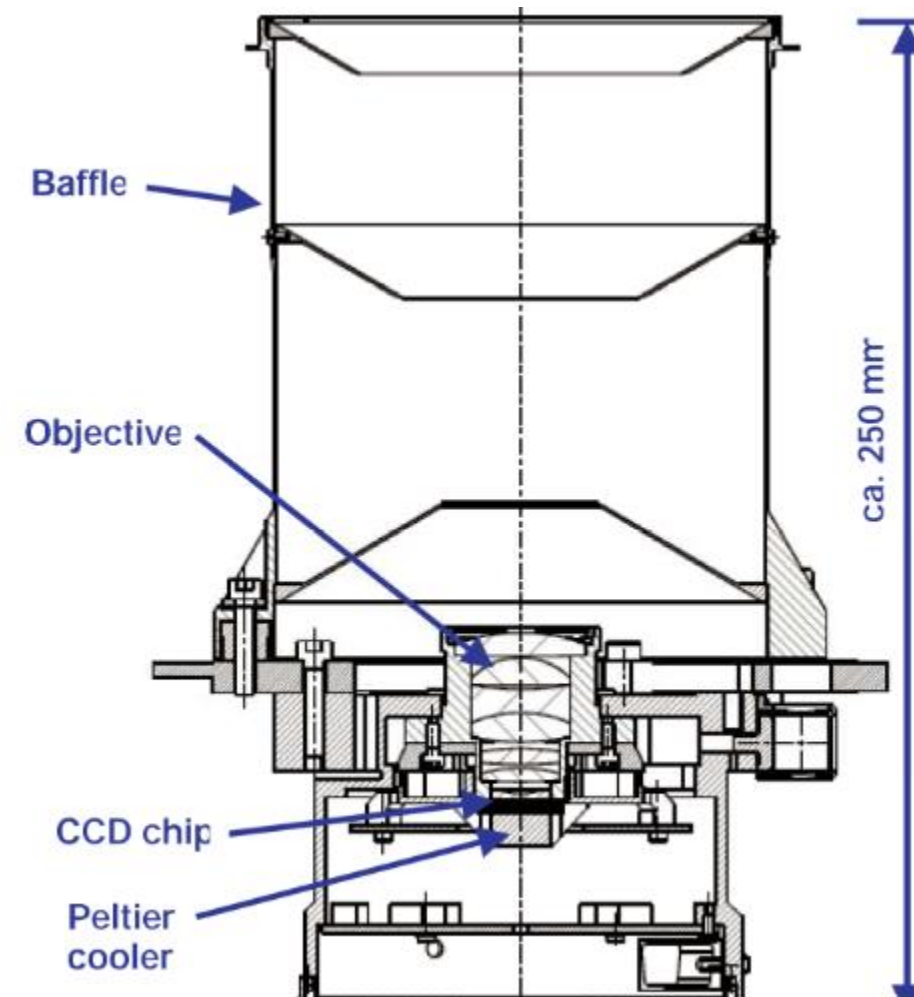
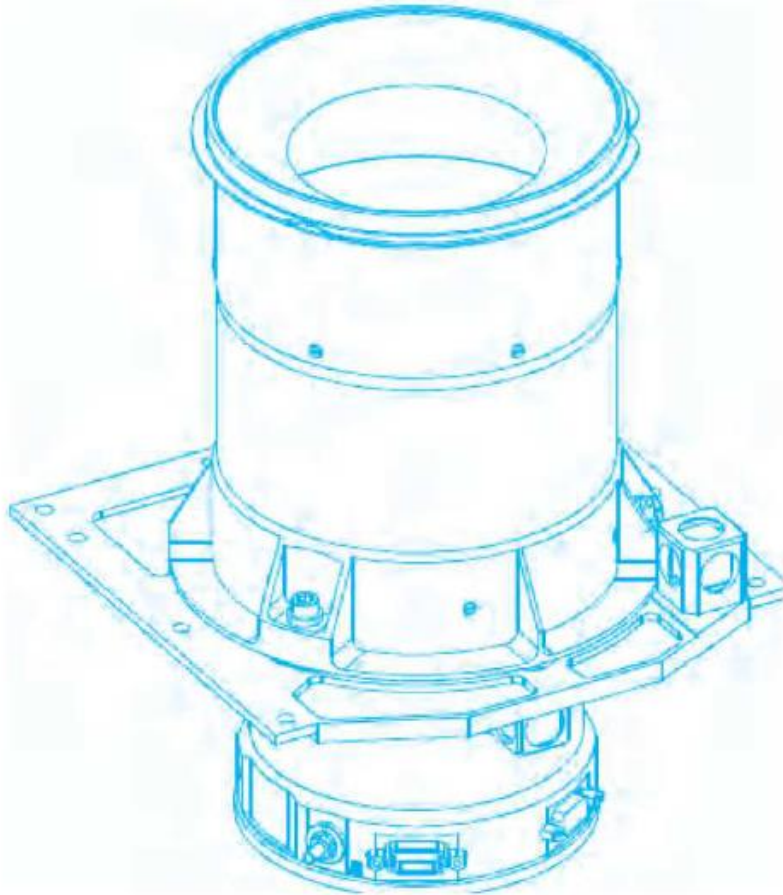
Cálculo dos componentes do vetor unitário da estrela no referencial do sensor. Fonte: ref. [2].

Sensor de Estrelas



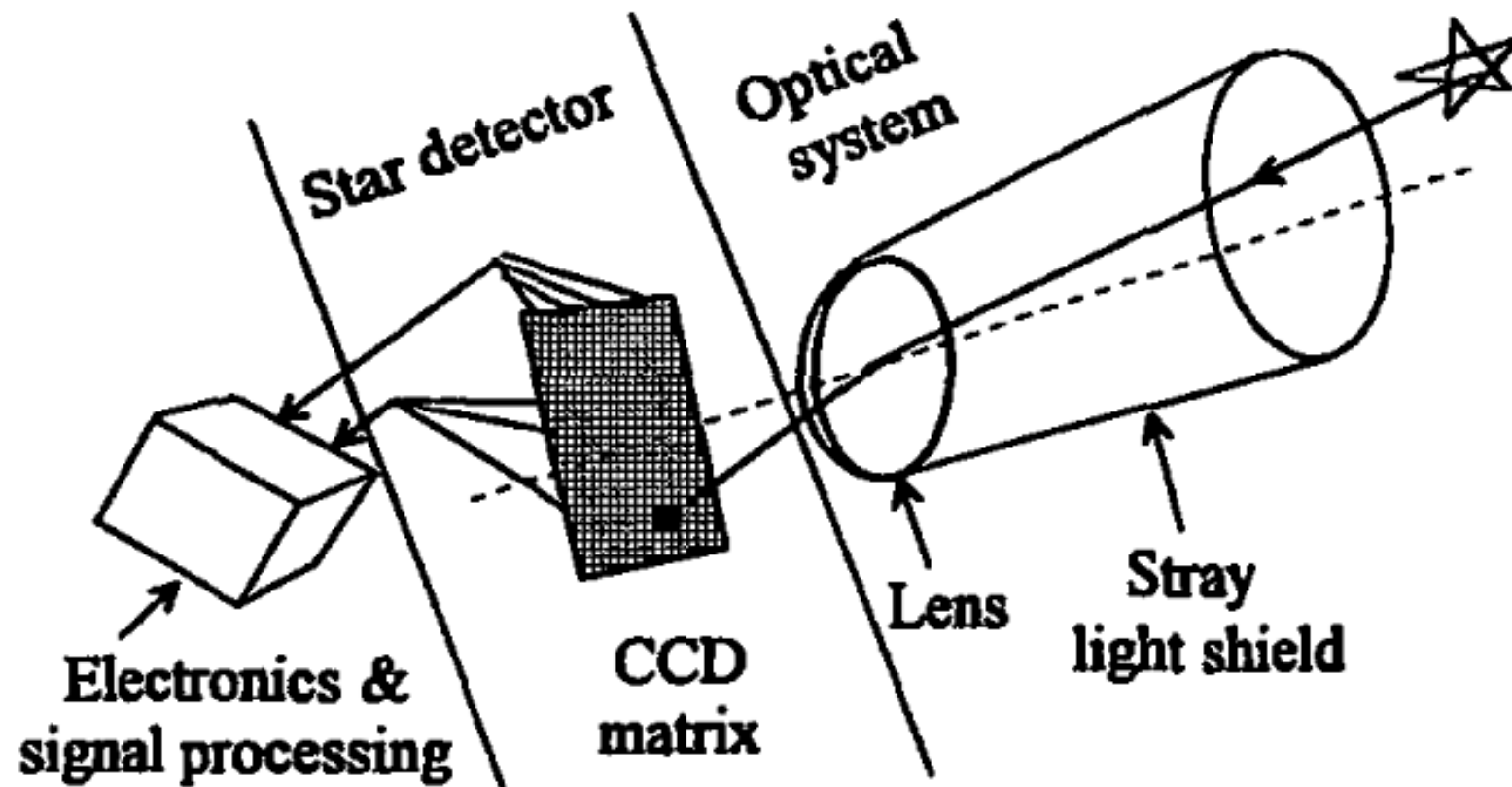
Componentes de um software de determinação de atitude de um sensor de estrelas. Fonte: ref. [2].

Sensor de Estrelas



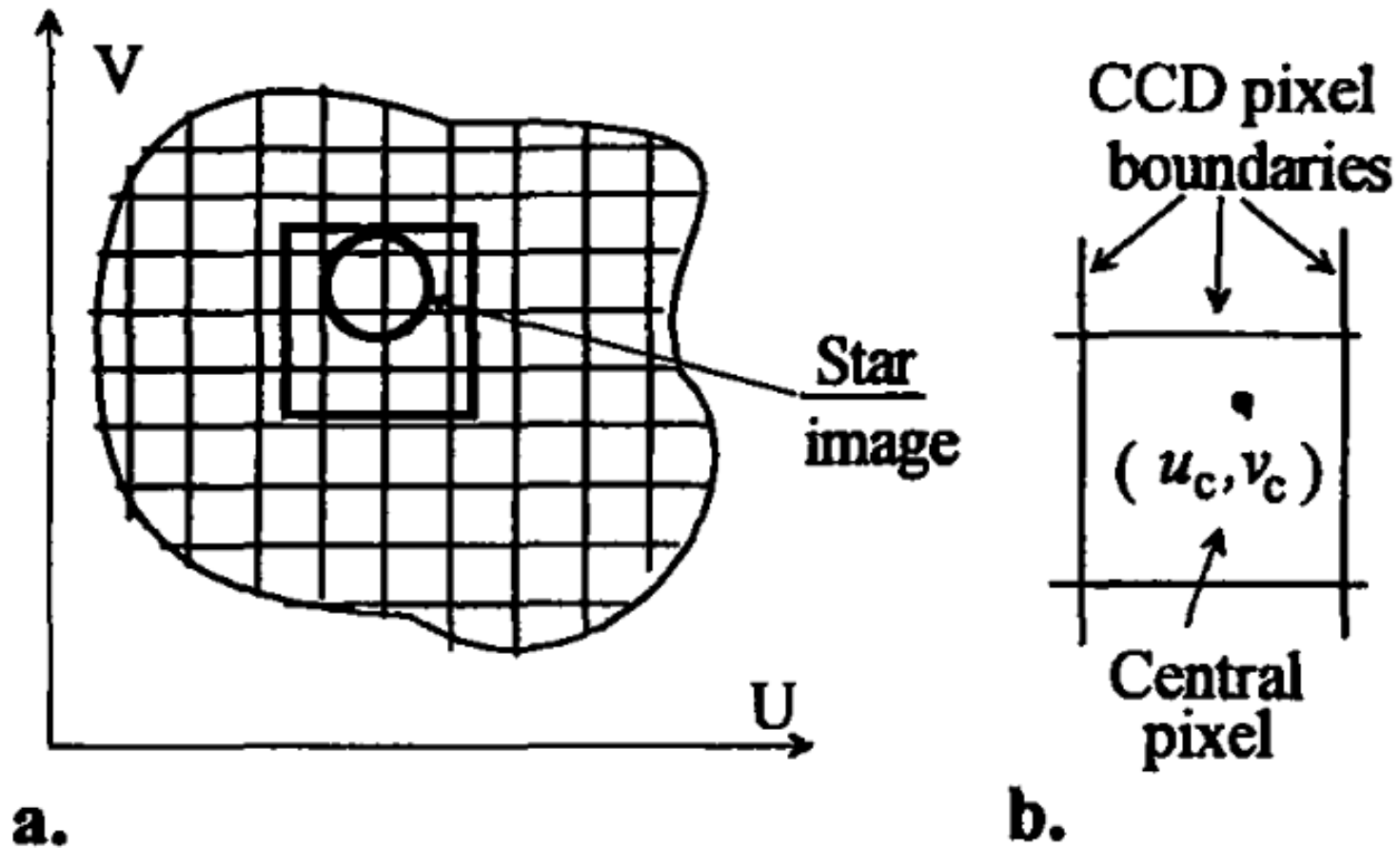
Cabeça de sensor de estrelas com defletor. Fonte: ref. [1]. Seção transversal da cabeça de sensor de estrelas. Fonte: ref. [1].

