

2 Sensores

A capacidade e a forma de interagir com o mundo dependem de como ele é percebido. Os sensores provêm o robô com a capacidade de perceber o mundo, logo a utilização dos mesmos é de grande importância na construção de um sistema autônomo.

Existem diversos tipos de sensores que são utilizados na robótica móvel. O foco deste capítulo será naqueles mais comumente utilizados para resolver problemas de localização, comuns a todos os robôs autônomos móveis. Dentre os sensores abordados, apenas o sensor inercial e o GPS serão apresentados em maiores detalhes. Com relação aos outros sensores abordados, um maior detalhamento é encontrado em (SIEGWART e NOURBAKHSI et. al., 2004) e (EVERETT e PETERS et. al., 1995).

2.1. Erro

Os sensores medem quantidades físicas, e seu erro é dado pela diferença entre o valor medido e o valor real.

$$V_m = V_r + e \quad (1)$$

onde:

V_m – valor medido.

V_r – valor real.

e – erro.

O erro limita a precisão e a acurácia do resultado de uma medida. Este pode ser classificado em dois tipos distintos: o erro aleatório e o sistemático. O erro aleatório é aquele que possui uma flutuação temporal, sendo este imprevisível, enquanto o sistemático é constante ou proporcional ao valor real, podendo ser

predito. Quando a causa de um erro sistemático for identificável, o mesmo pode ser eliminado. Este procedimento é chamado de calibração do sensor.

O erro dos sensores é um dos limitantes das soluções de navegação, e reduz a capacidade de autonomia de um sistema robótico. A compreensão das diversas fontes de erro presentes em uma medida e sua devida modelagem permitem soluções de navegação mais robustas e construção de filtros para redução dos mesmos. Os tipos mais comuns de erros presentes em sensores, e como estes alteram a relação entre a entrada e saída, estão representados na Fig. 6.

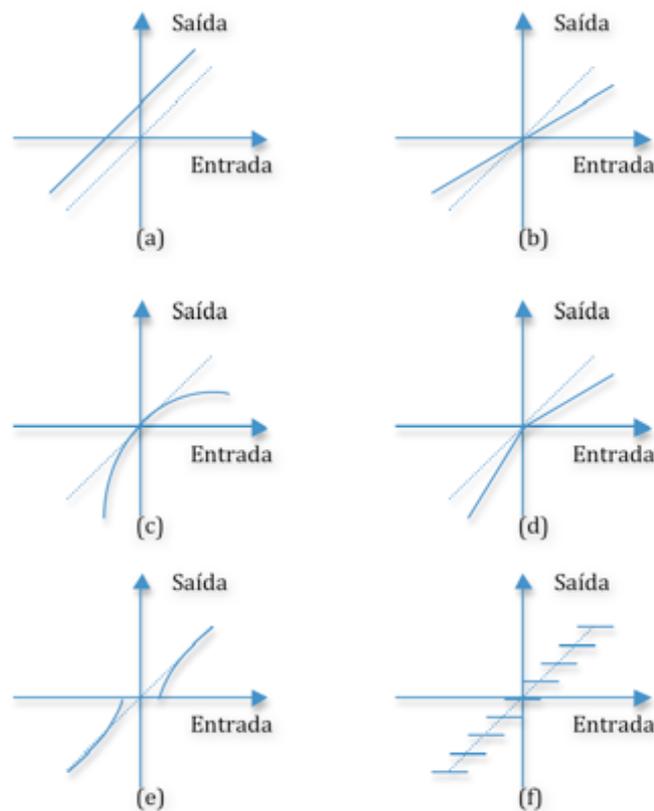


Figura 6 – Erros comuns entre entrada e saída: (a) bias; (b) fator de escala; (c) não-linearidade; (d) assimetria; (e) zona morta; (f) quantização.

2.2. Sensores Proprioceptivos

Sensores proprioceptivos são aqueles que medem os parâmetros internos ao sistema. A vantagem deste tipo de sensor é de não depender do meio ambiente para suas medidas, o que as torna mais robustas. Os sensores utilizados na

robótica móvel que se enquadram nesta categoria são os odômetros e os sensores inerciais, os quais são detalhados a seguir.

2.2.1. Odômetros

Robôs móveis em geral utilizam atuadores rotativos para se locomoverem. Em conjunto com as equações cinemáticas do sistema, é possível inferir o deslocamento no ambiente a partir do deslocamento angular dos motores ao longo do tempo. Os dispositivos mais utilizados na robótica que medem posição e velocidade angular de um motor são os *resolvers* e os *encoders* óticos. Esses sensores podem também ser usados para inferir velocidades. Os *encoders* óticos possuem uma acurácia mais alta que o resolver e são de mais simples implementação, enquanto os *resolvers* são mais robustos e duráveis. As equações e os princípios de funcionamento podem ser vistos em (BARNET et. al., 2007).

2.2.2. Sensores Inerciais

Os sensores inerciais são constituídos de girômetros e acelerômetros. O girômetro mede a velocidade angular em relação a um referencial inercial e o acelerômetro a aceleração. Isto permite, através de cálculos integrais, definir a posição, velocidade e orientação do veículo, sem depender de parâmetros externos ao sistema. Em (DUDEK e JENKIN et. al., 2008; GREWAL, WEILL e WILEY et. al., 2007) são fornecidas informações complementares às apresentadas a seguir sobre os acelerômetros, girômetros e os sensores inerciais. Um sistema inercial pode possuir giroscópios, o qual é um subsistema inercial baseado em um dispositivo girômetro, que emprega circuitos eletrônicos para integrar o sinal de velocidade angular (medido através do girômetro) e determinar o ângulo de atitude no eixo correspondente.

Os sensores inerciais possuem duas implementações distintas: *Guimbale*, onde os girômetros e acelerômetros estão dentro de um suporte de anéis ortogonais uns aos outros que possuem a liberdade de girar, Fig. 7; ou *Strapdown*, onde 3 girômetros e 3 acelerômetros são montados ortogonalmente sob um bloco fixo, vide Fig. 8

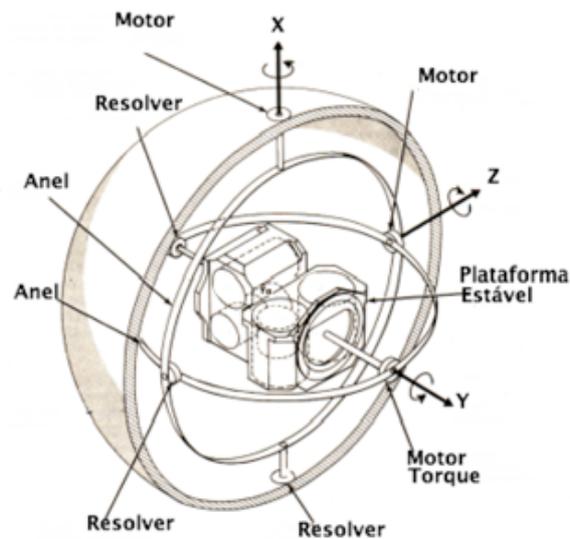


Figura 7 – Sensor inercial Guimbale (BOSE, et. al., 1982)

