



PROCESSAMENTO DE NUVEM DE PONTOS 3D
CGEO- 7028

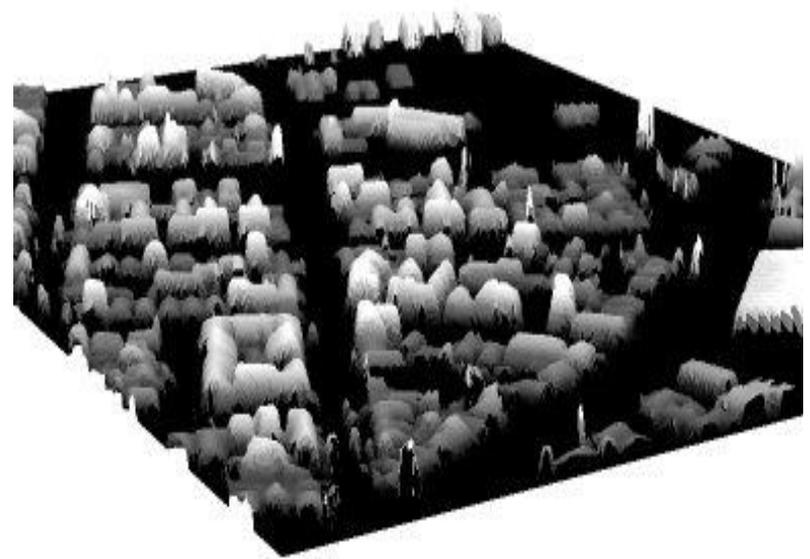
**Sensoriamento Remoto por LIDAR
(LIDAR Remote Sensing)**

Sistemas aerotransportados

UFPR – Departamento de Geomática
Prof. Jorge Centeno
2023
copyright@ centenet

Laser Scanner aerotransportado

- Neste caso, o sistema é instalado em uma plataforma móvel, geralmente um avião, e carregado para sobrevoar superfície do terreno e assim obter uma imagem tridimensional da superfície.



A aeronave deve ter condições para garantir o funcionamento do equipamento (Por ex. espaço e energia elétrica suficientes).



A posição e atitude (ângulos) do sistema são variáveis e dependem das condições do voo.

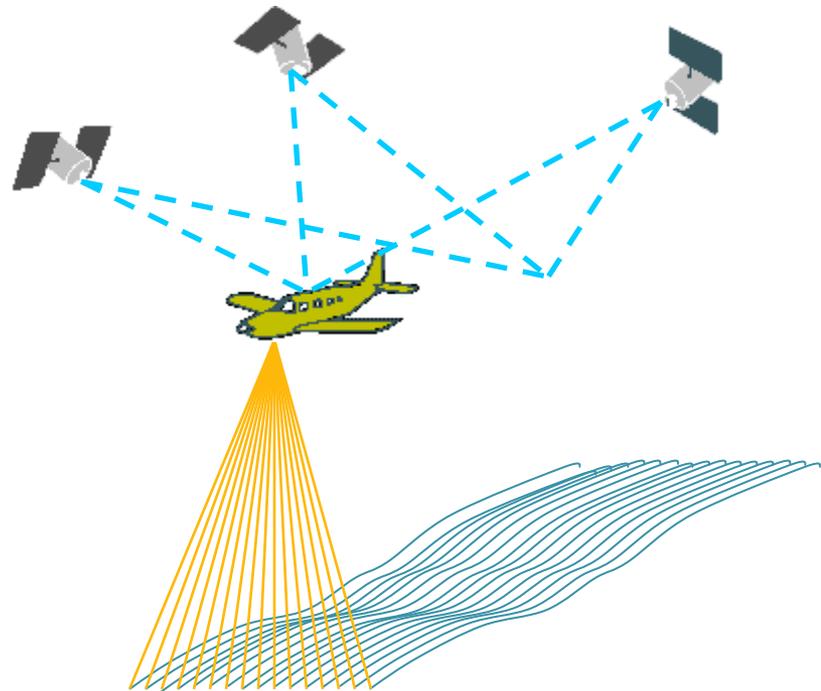


A questão da posição

Quando o sistema é aerotransportado, a posição do sensor varia com o tempo. Uma alternativa consiste em determinar a posição instantânea com ajuda de receptores GPS.

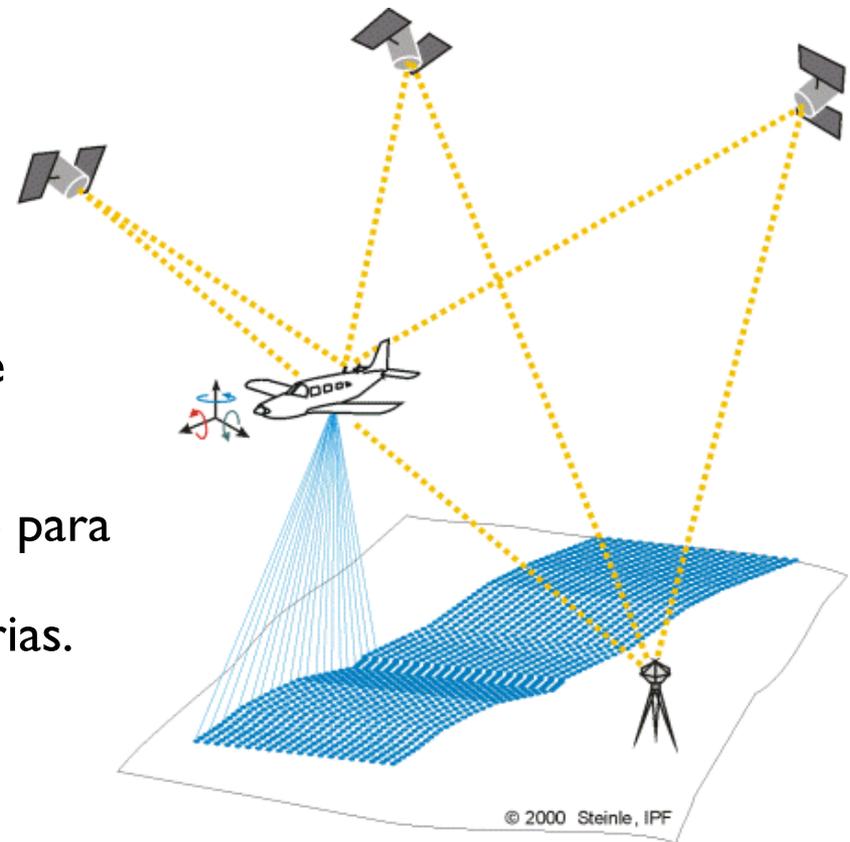
Neste caso, a posição do avião é determinada a partir de sinais recebidos de satélites artificiais.

Como este processo não é isento de erros, a posição obtida é afetada pela precisão com a qual o sistema GPS opera.

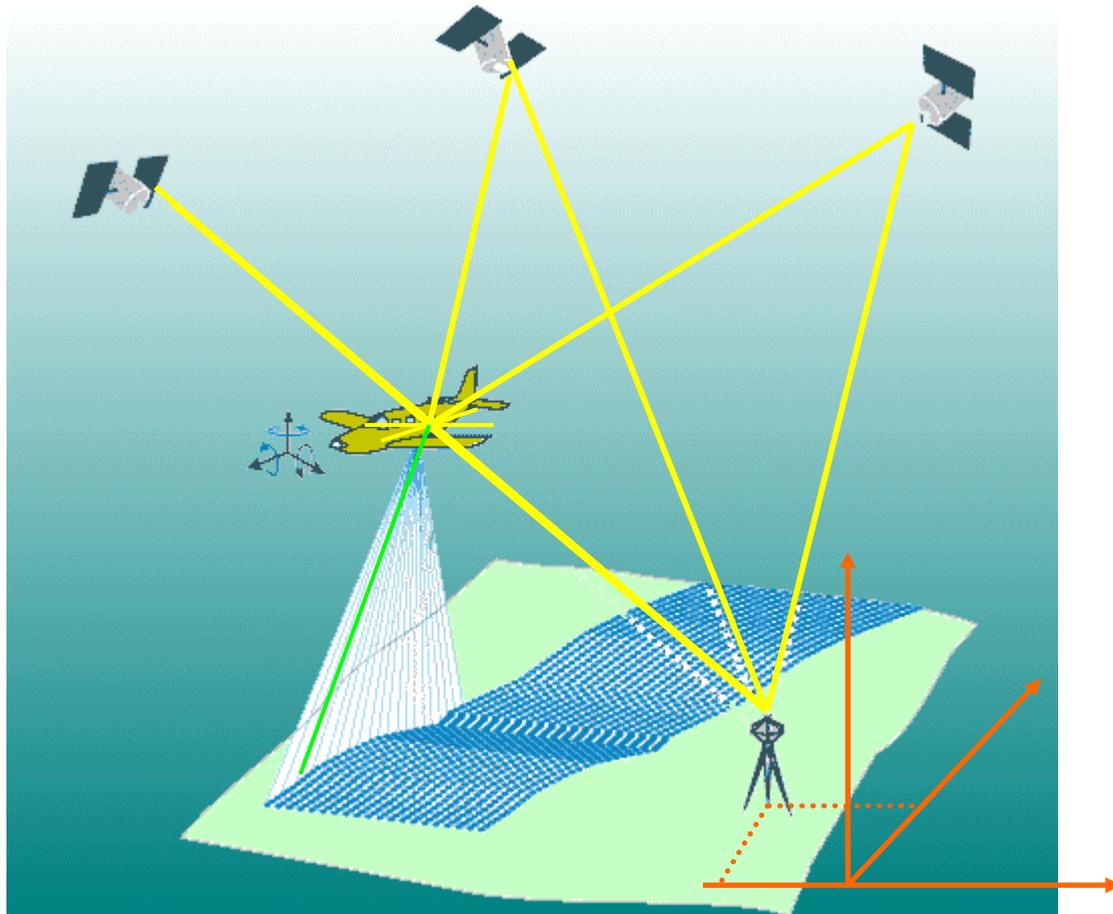


GPS diferencial

- A solução mais adequada consiste em determinar a posição com ajuda de um sistema GPS diferencial (dGPS).
- Neste caso são usados,
 - além de:
 - - Sistema de satélites
 - - Receptor móvel na aeronave
 - um
 - - Receptor FIXO, que é usado para
 - estimar as correções necessárias.



