



Centro de Instrução Almirante Wandenkolk - CIAW

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA



Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Armas



TSA: Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais



Jozias **Del Rios** Cap Eng



delriosjdrvgs@fab.mil.br



(12) 98177-9921

Abril 2018

TECNOLOGIA DE SENSORES E ATUADORES EM ARMAMENTOS GUIADOS

Fundamentos de Sensores Inerciais

Instrutor: Cap Eng Jozias **DEL RIOS**

Autor do Material: Jozias **DEL RIOS** – rev. 04.mai.2016

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

TÓPICOS

1. Sistemas de Navegação Inercial (**INS**)
 - a) Gimbaled
 - b) Strapdown
2. Sensores Inerciais (**IMU**)
 - a) Erros
 - b) Alinhamento
3. Integração
4. Calibração e Compensação

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

INS – INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

Uso de apenas sensores inerciais para navegar:

- ☺ Autônomo: imune à interferidores (jamming).
- ☺ Não transmite: stealth.
- ☹ Acúmulo de erros de integração: “deriva” (drift)

Determinar e atualizar, no espaço e com certa acurácia:

- atitude (orientação espacial)
 - posição (referente a um sistema de coordenadas)
 - velocidades angulares (rotação em torno de eixos)
 - velocidades lineares (velocidades nestes eixos)
 - acelerações lineares (acelerações nestes eixos)
- Total **15 DoF** obtidos a uma taxa de ~ 100 Hz (update rate)

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

NAVEGAÇÃO

Técnica de Dead-Reckoning:

- “**FIX**” obtido de uma posição / orientação conhecida:
 - Avião: hangar ou uma referência durante o voo (ilha).
 - Carro: última posição válida por GNSS (**GPS**)
 - Míssil: fornecido pela aeronave lançadora.
 - Campos: magnético (bússola), gravitação, baroaltímetro.
 - Terreno: **DSMAC** (visual), **TERCOM** (radar), Landmarks.
 - Espacial: mapa celestial (sextante), star tracker.
 - Rádio: **GNSS**, **VOR**, **DME**, **LORAN**, radar altímetro.
- Leitura e integração periódica de sensores inerciais para atualizar a posição e orientação relativas à referência “**FIX**”.
 - Soma incremental de vetores...

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

Gimbaled: INERTIALLY STABILIZED PLATFORM

Efeito Giroscópio: (**MTBF** ~ 500h)

- Motor mantém um volante em velocidade alta e constante.
- Conservação do momento angular faz com que o eixo do volante aponte sempre para a mesma direção espacial.
- Volante montado dentro de um Gimbal de **4** graus de liberdade, que está solto (sem atuação, baixo atrito).
 - Com apenas **3** graus de liberdade → Gimbal Lock! (Apollo)
- Encoders montados nos eixos do Gimbal, para determinar a orientação inercial relativa ao corpo do veículo.
- Precisão ótima ☺ alta complexidade ☹ baixa confiabilidade ☹
- Acelerômetros montados na parte interna → Eixos estáveis.

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

Gimbaled: INERTIALLY STABILIZED PLATFORM

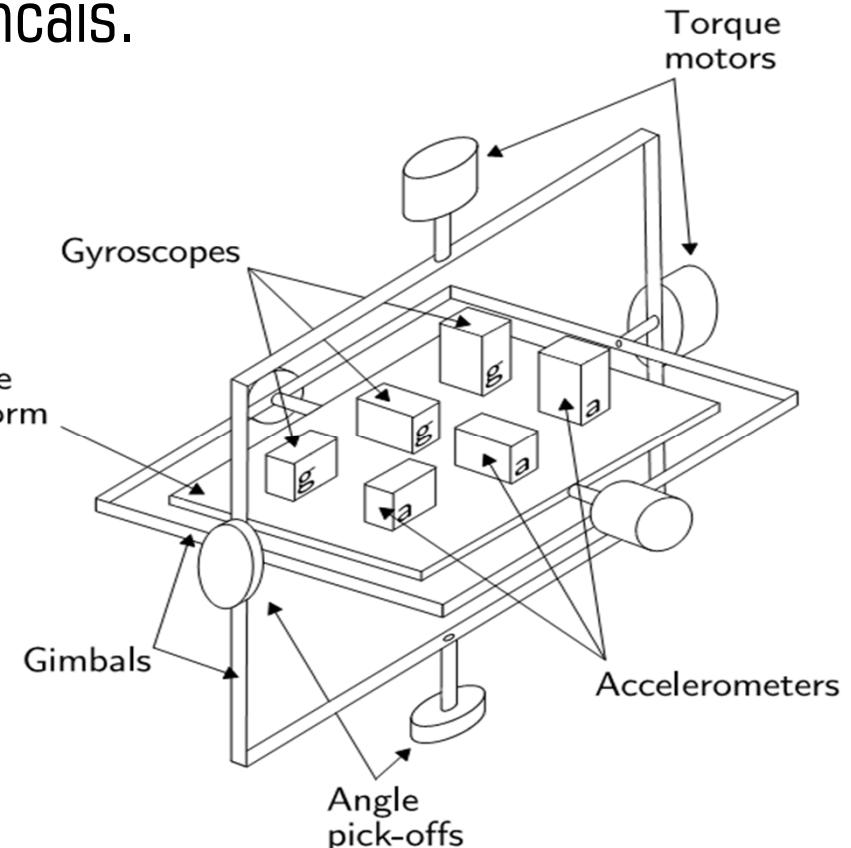


Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

Gimbaled: PLATAFORMA GIRO ESTABILIZADA

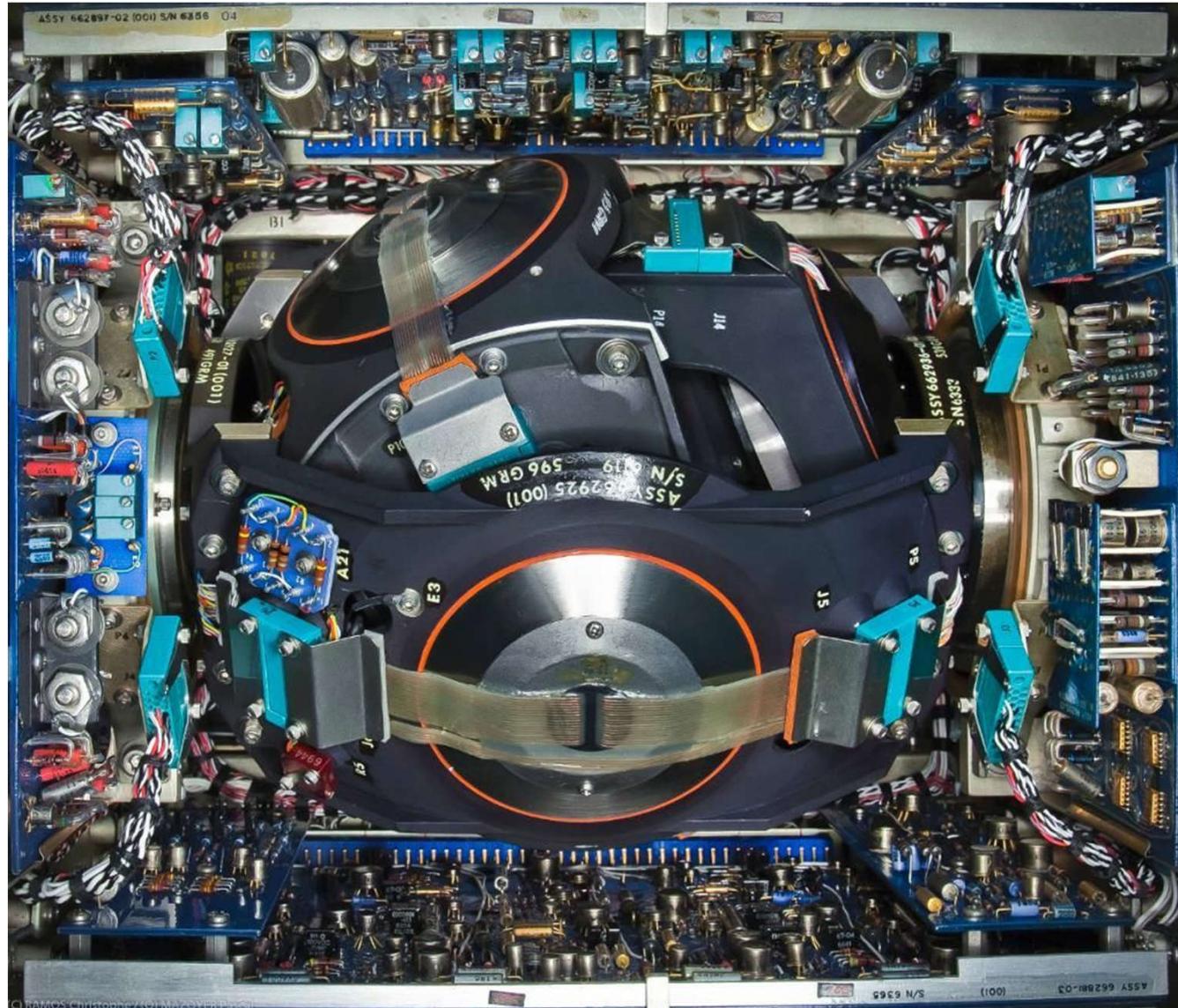
- Sem volante (óbvios).
- Girômetros de integração medem rotações da plataforma.
 - Causados por atrito nos mancais.
- Sinal de controle retroalimenta motores de torque nos eixos, para anular as rotações observadas.