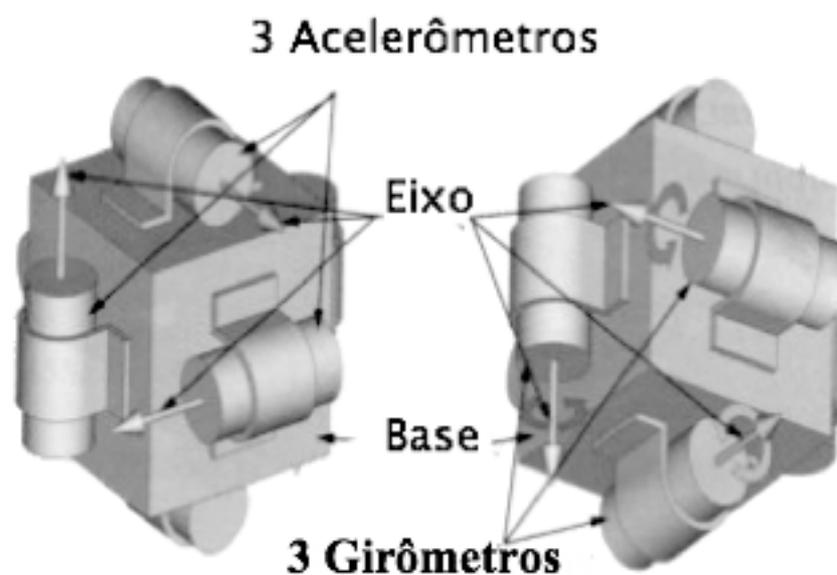


Figura 8 – Sensor inercial Strapdown (BOSE, et. al., 1982)

A principal diferença entre essas implementações consiste no fato de, na *Guimbale*, o sensor inercial estar desacoplado da rotação do veículo, enquanto no *Strapdown* não. O desacoplamento em relação à rotação isola o sensor de altas taxas de variações angulares, permitindo assim maior precisão. Entretanto, esse isolamento vem a um custo de uma mecânica mais complexa, que acrescenta custo, peso e tamanho ao sensor.

Os acelerômetros presentes nos sensores inerciais são comumente sistemas MEMS (micro sistemas eletromecânicos), constituídos de massa-viga engastada ou massa – mola – amortecedor, ou piezoeletricos (Fig. 9). Uma característica importante a ser considerada ao se trabalhar com acelerômetros é sua saída possuir um deslocamento de origem devido à gravidade local, ou seja, um acelerômetro possuirá uma saída de 1G na vertical quando estacionário.

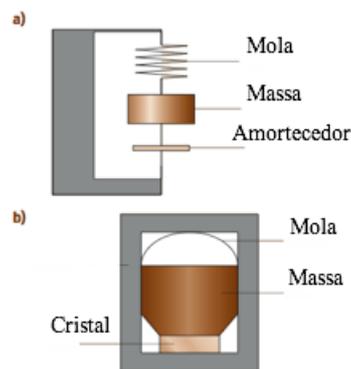


Figura 9 – (a) Acelerômetro Mecânico. (b) Piezoeletrico. (DUDEK; JENKIN, et. al., 2008)

Os girômetros podem ser mecânicos, ópticos ou por efeito de Coriolis. Os ópticos são mais modernos, possuindo duas implementações distintas, a “Ring Laser” ou a Fibra Óptica, representadas nas Fig. 10 e Fig. 11, respectivamente. Os por fibra óptica possuem um menor custo e maior robustez, entretanto apresentam uma menor precisão que os por “Ring Laser”. O princípio de funcionamento dos giroscópios ópticos é: dado um caminho fechado, dois feixes de luz que saiam do mesmo ponto ao mesmo instante retornarão em tempos distintos ao ponto que saíram, caso haja uma rotação do percurso fechado. Combinando ambos os feixes de laser em um detector um padrão de interferência será formado, o qual dependerá da velocidade angular. No “Ring Laser”, este caminho fechado é constituído por espelhos que refletem o raio de luz, enquanto no por fibra óptica o caminho é a fibra óptica enrolada. As principais vantagens dos giroscópios ópticos sobre os mecânicos decorrem daqueles possuírem um menor ruído, insensibilidade às acelerações e velocidades lineares, insensitividade à vibração, e não requererem uma massa balanceada girando.

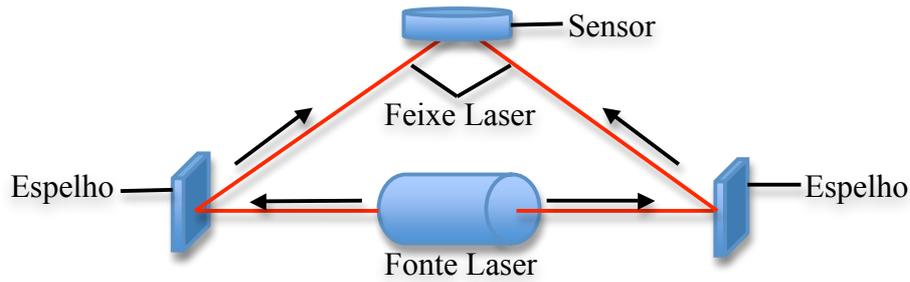


Figura 10 – Girômetro “Ring Laser”

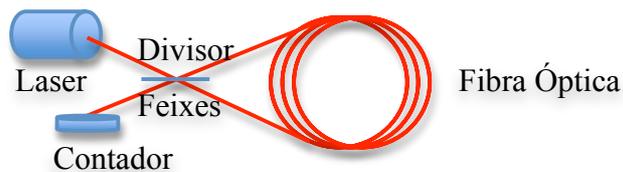


Figura 11 – Girômetro de fibra óptica

Os girômetros mecânicos são constituídos de uma massa balanceada girando, a qual é isolada do movimento angular do veículo através de anéis, vide Fig. 12. Uma massa girando vai resistir a qualquer mudança em seu vetor de momento angular com relação ao seu espaço inercial, logo a mudança na posição dos anéis medirá a velocidade angular.



Figura 12 – Girômetro Mecânico.

Os girômetros por efeito de Coriolis são constituídos de uma massa que está vibrando na direção radial de um sistema em rotação, vide Fig. 13. Devido a força de Coriolis no sentido perpendicular a vibração original, uma nova vibração surgirá nesta direção. Cujas amplitude é função da velocidade angular. Estes girômetros são mais imprecisos e baratos que os mecânicos e ópticos.

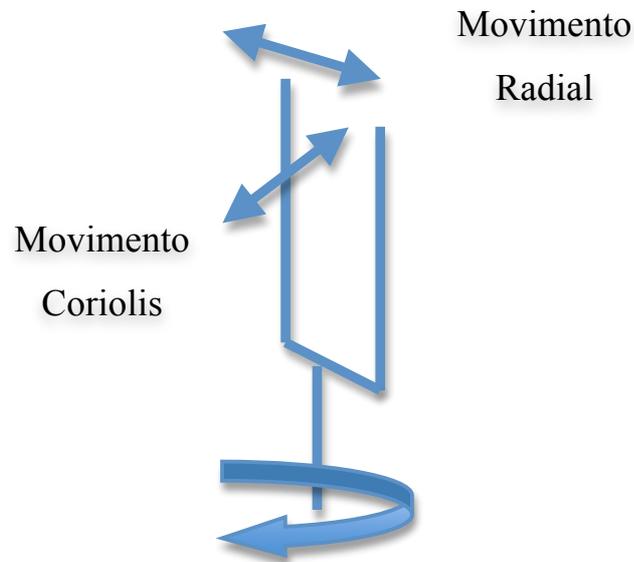


Figura 13 – Girômetro por efeito de Coriolis.

