

Aula 03: Sensores de posição empregados em determinação, navegação e controle de atitude: Sensores Solares: Sensores analógicos.

Nas próximas aulas vamos descrever exemplos representativos de *hardware* utilizados para determinação e controle de atitude. Serão vistos as características físicas e os princípios operacionais de uma variedade de sensores. Os modelos matemáticos associados com esses sensores serão vistos mais adiante. Mais informações sobre *hardware* para controle de atitude, podem ser encontradas em Fontana *et al.*, 1974, Hatcher, 1967, e Schmidtbauer *et al.*, 1973. Um sumário que lista o *hardware* específico para várias missões é dado em Wertz, 1978.

Sensores Solares

O tipo de sensor mais utilizado é o sensor solar. Quase toda missão apresenta uma ou mais variedades desse tipo de sensor. Essa versatilidade é devida a vários fatores.

- Diferentemente da Terra, o raio angular do Sol quase que independente da posição orbital e é suficientemente pequeno ($0,267^\circ$ à distância de uma UA¹). Então, para a maioria das aplicações é válida a aproximação do Sol por um ponto. Isso simplifica o projeto do sensor e os algoritmos de determinação de atitude.
- O Sol é suficientemente brilhante, o que permite a utilização de um equipamento simples, confiável e com requisitos mínimos de potência.
- Muitas missões têm experimentos solares, a maioria tem vínculos térmicos relacionados com o Sol e quase todas retiram do Sol a energia necessária para acionar os equipamentos². Consequentemente, as missões têm interesse na orientação e na evolução temporal do vetor satélite-Sol nas coordenadas do corpo. Com frequência, sistemas de controle de atitude utilizam um pulso de referência solar para acionamento de foguetes, ou, em geral, quando necessitam de informação de ângulo-fase.
- Sensores solares também são usados para proteger equipamentos sensíveis como sensores de estrelas, para fornecer uma referência para controle de atitude a bordo e para posicionar geradores de potência (painéis solares).

A vasta aplicabilidade dos sensores solares tem levado ao desenvolvimento de numerosos tipos de sensores com *campos de visada* (FOV, do inglês, *Field of View*) variando de alguns minutos de arco (10^{-7} sr³) até 128° por 128° (aproximadamente π sr) e resolução variando de vários graus a menos que um segundo de arco. As três classes básicas de sensores solares são os *sensores analógicos*, que têm um sinal de saída que é função contínua do ângulo solar, geralmente monotônica; *sensores de presença solar*, que fornecem um sinal de saída constante quando o Sol está no FOV e *sensores digitais*, que fornecem uma saída codificada e discreta que é função do ângulo solar. A Tabela 1 apresenta um resumo dos tipos de sensores fabricados pela Adcole Corporation.

¹ A *unidade astronômica*, ou UA, é a unidade de comprimento igual ao semi-eixo maior da órbita da Terra em torno do Sol.

² As missões *Pioneer* são exemplos de missões que não utilizam o Sol como fonte de energia. Elas utilizam energia nuclear devido ao fato do fluxo solar ser inversamente proporcional ao quadrado da distância do Sol.

³ A área de um triângulo esférico medido sobre a superfície curva de uma esfera de raio unitário é chamada *ângulo sólido*. Ângulos sólidos são medidos em graus ao quadrado ou *esteroradianos* (sr).

Sensores Solares Analógicos

Sensores analógicos, às vezes chamados de *detectores coseno* porque um tipo comum é baseado na variação senoidal da corrente de saída de uma célula solar de silício com o ângulo solar, está mostrado na Figura 1. Especificamente, o fluxo de energia, E , na direção normal, através da superfície de área dA da fotocélula é

$$E = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}} dA, \quad (1)$$

onde \mathbf{P} é o vetor que dá a direção e a magnitude da radiação eletromagnética. Então, a energia depositada na fotocélula e, conseqüentemente, a corrente de saída, I , é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência da radiação solar, isto é

$$I(\theta) = I(0) \cos \theta. \quad (2)$$

Pequenas perdas devido à reflexão de Fresnel, área efetiva da fotocélula e reflexão na interface ar-célula, que depende do ângulo de incidência, não são consideradas no modelo simplificado da Equação 2.