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

Gimbaled: PLATAFORMA GIRO ESTABILIZADA



INS da
aeronave civil
Concorde

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

STRAPDOWN INS

- Sensores inerciais em posições fixas no corpo
- Depende de processamento matemático para a determinação da posição...



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

IMU – INERTIAL MEASUREMENT UNIT

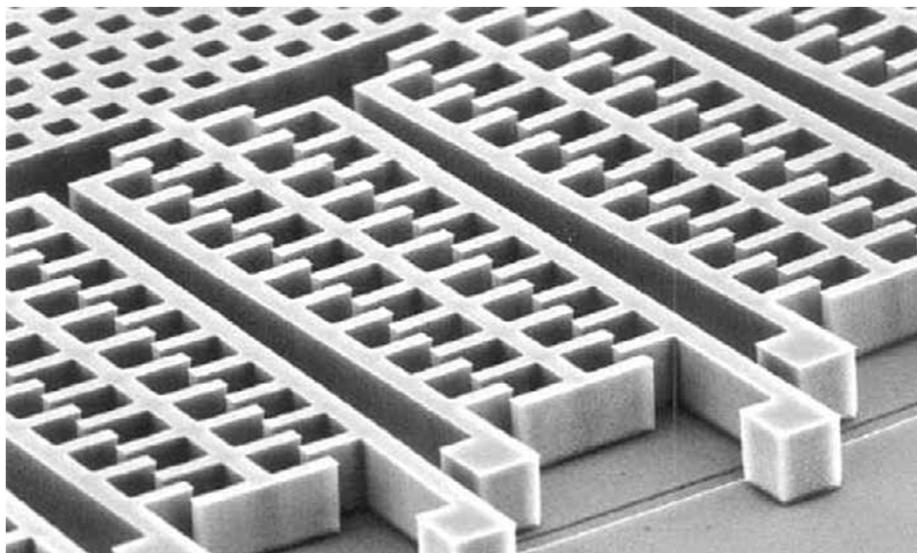
- Acelerômetros strapdown em 3 eixos ortogonais
 - Mede a aceleração linear com a unidade **g** ($9,81 \text{ m/s}^2$)
 - Aceleração da força gravitacional inseparável.
 - Escala / Resolução / Taxa usuais para acelerômetros:
 - **10g / 10mg / 40ksps** – Vibração e instrumento shaker
 - **5000g / 1g / 1ksps** – Impactos, espoleta
 - **16g / 4mg / 4ksps** – **MEMS COTS** (drones, celulares)
 - Sensor de queda-livre (hard-disk safe head-park)
 - **100g / 4mg / 4ksps** – Limites **COTS ITAR-free**
 - **2g / 10 μg / 200sps** – Inclinômetros

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

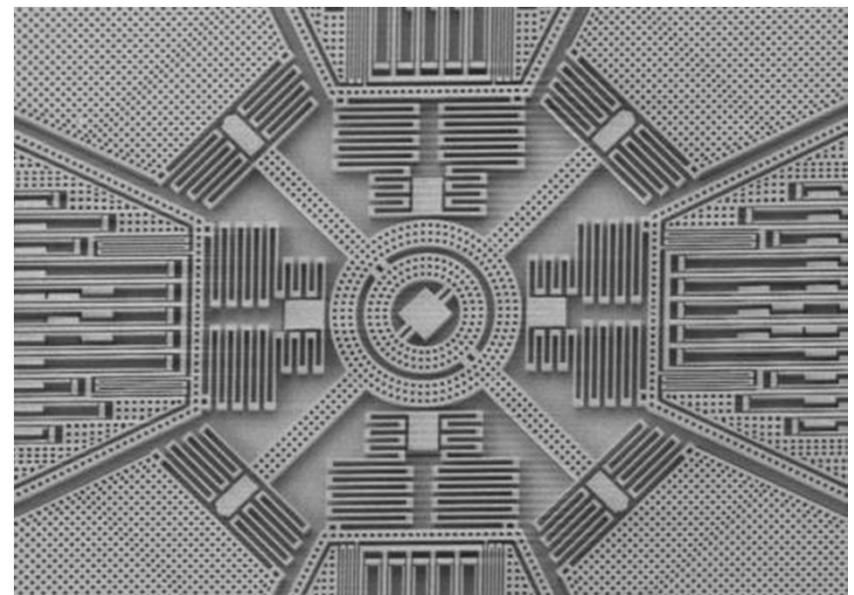
Fundamentos de Sensores Inerciais

IMU – INERTIAL MEASUREMENT UNIT

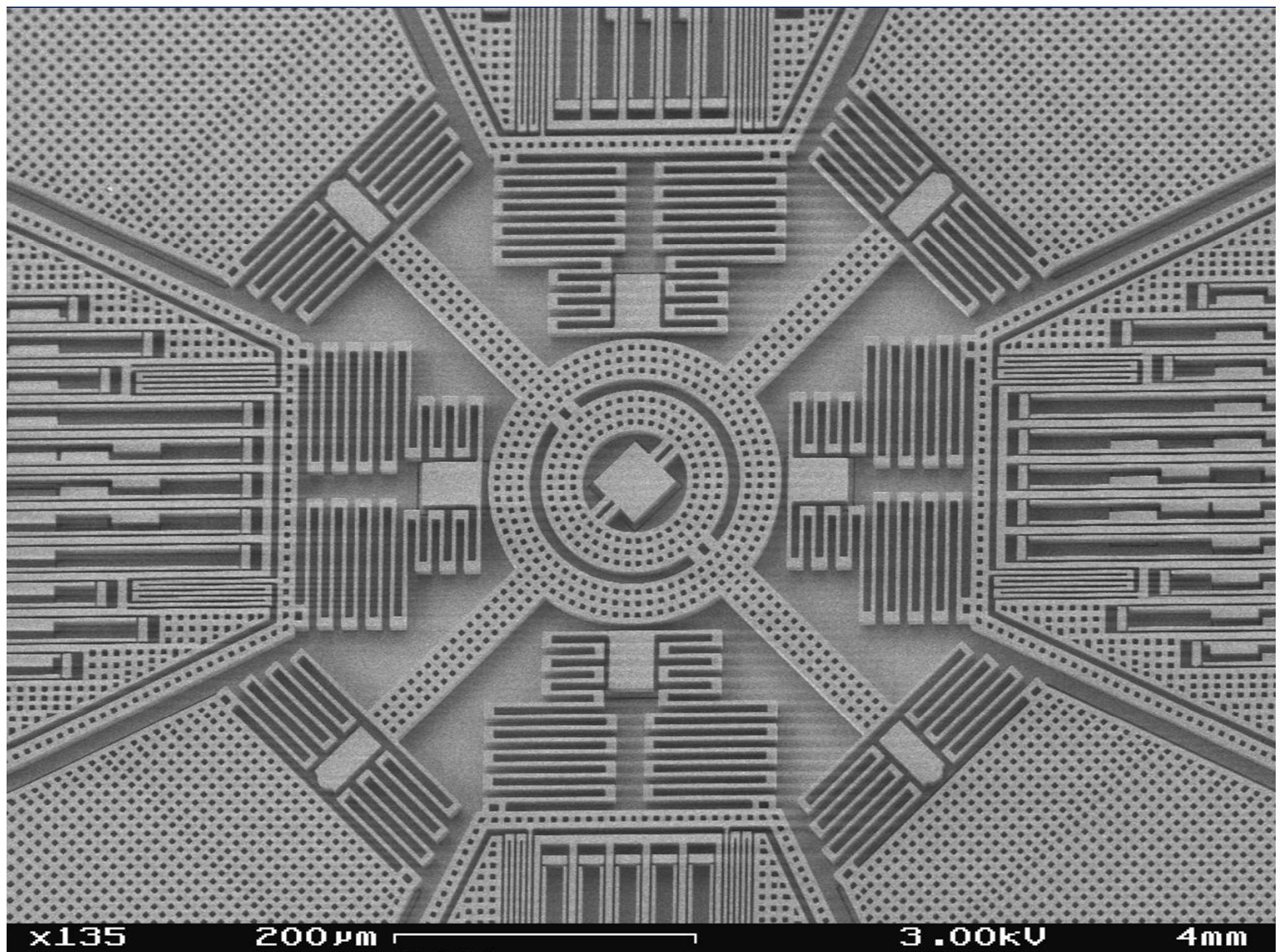
- Tecnologia MEMS (micro electro-mechanical systems)
- Capacitivo: baixa frequência, alta sensibilidade → **IMU**
- Piezo elétrico/resistivo: cristais ou cerâmicas.
 - Alta-frequência ou grande escala → shaker/impact