Os erros nos sensores inerciais são provenientes dos acelerômetros e dos girômetros. Considerando que um sensor inercial *Strapdown* possui três conjuntos de acelerômetros e girômetros acoplados em três eixos ortogonais x, y e z, pode-se reescrever a Eq. (1) para um dos eixos. De acordo com (BOSE. et. al., 1982) o termo do erro pode ser expandido como a soma de diversos erros, Eqs. (2) e (3). O resultado obtido para um dos eixos é análogo para os outros dois eixos. Note que as Eqs. (2) e (3) representam apenas um modelo para descrever as fontes de erros dos sensores inerciais. Este modelo não engloba todos os erros de um sensor inercial, nem é válido para todas as aplicações, no entanto fornece uma primeira ferramenta para o estudo do problema.

$$\begin{aligned}
 A_{mx} = & A_{rx} + (b_a + b_{aT}F_a) + b_{ac} + b_{aw} + b_{VIB}|V| + \frac{1}{2}\Delta S_a|A_x| + \\
 & (S_{ax} + S_{aTx})A_x + (S_{ay} + S_{aTy}F_a)C_yA_y + (S_{az} + S_{aTz}F_a)C_zA_z + \\
 & f_{xx}A_x^2 + f_{yy}A_y^2 + f_{zz}A_z^2 + f_{xy}C_yA_xA_y + f_{xz}C_zA_xA_z + f_{yz}C_yC_zA_yA_z + \\
 & W_x\omega_x + W_y\omega_y + W_z\omega_z + W_{Dx}\dot{\omega}_x + W_{Dy}\dot{\omega}_y + W_{Dz}\dot{\omega}_z
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
\omega_{m,x} = & \omega_{r,x} + (b + b_T F_a) + \frac{1}{2} \Delta S_g |\omega_x| + b_c + b_w + b_{VIB} |V| \\
& + (S_x + S_{Tx}) \omega_x + (S_y + S_{Ty}) C_y \omega_y + (S_z + S_{Tz}) C_z \omega_z + \\
& D_{xx} \omega_x^2 + D_{yy} C_y \omega_y^2 + D_{zz} C_z \omega_z^2 + D_{xy} C_y \omega_x \omega_y + D_{xz} C_z \omega_x \omega_z + \\
& D_{yz} C_y C_z \omega_y \omega_z + (h_x + h_{Tx} F_g) A_x + (h_y + h_{Ty} F_g) A_y + \\
& (h_z + h_{Tz} F_g) A_z + k_{xx} A_x^2 + k_{yy} A_y^2 + k_{zz} A_z^2 + k_{xy} A_x A_y + \\
& k_{xz} A_x A_z + k_{yz} A_y A_z
\end{aligned} \tag{3}$$

na qual:

Na qual subscritos x,y, z indicam o eixo;

os subscritos m e r indicam o valor medido e real, respectivamente ;

os subscrito a indica que é uma variável do acelerômetro;

A – aceleração;

ω – velocidade angular;

b – bias;

b_T – bias termal;

b_c – ruído correlacionado;

b_w – ruído branco;

b_{VIB} – sensibilidade a vibração;

F – função térmica;

V – velocidade;

ΔS – assimetria do fator de escala;

S – fator de escala linear;

S_T – fator de escala térmico;

f, D – fator de escala quadrático;

C – coeficiente de acoplamento cruzado entre o eixo medido e o subscrito;

h – sensibilidade a aceleração;

h_T – sensibilidade térmica a aceleração;

k – sensibilidade ao quadrado da aceleração;

W – sensibilidade à velocidade angular; e

W_D – sensibilidade à aceleração angular.

E nas quais define-se:

Bias: saída medida pelo sensor quando a entrada é nula. O bias é dividido em duas componentes: um bias puro e um bias térmico, que representa a sensibilidade do sensor com a temperatura.

Vibração: o sensor inercial é sensível à vibração: quanto maior a vibração, maior o erro do sensor. Em muitos sistemas dinâmicos ele é uma função da velocidade do sistema, logo o termo aparece multiplicado pela velocidade total do sistema.

Fator de Escala: incrementos iguais na entrada não geram incrementos iguais na saída, essa incerteza na linearidade da saída do sensor é modelada pelo fator de escala. Esta causa de erro só existe quando a entrada do sensor é não nula e cresce à medida que cresce o valor da entrada, logo o fator de escala aparece multiplicado pela entrada do sistema.

Fator de Escala Térmico: o fator de escala de um sensor não é um parâmetro constante, sofrendo alterações durante a operação do sistema. Parte da variação do fator de escala é causada por sensibilidade à temperatura e modelada pelo acréscimo do fator de escala térmico. Por este termo ser em geral pequeno, só estará presente no fator de escala linear, sendo descartado no termo quadrático.

Assimetria: é causada pela desigualdade das saídas positivas e negativas do sensor. Este erro é modelado como um parâmetro multiplicando o módulo da entrada do sistema.

Não-Ortogonalidade: é modelada pelo fator de escala linear e quadrático dos eixos multiplicado pelas suas respectivas saídas e pelo parâmetro de acoplamento cruzado.

Aceleração Centrípeta: necessária ao movimento angular, logo o erro da aceleração depende das velocidades e acelerações angulares.

Elasticidade: o erro do valor medido pelo giroscópio depende das acelerações, pois a diferença de elasticidade em duas direções distintas cria um braço de alavanca, sobre o qual o vetor aceleração pode criar um torque, gerando assim um deslizamento.

A qualidade de um sensor inercial pode ser classificada a partir do valor de suas fontes de erros. (BOSE. et. al., 1982) fornece às tabelas 1 e 2 para a partir das principais fontes de erro se classificar o acelerômetros e o girômetros como senso de qualidade baixa, média ou alta.

Tabela 1– Erro do Acelerômetro. (BOSE. et. al., 1982)

Fonte	Unidade	Baixa	Média	Alta
Bias	μg	500	100	50
Fator de Escala	%	0.2	0.04	0.01
Assimetria	%	0.05	0.01	0.005
Não-Ortogonalidade	SEC	100	20	10
Ruído Correlacionado	$\mu\text{g @ C.T}$	10@20	3@20	1@20
Ruído Branco	$\mu\text{g} / \sqrt{\text{Hz}}$	30	10	5
Tendência	$\mu\text{g} / \text{Day}$	5	2	1

Tabela 2 – Erro do Girômetro. (BOSE. et. al., 1982)

Fonte	Unidade	Baixa	Média	Alta
Bias	$^{\circ}/\text{Hr}$	1	0.1	0.01
Fator de Escala	%	0.1	0.02	0.005
Assimetria	%	0.01	0.002	0.0005
Massa Desbalanceada	$^{\circ}/\text{Hr}/\text{g}$	0.5	0.1	0.02
Não-Ortogonalidade	SEC	100	20	10
Ruído Correlacionado	$^{\circ}/\text{Hr@ C.T}$	0.03@200	0.01@20	0.02@020
Ruído Branco	$^{\circ}/\text{Hr}/ \sqrt{\text{Hz}}$	0.2	0.1	0.05
Tendência	$^{\circ}/\text{Hr}/ \text{Day}$	0.01	0.02	0.0005

2.3. Sensores *Exteroceptivos*

Sensores caracterizados como *exteroceptivos* são aqueles que adquirem informação a partir da energia vinda do meio. Existem dois princípios distintos de energias que são utilizadas: a eletromagnética e a acústica. Os sensores *exteroceptivos* são agrupados como ativos ou passivos dependendo se emitem, ou não, essas energias no ambiente onde seu sensoriamento é realizado.

Os sensores ativos emitem energia no ambiente e obtêm medidas de distância e velocidade relativa a partir da reação a esta energia. As técnicas mais comumente utilizadas de medição de distâncias são por tempo de voo, por diferença de fase, modulação de frequência, ou por triangulação, e no caso de velocidade relativa utiliza-se o efeito Doppler. Os principais sensores de energia ativa na robótica móvel são os *LIDARs*, os sonares, os radares de milímetro, e os sistemas de satélite para navegação global (GNSS). As técnicas de medição e os sensores são apresentados em detalhes a seguir.

2.3.1. Energia Acústica

O som é uma vibração mecânica que viaja por um meio elástico como uma onda longitudinal. Logo, as características das ondas sonoras são influenciadas pelo meio de propagação. (EVERETT e PETERS et. al., 1995) descreve a velocidade para meios gasosos e líquidos pela Eq. (4).

$$s = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad (4)$$

Na qual:

- s – velocidade de propagação da onda;
- C – coeficiente de elasticidade do meio; e
- ρ – densidade do meio.