Determinação da posição da aeronave por dGPS



Exemplo de receptor GPS



Atitude

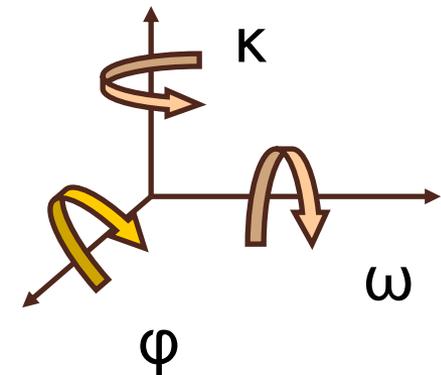
- A aeronave experimenta inclinações durante o voo, por exemplo por efeito do vento.



Por este motivo, é necessário determinar a “atitude” do avião a cada momento.

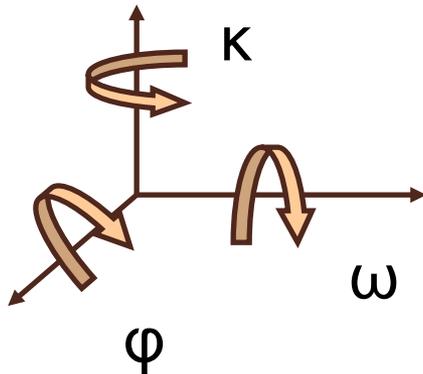
Atitude: inclinação nos três eixos.

O que é determinado usando uma unidade inercial



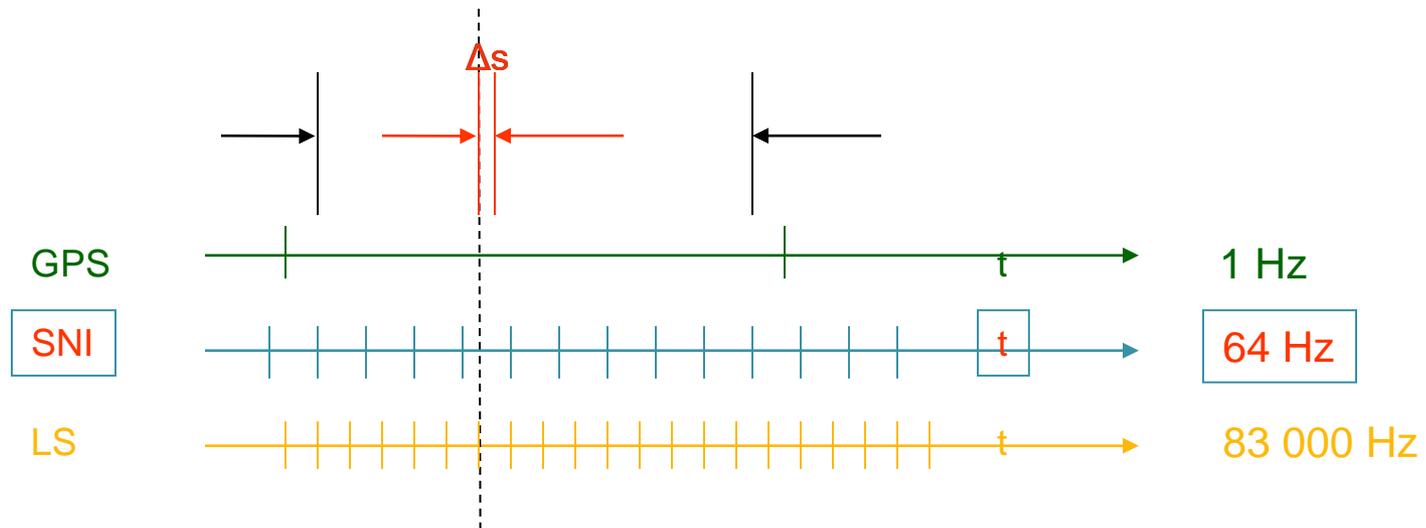
INS = Inertial Navigation System

- O sistema de Navegação Inercial (SNI) é um dispositivo capaz de medir a inclinação da aeronave em torno dos três eixos.



Problema de frequência diferenciada

O varredor laser (LS), o sistema inercial (SNI) e o sistema GPS coletam dados em intervalos diferentes, logo, muitos valores devem ser interpolados. Por isso, a frequência de coleta é menor à frequência do varredor laser.



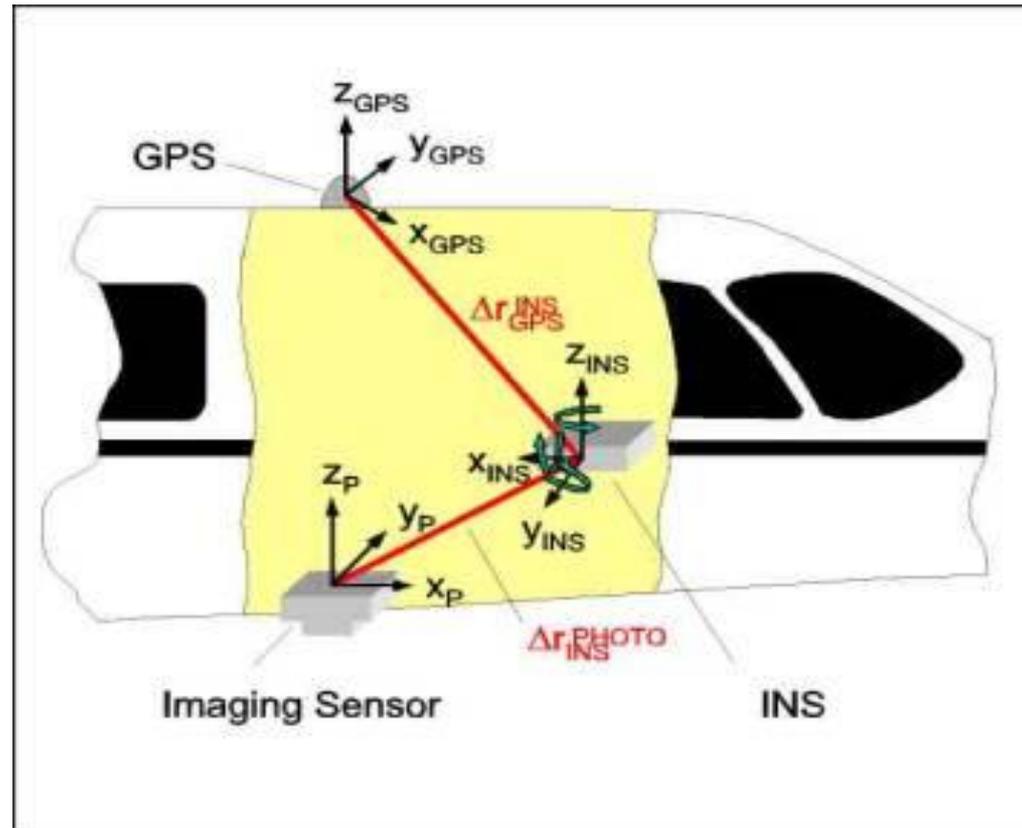
Exemplo do sistema Toposys

⇒ resulta em uma frequência de: 630 Hz

Schenk, 2001

Determinação da posição do sensor

A posição relativa dos instrumentos deve ser cuidadosamente determinada e levada em conta na fase de processamento.



Para isto, são necessárias Transformações entre sistemas de coordenadas

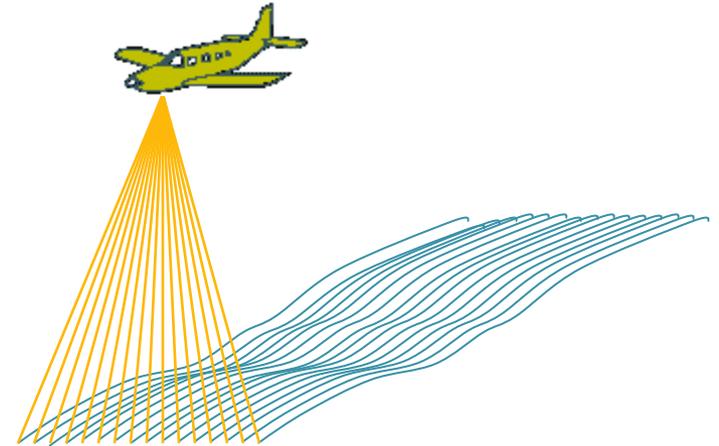
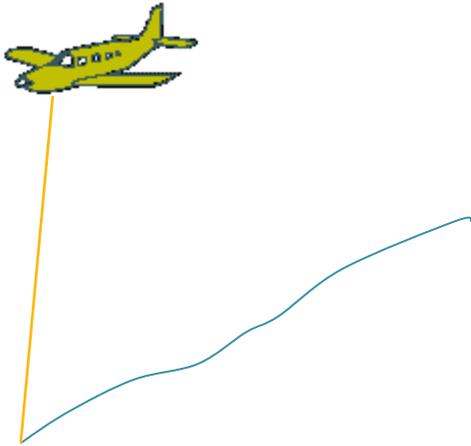
Equação geral

$$X_G = X_{0GPS} + M_{atitude} P + M_{atitude} M_{alinhamento} M_{scanner} R$$

X_G :	coordenadas do ponto no terreno
X_{0GPS} :	posição dada pelo GPS
$M_{atitude}$:	rotação da plataforma
P :	deslocamento GPS-laser
$M_{alinhamento}$:	rotação entre IMU-laser
$M_{scanner}$:	ângulos de emissão do laser
R :	distância