$$\vec{F} = m \vec{a}$$



$$F = -2 m \vec{v} \times \vec{\omega}$$



x135

200 μm

3.00kV

4mm

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

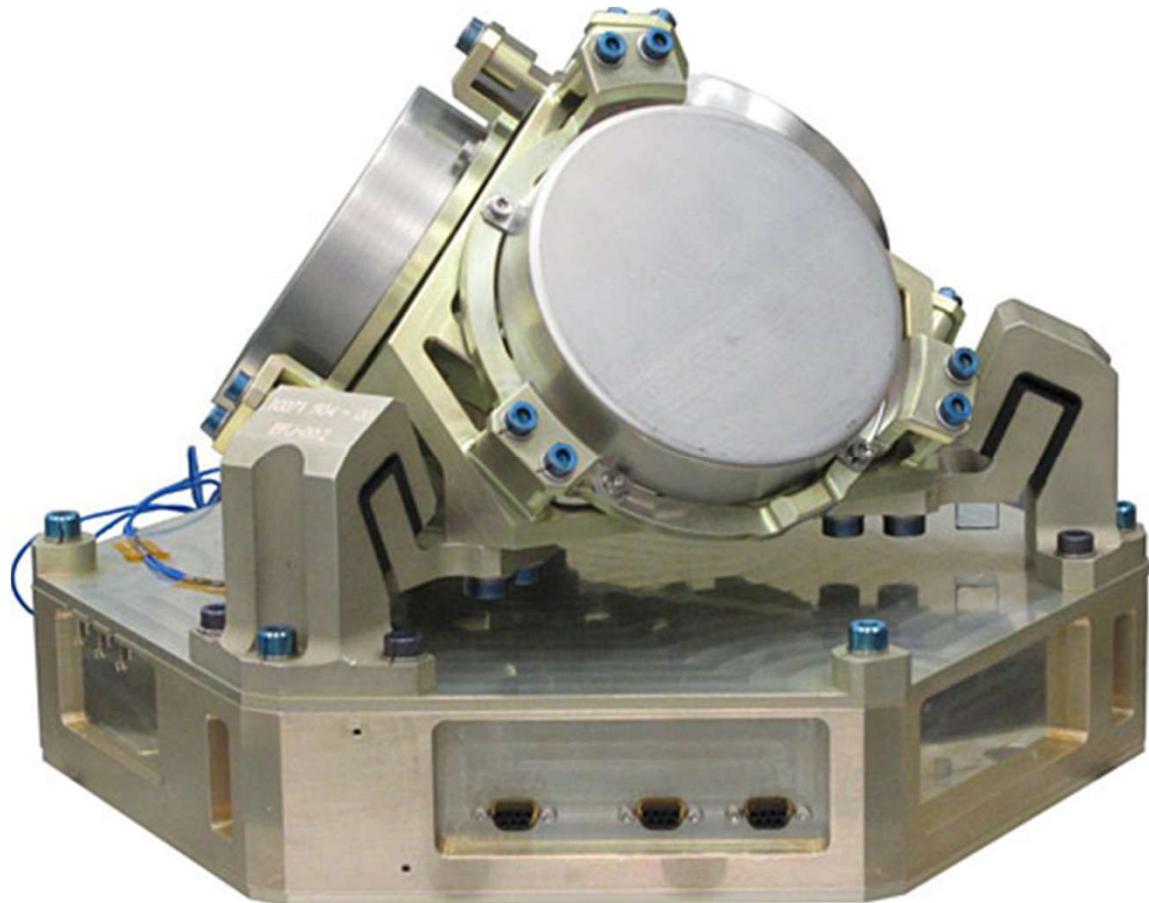
Fundamentos de Sensores Inerciais

IMU – INERTIAL MEASUREMENT UNIT

- Girômetros strapdown em 3 eixos ortogonais
 - Mede a velocidade angular em **graus por segundo (dps)**.
 - Escala normal para **IMU**: entre 20 dps e 2000 dps;
 - **MEMS**: massa em vibração ressonante, capacitivo:
 - menos preciso, mas baixíssimo custo.
 - **RLG** (Ring Laser Gyro) e **FOG** (Fiber Optic Gyro)
 - Interferometria.
 - Muito preciso.
 - Alta complexidade e custo.
 - Sem partes móveis → baixo desgaste

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados
Fundamentos de Sensores Inerciais