Em sensores ativos, a medida depende da energia sonora refletida pelo meio em direção ao sensor. A energia percebida é apenas parte daquela emitida pelo sensor, pois a potência do sinal sonoro decresce com o aumento da distância devido à sua dispersão em cone, à absorção de parte da energia pelo meio, e à dispersão gerada pela reflexão da energia. Por depender da reflexão da energia pelo meio, os sensores baseados em energia acústica estão suscetíveis a diversas causas de erros, sendo as principais:

- Reflexão Especular – onde a energia refletida não retorna ao sensor;
- *Cross Talk* – onde a energia recebida não foi aquela emitida pelo sensor; e
- Eco Fantasma – onde a energia recebida foi refletida mais de uma vez.

Outro aspecto importante a ser considerado ao se utilizar sensores baseados em energia acústica é a divergência da onda sonora. Como pode ser observado na Fig. 14, o sensor não é capaz de detectar a fenda, pois a largura da onda sonora, quando esta alcança a fenda, é muito grande. Além da não detecção, a divergência pode fazer com que superfícies sejam detectadas mais próximas do que realmente estão, como mostra Fig. 15, onde parte da onda sonora é refletida por um objeto inclinado, fazendo com que a distância medida seja menor do que a real. O controle da largura da onda sonora é feito alterando o diâmetro do transdutor e a frequência de operação. Frequências mais altas geram ondas mais estreitas, entretanto sofrem de maior atenuação do sinal quando operando no ar, reduzindo assim seu alcance.

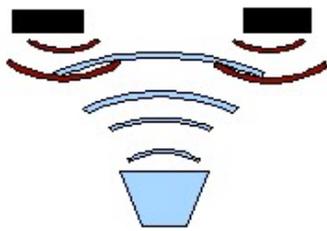


Figura 14 – A não detecção de uma fenda devido à divergência da onda sonora.

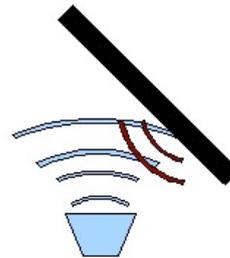


Figura 15 – Detecção do ambiente mais próximo do que este realmente se encontra.

2.3.2. Energia Eletromagnética

A energia eletromagnética é uma onda elétrica e magnética que se auto-propaga, logo não necessita de um meio de propagação. O meio em si atrapalha a propagação, reduzindo a sua velocidade. No ar, ela assume a velocidade próxima à da luz no vácuo. A energia eletromagnética é classificada de acordo com seu comprimento de onda vide, Fig. 16.

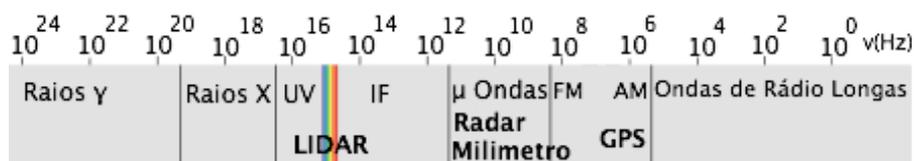


Figura 16 – Espectro da energia eletromagnética

A escolha da frequência de operação depende da aplicação e do meio onde o sensor precisará funcionar. Quanto mais alta a frequência, menor o comprimento de onda, permitindo resoluções mais altas. Entretanto, ficarão mais suscetíveis a atenuações atmosféricas, o que diminui o alcance e incapacita o sensor de operar em condições muito adversas, como em uma nuvem de poeira ou neblina. As frequências mais baixas estão mais susceptíveis à reflexão especular, onde a energia não é refletida de volta ao sensor, mas conseguem operar mesmo sobre condições adversas.

A frequência da energia existente no ambiente é outra variável que precisa ser levada em conta, pois ao trabalhar com os sensores ativos em uma frequência muito próxima a uma existente no ambiente, o sensor pode detectar a reflexão da energia vinda do ambiente, o que acarreta em erros. Por exemplo, ao se trabalhar em ambientes externos sob sol intenso, a frequência na faixa do ultravioleta com 0,3 microns de comprimento de onda alcança um desempenho melhor que o infravermelho, pois a primeira frequência é absorvida pela camada de ozônio.

Em (FISHED e KONOLIGE et. at., 2008) encontra-se um maior detalhamento dos principais métodos de medição de distância por energia eletromagnética e o resultado da navegação utilizando os mesmos.

2.3.3. Medição por Tempo de Vôo

A medição por tempo de vôo é realizada enviando pulsos de onda e medindo o tempo que os mesmos demoram a ser refletidos de volta ao sensor. Sabendo a velocidade da onda no meio e aplicando a Eq. (5), (EVERETT e PETERS et. al., 1995), obtém-se a distância ao objeto. Este método de medida permite a utilização de ambos os tipos de energia.

$$d = v \frac{t}{2} \quad (5)$$

Na qual:

- d – distância ao objeto que refletiu a energia;
- v – velocidade de propagação da energia emitida; e
- t – tempo que a energia levou para retornar ao sensor.

Na escolha de qual tipo de energia utilizar, é importante considerar a velocidade da onda, pois no ar o som se propaga com uma velocidade de 0,3 m/ms, enquanto a onda eletromagnética se propaga com uma velocidade de 0,3m/ns, i.e., um milhão de vezes mais rápido. Logo, para distâncias muito pequenas, os sensores eletromagnéticos apresentam imprecisão pela dificuldade de medir um tempo tão pequeno. Em contrapartida, os sensores sonoros possuem uma taxa de atualização baixa para distâncias longas devido ao tempo necessário para a onda ser refletida e retornar ao sensor.

2.3.4. Medição por Diferença de fase

Na medição por diferença de fase, o sensor transmite continuamente a energia em uma frequência escolhida, obtendo a distância através da diferença entre a fase da onda refletida e da enviada de acordo com (EVERETT e PETERS et. al., 1995)

$$d = \frac{\phi\lambda}{4\pi} \quad (6)$$

Na qual:

- d – distância ao objeto que refletiu a energia;
- ϕ - diferença de fase; e
- λ - comprimento de onda.

A vantagem deste método é permitir medições de distâncias pequenas com sensores eletromagnéticos, além de medir a velocidade relativa ao objeto que refletiu a energia. Entretanto, como a eletrônica mede na realidade a distância a partir do cosseno da diferença de fase, existirá mais de uma distância que resultará nesta mesma diferença. Mas em geral esta ambiguidade não é encontrada, pois a atenuação do sinal ocorre antes da distância necessária para gerar 360° de diferença de fase.

2.3.5. Medição por Variação de Frequência

Na medição por variação de frequência, o sensor envia continuamente uma onda modulada por um sinal triangular periódico que ajusta a frequência transmitida, onde esta é uma função linear do tempo de acordo com (EVERETT e PETERS et. al., 1995).

$$f(t) = f_o + at \quad (7).$$

Na qual:

- a – constante;
- f_o – frequência portadora; e
- t – tempo.

A distância é obtida através da comparação do sinal recebido com aquele que está sendo enviado, de acordo com (EVERETT e PETERS et. al., 1995), Eq. (8). A vantagem deste método é não possuir medições ambíguas.

$$d = \frac{F_b v}{4F_r F_d} \quad (8)$$

Na qual:

- d - distância ao objeto que refletiu a energia;
- v – velocidade da energia no meio;
- F_b – frequência enviada e recebida combinada em um *mixer*;
- F_r – frequência de repetição; e
- F_d – desvio total da frequência.

2.3.6. Medição por Triangulação

Medições por triangulações utilizam propriedades geométricas para determinar a distância. Uma energia é emitida no ambiente e, a partir de geometrias conhecidas na configuração do emissor/receptor, a distância é calculada por triangulação.