Para limitar o FOV de um sensor analógico são usadas aberturas, e detectores coseno usados para posicionar o ângulo solar geralmente tem FOVs cônicos. Um grupo de detectores coseno, ou *olhos*, cada um com um FOV limitado, pode fornecer precisão intermediária sob uma grande região angular, como mostram as Figuras 2 e 3.

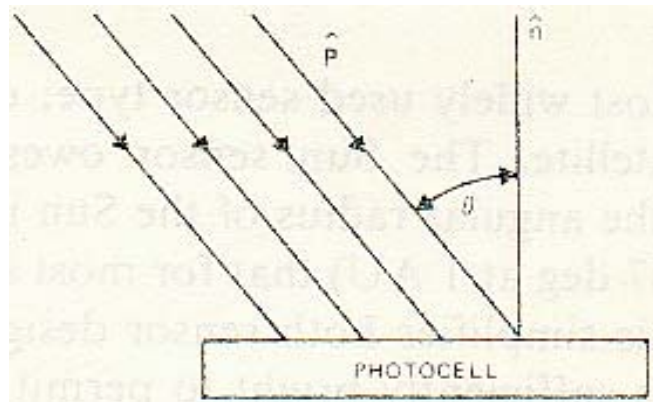


Fig. 1 – Sensor solar detector coseno.

Um segundo tipo de sensor analógico usa uma barra ou máscara para sombrear uma porção de uma ou mais fotocélulas. Existem diferentes configurações para sensores de um eixo (Fig. 4) ou sensores de dois eixos (Fig. 5) com FOVs e resolução variáveis. O sensor de dois eixos mostrado é similar àquele que voou no HEAO-1 (Gray, *et al.*, 1976).

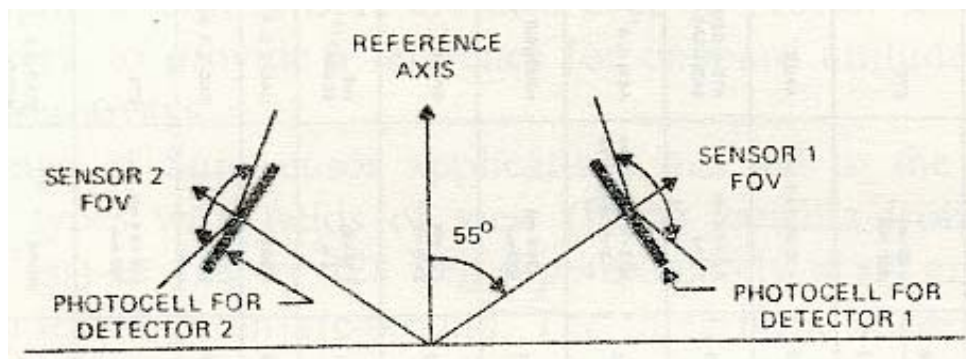


Fig. 2 – Orientação de dois detectores coseno montados com o objetivo de fornecer medidas do ângulo solar sob uma grande região angular.