Mecanismos de varredura

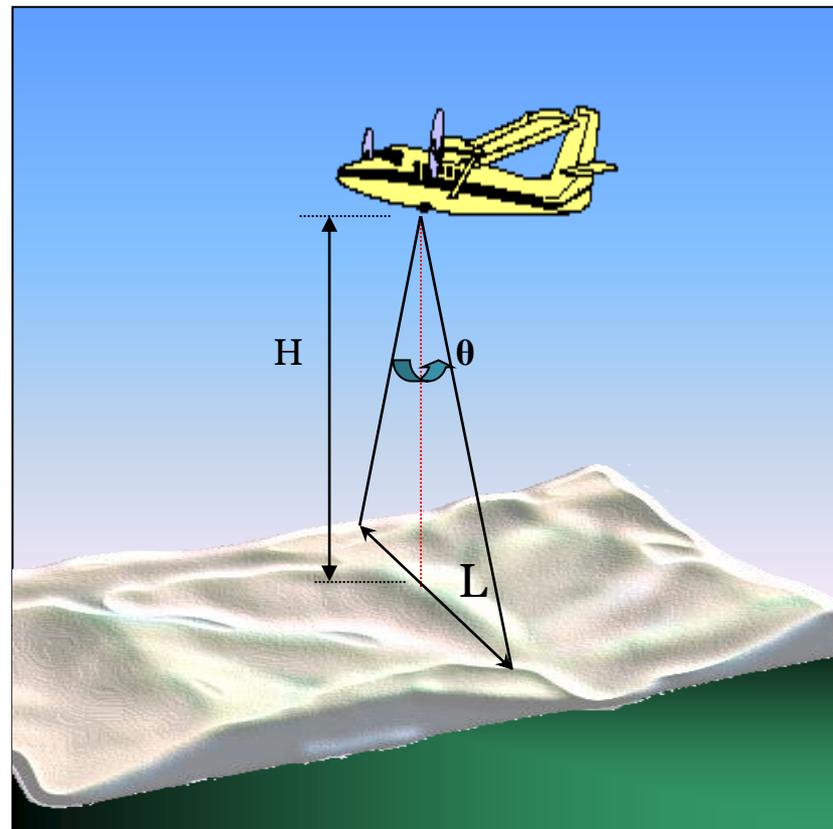
- Se o feixe fosse emitido em apenas uma direção, (p.ex: para baixo), apenas um perfil do terreno seria obtido.
- Para obter altitudes ao longo de uma faixa é necessário direcionar o feixe no sentido perpendicular ao vôo.



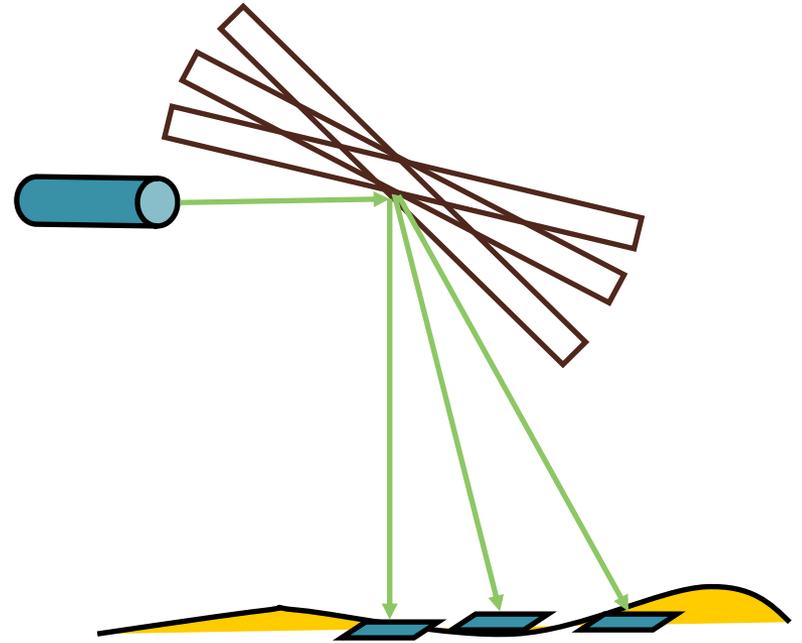
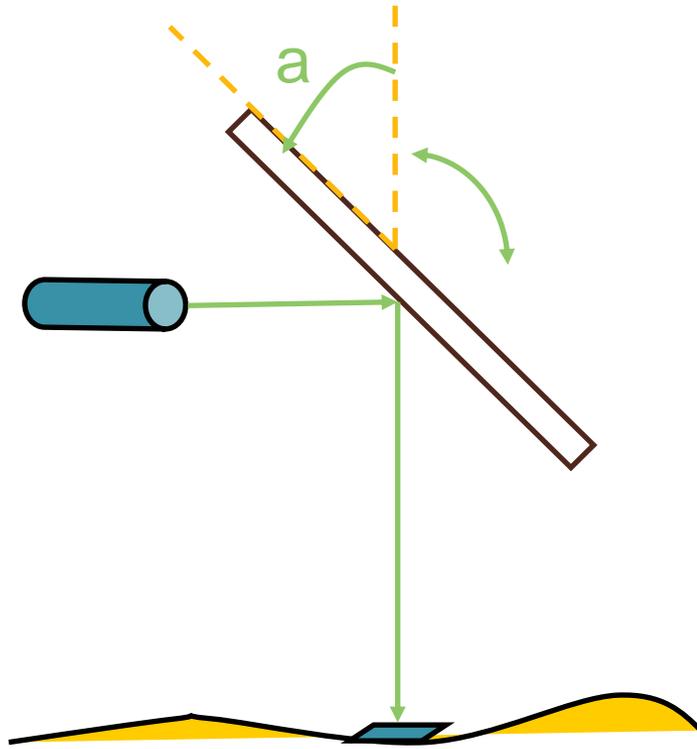
Largura da faixa varrida

- O feixe é apontado na direção perpendicular à linha de vôo até um ângulo máximo, $\theta_{\text{máx}}$ na figura.
- Combinando este ângulo com a altura de vôo (H), a faixa varrida no terreno é definida.

- $L = 2 * H \tan(0,5 * \theta_{\text{máx}})$

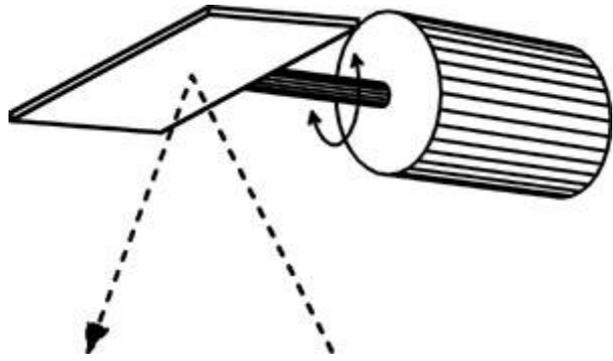


Opções: espelho oscilante

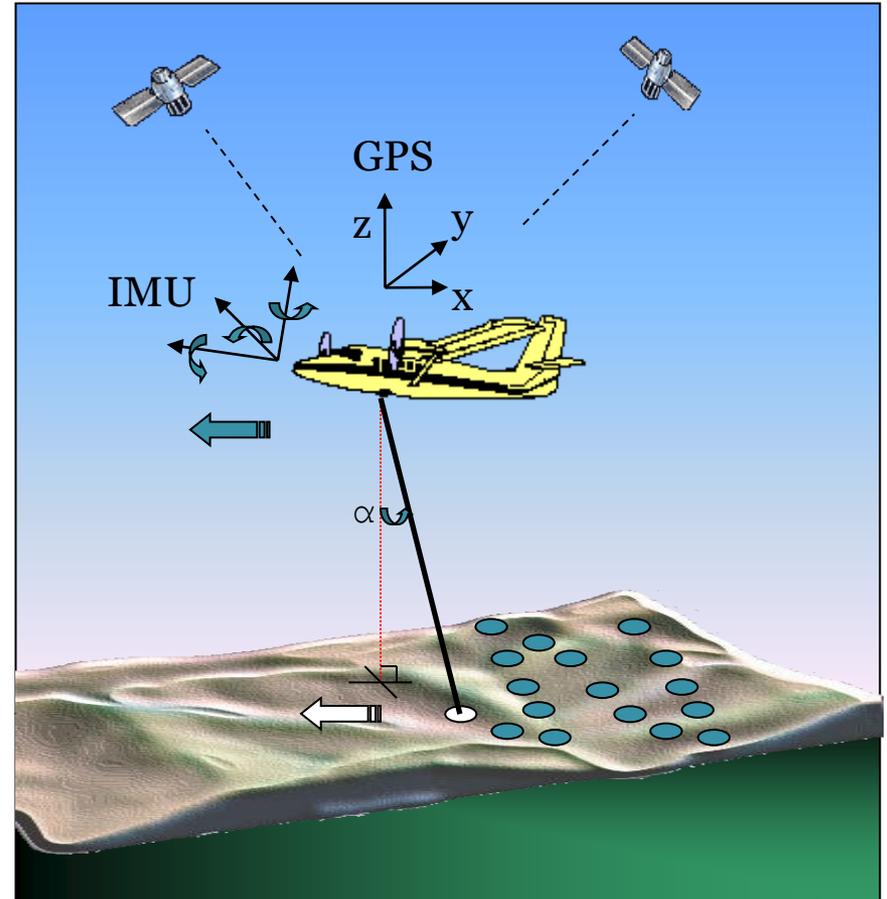


□ direciona o feixe na direção perpendicular à linha de vô.

Nach [\[Lohr & Wehr, 1999\]](#)

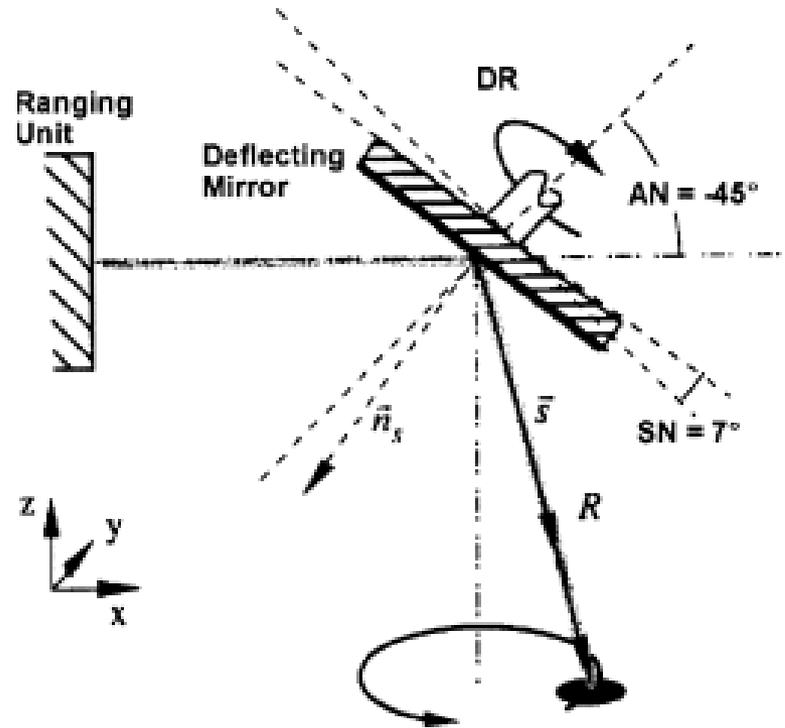


Devido ao deslocamento do avião e ao movimento oscilante do espelho, um padrão produzido no terreno é de zig-zag. Este varredor se encontra instalado no ALTM 1025.