FOG – FIBER OPTIC GYRO

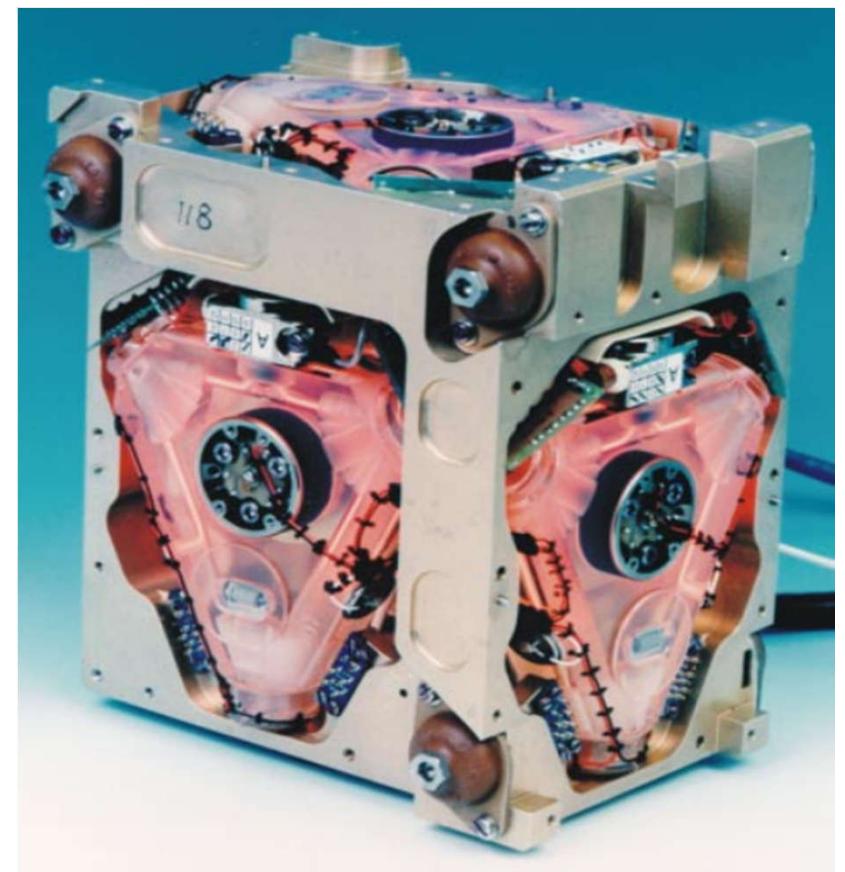
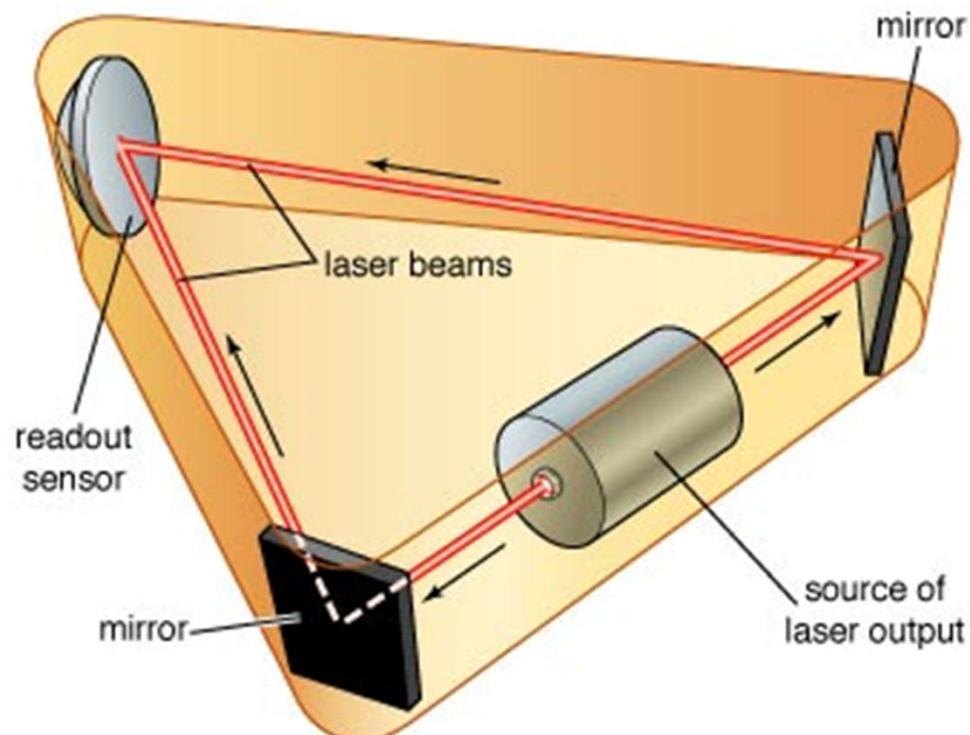


