

# **Sensoriamento Remoto II**

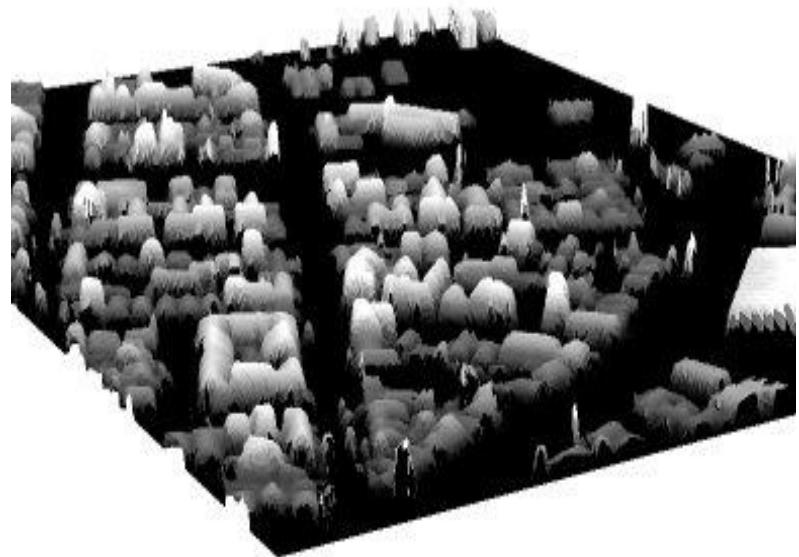
**Sensoriamento Remoto por LIDAR  
(LIDAR Remote Sensing)**

**Sistemas aerotransportados**

UFPR – Departamento de Geomática  
Prof. Jorge Centeno  
2016  
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).**



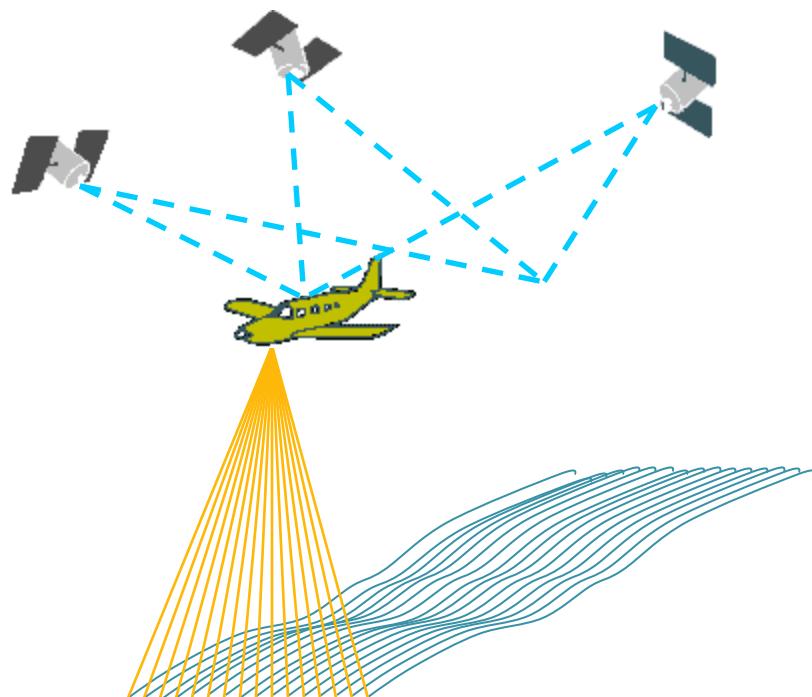
**A posição e atitude (ângulos) do sistema são variáveis e dependem das condições do voo.**

# 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.

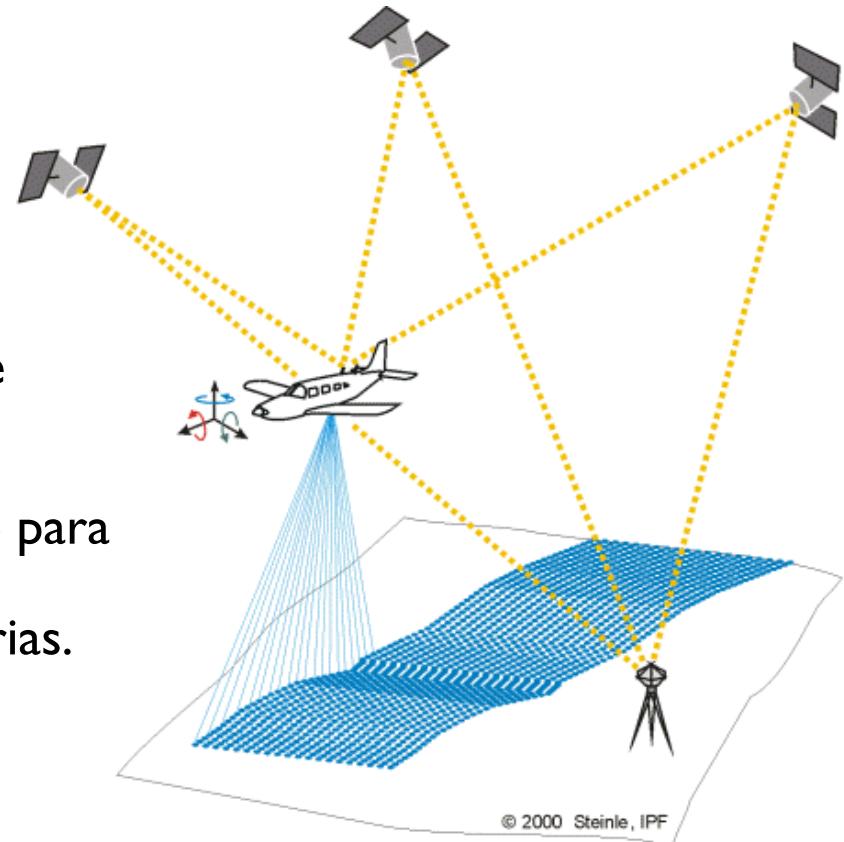
Neste caso, a posição do avião é determinada a partir de sinais recebidos de satélites artificiais.