A triangulação em uma dimensão (1D) calcula a distância através da projeção da energia refletida em um sensor linear, vide Eq. (9) dada por (EVERETT e PETERS et. al., 1995) e Fig 17. O problema com a triangulação 1D reside no fato de a distância ser proporcional ao inverso da posição x do raio refletido no sensor de posição, logo a resolução do sensor é melhor para objetos mais próximos.

$$d = f \frac{L}{x} \quad (9)$$

Na qual:

d – distância ao objeto que refletiu a energia;

f – frequência da energia;

L – distância entre o emissor e o receptor; e

x – posição do raio refletido no sensor de posição.

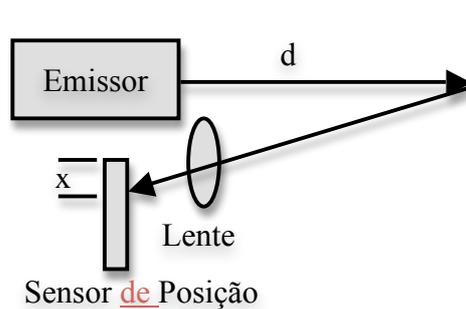


Figura 17 – Triangulação 1D

Na triangulação em duas dimensões, o emissor projeta um padrão conhecido e o receptor - uma câmera - calcula a distância a partir da deformação observada deste padrão no objeto, vide Fig. 18.



Figura 18 – Padrão estruturado de luz para triangulação em 2 dimensões, (RAMAMOORTHY et. al.)

2.3.7. Medição por Velocidade Relativa

Sensores de velocidade relativa estimam a velocidade relativa entre dois corpos. Estes sensores são baseados no efeito Doppler onde, para uma frequência F_t transmitida, a frequência F_r recebida é uma função da velocidade relativa entre o emissor e o receptor. Quando se mede a velocidade relativa do sensor ao ambiente estático, é preciso acrescentar um fator de dois, pois é preciso considerar o caminho de volta da onda, logo (EVERETT e PETERS et. al., 1995) descreve a velocidade relativa entre o receptor e o transmissor como

$$v = \frac{(F_t - F_r).c}{2F_t \cos\theta} \quad (10)$$

Na qual:

v – velocidade relativa entre o receptor e o transmissor;

c – velocidade da energia emitida no meio;

F_t – frequência transmitida;

F_r – frequência recebida; e

θ - ângulo relativo entre a direção do movimento e a direção da energia emitida.

2.3.8. LIDAR

LIDAR é a sigla em inglês para detector de luz e distância. São sistemas que utilizam a energia eletromagnética em frequências altas para medir a distância ao

ambiente. As frequências utilizadas são tipicamente ultravioleta, visíveis, ou próximas ao infravermelho. O método de medição comumente utilizado nestes dispositivos é por tempo de voo. Os dispositivos por LIDAR em geral são acoplados a um espelho rotatório, possibilitando assim fazer uma varredura do ambiente, vide a Fig. 19.

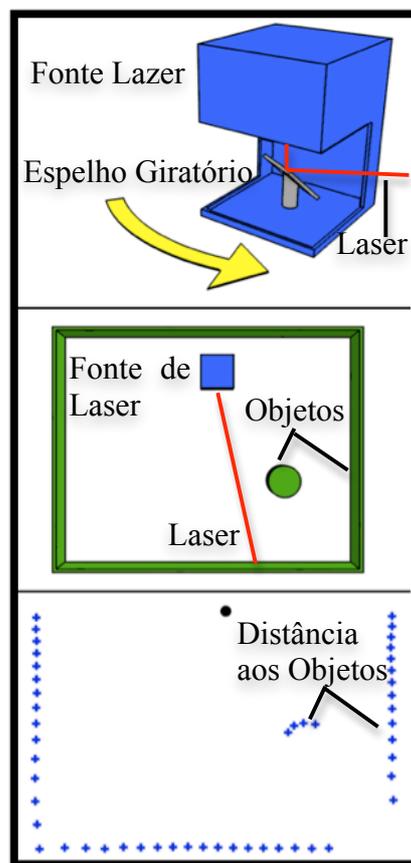


Figura 19 – LIDAR mapeando em duas dimensões.

O sistema LIDAR, por trabalhar com frequências altas, possui uma alta resolução e baixa incidência de reflexões especulares. Entretanto, esta frequência faz com que o alcance seja reduzido, além de não ser capaz de operar em condições atmosféricas adversas como neblina e chuva, e de apresentar mau desempenho em ambientes ensolarados.

2.3.9. Sonar

O sonar é uma sigla para navegação e medição de distâncias por som. Na robótica móvel, em geral, trabalha-se com frequências altas de som - o ultra-som - utilizando medições por tempo de voo. Um resultado típico de uma varredura por som pode ser visto na Fig. 20.

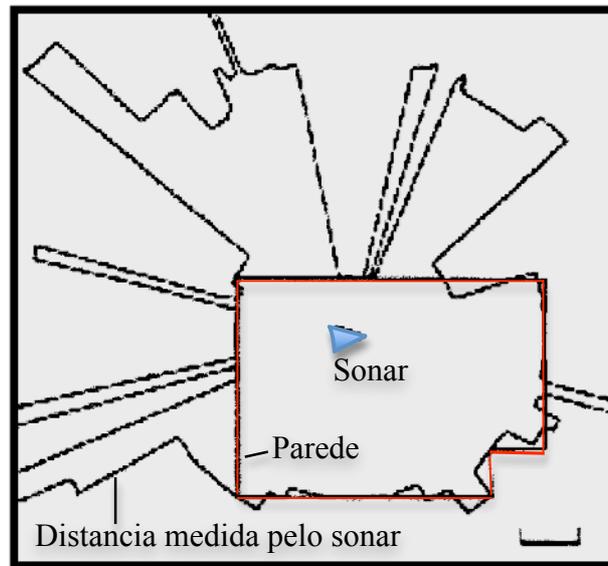


Figura 20 – Resultado de uma varredura utilizando um sonar

A medição por som é mais lenta que por luz devido à velocidade de propagação da onda sonora, além de ocorrerem mais frequentemente ecos fantasmas e reflexões especulares. A vantagem do som é que este funciona igualmente em ambientes internos e externos, com ou sem adversidade atmosférica, além de refletir sobre vidros, que em geral não são enxergados pelos sensores de luz. Entretanto, a varredura do ambiente, quando feito com o sonar, exige em geral mais de um sensor, o que pode resultar em erros de *cross talk*.

2.3.10. Radar de Milímetro

Os radares de milímetro utilizados na robótica trabalham, em geral, com modulação de frequência na faixa de 35GHz. São capazes de medir a velocidade relativa entre os alvos e o sensor, e a distância a diversos alvos em profundidade,

uma vez que, dependendo do alvo, parte da energia é refletida, enquanto parte atravessa o alvo. E.g., a energia enviada em direção a um arbusto é em parte refletida pelo arbusto, enquanto parte o atravessa sendo refletida pela parede atrás do arbusto, obtendo-se, assim, a distância a ambos os alvos. Um exemplo da utilização do radar de milímetro no mapeamento do ambiente pode ser visto na Fig. 21.