Efeito Sagnac – Interferência entre ondas **CW** e **CCW**

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

RLG – RING LASER GYRO

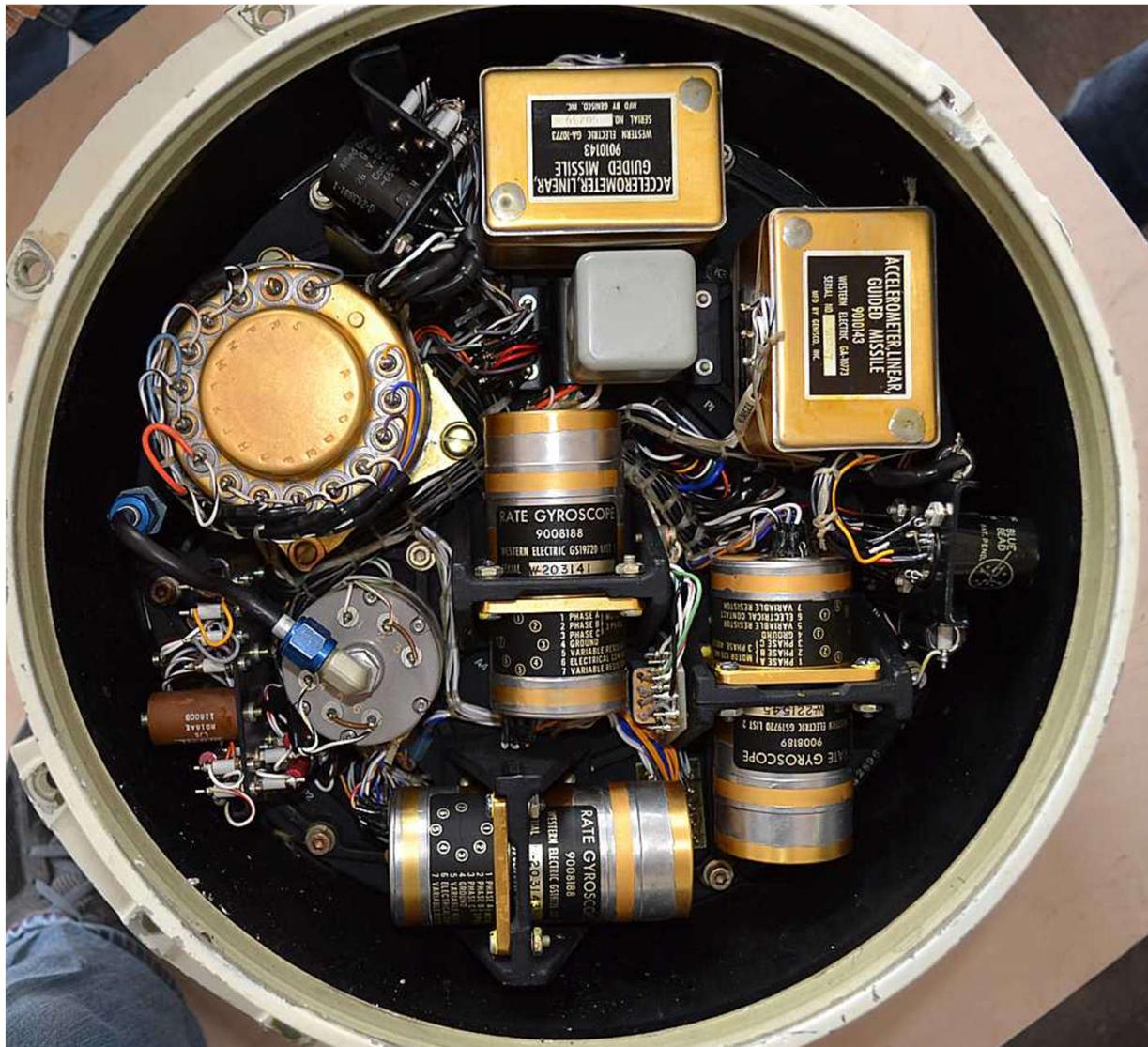


Efeito Sagnac - Interferência

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

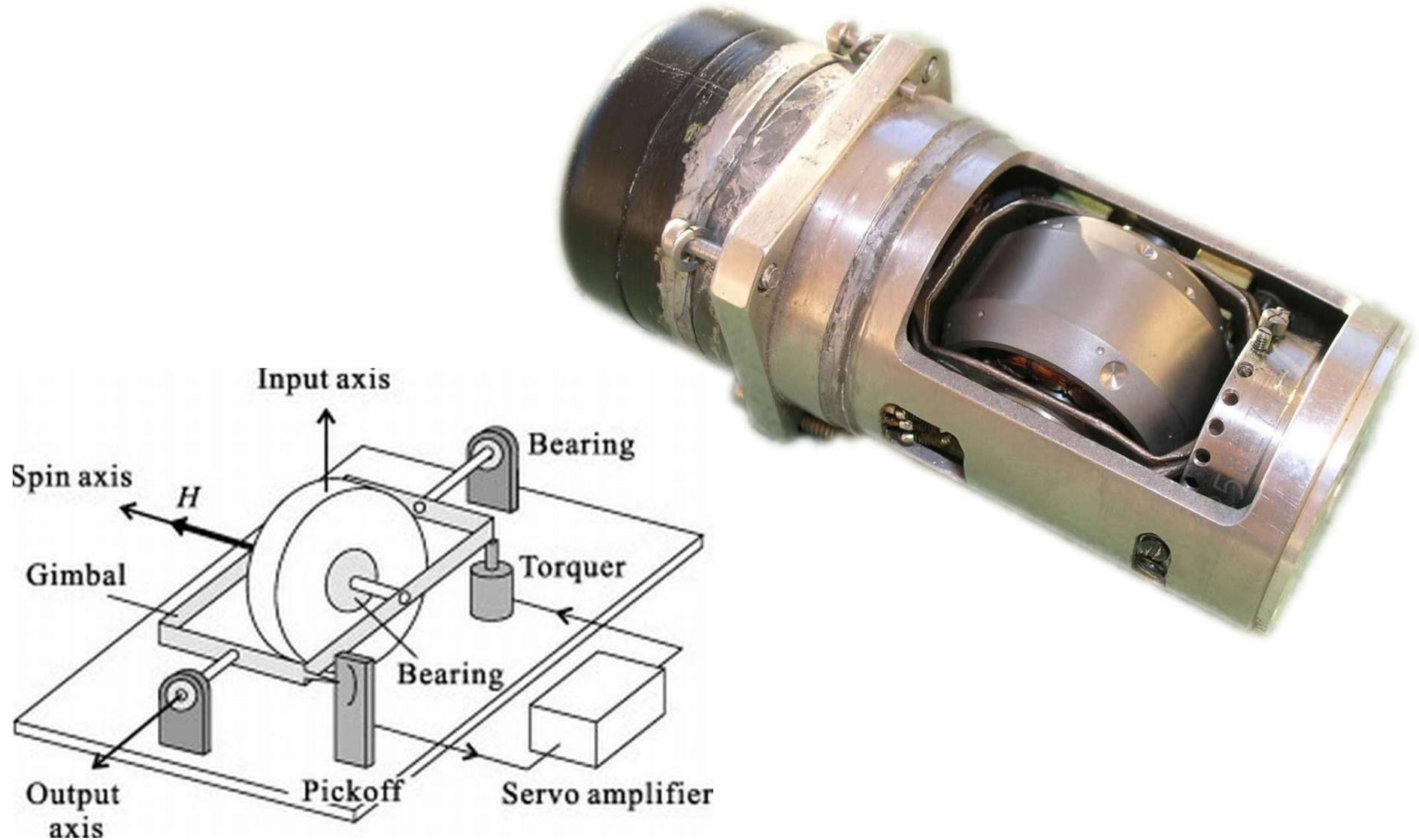
Fundamentos de Sensores Inerciais

IMU em um Míssil



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados
Fundamentos de Sensores Inerciais

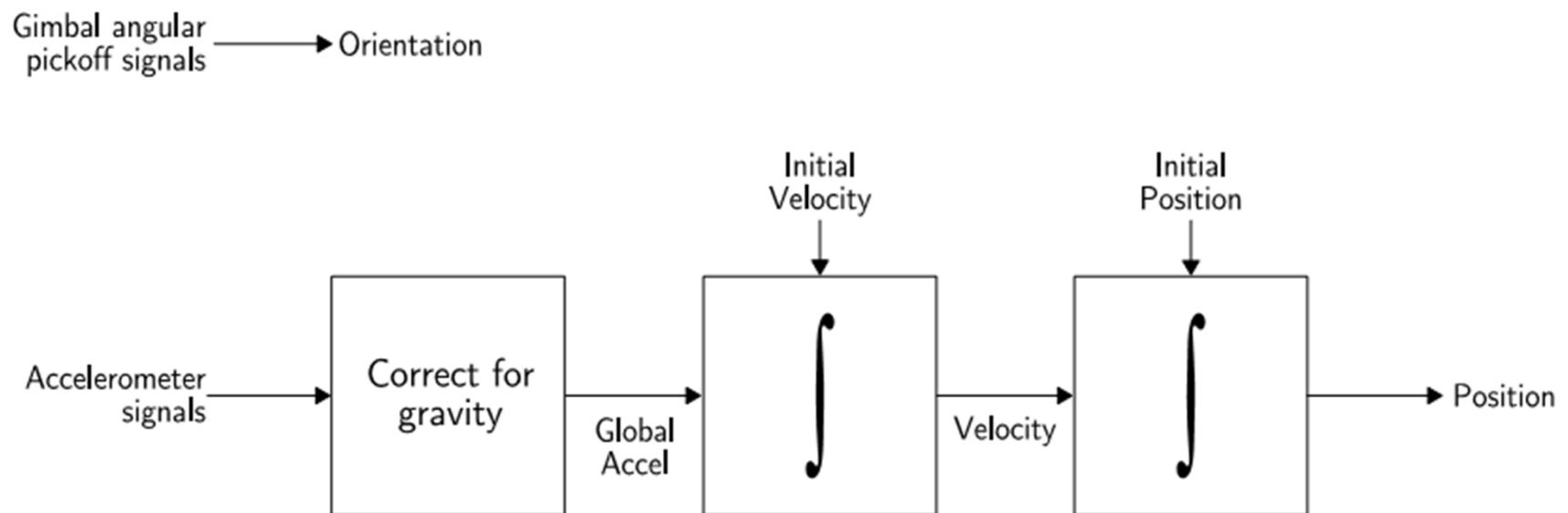
RATE INTEGRATING GYRO



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

INTEGRAÇÃO da NAVEGAÇÃO - GIMBALED



Orientação: leitura dos encoders da plataforma estabilizada

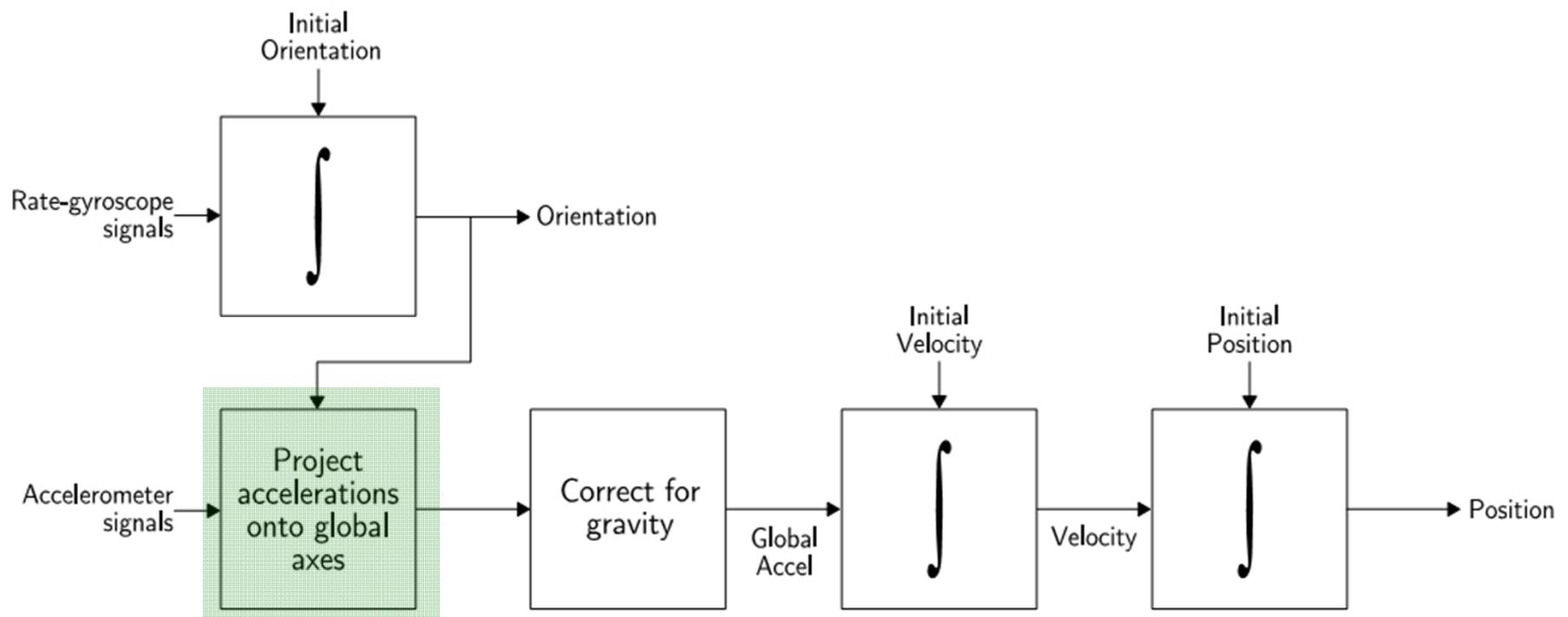
Acelerações: medidas e integradas num referencial fixo e inercial

Geralmente um eixo aponta para o centro da Terra, e os outros dois definem o plano local do horizonte (**NED**: North-East-Down).