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

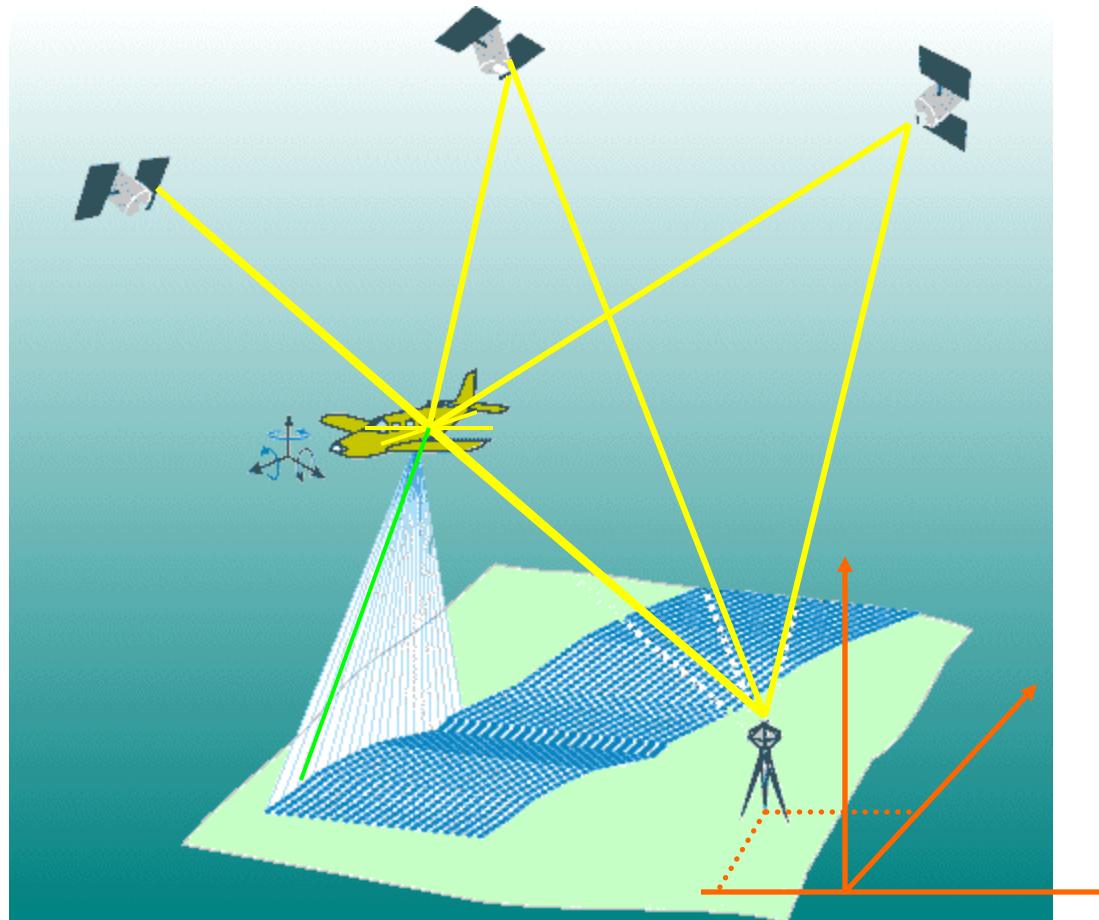


# GPS diferencial

- 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

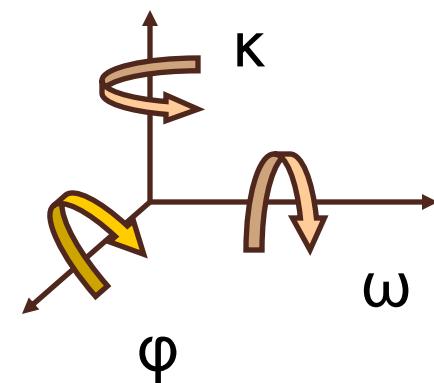
- A aeronave experimenta inclinações durante o voo, por exemplo por efeito do vento.



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

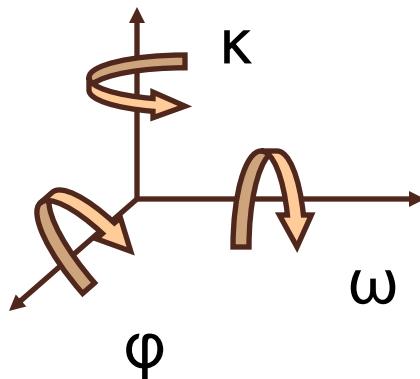
Atitude: inclinação nos três eixos.

O que é determinado usando uma unidade inercial



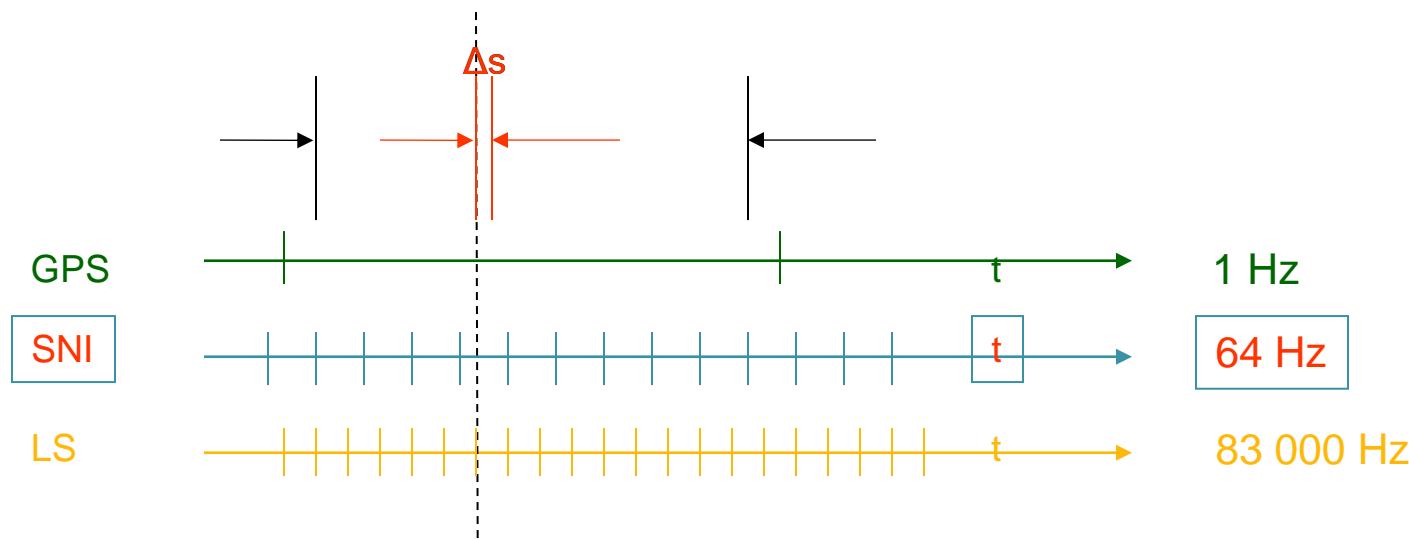
# **INS = Inertial Navigation System**

- 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.