Sensor de Estrelas



Sensor de estrelas baseado em matriz CCD. Fonte: ref. [2].

Sensor de Estrelas



Uso de um sub array de pixels 3x3 para aumentar a resolução do sensor pelo algoritmo do centroide da imagem. Fonte: ref. [2].

Sensor de Estrelas

Attributes	Value	Annotations
Accuracy (EOL)	LOS 0.025° , 3σ Cross 0.003° , 3σ	EOL (End of Life) approx. 10 years, rotation rates $< 0.1^\circ/\text{s}$ LOS (Line of Sight) = optical axis
Temperature stability	$\pm 0.003^\circ$	Temperature range -30 to $+30^\circ\text{C}$
Update rate	8 Hz	–
Baffle	30° (Sun exclusion angle) 25° (albedo exclusion angle)	Angular distance between incident radiation and optical axis
FOV	About $18^\circ \times 13^\circ$	FOV = Field of View
Temperature range	-45 to $+35^\circ\text{C}$ (sensor head) -45 to $+50^\circ\text{C}$ (electronic box)	Temperature at the mounting interface
Mass	3.7 kg	Total: head, electronic box, harness
Power	8 W (cooler off) 14 W (cooler on)	At 20°C ambient temperature

Sensor Solar

- Tipos de sensor solar:
 - Grosseiro: mede somente o lado iluminado do VE;
 - Fino: mede o ângulo de incidência da luz solar.

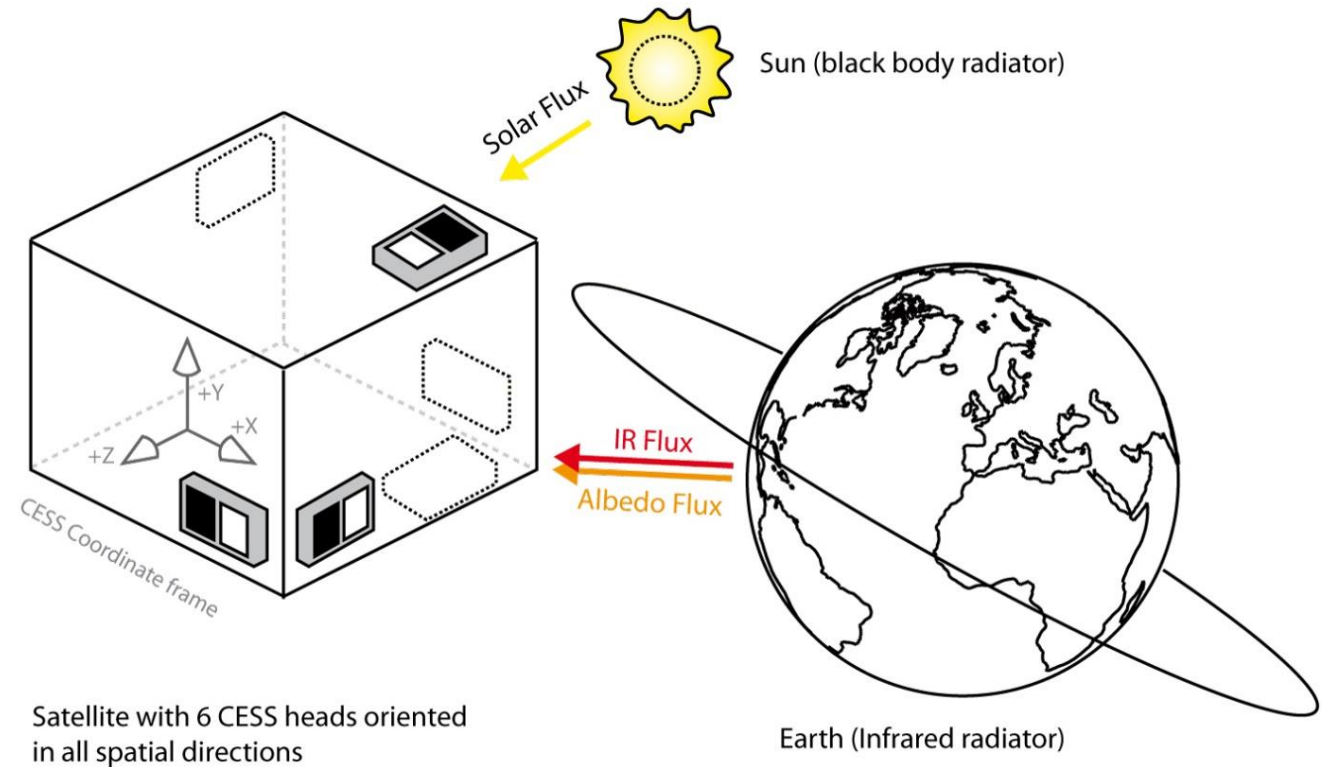
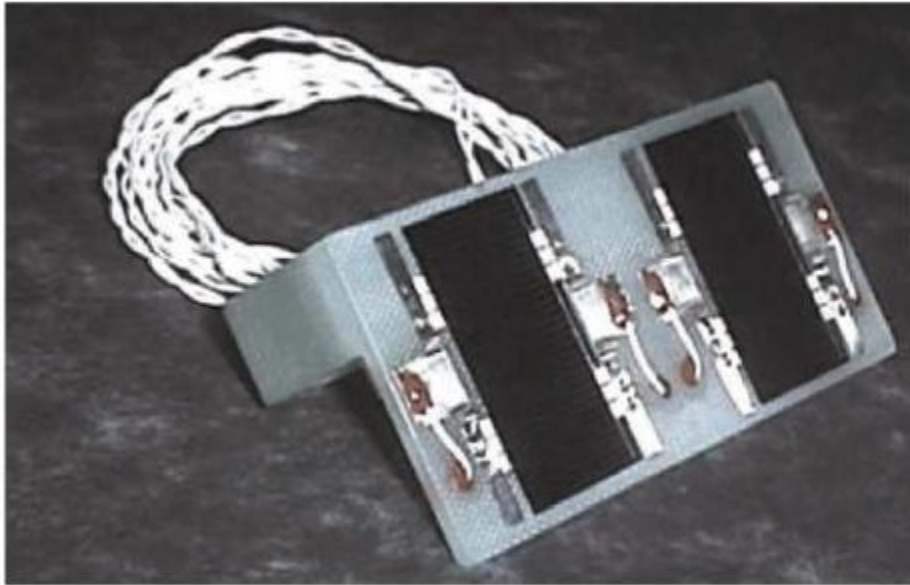


Ilustração de sensor solar grosseiro.

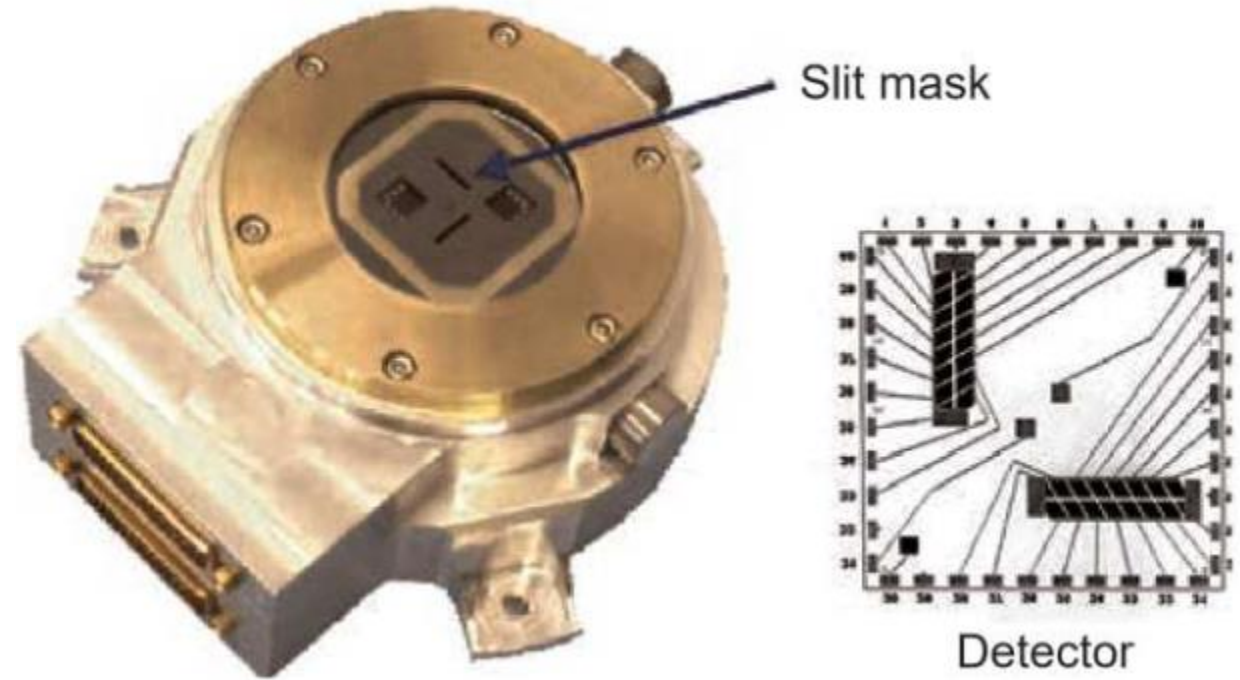
Sensor Solar

Aspect	Fine Sun sensor	Coarse Sun sensor
Attitude accuracy	0.01°	15°
Power consumption	1 W	0 W, connection to AD converter
Mass	1 kg	0.02 kg
Application area	Sun pointing	Orientation, safe mode

Sensor Solar

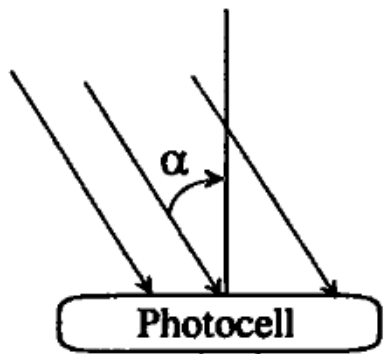


Célula solar em uma estrutura de montagem, como parte de um sensor solar grosseiro. Fonte: ref. [1].



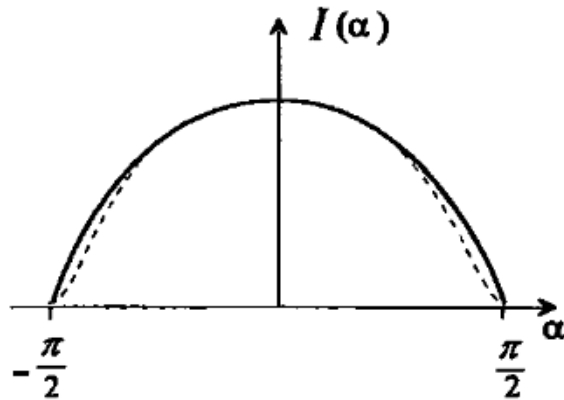
Sensor solar fino. Fonte: ref. [1].

Sensor Solar

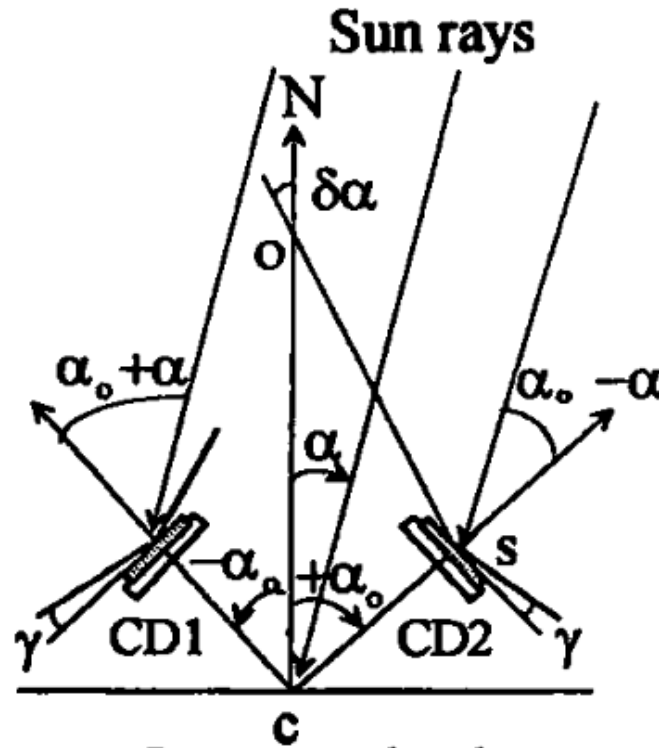


a.