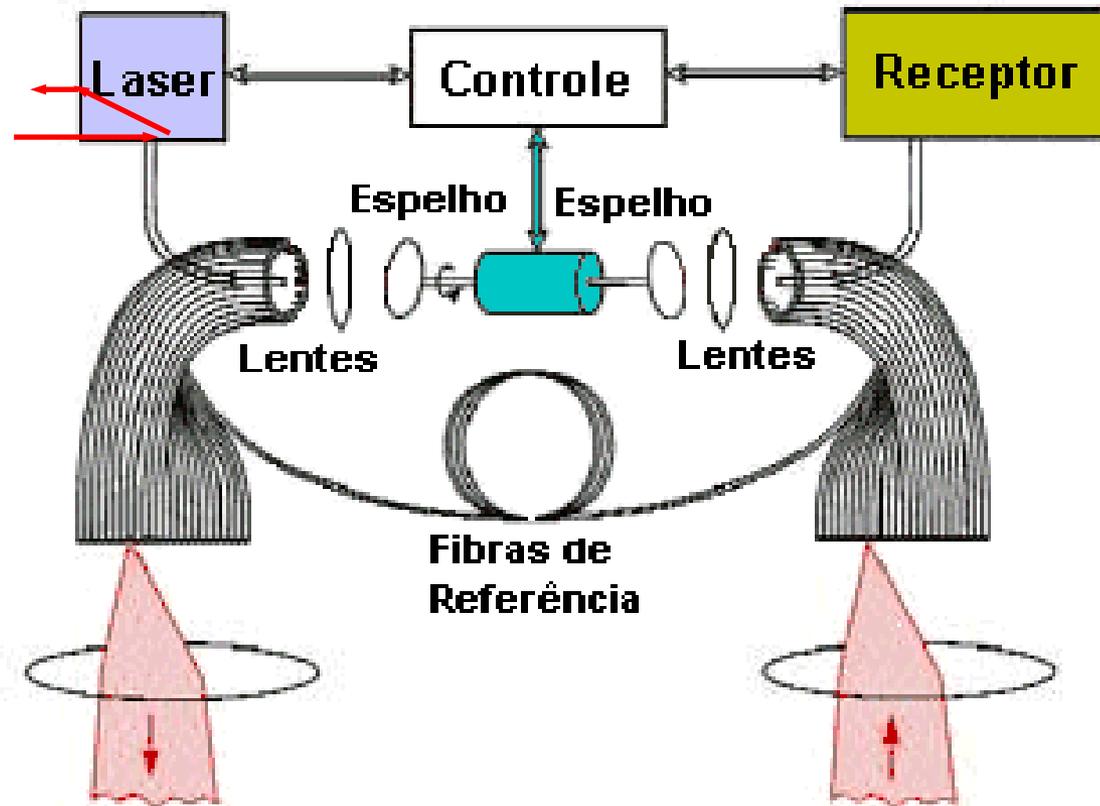
Opção: Espelho rotatório (ex. ScaLars)

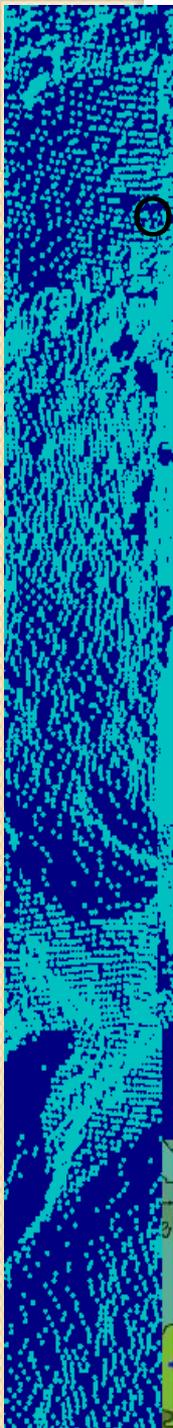
- □ Movimentos de oscilação e rotação do espelho.
- □ direciona o feixe segundo um padrão circular.



sistema de fibras ópticas (TopoSys)

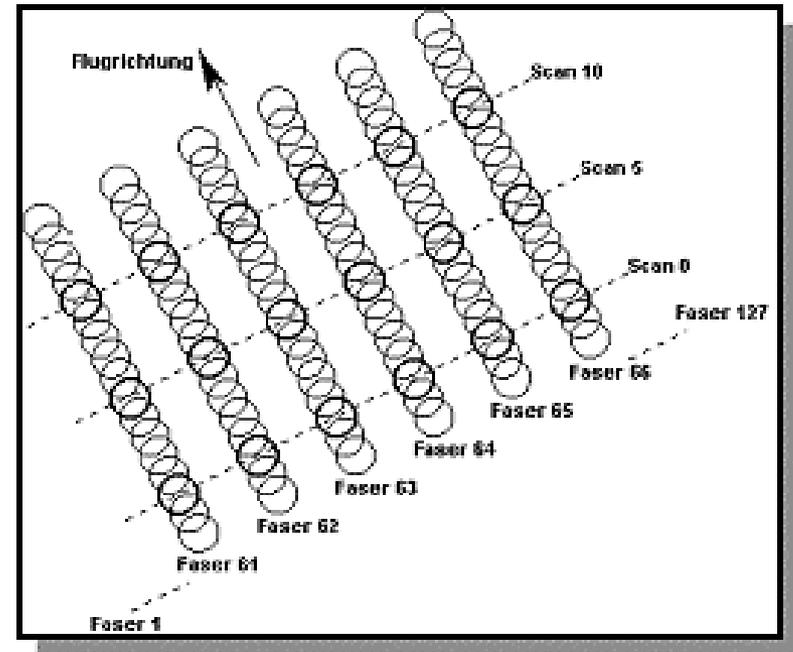
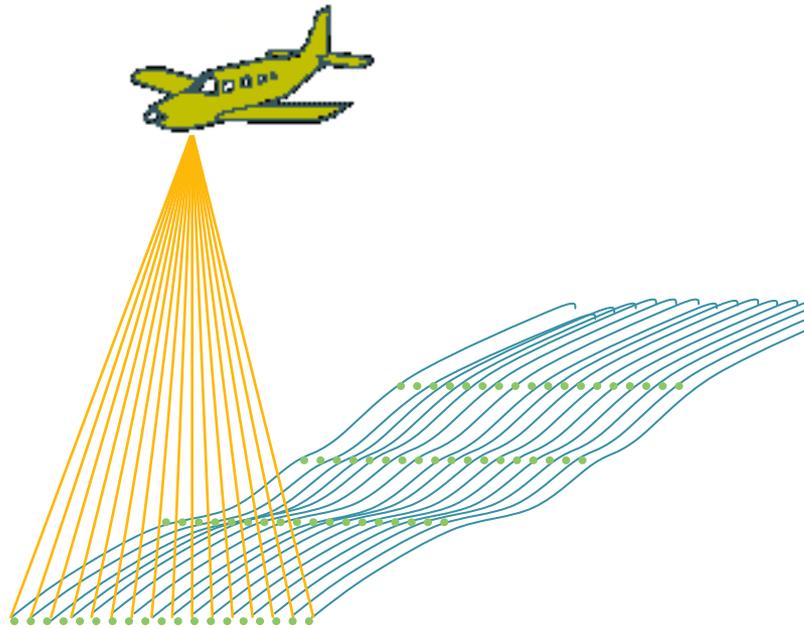
Um arranjo linear de fibras ópticas é usado para emitir os pulsos e captar os retornos. A unidade de controle central utiliza espelhos para apontar os feixes às respectivas fibras.





sistema de fibras ópticas (TopoSys)

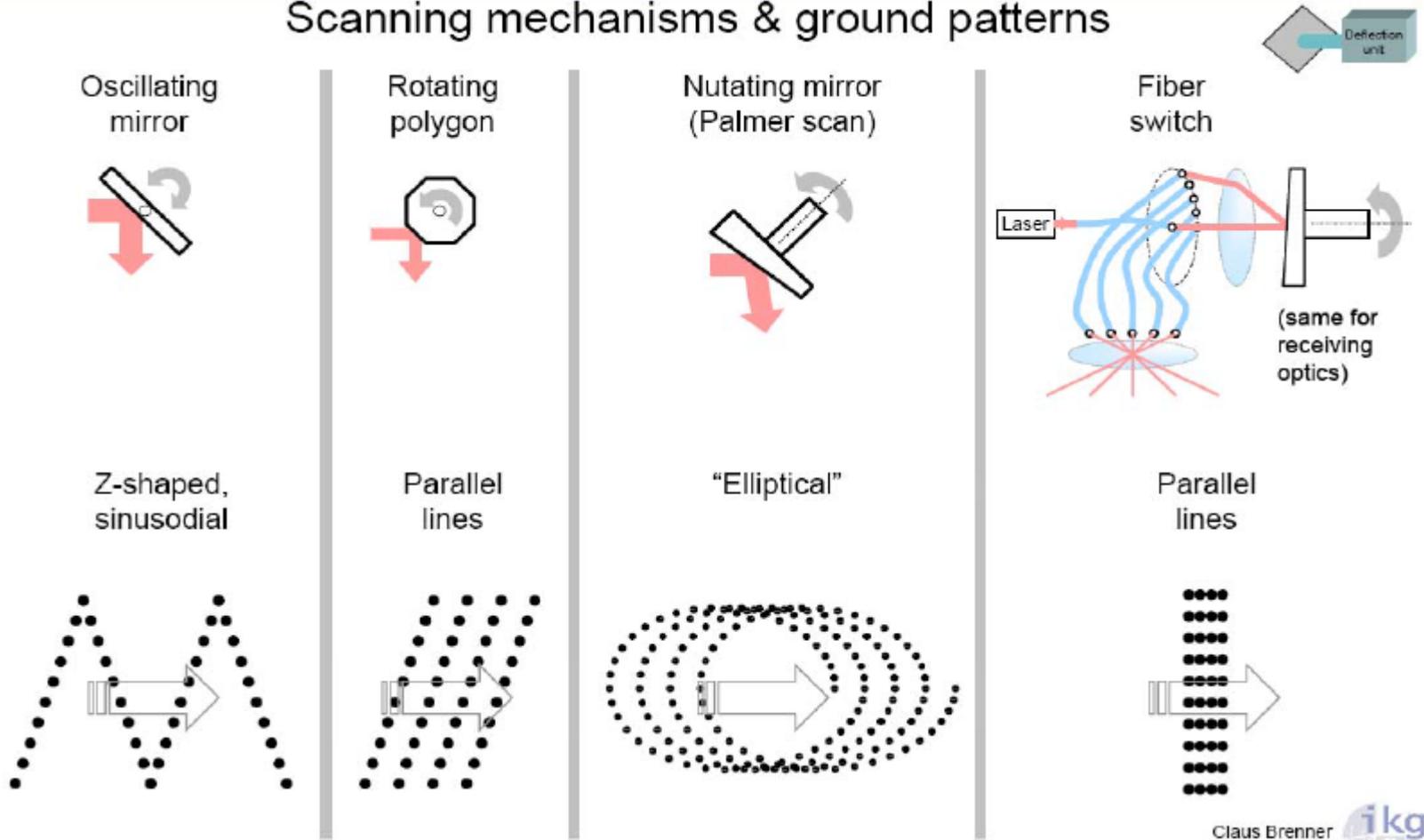
○ resultado é um padrão linear no terreno.