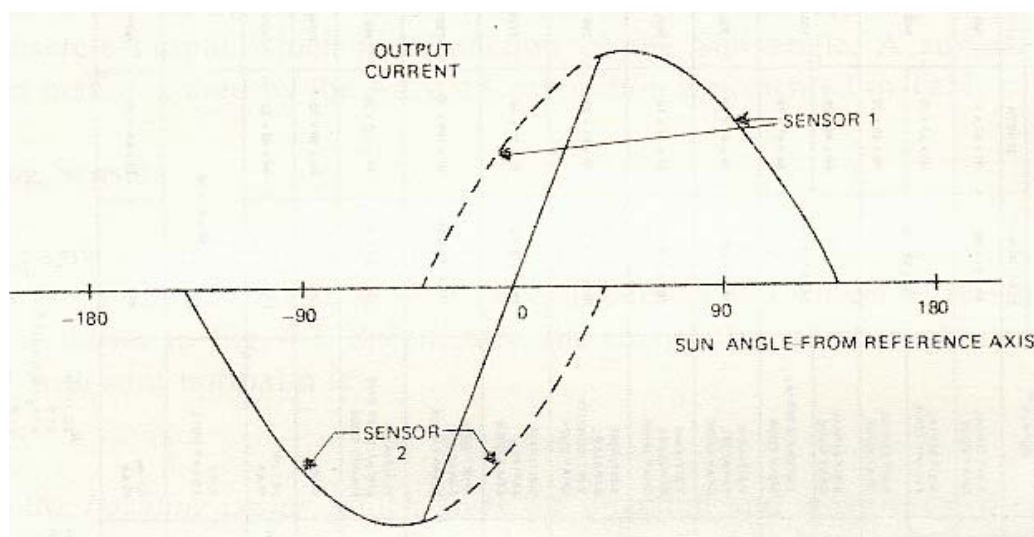


Fig. 3 – Soma dos sinais de saída de dois detectores coseno quando o Sol está no plano contendo o eixo de referência e a normal aos detectores (plano do papel na Fig. 2). As linhas tracejadas são as saídas de cada sensor. Repare que são curvas do coseno com valores máximos em $\pm 55^\circ$ (conforme a Fig. 2). A linha sólida é a soma dos sinais. A saída é linear em torno do erro nulo.

Tabela 1 - Sensores solares fabricados pela Adcole Corporation

Sensor	Modelo Adcole	FOV	Num. Max. de sensores ⁽²⁾	LSB	Precisão ⁽⁴⁾	Função de Transf. ⁽⁵⁾	Saída ⁽¹⁰⁾	Dimensões (mm)		Massa (g)		Potência	Missão
								eletrônica	sensor	eletrônica	sensor		
Digital p/ veículos girantes	17083	180° ⁽¹⁾	1	1,0°	0,5°	⁽⁶⁾	9-bit serial Gray	84x51x89	51x51x31	445	141	-24,5 VDC 12 ma	AE-3, 4, 5, RAE-2
	15761	5,6° ⁽¹⁾	1	0,02°	0,1°	⁽⁷⁾	8-bit serial bin	102x89x56	33x33x33	540	109	+5 VDC 80 mA, +8 VDC 4 mA, -8 VDC 4 mA	AEROS-1 AEROS-2
		180° ⁽¹⁾	1	1,0°	0,5°	⁽⁶⁾	8-bit serial Gray		46x43x20				
	18273	64° ⁽¹⁾	2	0,25°	0,1°	⁽⁶⁾	8-bit serial Gray	193x114x64	66x38x25	1043	73	+28 VDC 600 mW	CTS
Digital de dois eixos		128°x128°	5	1,0°	0,5° ⁽³⁾	⁽⁸⁾	7-bit/eixo serial Gray		84x41x18				
	15486	128°x128°	1	1,0°	0,5° ⁽³⁾	⁽⁸⁾	7-bit/eixo paral. Gray	76x76x51		358	82	+15 VDC 19,5 mA	ATS-6
	17115	128°x128°	3	1,0°	0,5° ⁽³⁾	⁽⁸⁾	7-bit/eixo paral. Gray			957	113	5,0 ± 0,2 VDC 12 mA	ATS-6, GEOS-3, SAS-3, RAE-2
	16764	128°x128°	5	0,5°	0,25° ⁽³⁾	⁽⁸⁾	8-bit/eixo paral. 3-bit ident. Gray	89x114x31	81x81x20	295	259	+12 ± 0,36 VDC 8 mA, -12 ± 0,36 VDC 2 mA	AEM-A, B ⁽¹¹⁾
	17032	64°x64°	4	0,125°	0,1° ⁽³⁾	⁽⁸⁾	9-bit/eixo serial Gray	197x114x60	97x71x23	1148	277	-24,5 VDC 560 mW	NIMBUS-6
	15381	64°x64°	1	0,004°	0,017° ⁽³⁾	⁽⁹⁾	14-bit/eixo paral. Bin	198x114x64	97x104x25	1361	372	+28 VDC 61,5 mA	OA0-3
	18960	64°x64°	2	0,004°	0,017°	⁽⁹⁾	15-bit/eixo serial Gray e bin	206x157x30	84x110x25	455	341	+28 VDC 1,8 W	IUE SEASAT ⁽¹¹⁾
Analog. De dois eixos	12202	30° cone	N/A	N/A	1,0° na ref.	± 1° linear	±4 mA	N/A	64x30x33	NÃO	55	NÃO	OA0-2, 3, ATS-6
	18394	hemisfério	1	N/A	2,0° na ref.	± 30° linear	±0,1 mA PICO	N/A	48x48x33		82		
Analog. De um eixo	17470	40°x60°	1	N/A	6,0° na ref.	± 1° linear	0 – 5 V 2,5 V null	69x51x28		118		±15 ± 0,6 VDC 100 mW	CTS
Analog. Lei dos cosenos	11866	160° cone	N/A	N/A	2μs	Coseno do ângulo de incidência	±0,1 mA PICO	N/A	23 dia x10	NÃO	4,6	NÃO	OA0-2, 3, ATS-6

⁽¹⁾O FOV é do tipo FAN. Um pulso é gerado quando o FAN cruza o Sol e o ângulo solar digital é lido e armazenado. O sensor deve ser montado de tal modo que o plano do FAN seja paralelo ao eixo de giro.