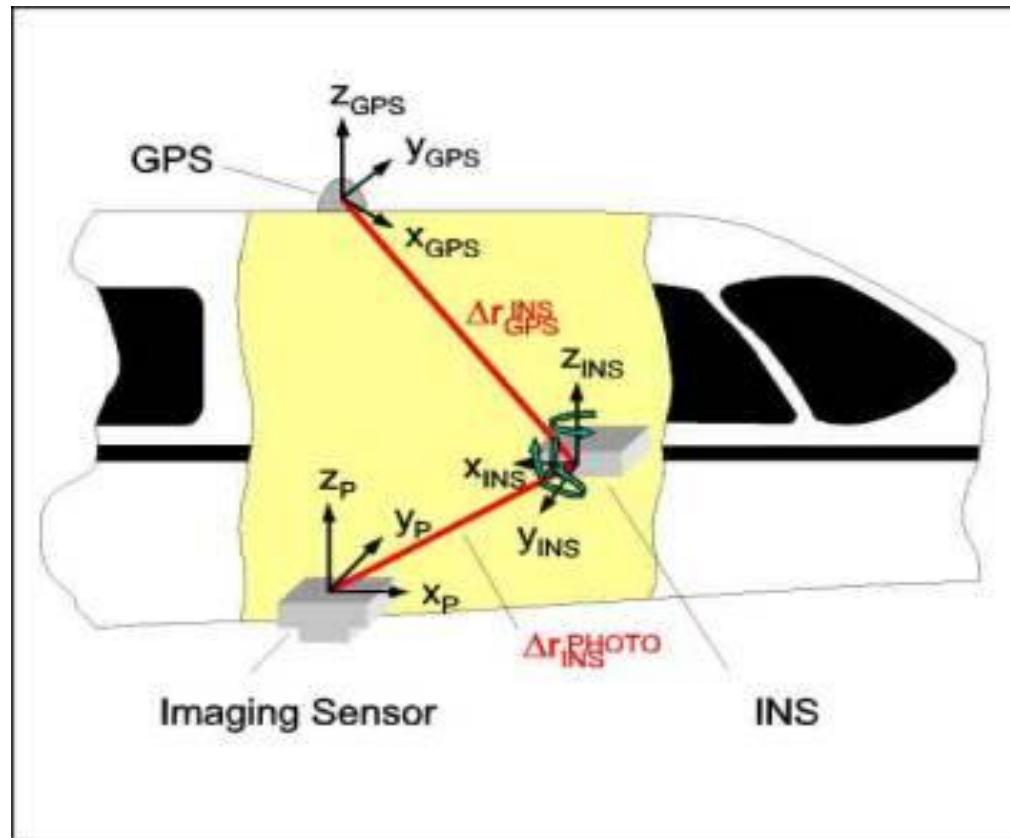
Exemplo do sistema Toposys

⇒ resulta em uma freqüência 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

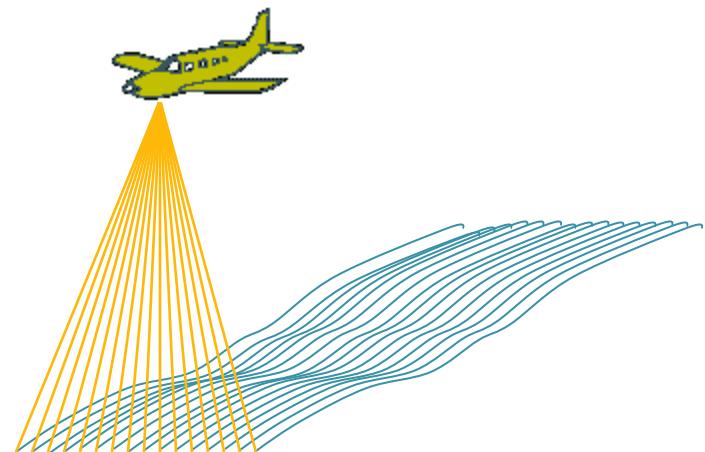
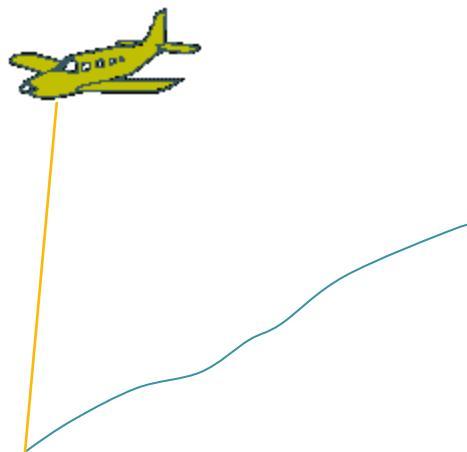
$M_{alinhamento}$  : rotação entre IMU-laser

$M_{scanner}$  : ângulos de emissão do laser

$R$ : distância

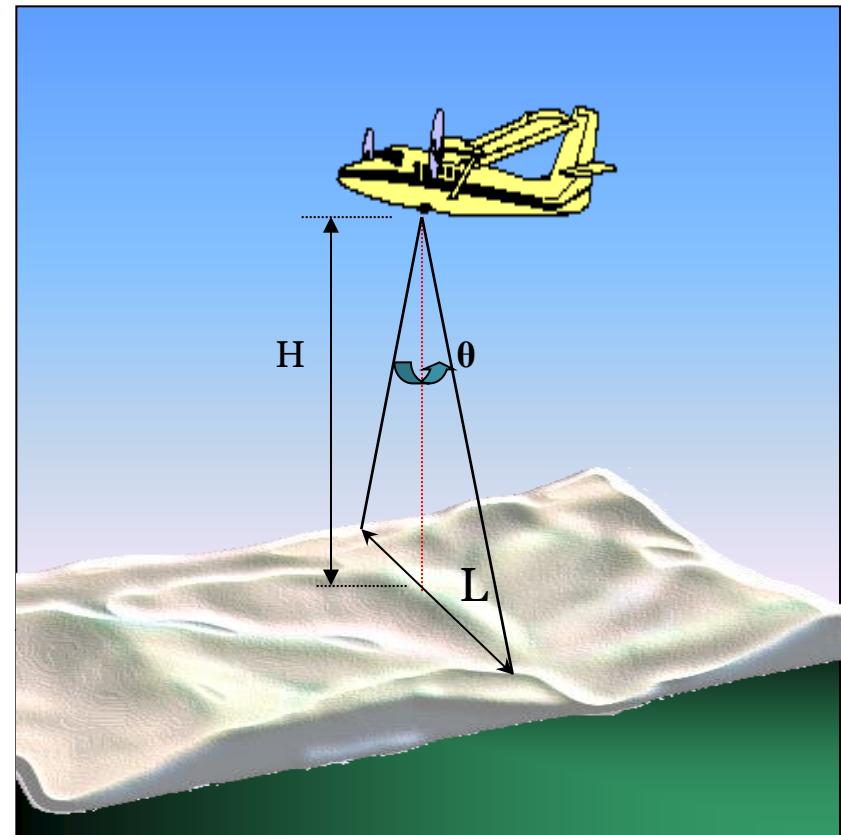
# Mecanismos de varredura

- 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.