Terreno plano (ideal)

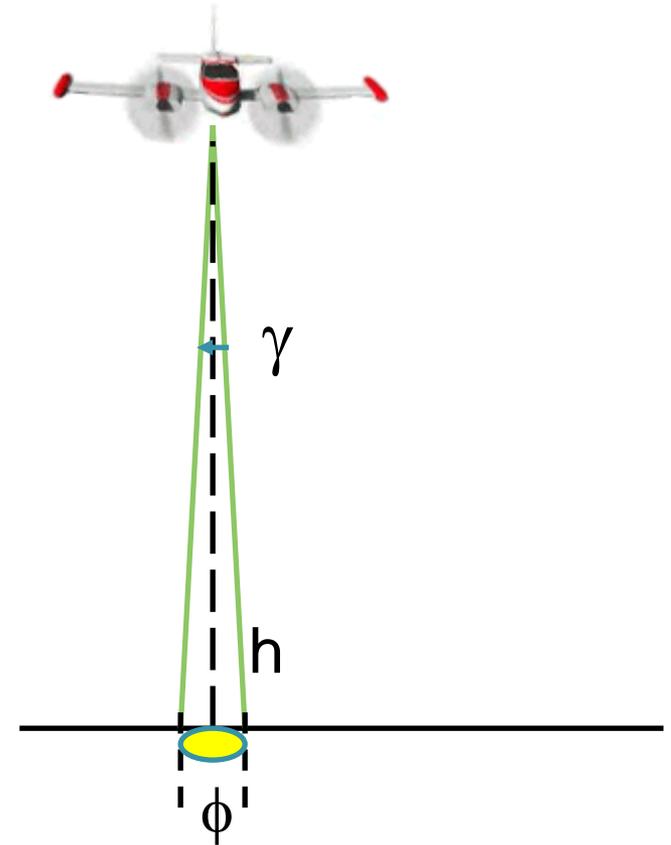
Mecanismos de varredura

Scanning mechanisms & ground patterns



Diâmetro do pulso (Footprint)

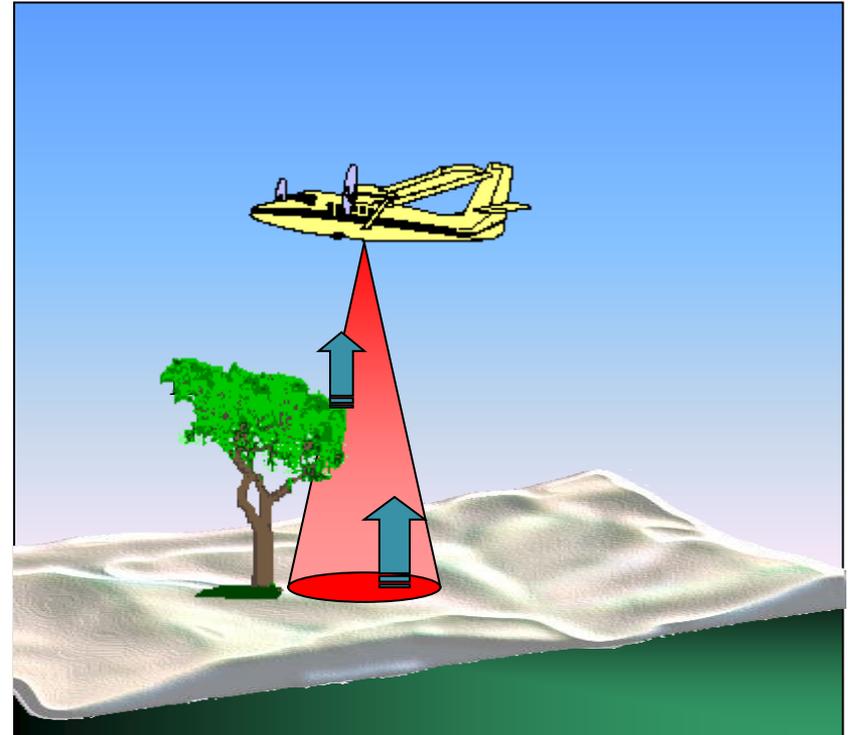
- O diâmetro da região coberta pelo pulso na superfície do terreno (ϕ) pode ser calculado em função da:
 - altura de vôo (H),
 - o ângulo de divergência (γ) e
 - a largura da abertura do sistema (D).
- Quando a abertura é muito menor em relação à altura de vôo, ela pode ser desprezada, sendo considerada uma fonte pontual.



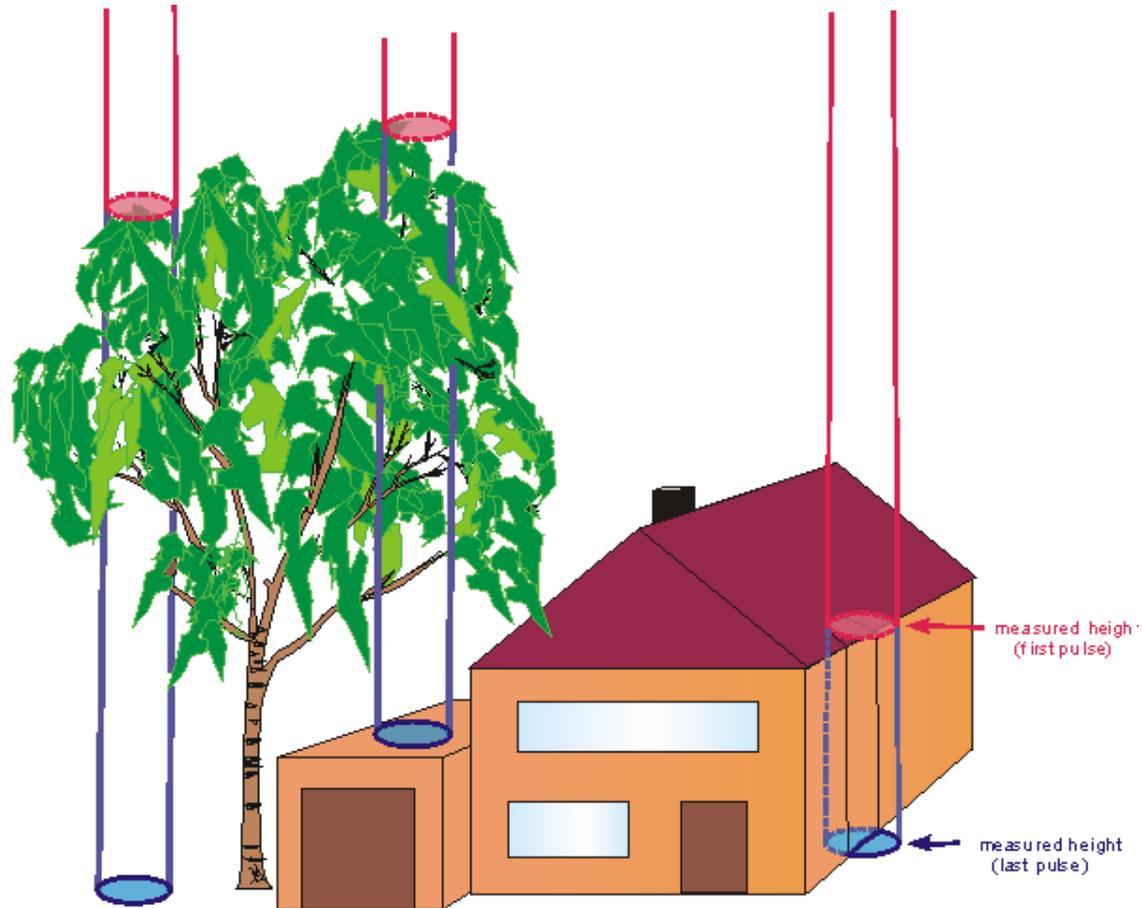
A projeção do feixe na superfície é chamada de footprint.

Primeiro / Último pulsos

- Quando o feixe incide em superfícies que permitem a passagem de parte do feixe, ou cantos de objetos, como edificações, o reflexo captado pode ser múltiplo.
- Em geral, capta-se o primeiro e o último pulso refletido, pois a partir deles pode-se obter informação do topo do objeto e do solo ou sua base.