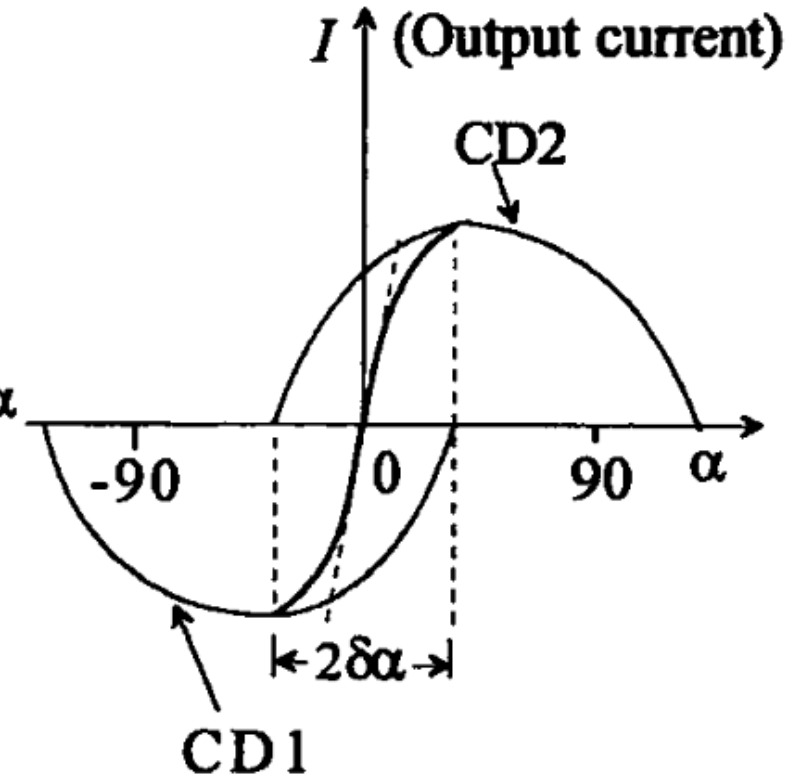
Fotocélula: corrente de saída dependente do ângulo de incidência solar.



b.



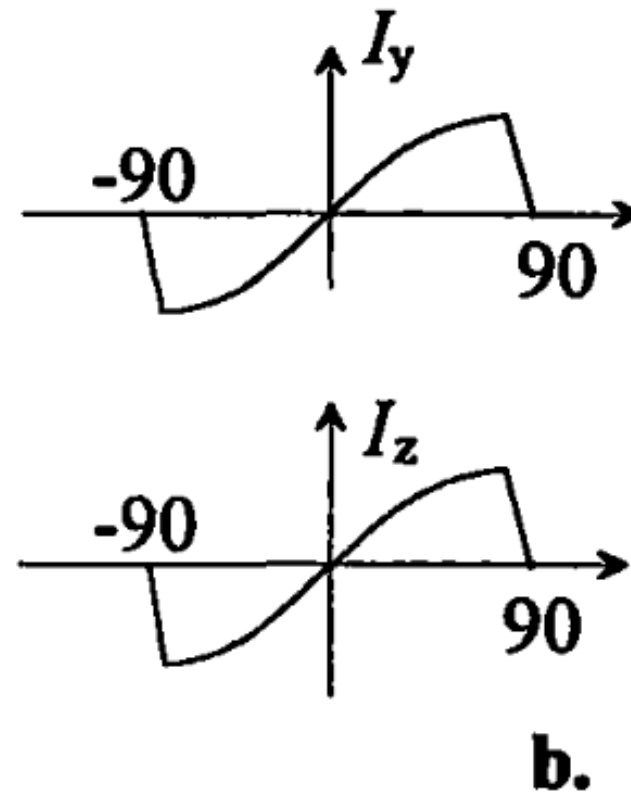
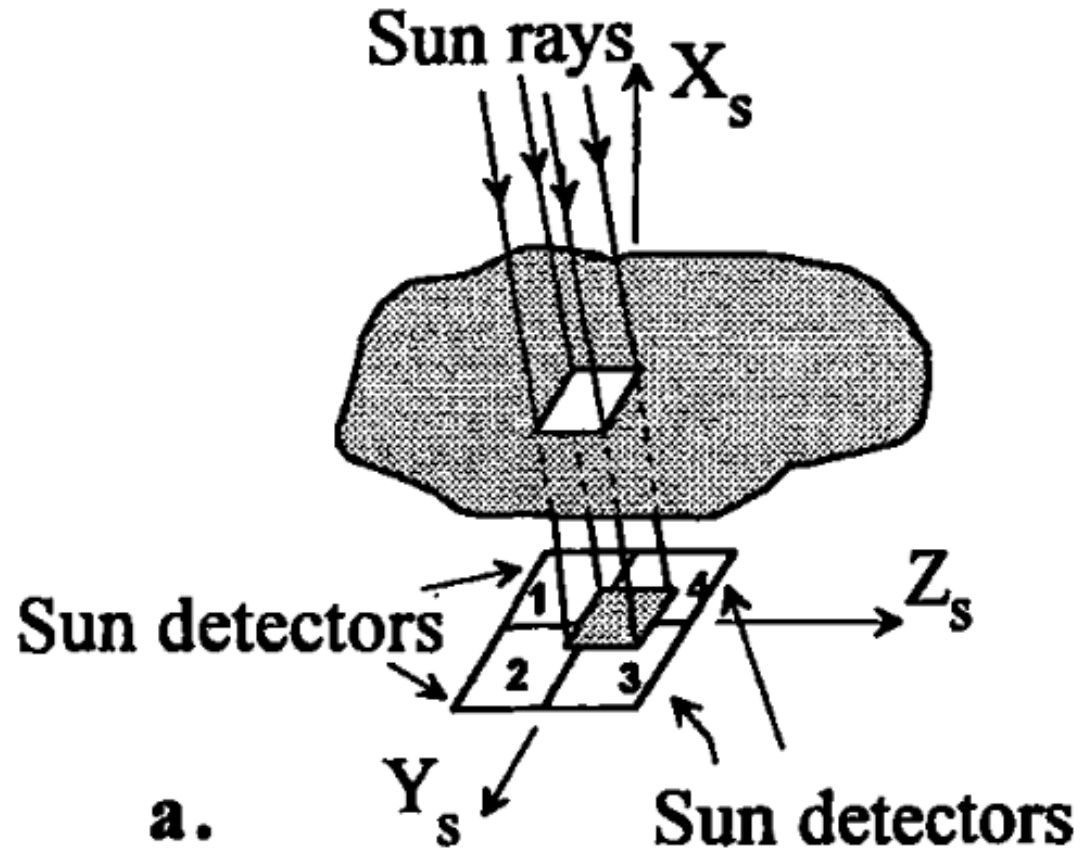
a. Sun sensor head



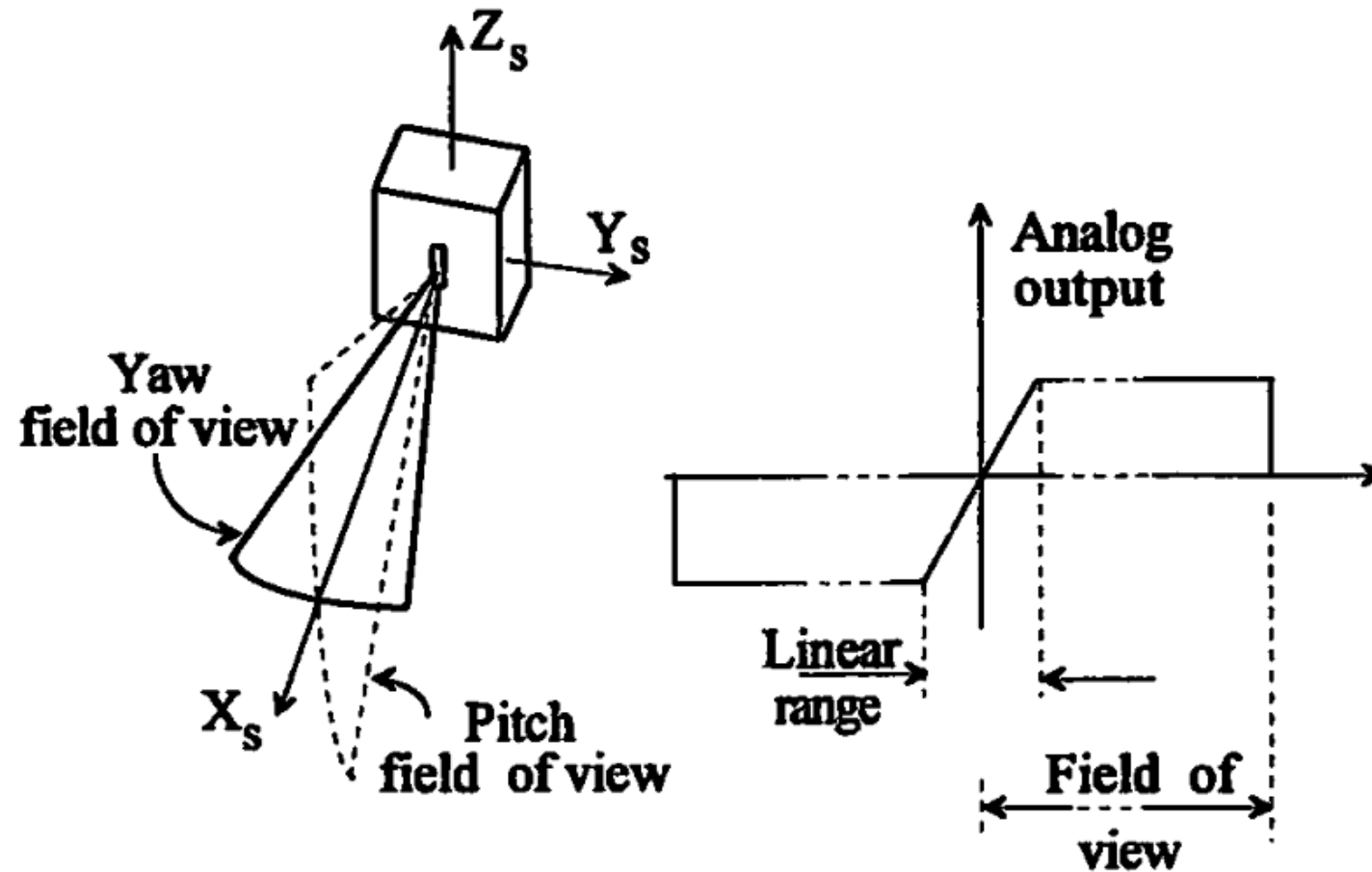
b.

Arranjo de dois detectores cossenoidais que propiciam uma medida uniaxial quase linear em um intervalo predeterminado.