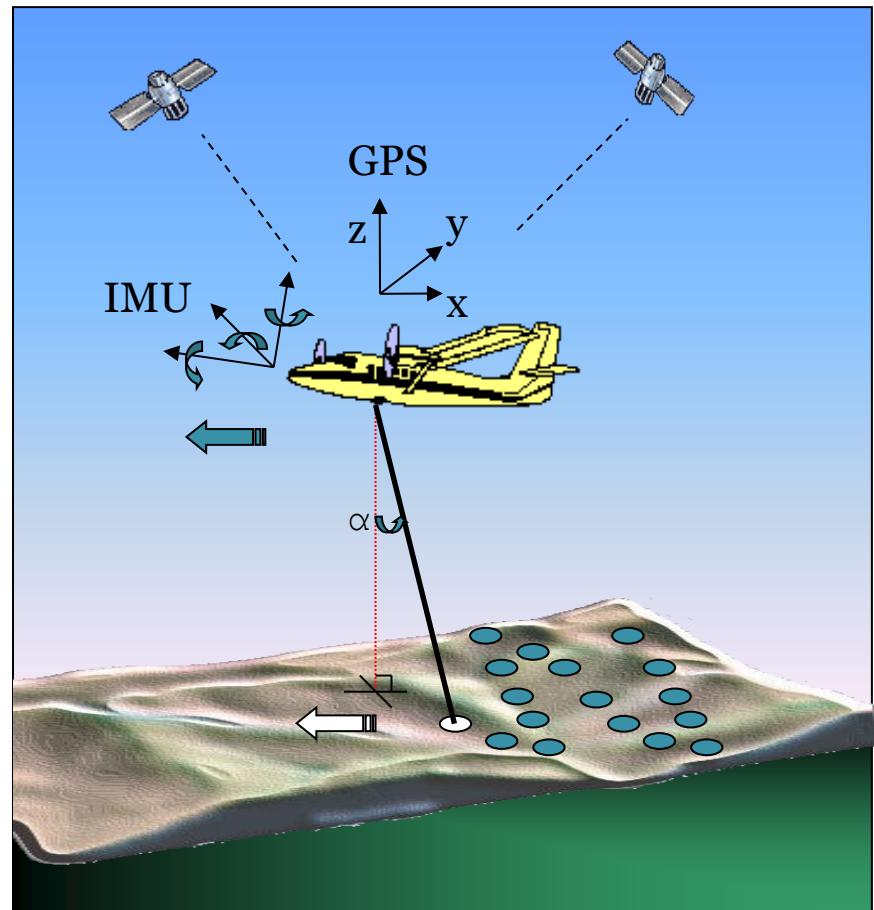
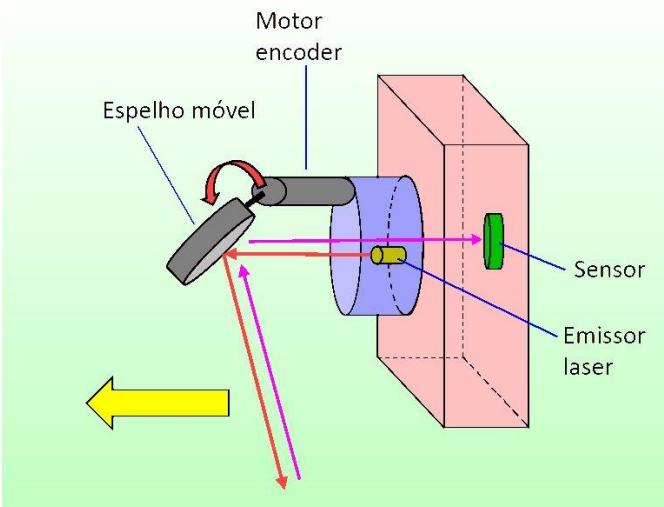


# Largura da faixa varrida

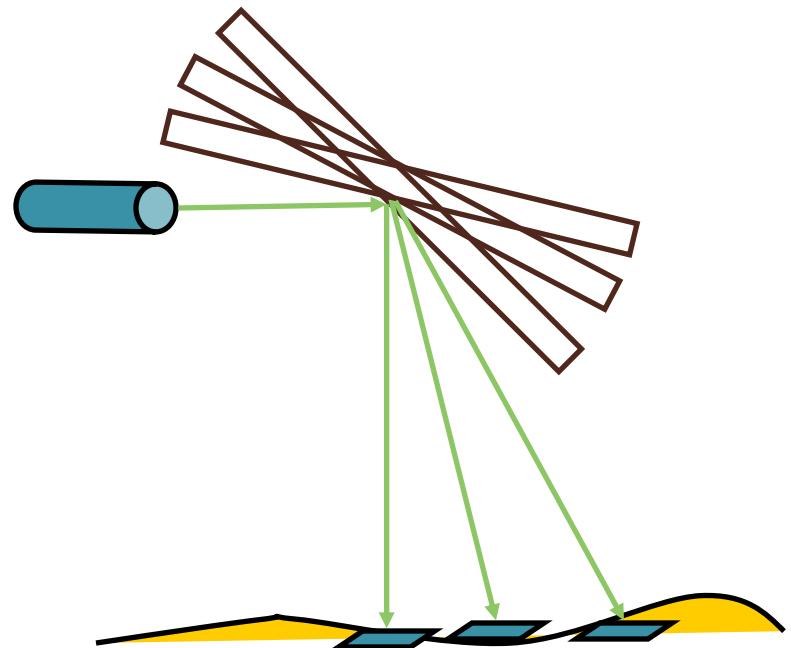
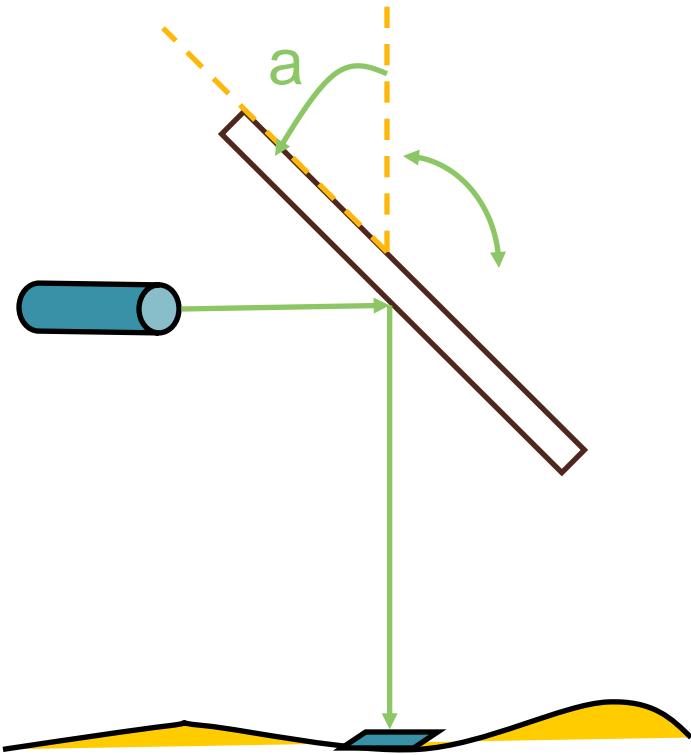
- O feixe é apontado na direção perpendicular à linha de vôo até um ângulo máximo,  $\theta_{\text{máx}}$  na figura.
- Combinando este ângulo com a altura de vôo ( $H$ ), a faixa varrida no terreno é definida.
- $$L = 2 * H \tan(0,5 * \theta_{\text{máx}})$$



Devido ao deslocamento do avião e ao movimento oscilante do espelho, um padrão produzido no terreno é de zig-zag.



## Opções: espelho oscilante

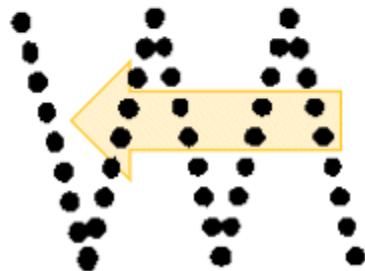


□ direciona o feixe na direção perpendicular à linha de vôo.