⁽²⁾Suportado pela eletrônica.

⁽³⁾Média dos LSBs de um eixo sob o FOV.

⁽⁴⁾Para um sensor digital, o erro é definido como o valor absoluto da diferença entre o ângulo solar calculado da função de transferência e o medido.

⁽⁵⁾função de transferência e âng. solares - seção 7.1 e Fig. 7.8.

⁽⁶⁾Equação 7.13, $J = 0; \alpha = k_0 + k_1 N + O(N^3)$.

⁽⁷⁾ $J = 0; \alpha = 0,0108 + 0,0216 N$.

⁽⁸⁾Equação 7.17 até 7.21.

⁽⁹⁾Equação 7.38,

⁽¹⁰⁾Saída paralela: um fio/bit. Série: buffer

⁽¹¹⁾Proposto.

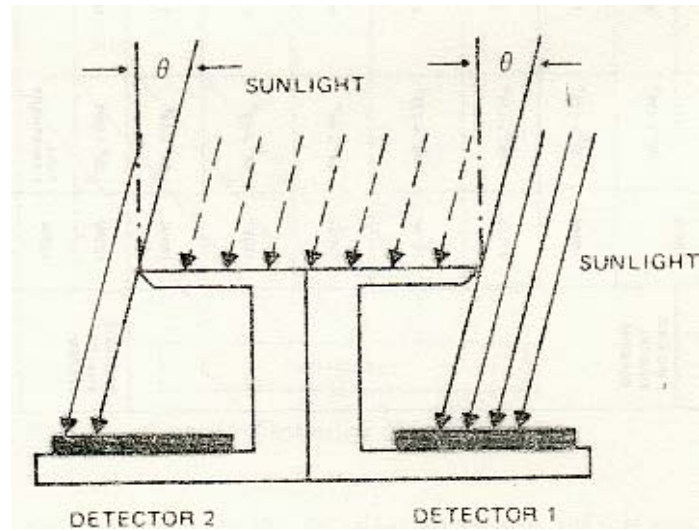


Fig. 4 – Sensor solar de máscara de um eixo (Koso e Kollodge, 1969).

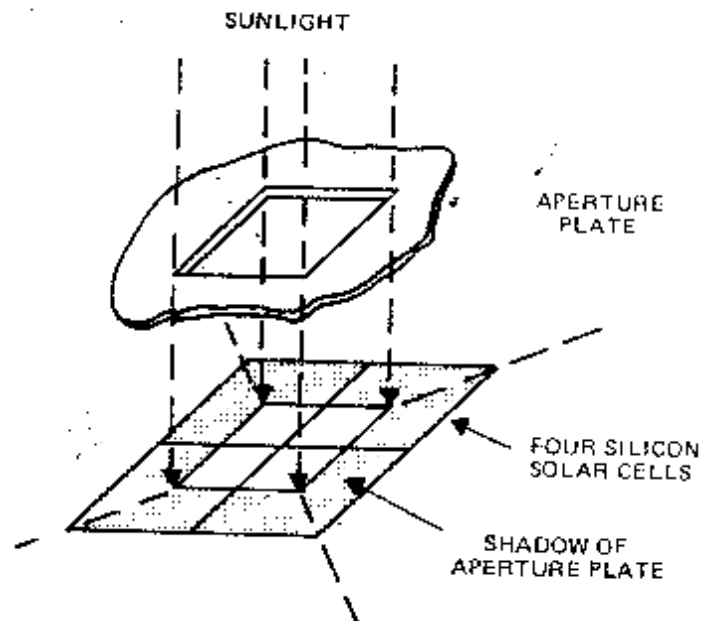


Fig. 5 – Sensor solar de máscara de dois eixos (Schmidtbauer *et al.*, 1973). A linha do Sol é normal ao prato de abertura se a saída de todas as quatro células é igual.