Sensor Solar

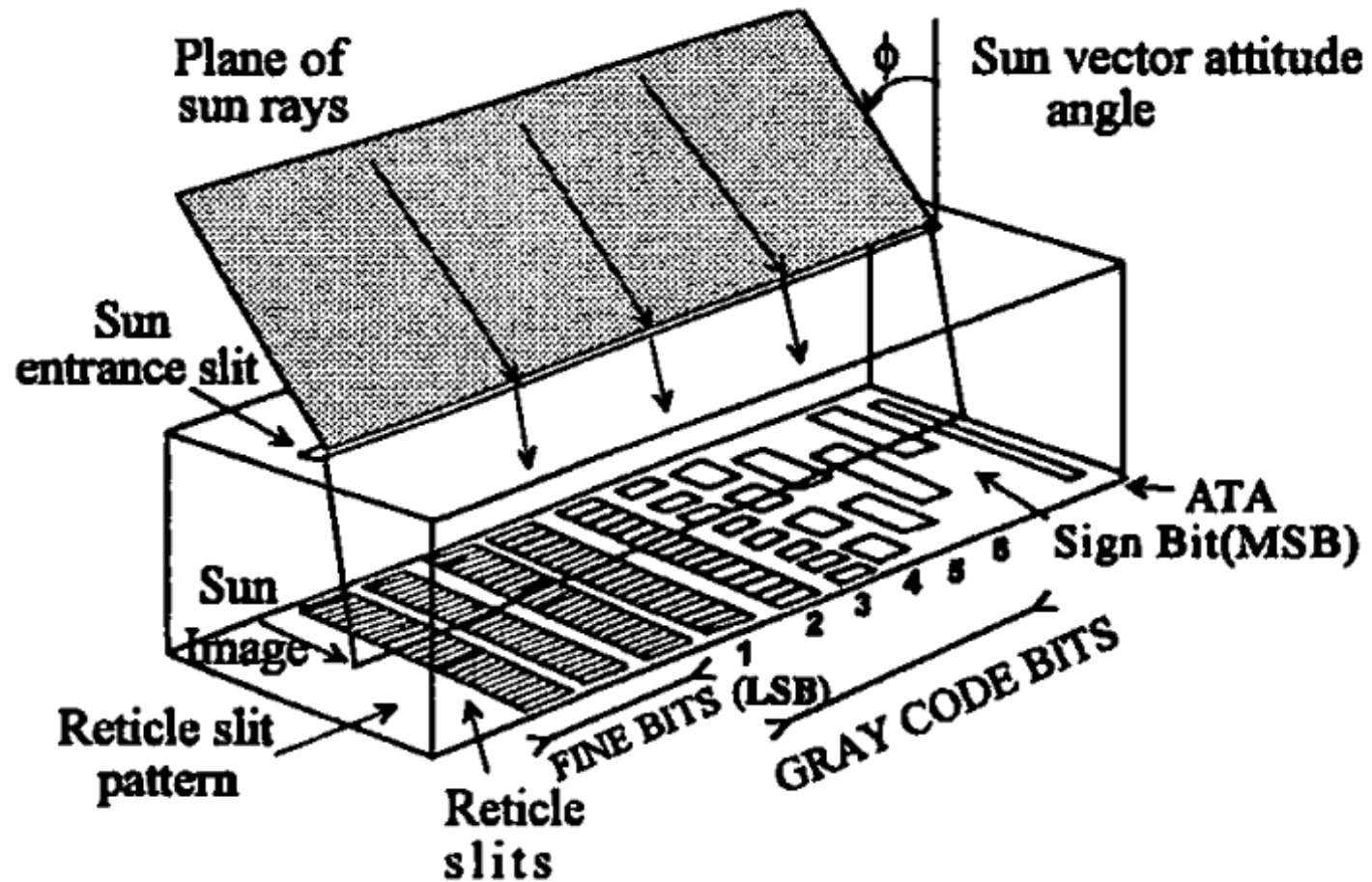


Sensor Solar



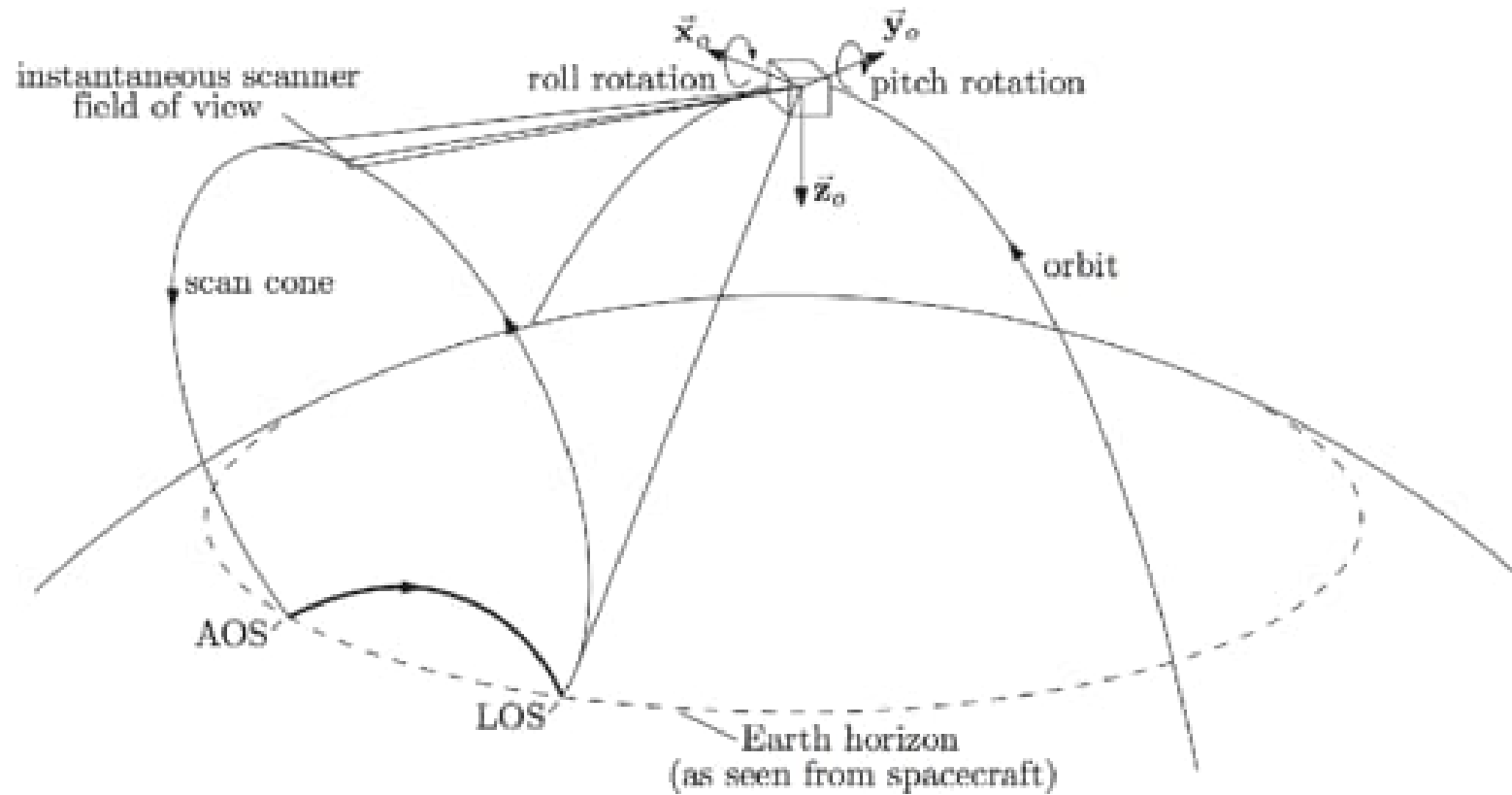
Características de um sensor solar analógico com saturação forçada fora de uma faixa linear.

Sensor Solar

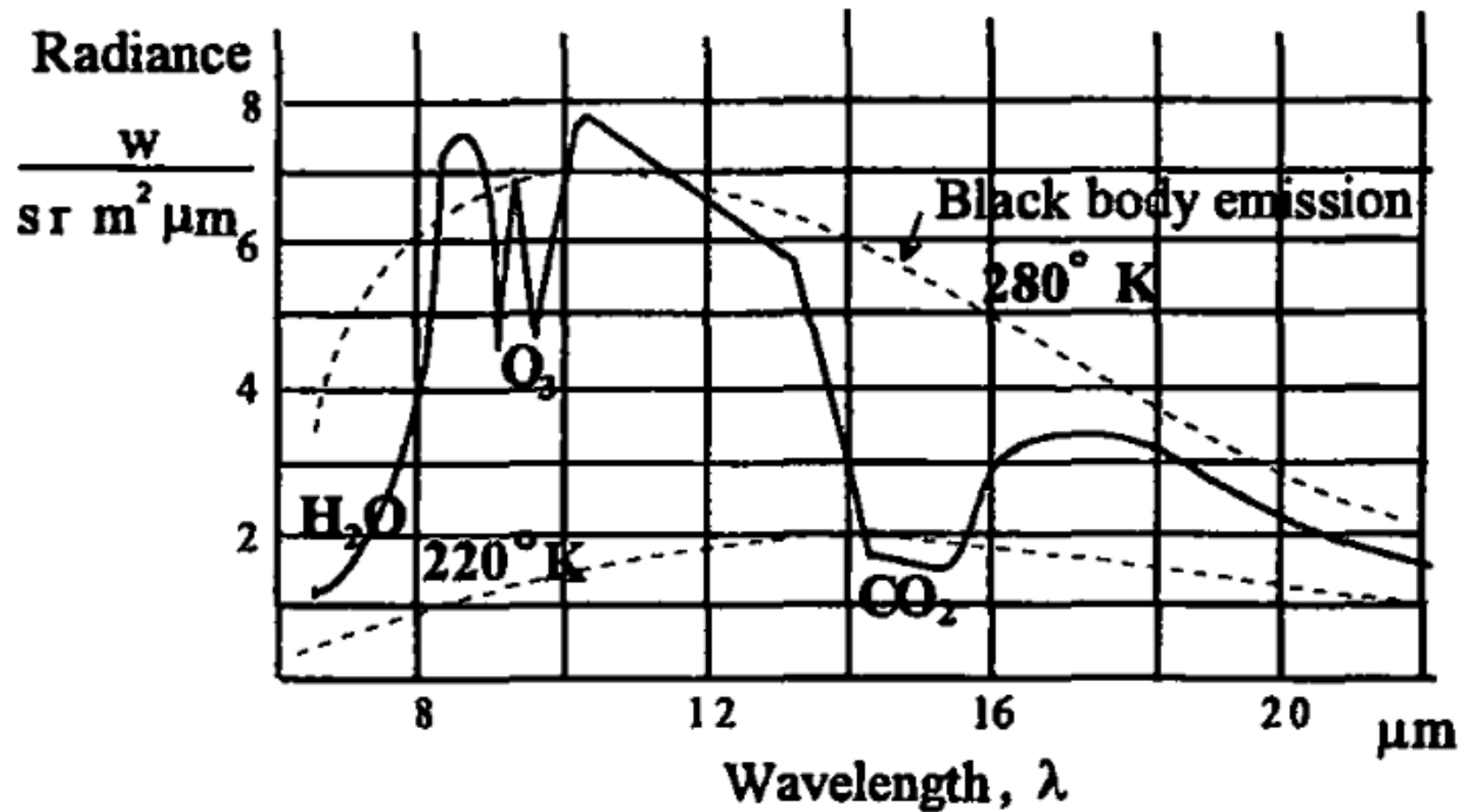


Sensor solar digital. Fonte: ref. [2].

Sensor de Horizonte Terrestre



Sensor de Horizonte Terrestre

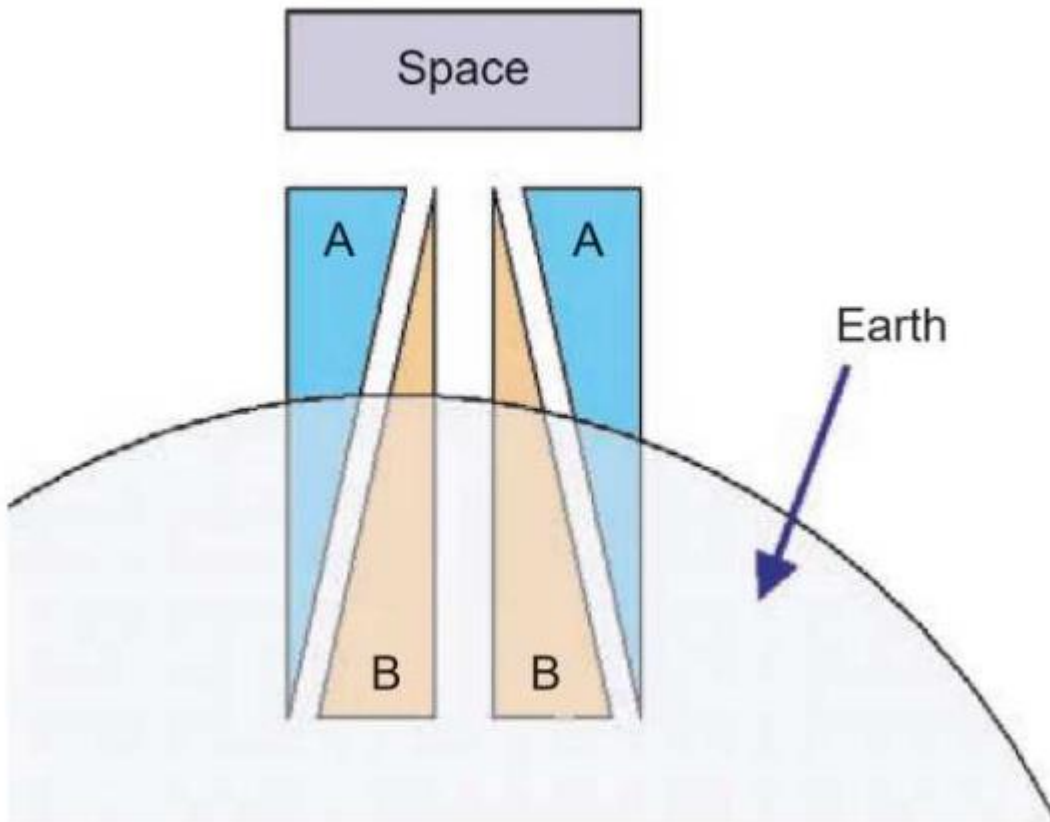


Distribuição espectral da emissão térmica da Terra. Fonte: ref. [2].