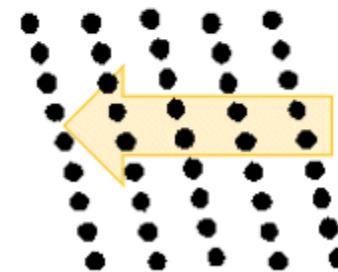
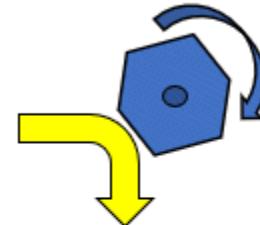
Nach [Lohr & Wehr, 1999]

# Sistemas de varredura diferentes

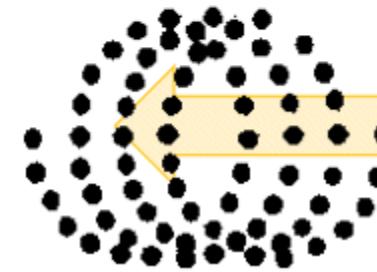
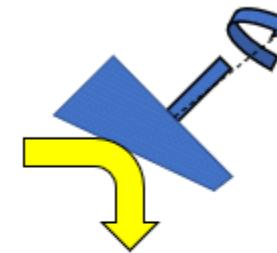
Espelho oscilante



Polígono rotatório

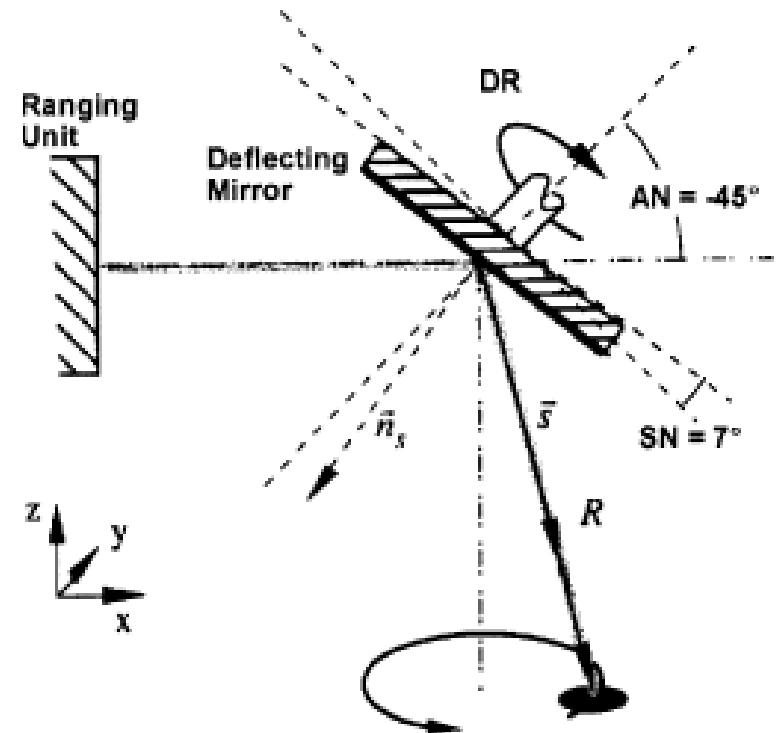


Palmer



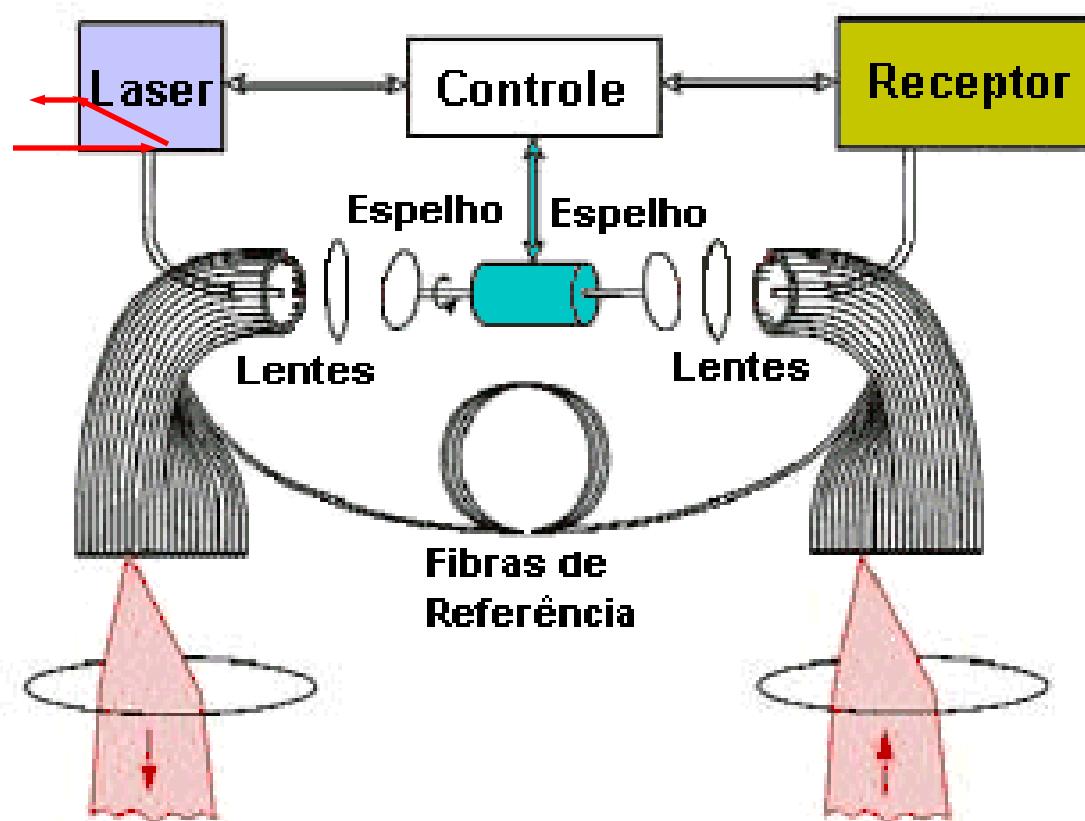
## Opção: Espelho rotatório (ex. ScaLars)