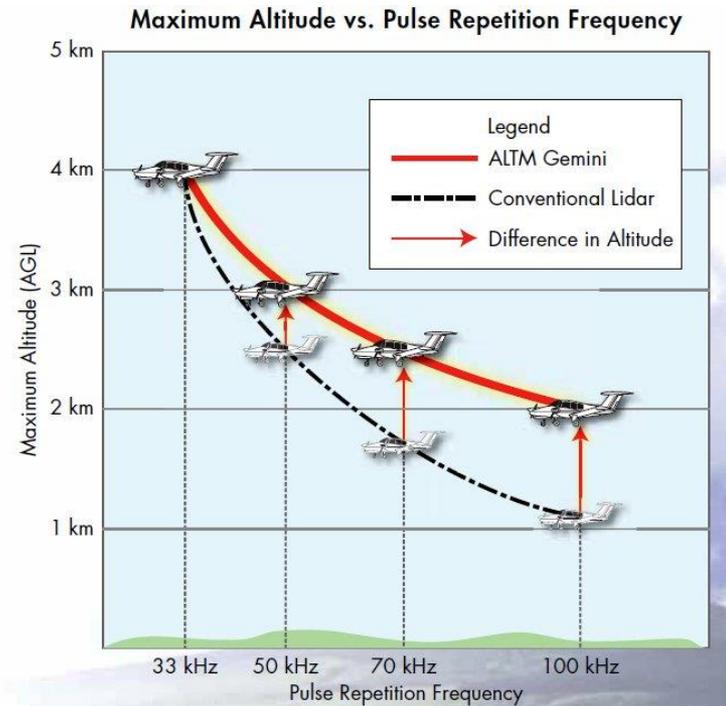


Exemplo de múltiplos retornos



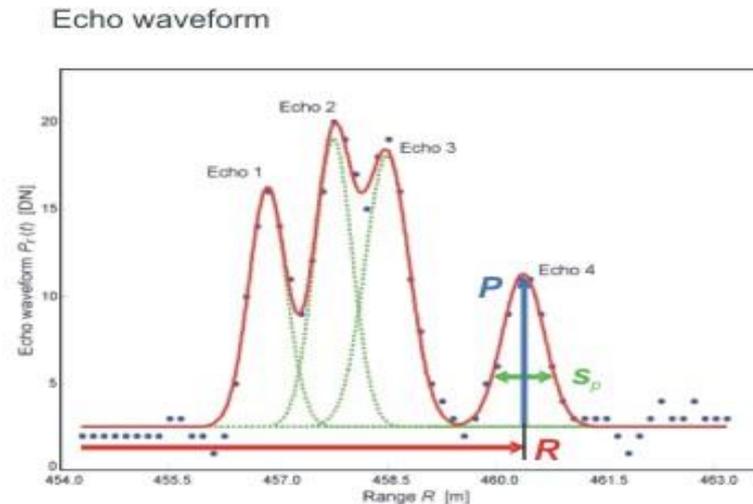
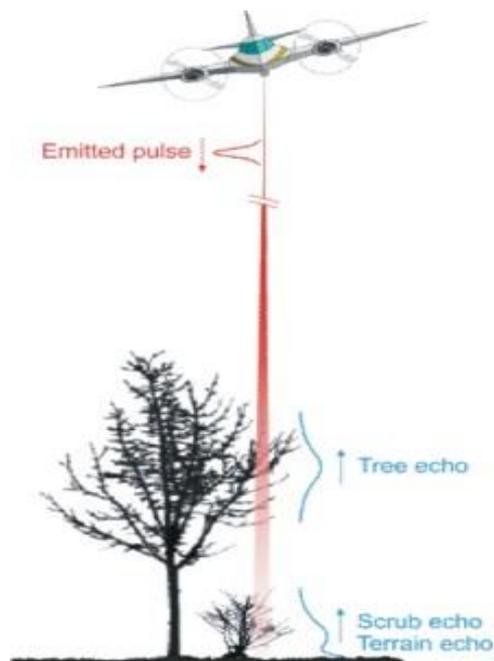
Multi-pulse

Os novos sistemas podem operar em modo multipulso (ex: Gemini Optech). Neste caso, o sistema continua disparando pulsos mesmo quando o primeiro ainda está em voo para o receptor. Isto permite ainda elevar a altura de coleta de dados. Porém é necessário aumentar a potência da emissão do laser. Outra vantagem é a possibilidade de obter um levantamento mais denso (mais pulsos).



Full wave

Full wave - Novos sistemas fornecem um perfil dos objetos encontrados ao longo de sua trajetória medindo vários retornos.



Information per echo:

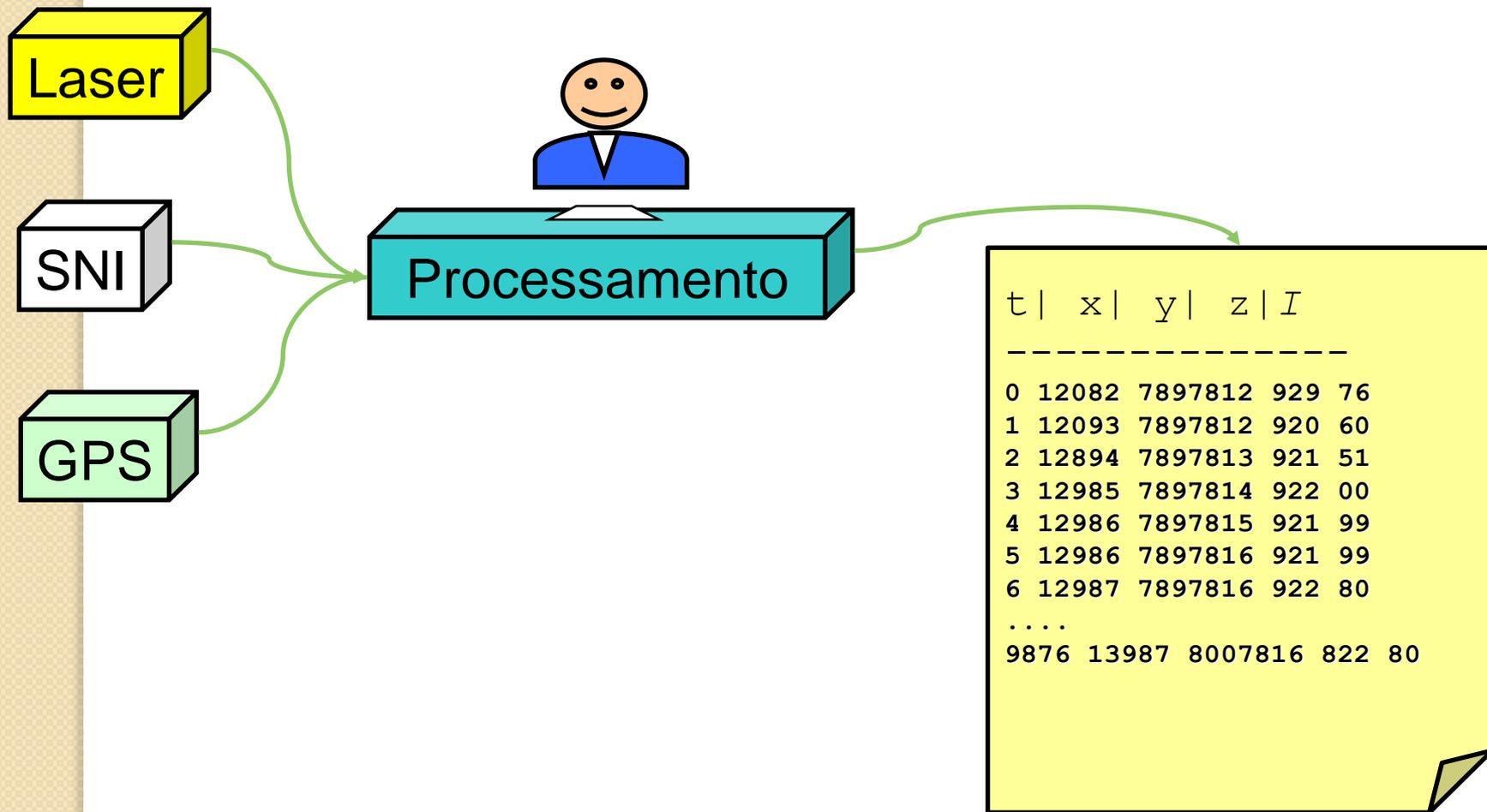
Amplitude (Intensity): P [DN]

Range: R [m]

Echo width: s_p [ns]

• <http://www.ipf.tuwien.ac.at/opals/html/ModuleFullwave.html>

Pós-Processamento



Características do sistema ALTM 1025



sistema:	pulso
ângulo de varredura (°):	0 - 40
Largura da faixa (m):	0 - 0.7*h
footprint (m):	0.3 (h:1000 m)
velocidade de vôo(km/h):	150
área varrida (km ² /h)	1.5 - 14.5
acurácia em distância (cm):	20
acurácia em posição (m):	< 0.5 (h:500m)
dimensões (cm):	30x35x40
peso (kg)	23

ALTM (OPTECH)

- ALTM Airborne Laser Terrain Mapper



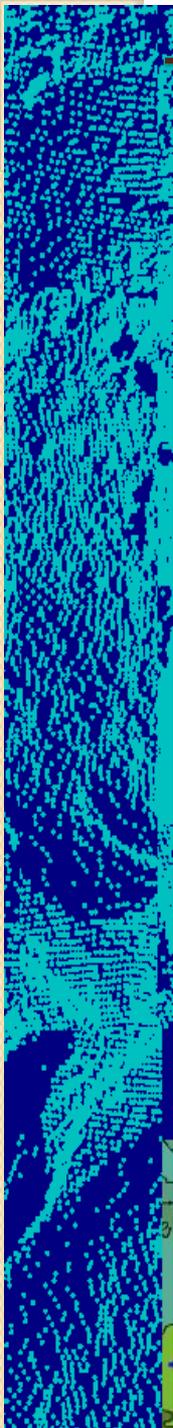
ALTM 3100

- Operating altitude 80 - 3,500 m nominal
- Horizontal accuracy $1/2,000 \times$ altitude; 1 sigma
- Elevation accuracy <15 cm at 1.2 km; 1 sigma
- <25 cm at 2.0 km; 1 sigma
- <35 cm at 3.0 km; 1 sigma
- Range resolution 1 cm
- Range capture Up to 4 range measurements for each pulse
- Intensity capture 12 bit dynamic range
- Scan frequency Variable; maximum 70 Hz
- Scan angle Variable from 0 to $\pm 25^\circ$, in increments of $\pm 1^\circ$
- Swath width Variable from 0 to $0.93 \times$ altitude m
- Spot distribution Sawtooth, uniform across 96% of scan
- Laser repetition rate 33 kHz (max. altitude (AGL) 3.5 km)
- 50 kHz (max. altitude (AGL) 2.5 km)
- 70 kHz (max. altitude (AGL) 1.7 km)
- 100 kHz (max. altitude (AGL) 1.1 km)
- Beam divergence Dual divergence 0.3 mrad (1/e) or 0.8 mrad (1/e)
-