Sensor de Horizonte Terrestre

- Dois tipos:
 - Estático.
 - Varredura;

Sensor de Horizonte Terrestre

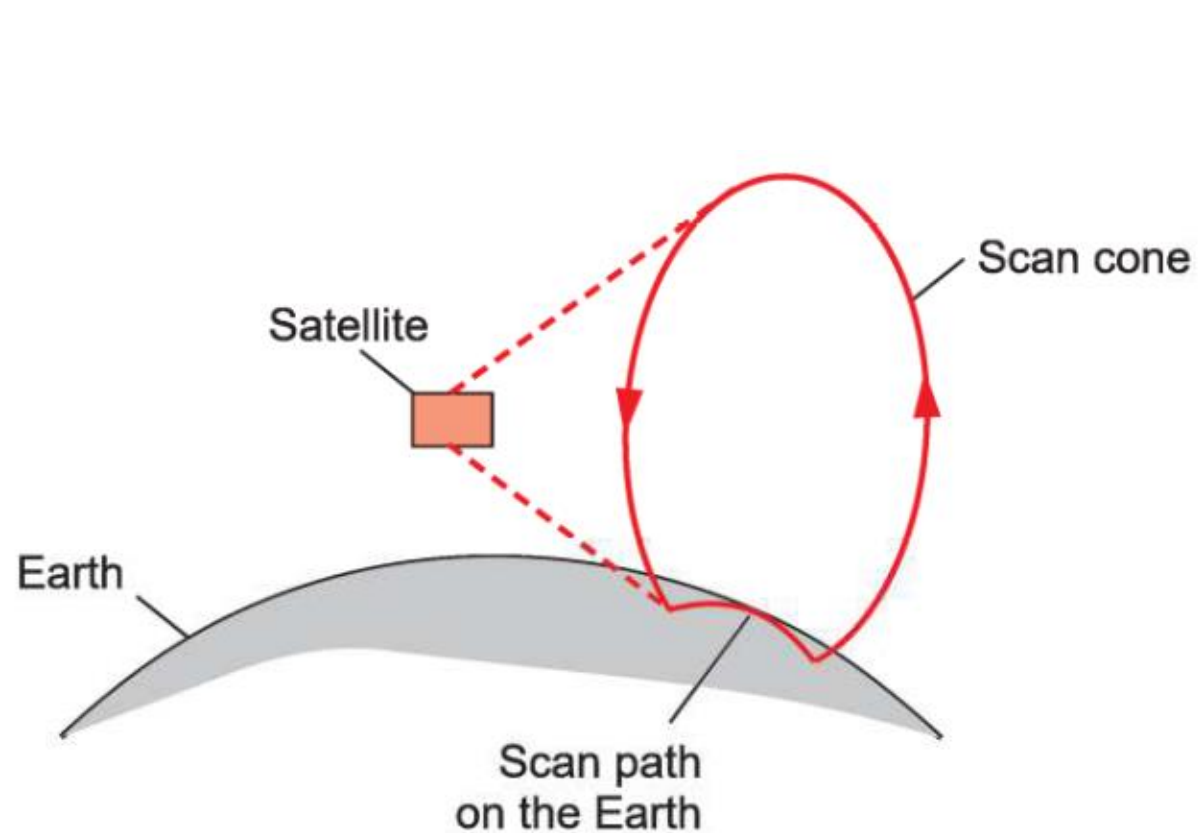


Princípio de medida de um sensor terrestre estático. Fonte: ref. [1].

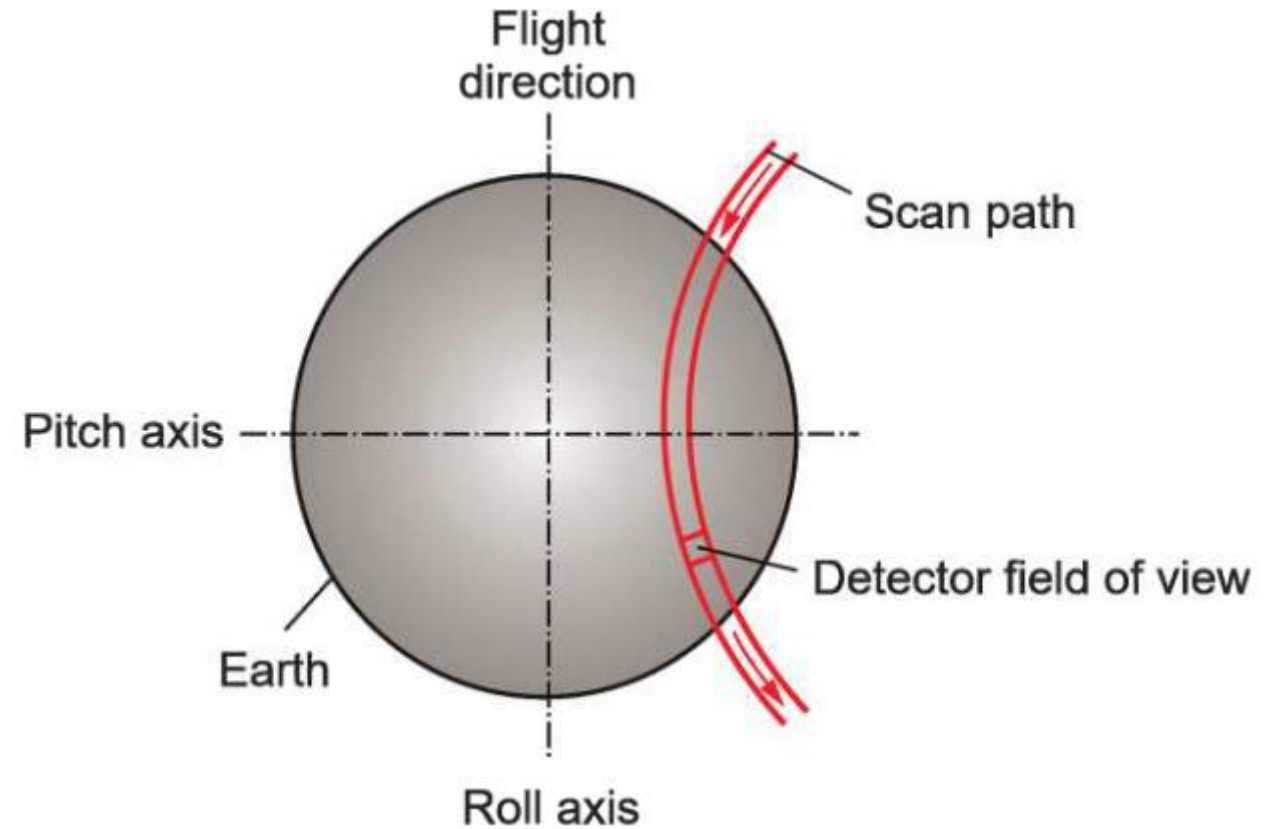


Arranjo de 3 sensores terrestres estáticos. Fonte: ref. [1].

Sensor de Horizonte Terrestre

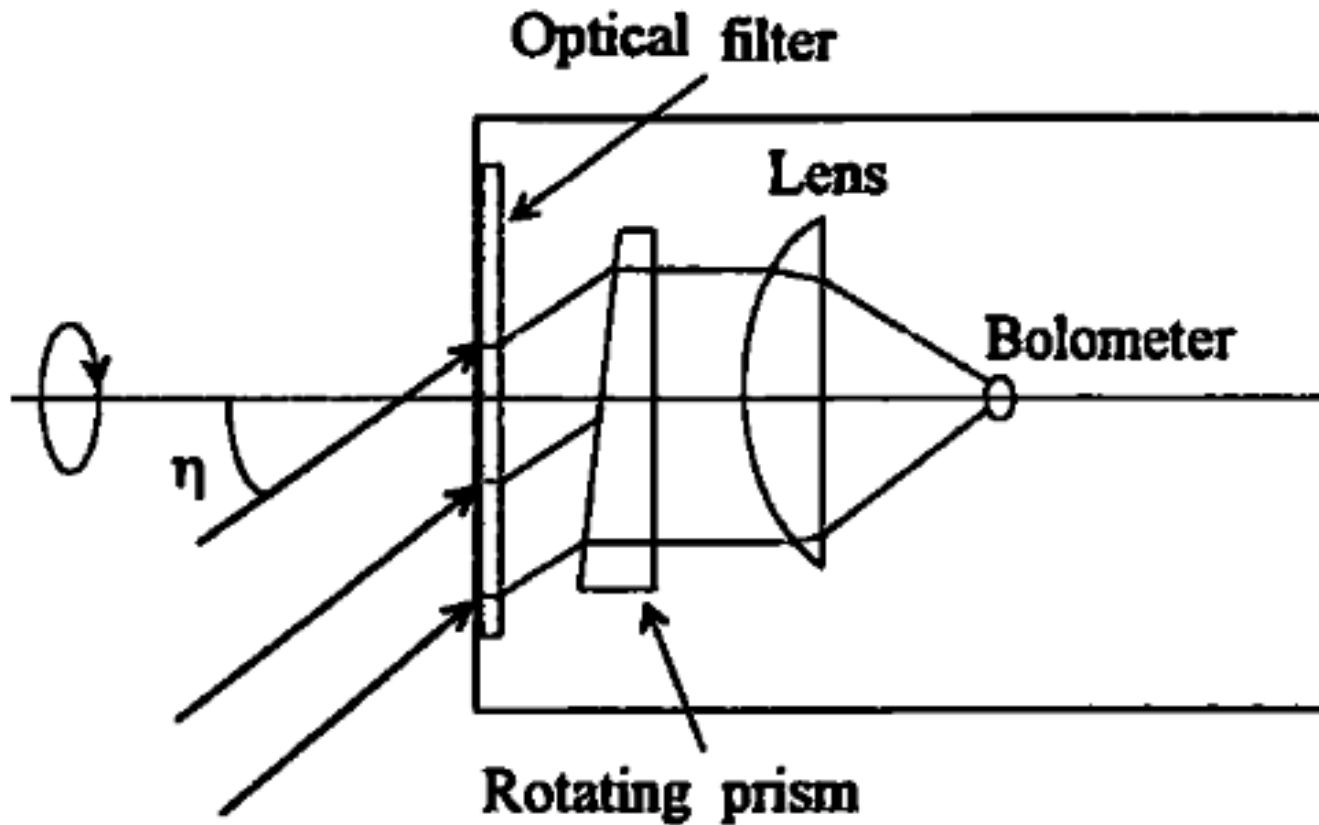


Geometria de escaneamento de um sensor terrestre de varredura. Fonte: ref. [1].



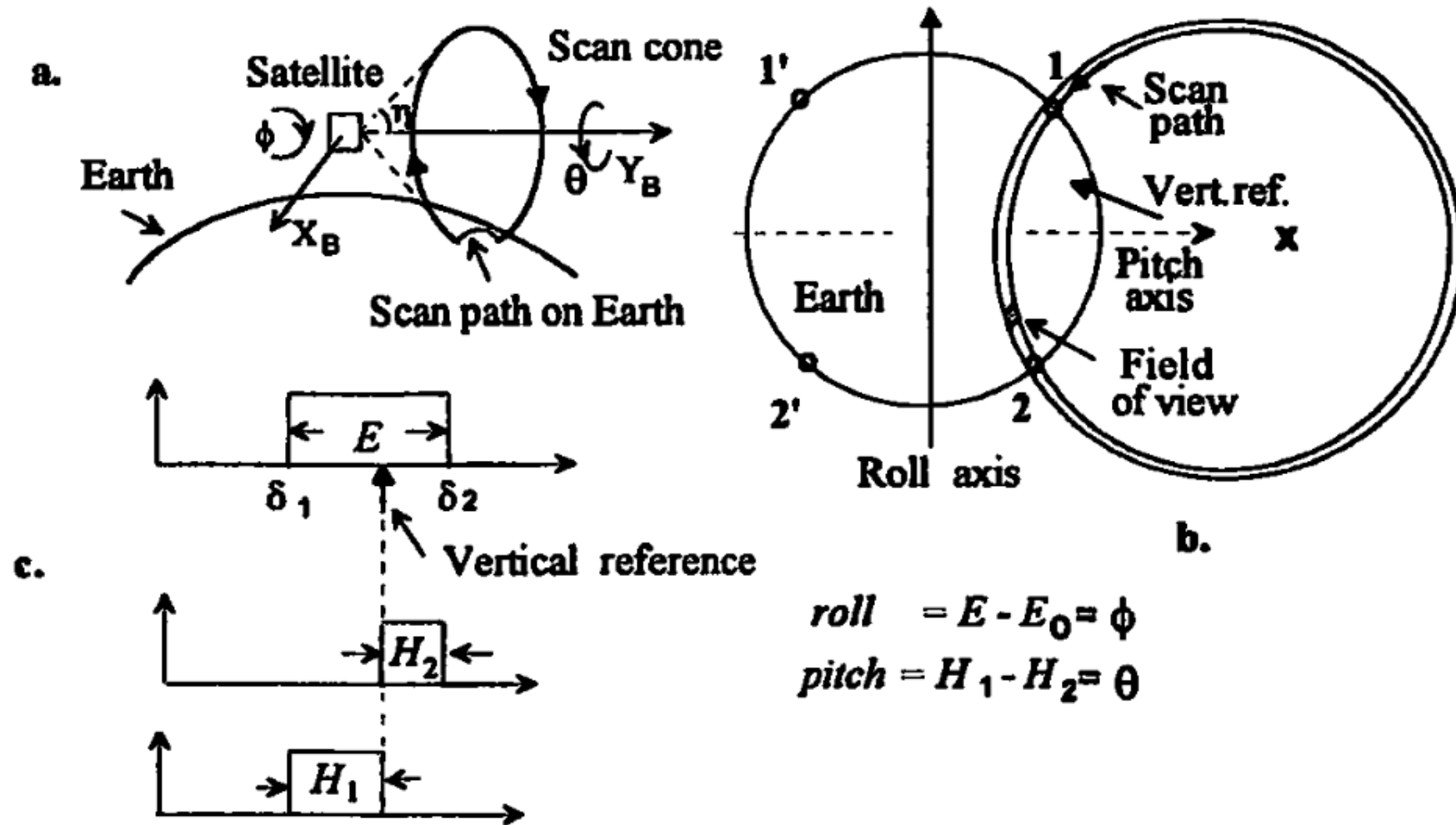
Princípio de medição de sensores terrestres de varredura. Dependência do sinal do detector com os ângulos de rolamento e arfagem do satélite Fonte: ref. [1].