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



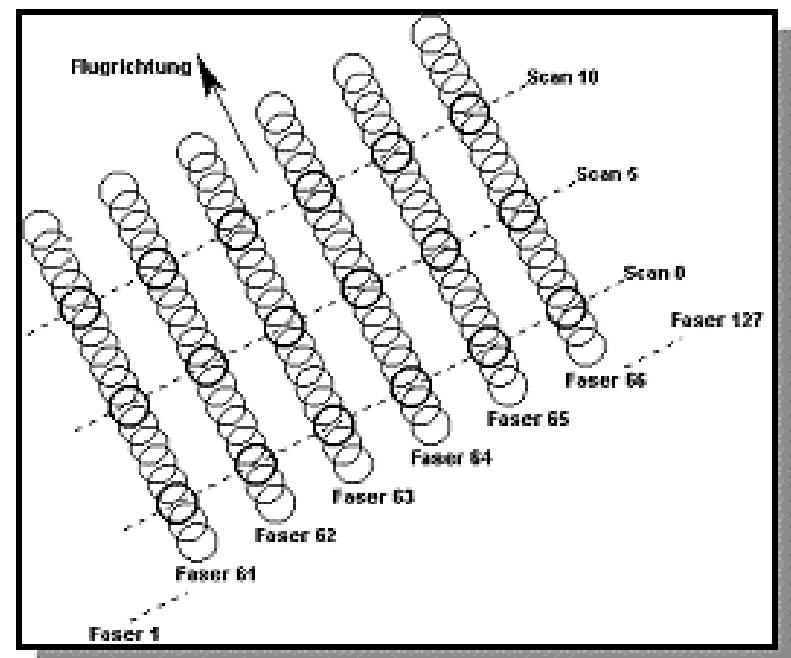
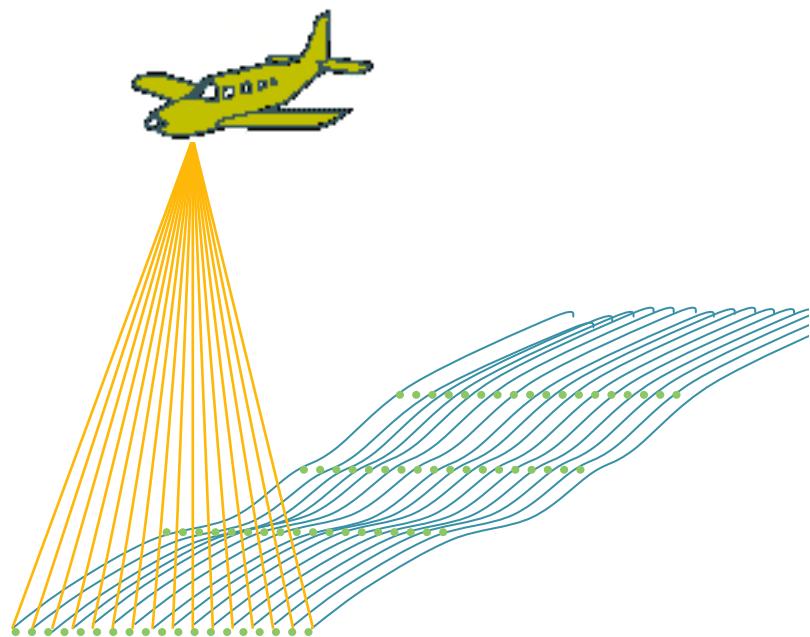
## sistema de fibras ópticas (TopoSys)

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



# sistema de fibras ópticas (TopoSys)

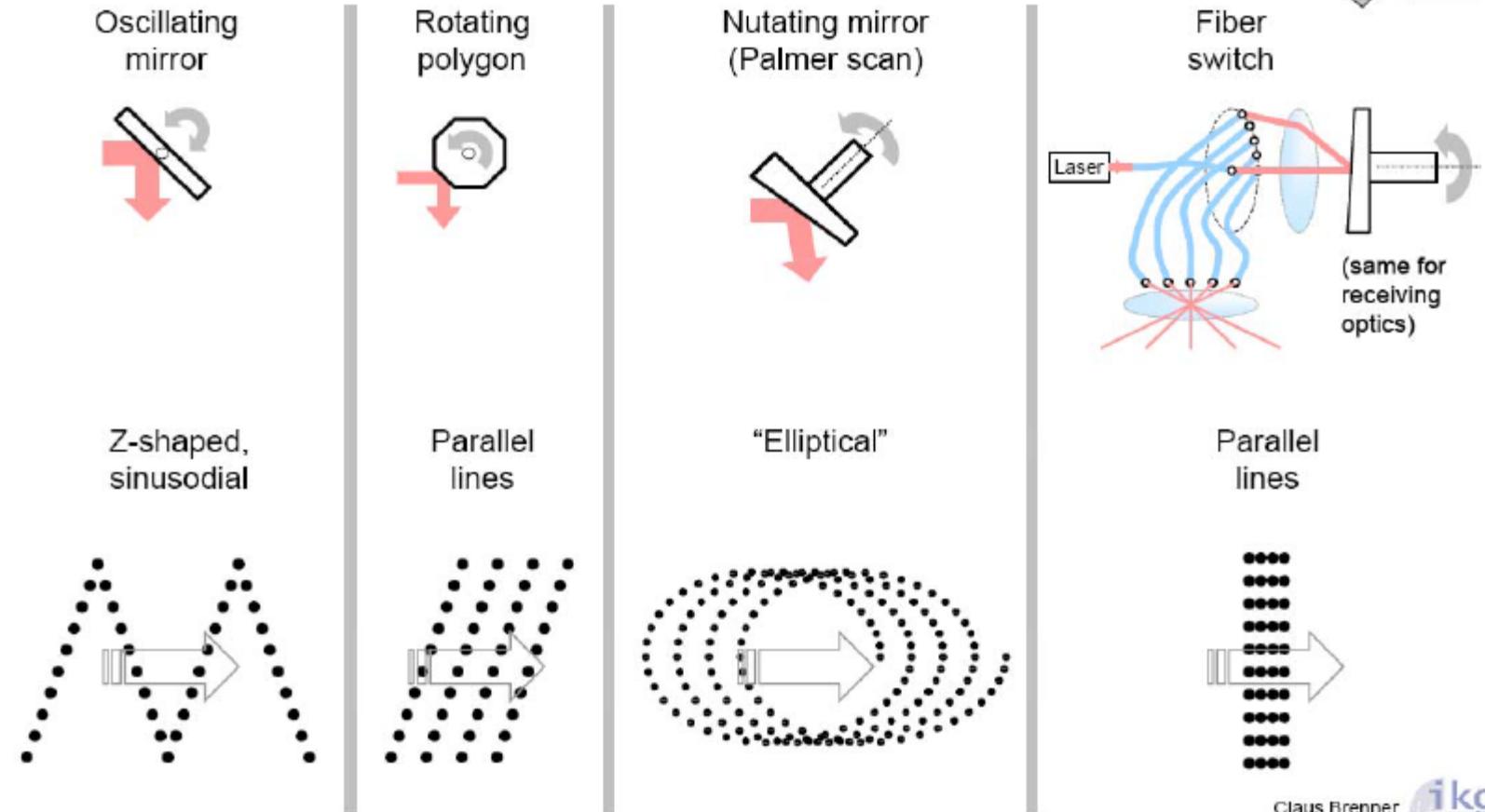
O resultado é um padrão linear no terreno.



Terreno plano (ideal)