OPTECH – Pegasus ALTM



Parameter	Specification
Laser wavelength	1064 nm
Horizontal accuracy	1/5,500 x altitude, 1 σ
Elevation accuracy	<5-20 cm, 1 σ
Effective laser repetition rate Programmable,	100-500 kHz
Scan width (FOV) Programmable,	0-75°
Scan frequency (5) Programmable,	0-140 Hz (effective)
Beam divergence	0.25 mrad (1/e)
Range capture return	Up to 4 range, including 1,2,3,4
Full waveform capture Waveform Digitizer (optional)	12-bit Optech IWD-2 Intelligent



Toposys: **FALCON III**

- Beam deflection: Fixed, fiber based
- Field of view: 28 degrees fixed
- Measurement rate: 50 kHz - 125 kHz
- Operating altitude: 30 m - 2,500 m
- Beam divergence: 0.7 mrad
- Range capture: Up to nine per pulse
Full waveform digitization as opt.
- Intensity capture: 12 bit dynamic range
- Scan frequency: 165 Hz - 415 Hz
- Eye save: > 0.27 m
- Swath width: 46 % of op. Altitude
- Range resolution: 0.010 m
- Vertical accuracy: < 0.10 m (absolute)
- Horizontal accuracy: < 0.20 m (absolute)

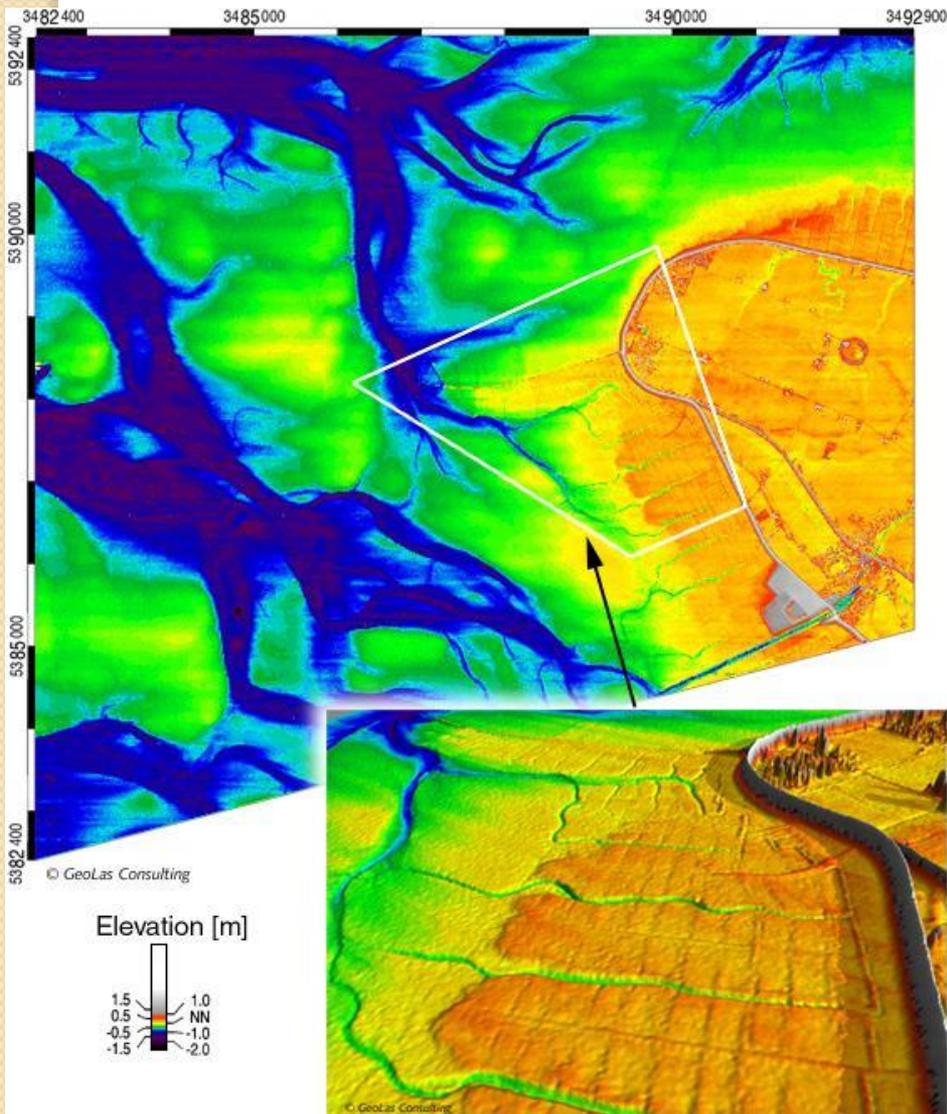
SHOALS (OPTECH)

- Optech's **SHOALS Airborne Laser Bathymeters**



SHOALS

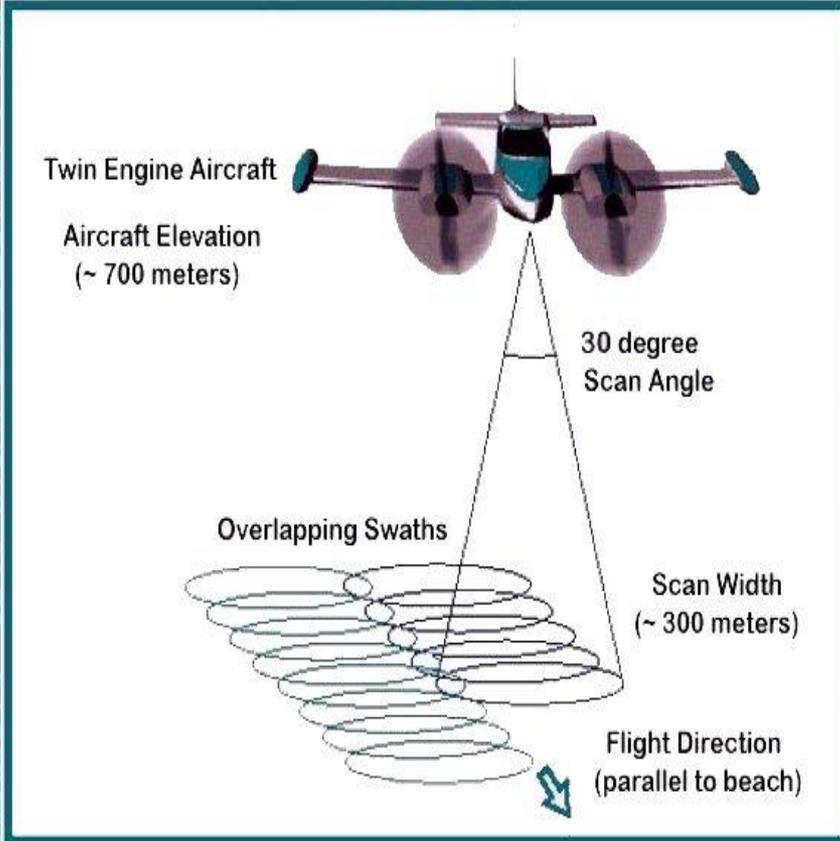
	SHOALS-1000	SHOALS-3000	
•			
•	SHOALS-1000		
•	Hydrographic mode		
•	Measurement rate	3,000 Hz	1,000 Hz
•	Operating altitude	300-400 m	200-400 m
•	(for maximum depth)		
•	Depth measurement accuracy (25 cm, 1 σ)		
•		IHO Order 1	IHO Order 1
•	Horizontal accuracy (25 cm, 1 σ)		
•		IHO Order 1	IHO Order 1
•	Minimum depth	0.2 m	0.2 m
•	Maximum depth	50 m	50 m
•	Swath width (Variable)	up to 0.75 x altitude	up to 0.58 x H
•	Typical swath width	300 m (@ 4x4 m)	215 m (@ 4x4 m)
•	Typical aircraft speed	125 - 260 knots	125 - 260 knots
•	Eyesafe altitude	150 m	150 m



Ex: Monitoramento e documentação de erosão na costa.

Sistema SHOALS consegue penetração na água rasa.

ScaLars - Características



sistema: onda contínua CW

ângulo de varredura (°): 27.2 and 38

Largura da faixa (m): $0.48 - 0.69 \cdot h$

footprint (m): 1.4 (h: 700 m)

velocidade de vôo (km/h): 270

área varrida (km²/h): 80

acurácia em distância (cm): 10

acurácia em posição (m): 1 (h:700m)

dimensões (cm): 50x50x85

Peso (kg): 56

Toposys - Características

sistema: pulso

ângulo de varredura (°): 14

Largura da faixa (m): $0.25 \cdot h$

footprint (m): 0.3 (h:600 m)

velocidade de vôo (km/h): 250

área varrida (km²/h): 3 - 20

acurácia em distância (cm): 1

acurácia em posição (m): $< 0.5 \text{‰} \cdot h$

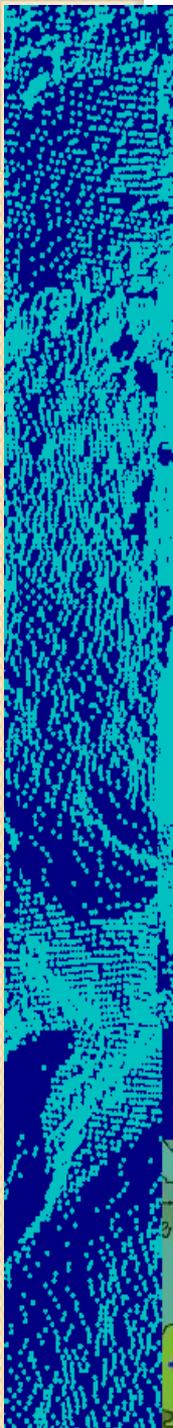
dimensões (cm): 47x53x53

Peso (kg): 28



Resumo dos sensores mais típicos

diâmetro do footprint:	0.3 - 1.4 m
largura da faixa:	0.25*h - 1.5*h
distância ao longo do da linha de vôo:	0.06 - 10 m
distância no sentido perpendicular à linha de vôo:	0.1 - 10 m
Frequência dos pulsos:	5 - 83 kHz
Frequência da varredura:	20 - 630 Hz
Acurácia em posição:	± 0.1 - 3.0 m
Acurácia em altitude:	± 10 - 60 cm