Sensor de Horizonte Terrestre



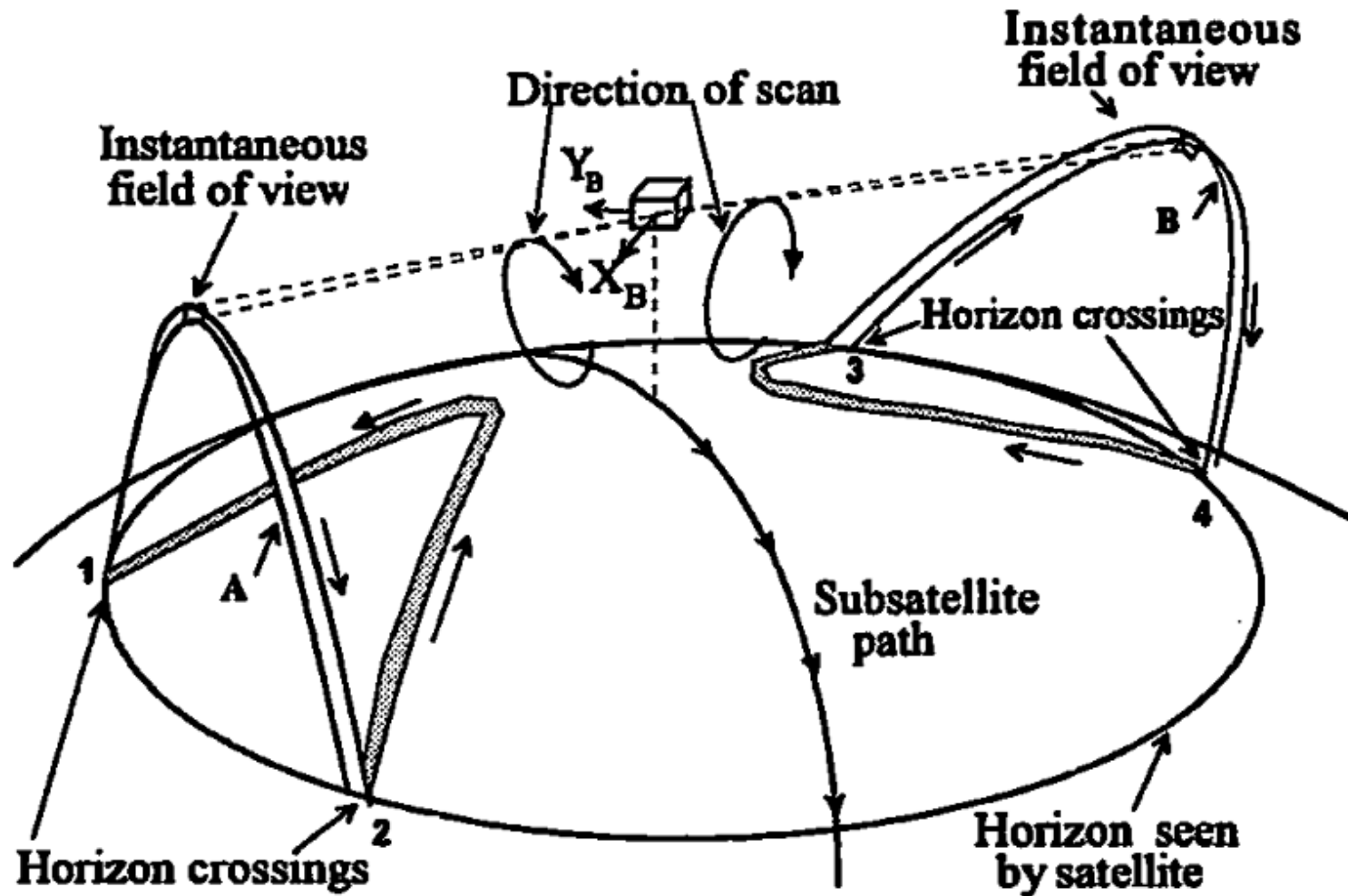
Princípio do sensor de varredura simples do horizonte. Fonte: ref. [2].

Sensor de Horizonte Terrestre

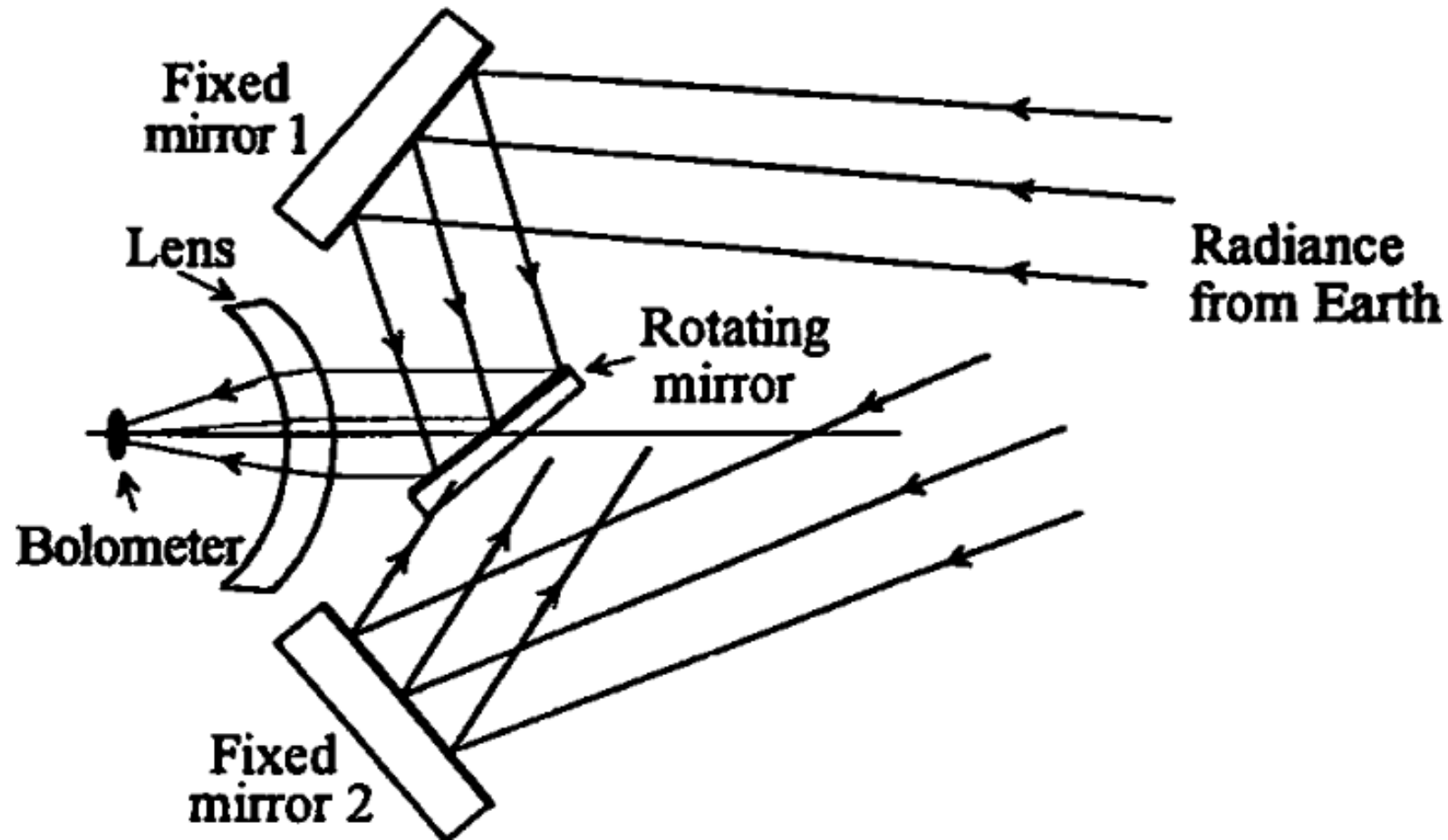


Determinação dos ângulos de rolamento e arfagem com um único cone. Fonte: referência [2].

Sensor de Horizonte Terrestre



Sensor de Horizonte Terrestre

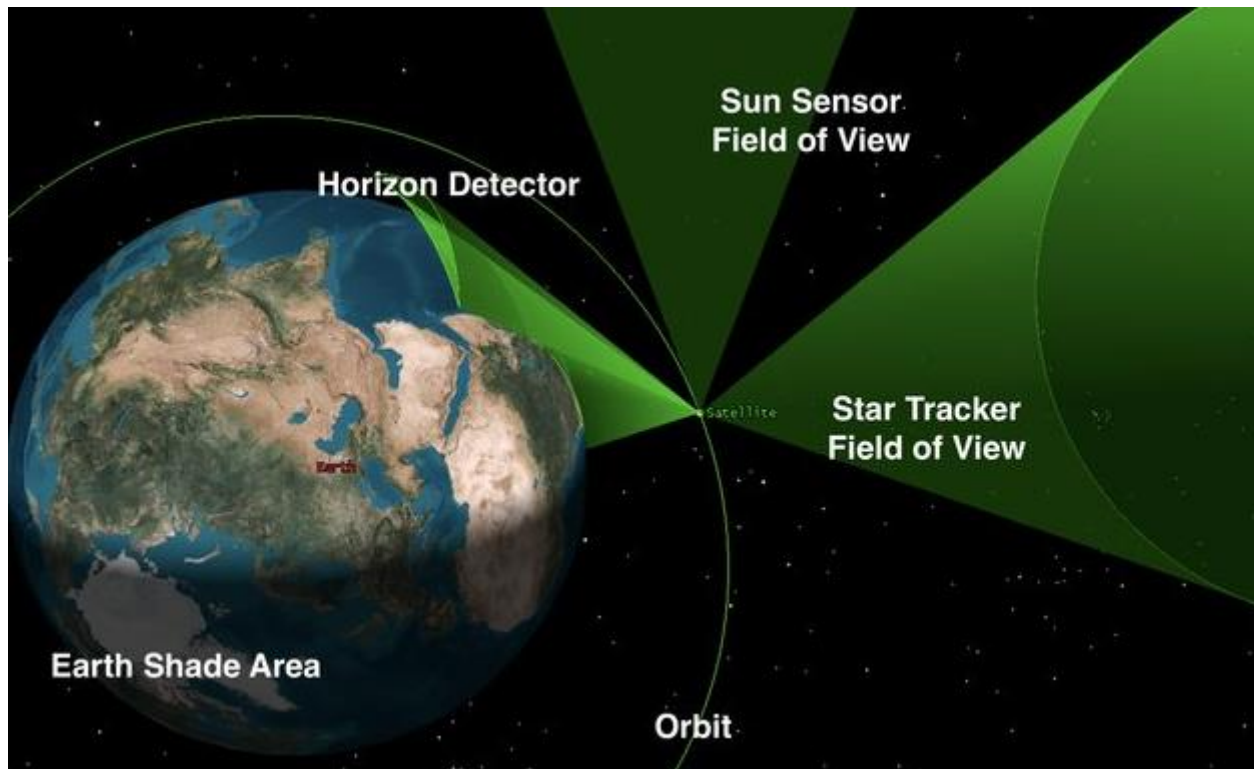


Detalhes construtivos do sensor de dupla varredura e meio cone. Fonte: ref. [2].