# Mecanismos de varredura

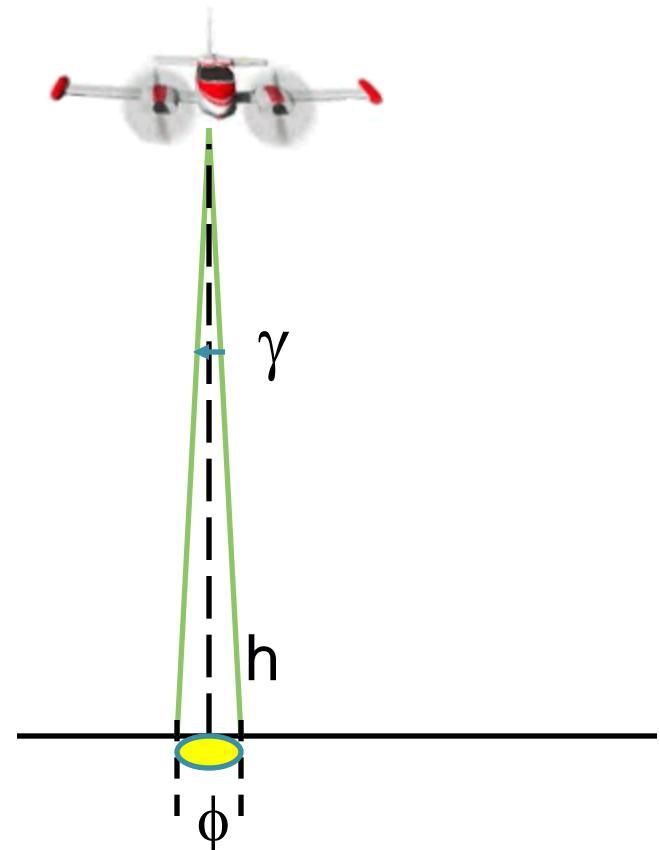
Scanning mechanisms & ground patterns



Claus Brenner

# Diâmetro do pulso (Footprint)

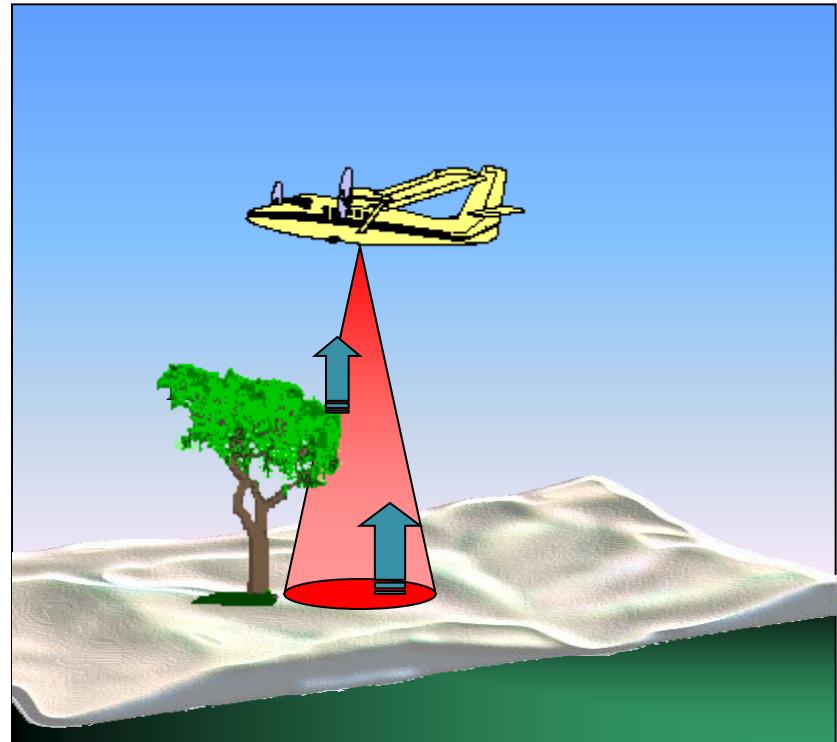
- O diâmetro da região coberta pelo pulso na superfície do terreno ( $\phi$ ) pode ser calculado em função da:
  - altura de vôo ( $H$ ),
  - o ângulo de divergência ( $\gamma$ ) e
  - a largura da abertura do sistema ( $D$ ).
- Quando a abertura é muito menor em relação à altura de vôo, ela pode ser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



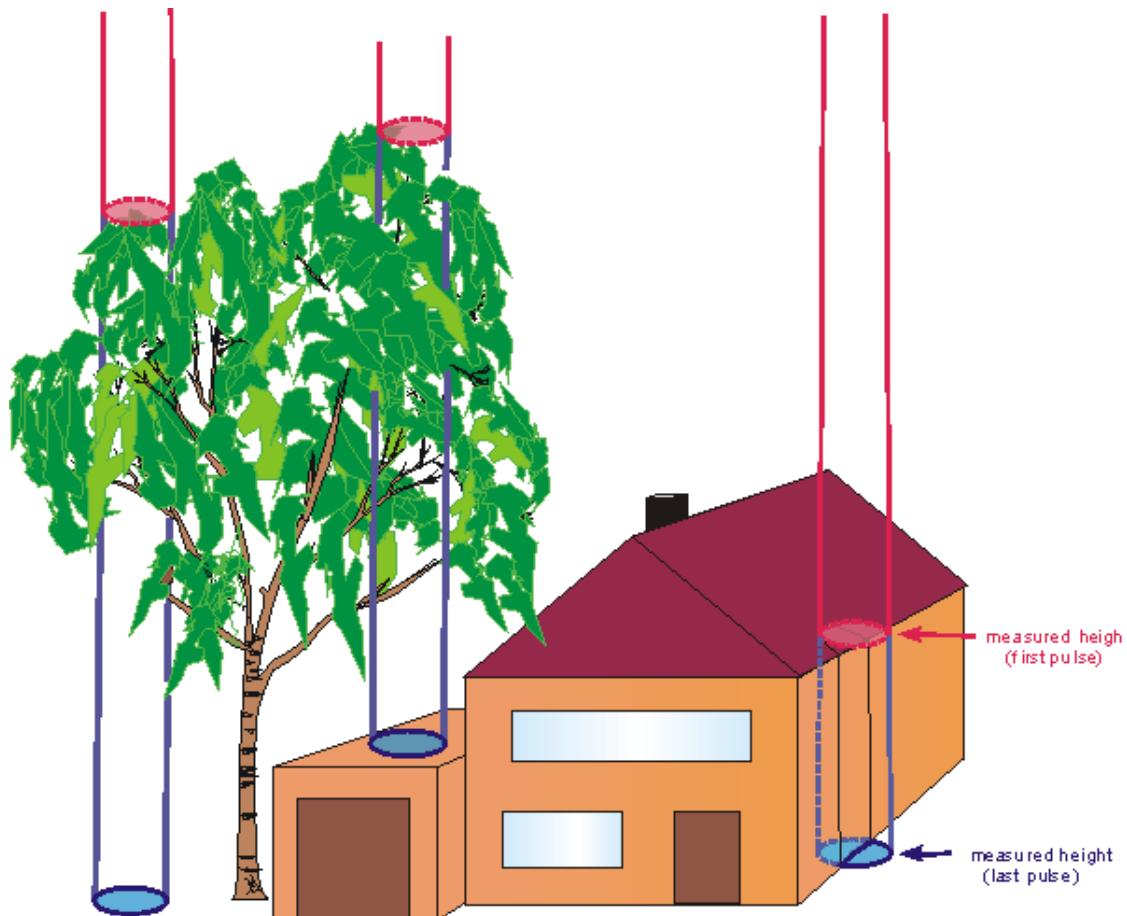
A projeção do feixe na superfície é chamada de footprint.