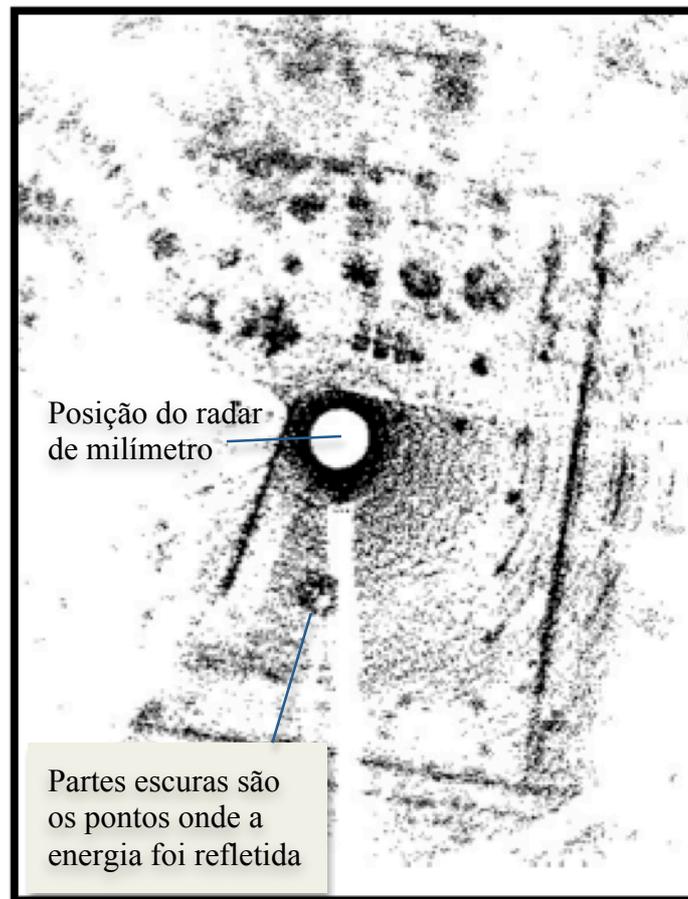


Figura 21– Varredura feita por um radar de milímetro. (SCHEDING; BROOKER; HENNESSY; BISHOP et. al., 2002)

Os radares de milímetro, por operarem em uma frequência mais baixa que os *LIDARs*, apresentam uma menor resolução e uma maior incidência de reflexões especulares. Possuem também um tamanho e custo maior que os sistemas *LIDAR* e os sonares. A vantagem consiste em funcionarem em ambientes ensolarados e sob condições atmosféricas adversas. Possuem um alcance longo, além da medição de distância em profundidade. Os trabalhos de (SCHEDING, BROOKER, HENNESSY, BISHOP E MACLEAN et. at., 2002; FOESSEL,

CHHEDA E APOSTOLOPOULOS et. at., 1999) apresentam resultados do funcionamento do radar de milímetro em ambientes adversos, bem como da percepção de longo alcance e com profundidade.

2.3.11. Bússolas

Os sensores caracterizados como bússolas são aqueles capazes de medir a direção de um campo magnético. Em geral, são utilizados na robótica para obter a direção do robô através da medição do campo magnético da Terra, o qual flui paralelamente à sua superfície, do pólo magnético sul para o norte. As bússolas eletrônicas comumente utilizadas são as magnetoresistivas, onde a resistência varia com o campo magnético aplicado.

Na robótica móvel, o robô não está confinado a um plano horizontal na superfície da Terra, logo é necessário utilizar três bússolas montadas ortogonalmente, uma à outra, para se obter a leitura do campo magnético terrestre. A partir da orientação que os eixos das bússolas se encontram com relação à superfície da Terra, é possível girar os sistemas de coordenadas usados na medições para encontrar a direção do norte magnético.

Erros nas medidas são causados principalmente por elementos ferrosos próximos à bússola, que distorcem o campo magnético da Terra. O ferro duro, material ferroso que mantém o direcionamento de um campo magnético após este ter sido retirado, adiciona um campo magnético constante, modelado como um bias ao campo magnético da Terra. O ferro mole, material ferroso que volta ao alinhamento aleatório após o campo magnético ter sido retirado, gera um campo magnético variável, modelado como um fator de escala. Existe também o erro devido às interferências magnéticas, geradas por outros equipamentos, e devido ao ruído do sensor, ambos aleatório por natureza. Na robótica móvel, a medição do campo magnético com relação à horizontal depende de uma transformação de coordenadas, logo estará sujeito a erros gerado pelo sensor de orientação que determina a orientação dos eixos das bússolas em relação à horizontal.

2.3.12. Sensores Baseados em Visão

Os sensores baseados em visão adquirem informações do meio através da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos corpos no espectro visível, produzindo uma imagem digital do que foi observado. A partir de uma imagem ou seqüência de imagens capturadas por um ou mais sensores de visão, podem-se reconhecer formas e cores, identificar pessoas, medir distâncias e velocidades. A visão computacional é o campo que trata de obter informação de imagens adquiridas com sensores.

Existem duas tecnologias predominantes e distintas para os sensores de visão, a CCD e a CMOS. Comparativamente, a CCD fornece imagens de maior qualidade e menor ruído, possuindo uma maior sensibilidade à luz. Enquanto a CMOS possui um tamanho e custo menor, além de consumir cem vezes menos energia.

2.3.13. Sistema de Satélites para Navegação Global

Um sistema GNSS é um conjunto de satélites, cada qual com seu relógio atômico sincronizado com os outros satélites. Cada satélite transmite continuamente por ondas de rádio uma mensagem de navegação o tempo de seu relógio atômico, sua posição na órbita e um código único de identificação (parâmetros necessários para o cálculo da posição de um corpo no espaço).

A mensagem de navegação é espalhada em uma frequência portadora por um código de espalhamento de espectro. Sendo o sinal uma onda eletromagnética, este viaja na velocidade da luz no espaço e um pouco mais devagar na atmosfera. A posição do satélite é determinada a partir da mensagem transmitida pelo mesmo. O tempo que o sinal demora a chegar ao receptor é determinado através da comparação do código de espalhamento recebido com uma cópia do mesmo gerado no receptor. A velocidade de propagação vezes o tempo é a pseudo-distância do receptor ao satélite. De acordo com (BLEWITT, et. at. 1997) calculam-se a posição do receptor e sua velocidade através das Eqs. (11) e (12) respectivamente:

$$(\rho_r - C_b)^2 = (x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (\dot{\rho}_r - \dot{C}_b)(\rho_r - C_b) &= (\dot{x} - \dot{X})(x - X) + \\ &(\dot{y} - \dot{Y})(y - Y) + (\dot{z} - \dot{Z})(z - Z) \end{aligned} \quad (12)$$

Na qual:

ρ_r – pseudo-distância do receptor ao satélite;

x, y, z – coordenadas de posição do satélite;

X, Y, Z – coordenadas de posição do usuário;

C_b – Bias do relógio (correção da defasagem de tempo entre o relógio do receptor e do satélite);

$\dot{\rho}_r$ – velocidade relativa entre o usuário e o satélite, estimado pela diferença na frequência entre o sinal transmitido e o recebido (efeito Doppler);

$\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ – velocidade do satélite; e

$\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$ – velocidade do usuário.

Para resolver o sistema de equações, é necessário o sinal de quatro satélites, determinando assim as variáveis de posição X, Y, Z e C_b do receptor. A existência da variável C_b se dá pelo fato de o relógio presente no receptor ser impreciso, quando comparado aos relógios atômicos presentes nos satélites transmissores. Logo, a hora marcada pelo mesmo precisa ser corrigida por este termo, sincronizando-o assim com o horário marcado pelos satélites.

Existem diferentes sistemas de GNSS, como pode ser visto na Tab. 1. Esta dissertação irá tratar apenas do GPS, detalhado a seguir.

Tabela 1 – Sistemas de GNSS existentes

GNSS	País	Status
GPS	Estados Unidos	Operacional
Glonass	Rússia	Parcialmente Operacional
Galileo	União Européia	2010

IRNSS	Índia	2012
-------	-------	------

2.4. GPS

O GPS é constituído por uma constelação de 24 ou mais satélite ativos, os quais se encontram em 6 órbitas circulares, com quatro ou mais satélites cada. Essa configuração permite que três ou mais satélites estejam sempre visíveis em praticamente qualquer ponto da superfície do planeta, possibilitando assim determinar a posição geo-referenciada 24 horas por dia, vide Fig. 22. Maiores informações sobre as órbitas e sobre o funcionamento do sistema GPS podem ser encontradas em (GREWAL, WEILL AND WILEY et. at., 2007).