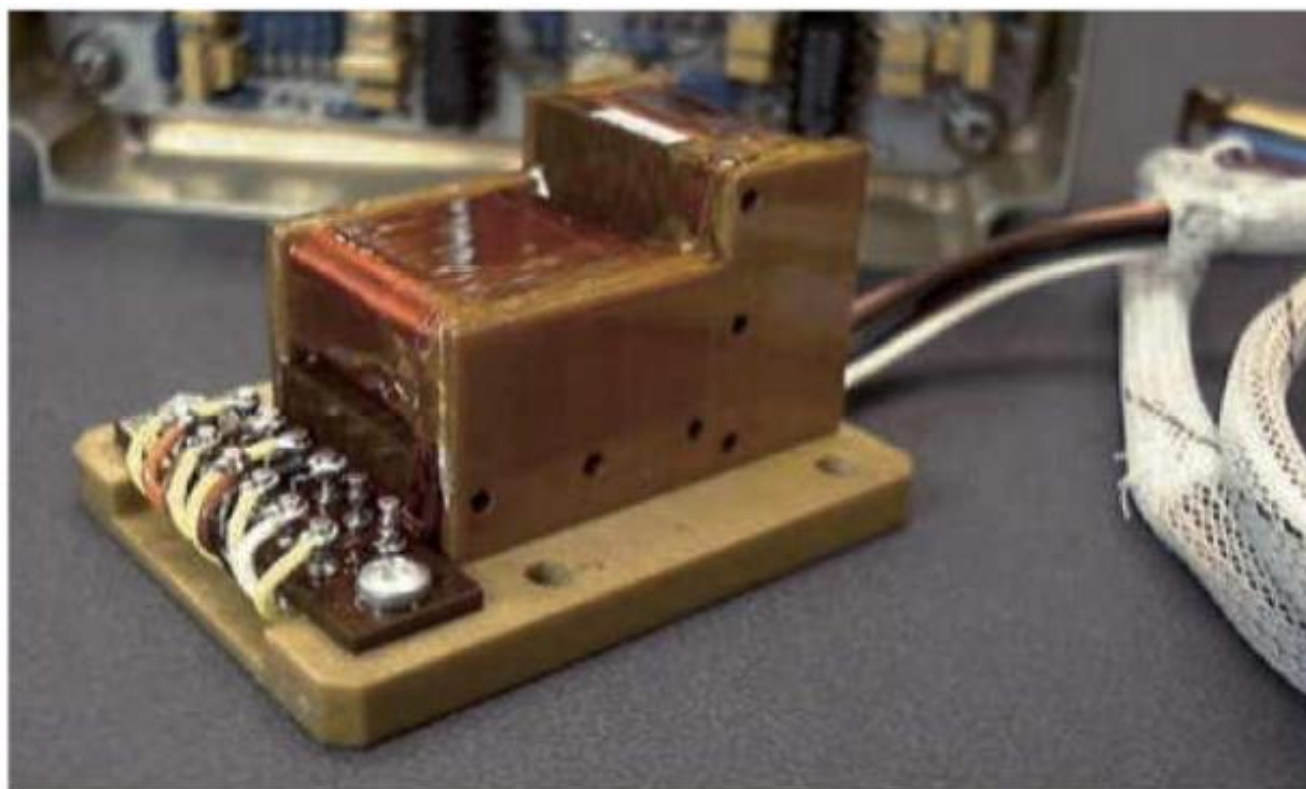
Sensor de Horizonte Terrestre

Aspects	Static	Scanning	Comments
Accuracy	$1^\circ, 3\sigma$	Bias: $0.05^\circ, 3\sigma$ Noise: 0.05°	After compensation for systematic errors
Field of view	20° ($\times 15^\circ$)	Roll $\pm 30^\circ$ Pitch $\pm 20^\circ$	LEO
Measurement axes	1	2	–
Mass	0.2 kg	3.5 kg	–
Power consumption	0.35 W	7.5 W	Without thermal control

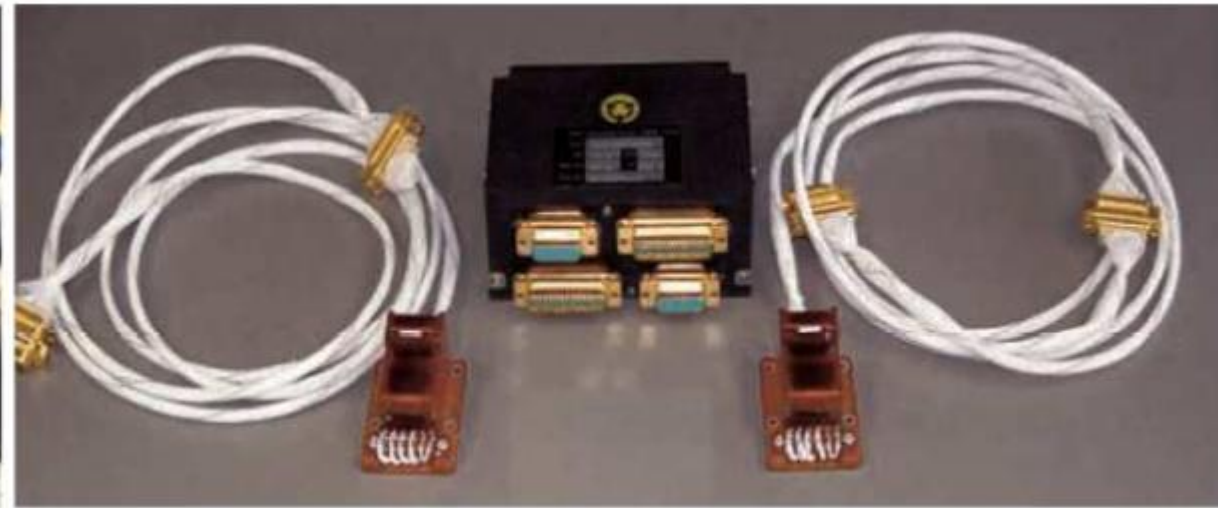
Campos de Visão e Limitações



Sensor Magnético



Cabeça de sensor com dois elementos perpendiculares do tipo “núcleo fluxgate anelar biaxial”. Cada elemento propicia a medida de duas componentes do vetor campo magnético. Fonte: ref. [1].

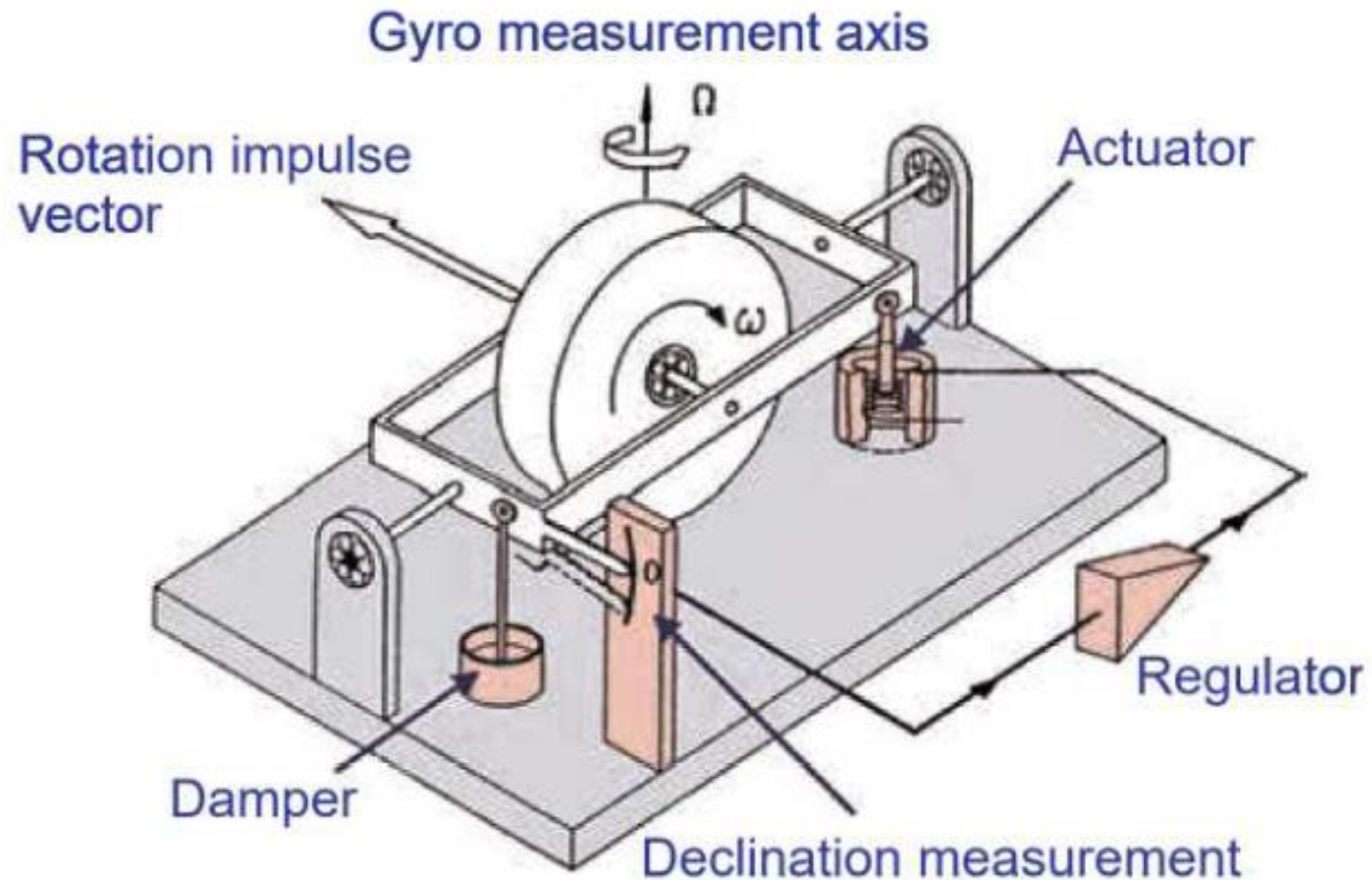


Magnetômetro redundante, consistindo de uma unidade eletrônica internamente redundante e duas cabeças de sensor. Fonte: ref. [1].

Sensor Magnético

Aspect	Value	Comments
Measurement accuracy of the magnetic field	0.5°	With adequate post calibration: 0.05°
Measurement bandwidth	40 Hz	Cut-off frequency for 50% of the effective value (see Section 4.5.6.1)
Power consumption	0.3 W	–
Mass	0.5 kg	Sensor head + cabling + electronic box
Application area	LEO	LEO = Low Earth Orbit

Giroscópio



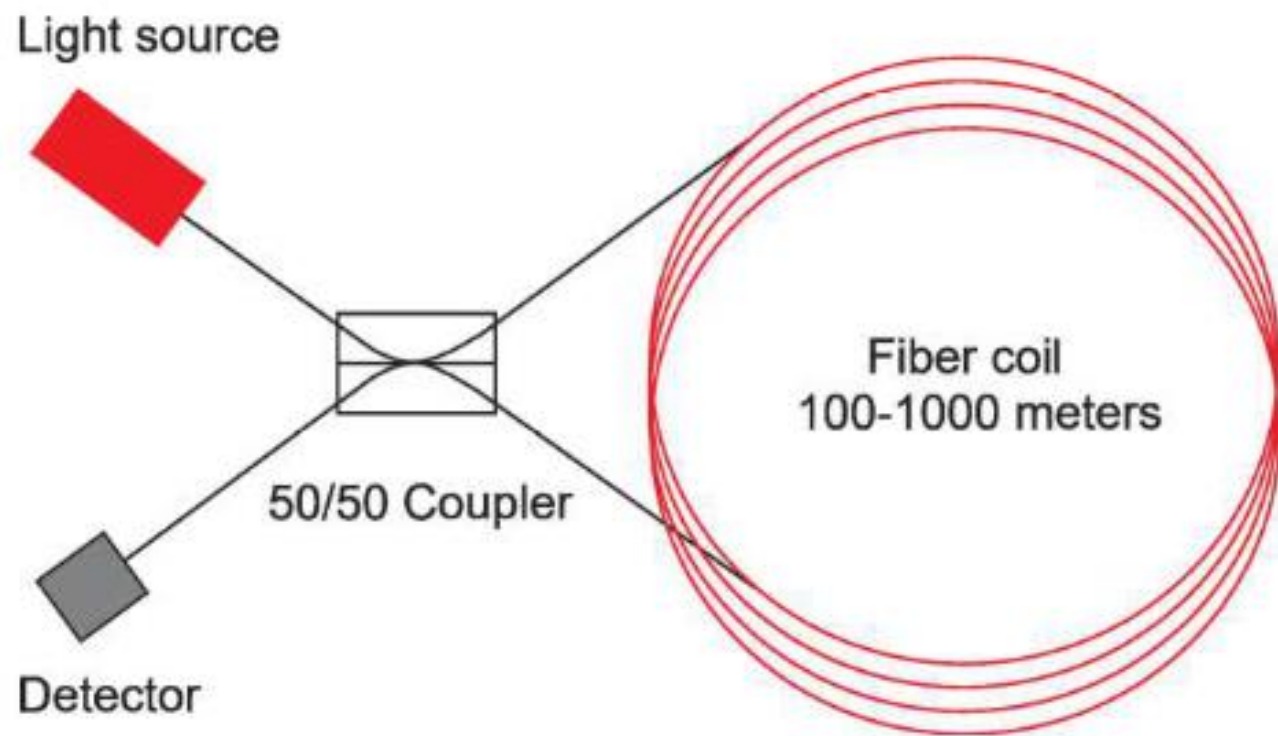
Princípio de medida de taxa de rotação por um giroscópio mecânico. Fonte: ref. [1].