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

INTEGRAÇÃO da NAVEGAÇÃO - STRAPDOWN



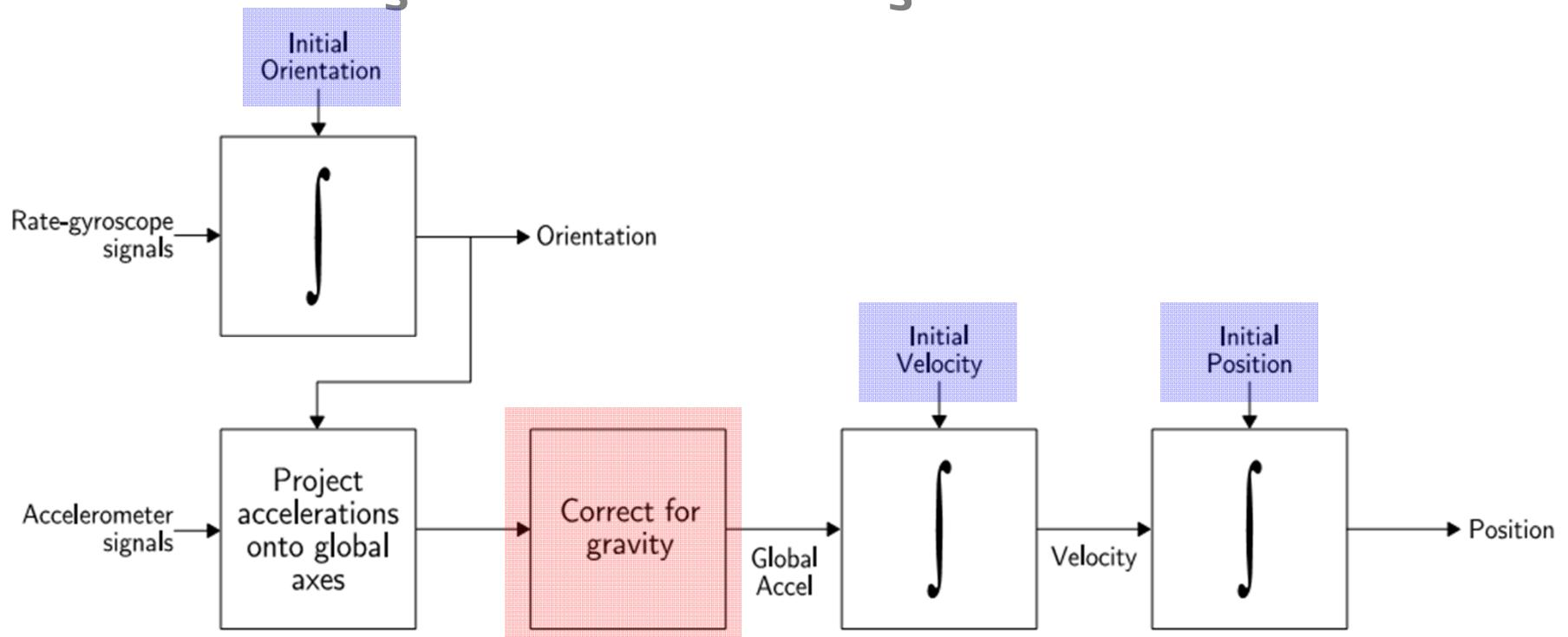
Transformação de Coordenadas era uma operação matemática complicada até 1980 para ser embarcada.

Com a chegada dos microprocessadores, a técnica strapdown tornou-se viável, robusta, simples e de baixo custo.

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

INTEGRAÇÃO da NAVEGAÇÃO - STRAPDOWN



Depende da inicialização das Condições Iniciais

Depende da Compensação do Modelo Gravitacional...

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

INS – TRANSFER ALIGNMENT

Ou referência de condições iniciais

- Posição inicial geograficamente aferida (**IBGE**).
- Velocidade nula (parado).
- Orientação por gyrocompass, referências ou bússola

Ou outro **INS** atualizado e de classe superior repassa as condições iniciais para o **INS** sendo inicializado.

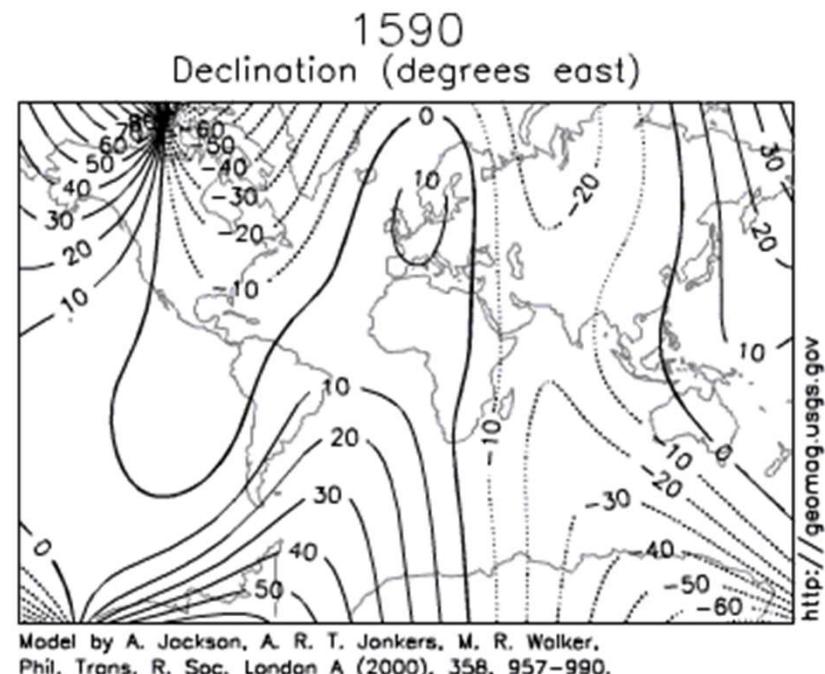
- Copia as condições iniciais
- Compara a integração com o **INS** de classe superior
 - Estima os próprios erros, para depois compensá-los

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

MAGNETÔMETROS

- Magnetômetros em 3 eixos ortogonais (bússola 3D)
 - Mede a direção tridimensional do campo magnético.
 - Elementos magnetorresistivos
- Declinação magnética varia com:
 - Localidade;
 - Data;
 - Altitude;
- Carta de declinação magnética:
- Medida sensível à configuração de objetos metálicos nas proximidades. → Calibração após montagem.



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

ERROS INTRÍNSECOS

- Bias/Offset: valor constante somado ao sinal.
- Scale factor: erro de medida proporcional ao sinal real.
- Não-linearidade: medidas não correspondem ao valor real.
- Saturação: limites da escala do sensor.
- Quantização: resolução digital da leitura.
- Discretização: descontinuidade digital por amostragem.
- Desalinhamento: incerteza na direção dos 3 eixos ortogonais.
- Ruído intrínseco: ruído branco somado ao sinal.
- Instabilidade: magnitude dos erros acima variam com:
 - temperatura, vibração, aceleração, idade, desgaste,
 - erros in-run e run-to-run.