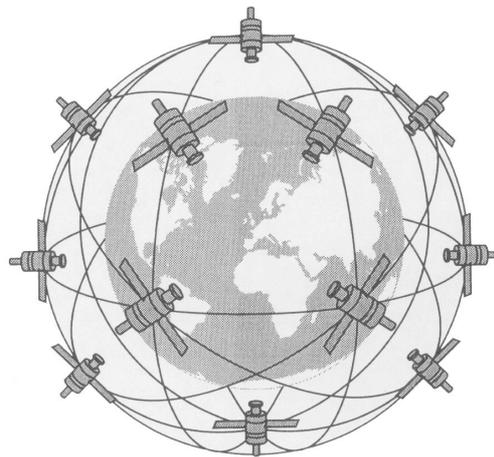


Figura 22 - Constelação de Satélites. (Brock University Map Library)

Os satélites do sistema GPS são continuamente monitorados por estações em terra e diariamente atualizados. As atualizações sincronizam os relógios atômicos dos satélites com base em um relógio atômico referencial em terra, mantendo assim a diferença de tempo entre satélites em menos de alguns nanosegundos. A informação *ephemeris* do modelo de órbita de cada satélite também é atualizada diariamente, onde estas informações são estimativas geradas por um filtro de Kalman, o qual utiliza como entrada a informação de diversas estações terrestres de rastreamento, assim como informações sobre o clima, entre outros parâmetros.

Todos os satélites transmitem simultaneamente nas frequências 1575,42 e 1227,60 MHz, respectivamente chamadas de L1 e L2. A mensagem de navegação, que pode ser vista em maiores detalhes no Apêndice A, é transmitida utilizando dois códigos de espalhamento de espectro: o código C/A e o P. A transmissão está representada na Fig. 23.

O código P pode ser criptografado pelo código Y, produzindo o código P(Y), o que mantém o seu uso limitado aos militares norte-americanos. A frequência L1 possui ambos os códigos e a L2 possui apenas o código P. Cada satélite possui seus códigos C/A e P únicos, possibilitando que todos os satélites transmitam na mesma frequência sem interferir um em outro.

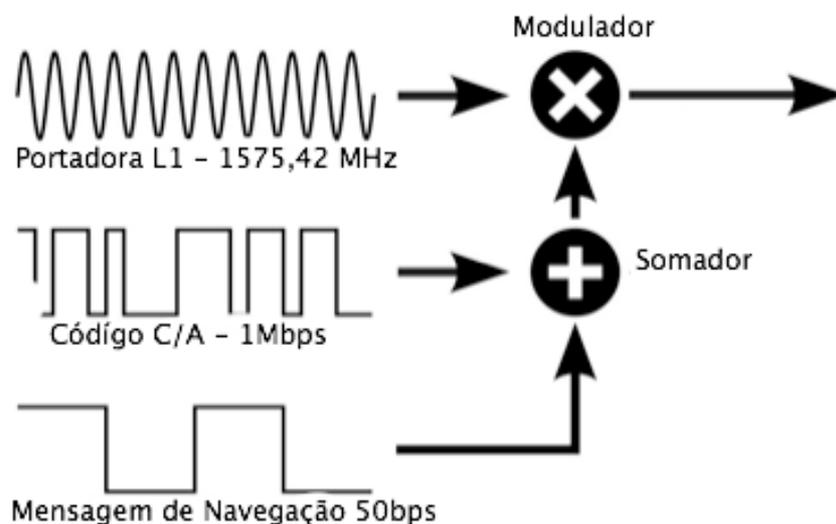


Figura 23 – Transmissão da Mensagem de Navegação com espalhamento C/A na L1.

2.4.1. Receptores

Existem diversas marcas e modelos de receptores de sinal de GPS. Os receptores geralmente são classificados por seus números de canais, o que indica o número de satélites que é capaz de monitorar simultaneamente, e se são de alta sensibilidade ou não, ou seja, qual a sua capacidade de perceber o sinal de GPS mesmo quando este está fraco.

Os receptores de melhor desempenho são aqueles de alta sensibilidade e de mais de cinco canais, pois a estimativa da posição é mais precisa quando se

utilizam mais de quatro satélites. Logo, com apenas quatro dentre os canais é possível rastrear o sinal dos quatro satélites simultaneamente, e os canais sobressalentes podem ser utilizados para rastrear os outros satélites visíveis ao receptor. Além de permitir que o receptor comute os satélites utilizados no cálculo da posição e da velocidade, sem perda de desempenho.

Outra característica importante em um receptor é a capacidade de utilizar a frequência L2. Apesar de a mensagem de navegação estar criptografada, o que inviabiliza seu uso para usuários não autorizados, ainda é possível recuperar a fase da frequência portadora, o que permite uma melhor correção do erro gerado pela ionosfera.

2.4.2. Erro

A estimativa da posição através do sinal do GPS está sujeita a erros. Os erros podem ser provenientes do equipamento do usuário, de informações imprecisas transmitidas pelo satélite, assim como da propagação do sinal em si. As diversas causas de erro estão detalhadas a seguir. O modelo utilizado por (BOSE et. al., 1982) para o erro da pseudo-distância medida entre o satélite e o receptor é dada pela Eq. (14).

$$\rho_m = \rho_r + c(\delta T + \delta I + \delta R + \delta C + \delta M) + b_w \quad (14)$$

na qual:

- ρ_m – pseudo-distância medida;
- ρ_r – pseudo-distância real;
- δT – atraso devido à troposfera;
- δI – atraso devido à ionosfera;
- δR – atraso devido à comparação do sinal;
- δM – atraso devido a múltiplos caminhos;
- c – velocidade da luz; e
- b_w – ruído branco.

2.4.3. Disponibilidade Seletiva (SA)

Até maio de 2000 a disponibilidade seletiva era um mecanismo adotado pelo departamento de defesa dos Estados Unidos, que degradava a acurácia que usuários comuns conseguiriam obter na estimação da posição utilizando o sinal do GPS. Essa degradação era realizada através da transmissão errônea da posição e do bias do relógio do satélite. Atualmente este mecanismo se encontra desligado, mas pode voltar a funcionar se assim for decidido pelo governo dos EUA.

2.4.4. Ionosfera

A ionosfera possui nuvens de elétrons livres, gerados por gases ionizados pelo sol, que agem como um meio dispersivo, onde a velocidade de propagação do sinal do GPS é uma função da frequência do mesmo, vide fig. 24. A medida de posição de um receptor depende da velocidade estimada de propagação do sinal de GPS, logo sua alteração levará a erros. O problema em estimar a alteração na velocidade é que a camada de elétrons livres não é espacialmente homogênea, variando com a atividade solar.

Os satélites enviam modelos da ionosfera em sua mensagem de navegação, permitindo a redução do erro em 50%, em média. Receptores com capacidade de detectar ambas as frequências L1 e L2 são capazes de remover a maior parte desses erros, considerando o fato de a velocidade de propagação na ionosfera depender da frequência.

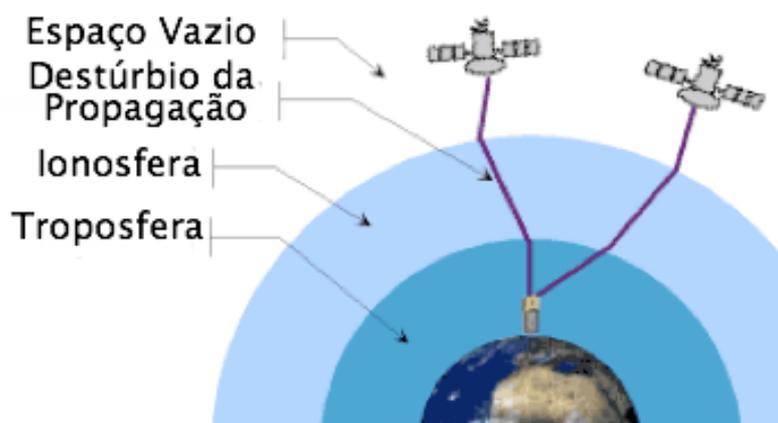


Figura 24 – Erro do GPS devido a Troposfera e Ionosfera.