PROCESSAMENTO DE NUVEM DE
PONTOS 3D CGEO- 7028

**Sensoriamento Remoto por LIDAR
(LIDAR Remote Sensing)**

Variáveis e planejamento de voo

UFPR – Departamento de Geomática
Prof. Jorge Centeno
2016
copyright@ centenet

Parâmetros Configuráveis / Calculados

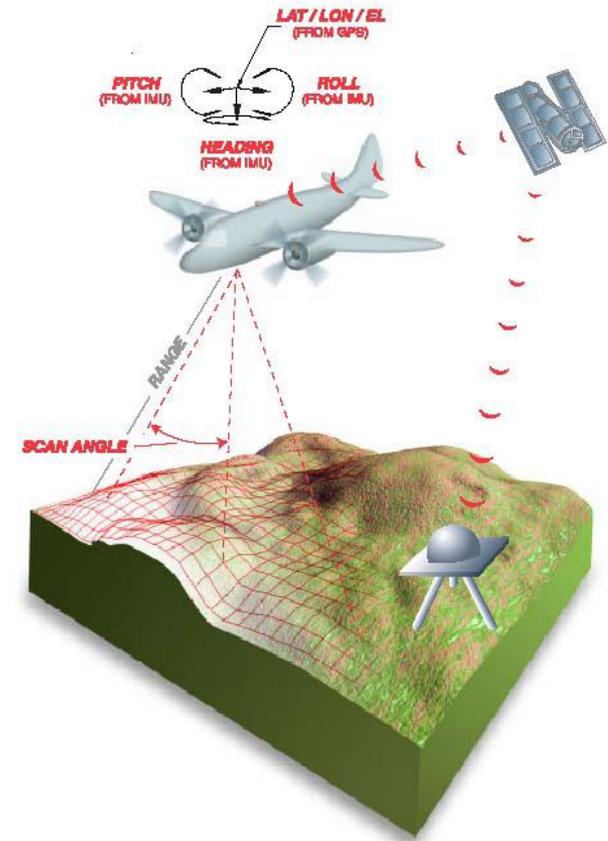
- Freqüência de varredura (r)
- Ângulo de varredura (θ)
- Altura de vôo (h)
- Velocidade da aeronave (v)
- Taxa de amostragem (f)

Largura da faixa:

Pontos por linha:

Distância entre pontos ao longo da varredura

Distância entre linhas de varredura

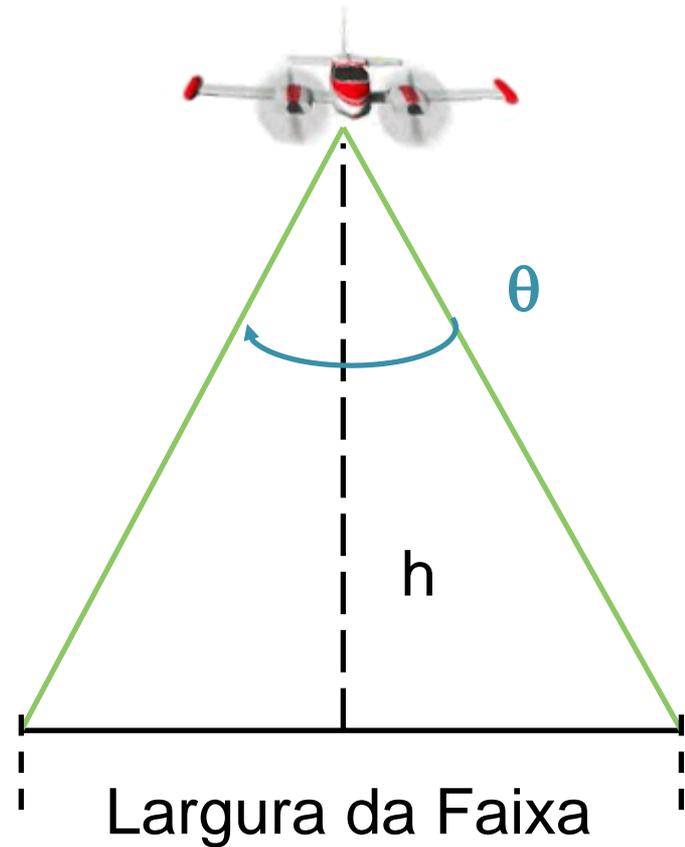


Parâmetros Configuráveis / Calculados

Largura da faixa:

$$L = 2 * h * tg(\theta / 2)$$

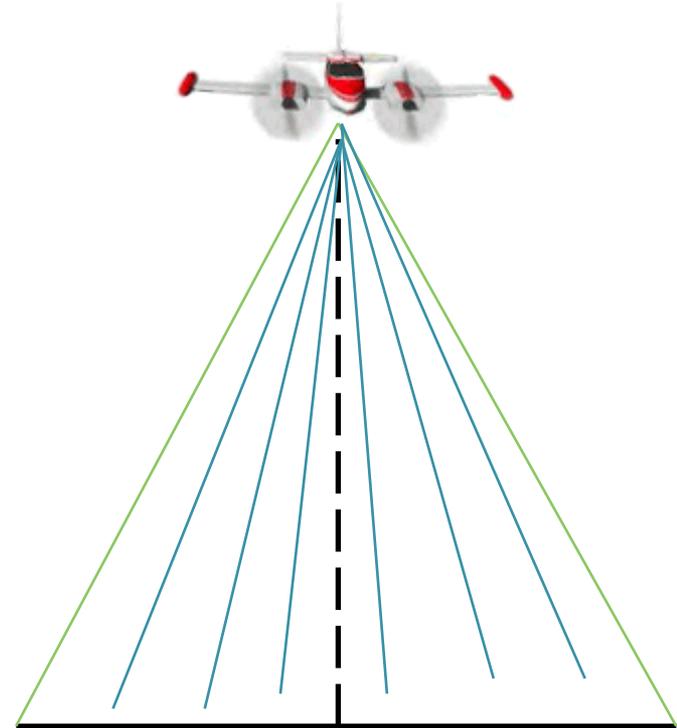
- Ângulo de varredura (θ)
- Altura de vôo (h)



Parâmetros Configuráveis / Calculados

Pontos por linha (N):

$$N = \frac{f}{2 * r}$$



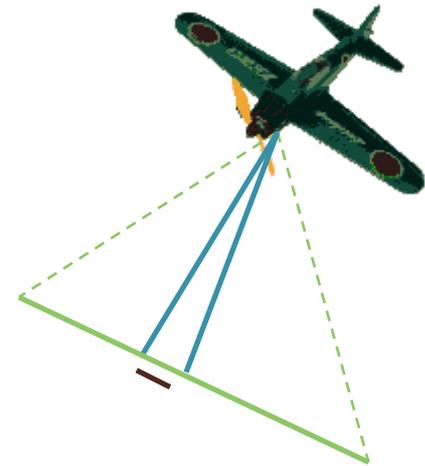
- f: Taxa de amostragem (kHz). Taxa ou frequência de repetição do pulso (f).
- r: Frequência de varredura (*scan rate*), em Hz. Número de linhas varridas por segundo.

Distância entre pontos

ao longo de uma linha varrida (perpendicular à linha de vôo):

$$Dp = L/N$$

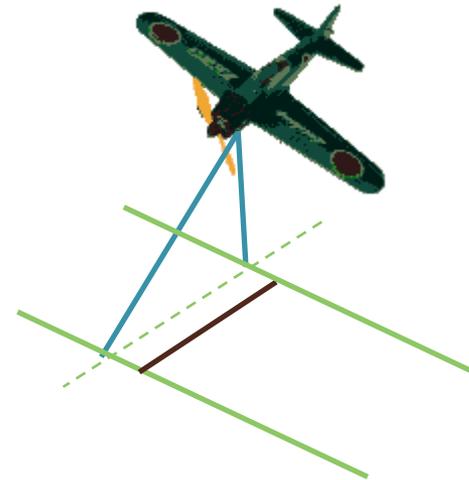
L: Largura da faixa
N: Pontos por linha.



Distância entre pontos ao longo da linha e vôo:

$$Dl = \frac{v}{f}$$

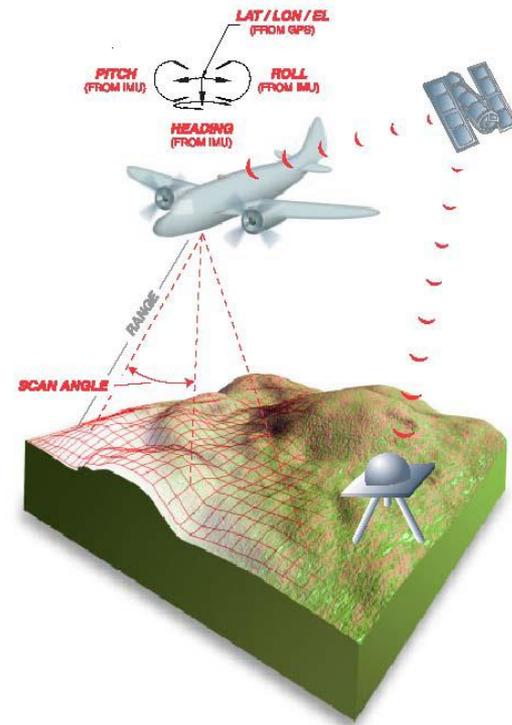
v : velocidade da aeronave
 f : Taxa de amostragem



Distância entre pontos

Distância entre pontos no terreno:

$$d = \sqrt{Dl^2 + Dp^2}$$



$$d = \sqrt{\frac{v^2}{f^2} + \frac{(4 * h * r * \text{tg}(\theta / 2))^2}{f^2}} = \frac{\sqrt{v^2 + (4 * h * r * \text{tg}(\theta / 2))^2}}{f}$$