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Fundamentos de Sensores Inerciais

LINCS/IAE – CALIBRAÇÃO e COMPENSAÇÃO

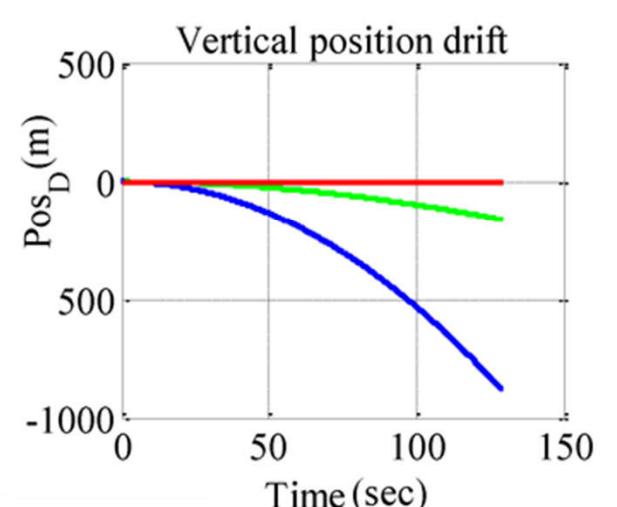
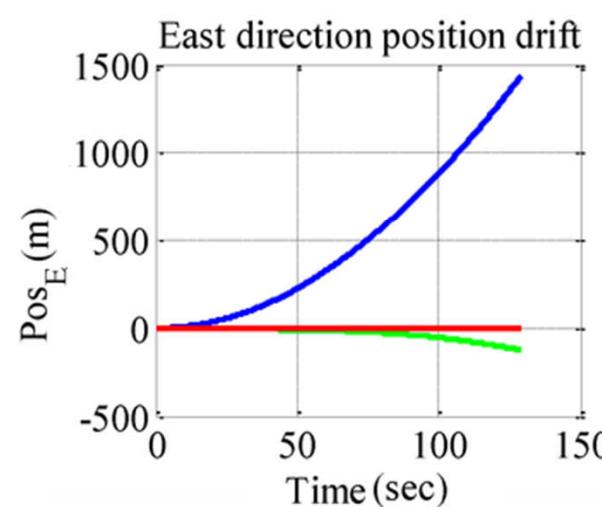
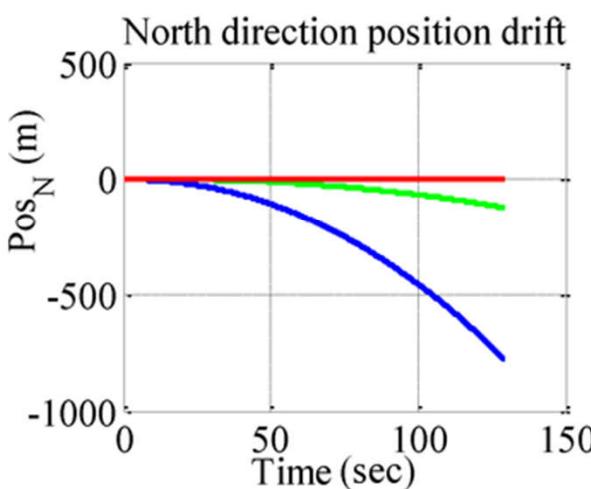
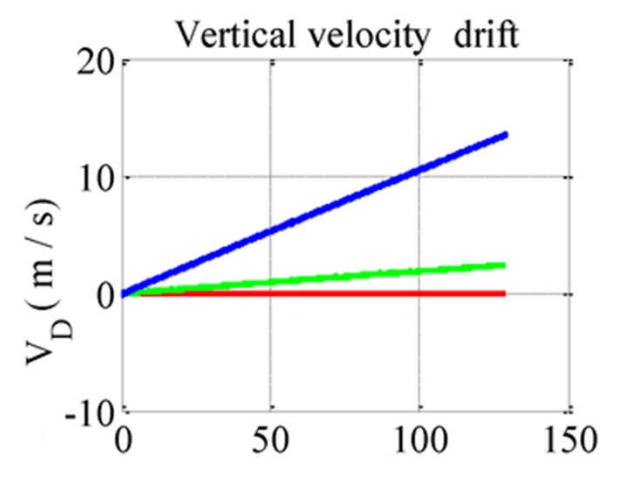
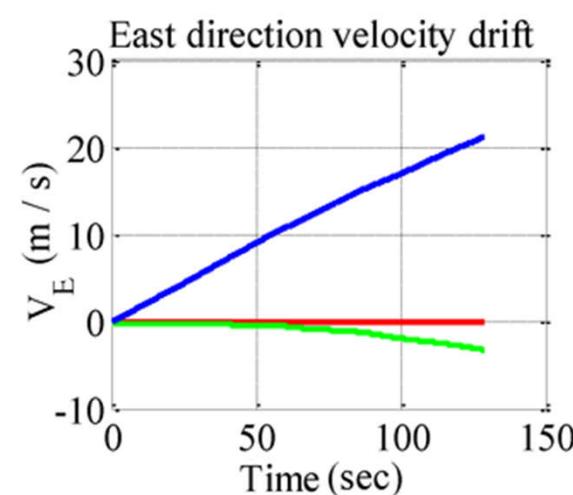
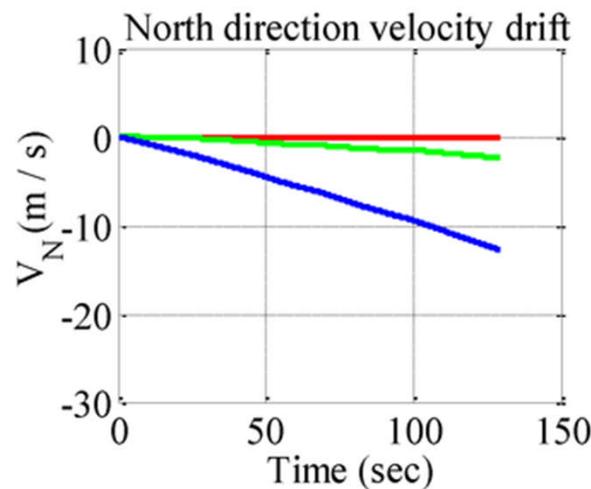


Laboratório de Identificação,
Navegação, Controle e Simulação

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

DERIVA (DRIFT) INERCIAL



— Reference — Compensated — Uncompensated

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

ERROS INCOMPENSÁVEIS

- **ARW** – Angle Random Walk
 - Medida de Erro de Navegação causado pela integração do ruído na medida de velocidade angular do Girômetro.
 - Unidade: graus/√tempo Exemplo: $\%/\sqrt{\text{hr}}$
- Exemplo girômetro **MEMS** part number MPU6050
 - **ARW** = $0,003 \, \%/\sqrt{\text{s}}$ ou $0,18 \, \%/\sqrt{\text{hr}}$
 - Qual a incerteza angular média após 10 minutos?
- Analogia com **VRW** – Velocity Random Walk unidade $\text{m/s}/\sqrt{\text{hr}}$