2.4.5. Troposfera

A troposfera é composta por gases e vapor d'água, o que aumenta o percurso de propagação do sinal de GPS devido à refração, vide fig. 24. As características da troposfera são locais e sofrem alterações mais velozes. Modelos precisos para a refração necessitariam de informações de pressão, umidade e temperatura da atmosfera ao longo do caminho do sinal do GPS, informações essas em geral inviáveis de se obter. A maioria dos receptores utiliza modelos para atmosfera seca para uma correção deste erro.

2.4.6. Múltiplos Caminhos

O sinal do GPS pode refletir na superfície de estruturas, como em um prédio, vide Fig. 25 A reflexão gera múltiplos caminhos possíveis entre o satélite e o receptor. A estimativa de posição considera sempre que o sinal do GPS seguiu um caminho direto entre o satélite e o receptor, logo quando o receptor recebe um sinal refletido ao invés do direto a estimativa da distância se torna maior do que realmente é.

Existem diferentes técnicas e métodos para a redução do erro gerado por múltiplos caminhos como, e.g., utilizar um formato da antena que minimize o sinal recebido por baixo, reduzindo o erro causado por sinais refletidos pelo solo. Esse problema afeta os receptores estáticos e móveis de maneiras bem distintas. No caso do receptor estático, a geometria de propagação do sinal de GPS muda muito lentamente à medida que o satélite se move, o que torna mais difícil detectar o erro por múltiplos caminhos, enquanto no caso do receptor móvel a geometria muda mais rapidamente facilitando assim a detecção.

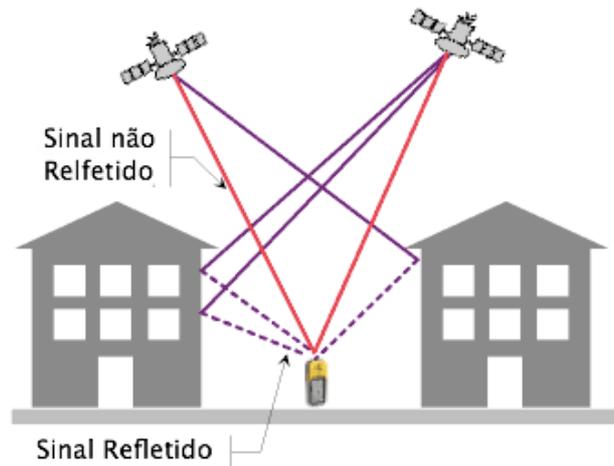


Figura 25 – Erro do GPS devido a múltiplos Caminhos.

2.4.7. Dados *Ephemeris*

As posições *ephemeris* transmitidas pelos satélites não são exatas. Estas são atualizadas uma vez ao dia com uma estimativa da posição real do satélite e com uma previsão da posição do satélite no futuro. Logo, o erro na posição do satélite cresce com o tempo desde a sua última atualização.

2.4.8. Relógio do Satélite

Os relógios atômicos dos satélites estão suscetíveis a ruídos e pequenas variações. As mensagens de navegação contêm as informações necessárias para corrigir estes erros e estimar a acurácia do relógio. Entretanto, estas são baseadas em observações e podem não indicar o estado real do relógio.

2.4.9. Resolução e Ruído do Receptor

O receptor de sinal de GPS compara a transição dos bits do C/A ou P(Y) recebidos do satélite com um gerado internamente, estimando assim o atraso que o sinal sofreu. Existe um erro na comparação dependendo da resolução do receptor.

2.4.10. Diluição de Precisão (DOP)

A qualidade das estimativas de posição e velocidade do receptor depende da distribuição espacial dos satélites que estão sendo usados para os cálculos. As Figs. 26 e 27 exemplificam uma boa e má distribuição espacial respectivamente. Como os cálculos são baseados em diferença, satélites muito próximos têm erros relativamente pequenos amplificados. Essa diluição da precisão (DOP) amplifica os erros de acordo com a Eq. (13), considerando que o erro de cada satélite é descorrelacionado e de média zero.

$$\sigma_f = DOP \cdot \sigma_i \quad (13)$$

Na qual:

σ_i – desvio padrão do erro; e

σ_f – desvio padrão após aplicar a diluição de precisão.

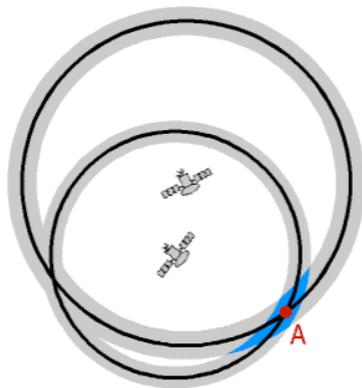


Figura 26 – Boa distribuição espacial dos satélites.

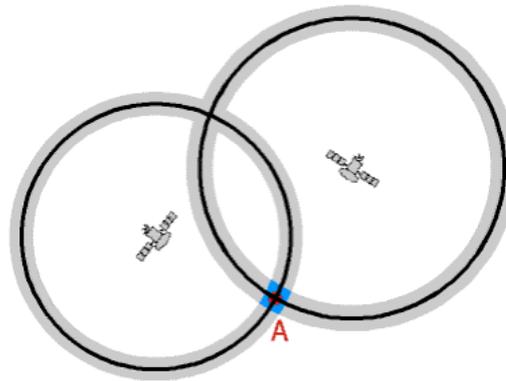


Figura 27 – Má distribuição espacial dos satélites.

A denominação DOP utilizado na Eq. (13) depende do erro que se está estimando, sendo: HDOP para o erro horizontal de posição; VDOP para erro vertical de posição; PDOP para erro de posição, consistindo este na raiz quadrada da soma dos quadrados de HDOP com VDOP; TDOP para erro no tempo; e GDOP para um erro geral, sendo este definido como a raiz quadrada da soma dos quadrados de PDOP com TDOP.

2.4.11. Sistema Diferencial de Posicionamento de Satélites

O Sistema Diferencial de Posicionamento de Satélites do sistema GPS (DGPS) é uma das técnicas para reduzir o erro na estimativa de posição de sistemas baseados em satélites. Esta técnica se baseia em utilizar um receptor com posição conhecida, transmitindo em tempo real o erro que existe ao estimar sua posição por GPS, o que permite corrigir os erros gerados por disponibilidade seletiva (SA), *ephemeris*, relógio, ionosfera e troposfera.

Assumindo que cada fonte de erro seja estatisticamente descorrelacionada de todas as outras, então o desvio-padrão pode ser obtido pela raiz quadrada da soma dos quadrados do desvio-padrão de cada uma. Uma visão geral do desvio padrão (raiz quadrada da variância) da variância das diferentes fontes de erros encontra-se na Tab. 2. Os valores desta tabela são específicos ao receptor de GPS, ao local, e às condições ambientes durante o teste.

Tabela 2 – Desvios padrão dos erros na estimativa de posição utilizando o sinal de GPS. (SCHRIEVER)

Fonte de Erro	σ (m) CA	σ (m) DGPS CA	σ (m) P(Y)	σ (m) DGPS P(Y)
Ionosfera	4.0	0.4	1.2	0.1
Troposfera	0.7	0.2	0.7	0.1
Múltiplos Caminhos	1.4	1.4	1.4	1.4
Dados <i>Ephemeris</i>	2.1	0.0	2.1	0.0
Relógio do Satélite	2.1	0.0	2.1	0.0
Resolução e Ruído do Receptor	0.5	0.5	0.5	0.5
Total (RMS)	5.3	1.6	3.6	1.5
Erro Vertical com VDOP=2.5	12.8	3.9	8.3	3.7
Erro Horizontal com HDOP=2.0	10.2	3.1	6.6	3.0

No próximo capítulo, o Filtro de Kalman Discreto é apresentado, permitindo fundir as medições dos diversos sensores apresentados.