Giroscópio



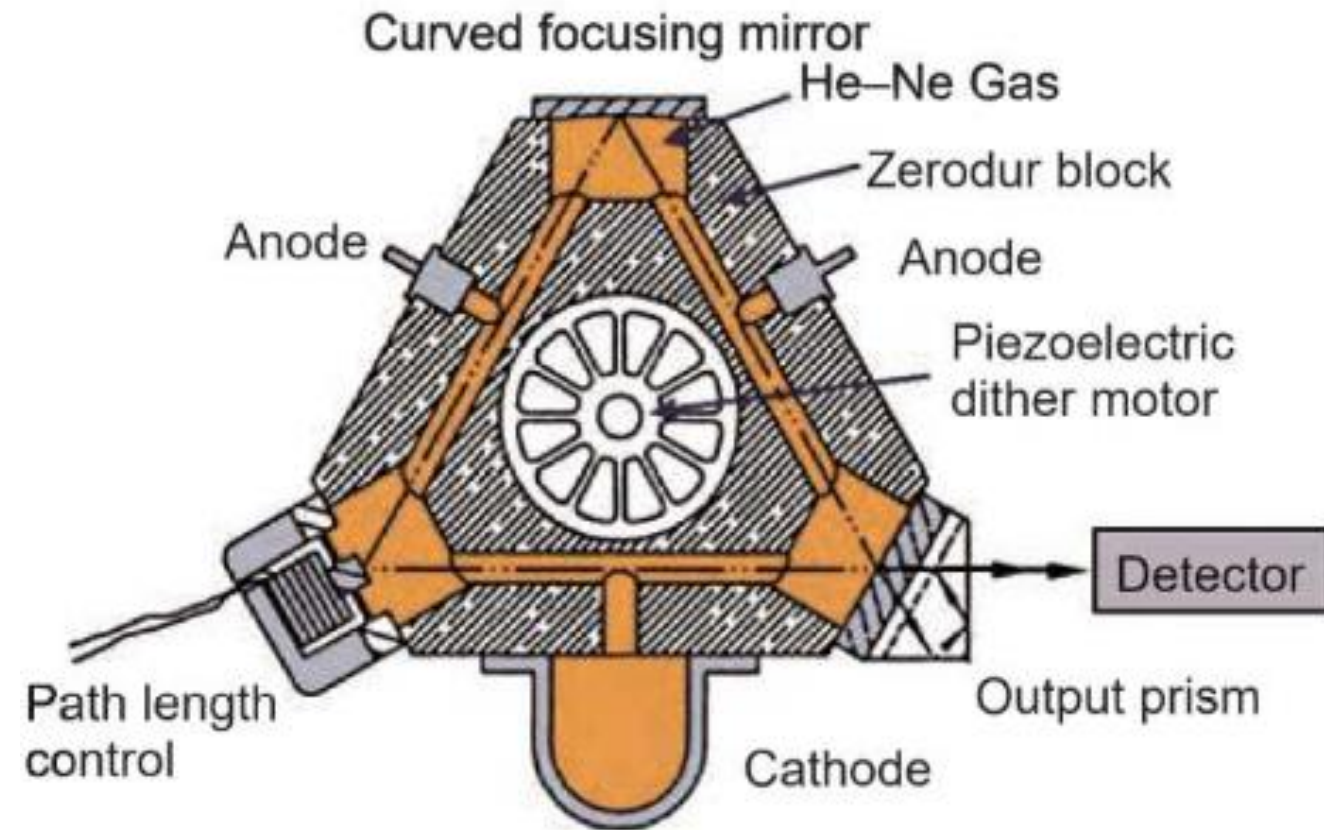
Aparência externa de um giroscópio mecânico. Fonte: ref. [1].

Giroscópio

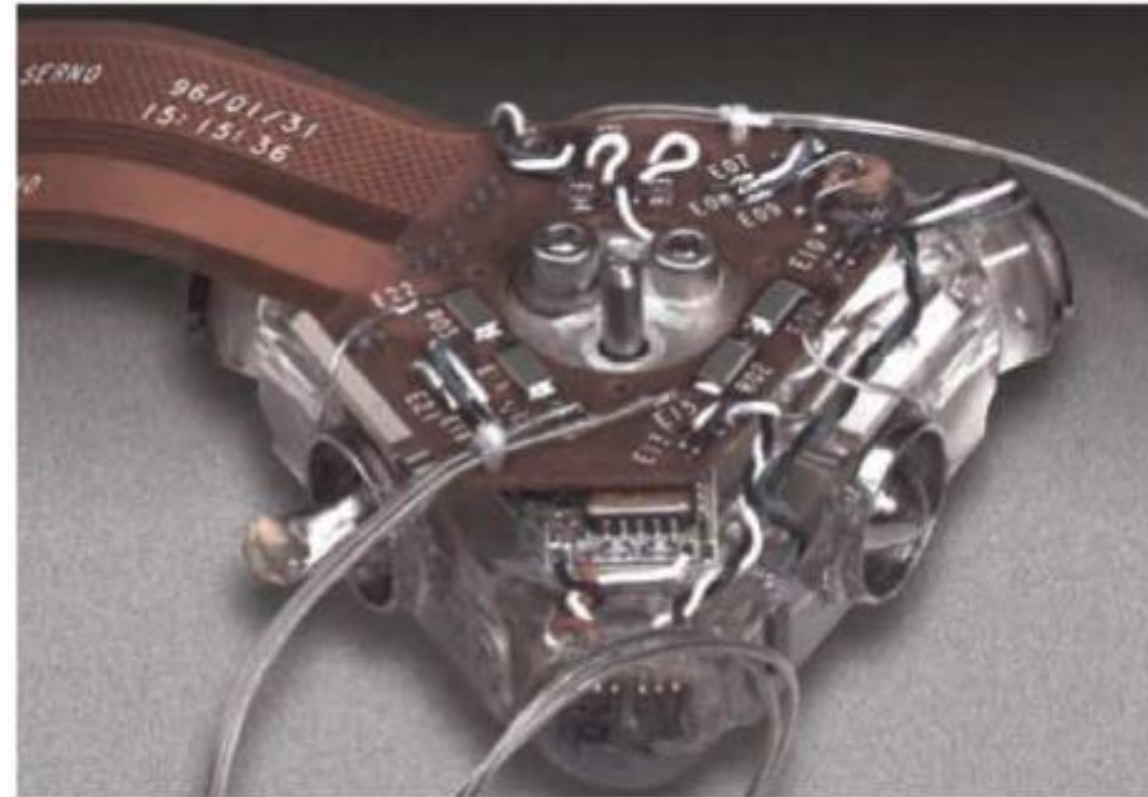


Princípio de um giro de fibra ótica. Fonte: ref. [1].

Giroscópio



Esquema funcional de um giro laser anelar. Fonte: ref. [1].

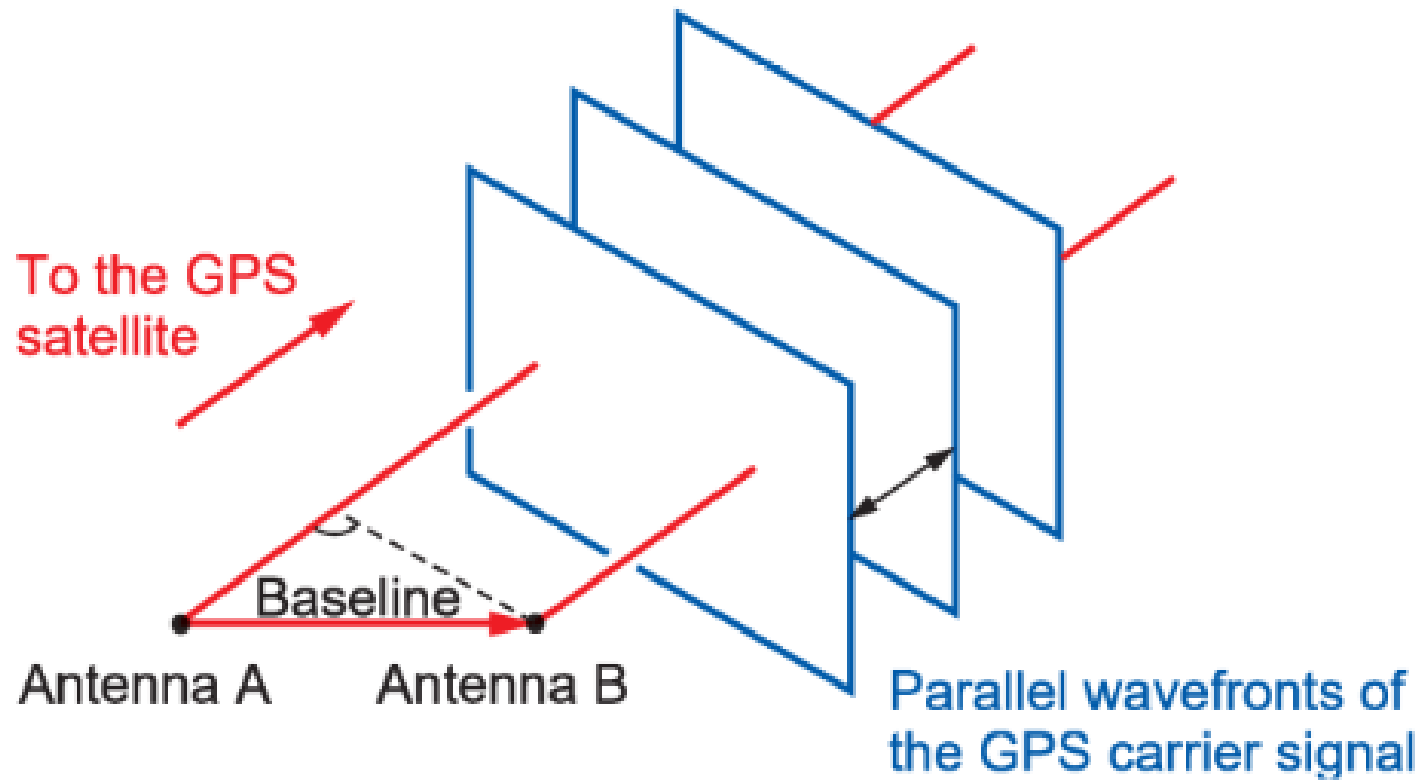


Bloco de vidraçaria de um giro laser anelar (aproximadamente 5 cm) com cabeamento da eletrônica. Fonte: ref. [1].

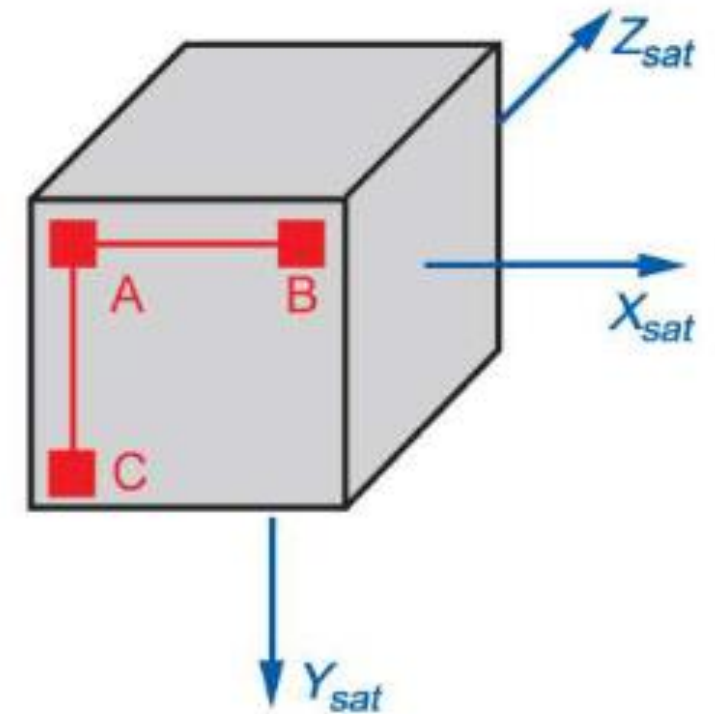
Giroscópios

Aspect	Mechanical gyro	HRG	RLG	FOG	Comments
Bias	$0.01^{\circ}/h$	$0.01^{\circ}/h$	$0.01^{\circ}/h$	$1^{\circ}/h$	1σ , after compensation
Scale factor error	50 PPM	30 PPM	100 PPM	1000 PPM	1σ , after compensation
Random walk	$0.005^{\circ}/h^{1/2}$	$0.0005^{\circ}/h^{1/2}$	$0.01^{\circ}/h^{1/2}$	$0.3^{\circ}/h^{1/2}$	1σ
Degradation	Deterioration	No	Aging	Yes	–
Moving parts	Yes	No (oscillating)	No (dither)	No	–

GNSS



Princípio de determinação de atitude baseada em GPS. Fonte: ref. [1].



Posicionamento de 3 antenas GPS A, B e C em um satélite. Fonte: ref. [1].

GNSS

Aspect	Value	Comments
Attitude accuracy	0.1°	1.5 m baseline, stationary measurement setup
Power consumption	7 W	Inclusive position determination
Mass	3 kg	Inclusive position determination Single receiver, four antennas with LNA and harness
Application area	LEO	Studies: use in GEO is possible