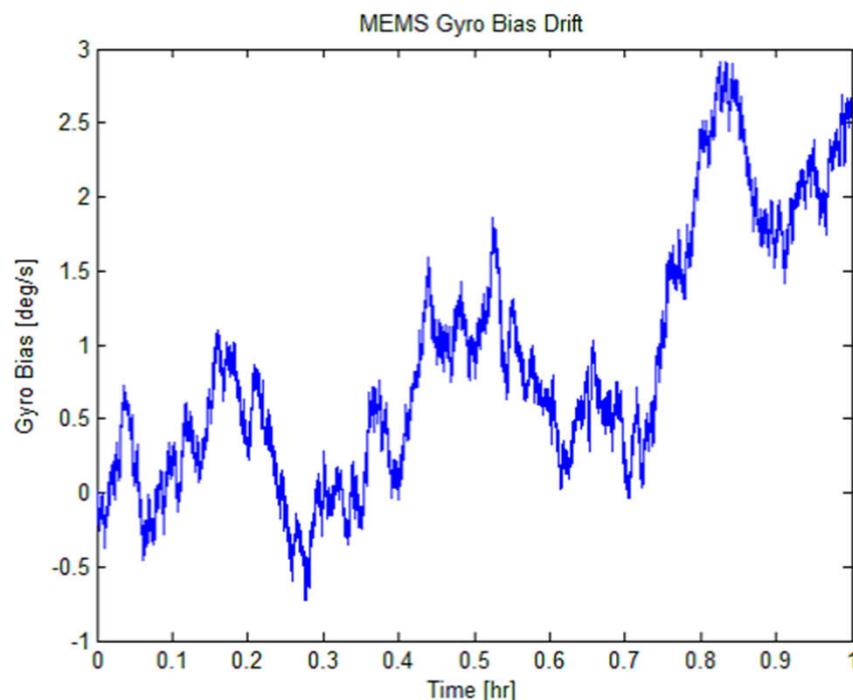


Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

ERROS INCOMPENSÁVEIS

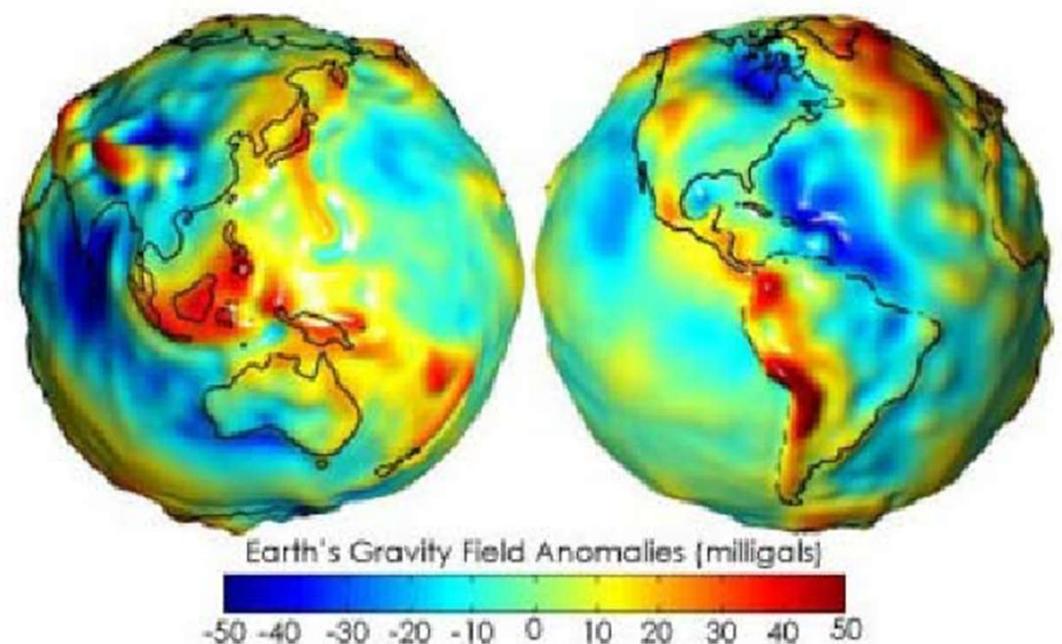
- Bias Instability (BRW – Bias Random Walk)
- Variação lenta e imprevisível do offset/bias na medida dos sensores inerciais.
- Geralmente a variação do bias se mantém em um intervalo.



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

INS – COMPENSADORES



Correções:

- Realinhamento de Eixos
- Correção do **Bias** e **Fator de Escala**
- Aceleração de Coriolis (rotação da Terra)
- Aceleração gravitacional (1 g)
- Modelo das ondulações gravitacionais do geóide da Terra:

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

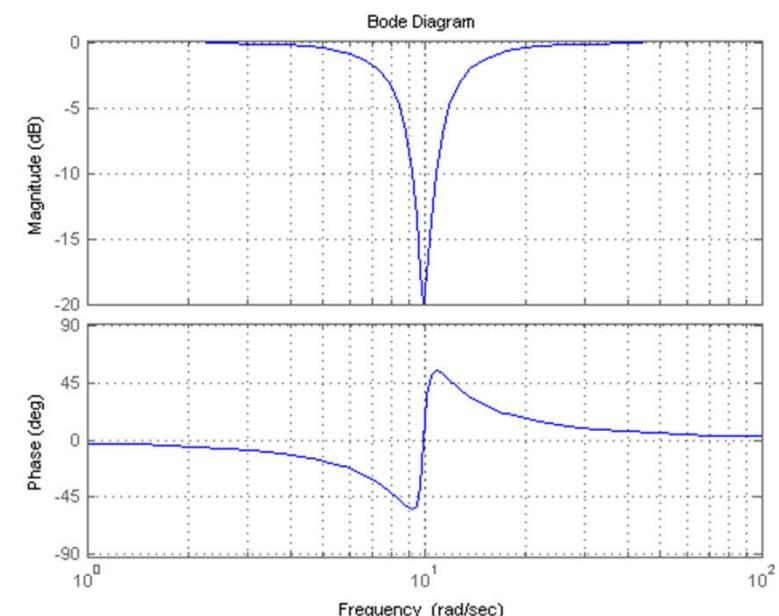
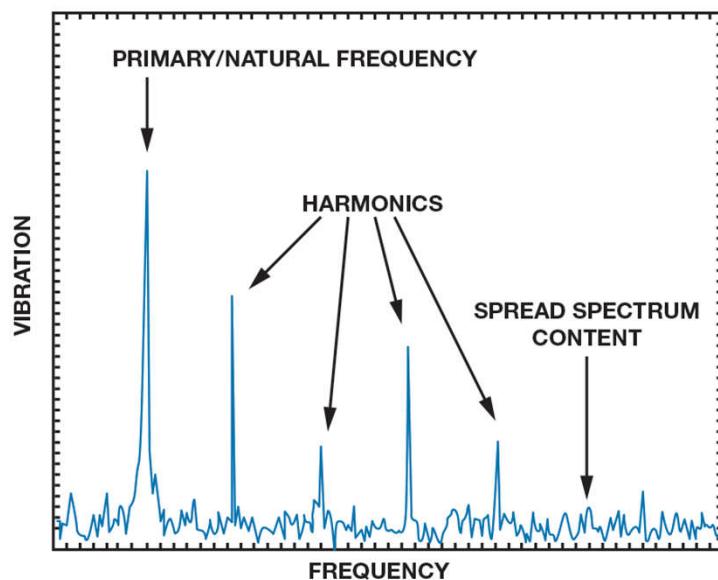
Fundamentos de Sensores Inerciais

IMU – FILTROS DE VIBRAÇÕES

Fixação/Acomodação mecânica/elástica da **IMU** deve amenizar a transmissão de vibrações do veículo para os sensores.

Mecanicamente: suavizar a dinâmica, mas introduzindo atraso.

Frequências dos modos naturais de vibração do corpo devem ser filtradas eletronicamente por um notch filter:



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

FUSÃO DE DADOS: IMU + GPS

Filtros de Kalman (**EKF** e **UKF**) integram a navegação inercial com informações de outros sensores, melhorando a estimativa de posição e orientação.

- Técnica padrão e madura (30+ anos de uso).
- Ponderação para aproveitar o melhor de cada sensor:
 - Inercial: bom no curto prazo, péssimo no longo prazo.
 - **GPS** plano H: bom no longo prazo (acurácia 5 m).
 - **GPS** plano V: bom no longo prazo (acurácia 20 m).
 - Baroaltímetro: bom fora da região transônica, grande **bias**.
 - Magnetômetro: acurácia alguns graus, bom no curto prazo.

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

Fundamentos de Sensores Inerciais

TRABALHO

- Trabalho individual para entrega até ____ / ____ / ____
- Cabeçalho curto (nome, instituição, professor, data, etc)
- Texto de 2 a 5 páginas – impresso, manuscrito ou digital.
 - enviar para e-mail address: joziasdelrios@gmail.com
- **Assunto:** “Classes de plataformas inerciais (**IMU**)”
 - Para aplicação na navegação de veículos, ex:
 - Submarino, navio, avião, carro, entretenimento, ...
 - Quais os fatores de qualidade que distinguem cada classe?
 - Compare custo, complexidade, tecnologia.
 - Cite as fontes utilizadas.
 - Não é necessário formato da norma ABNT.