# 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

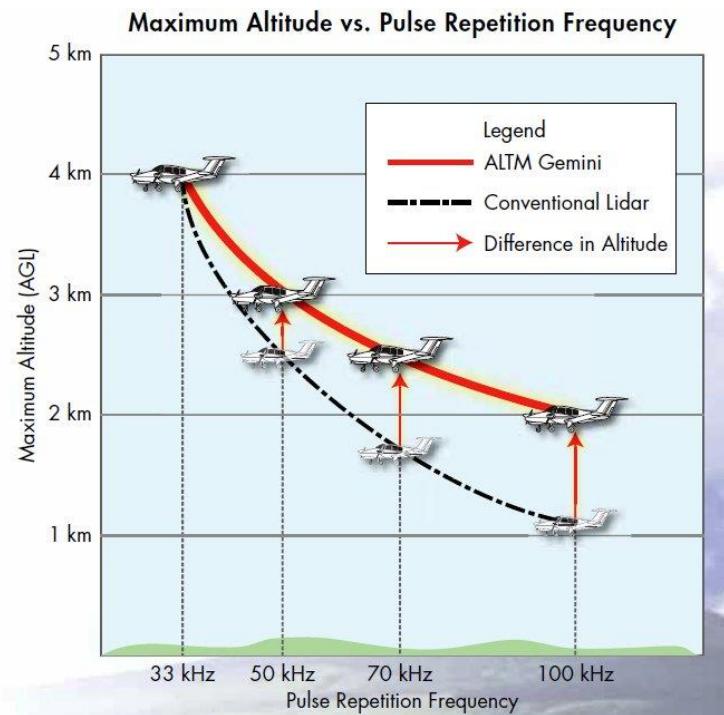


# Multi-pulse

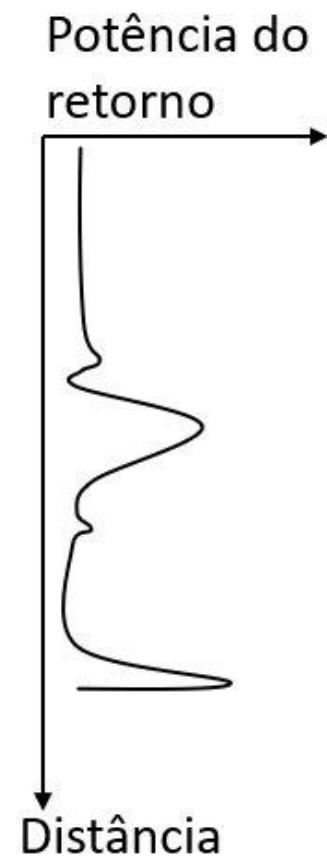
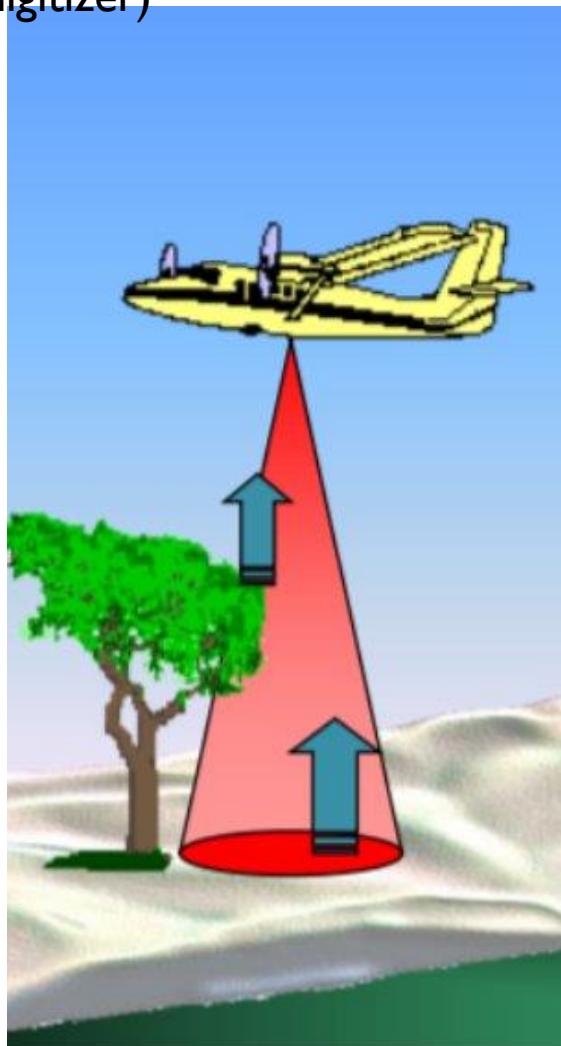
Os novos sistemas podem operar em modo multipulso (ex: Gemini Optech). Neste caso, o sistema continua disparando pulsos mesmo quando o primeiro ainda está em vôo para o receptor.

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).



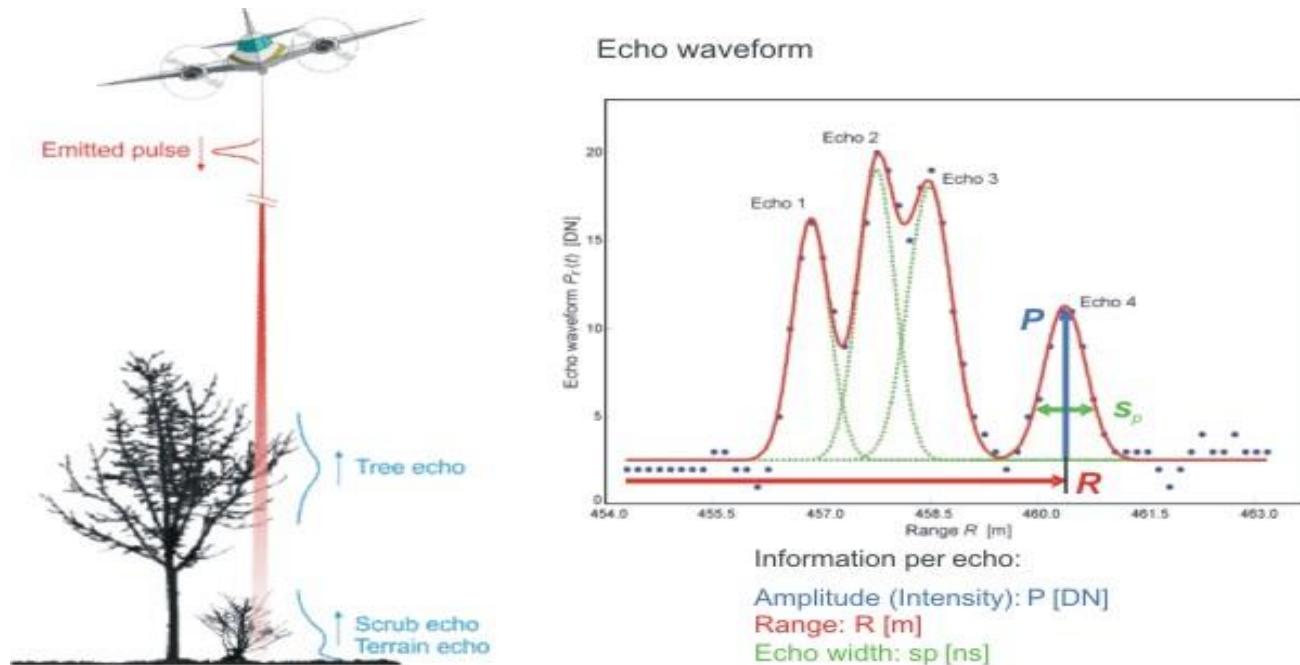
Full wave - Novos sistemas fornecem um perfil dos objetos encontrados ao longo de sua trajetória medindo vários retornos. (digitizer)



# Full wave

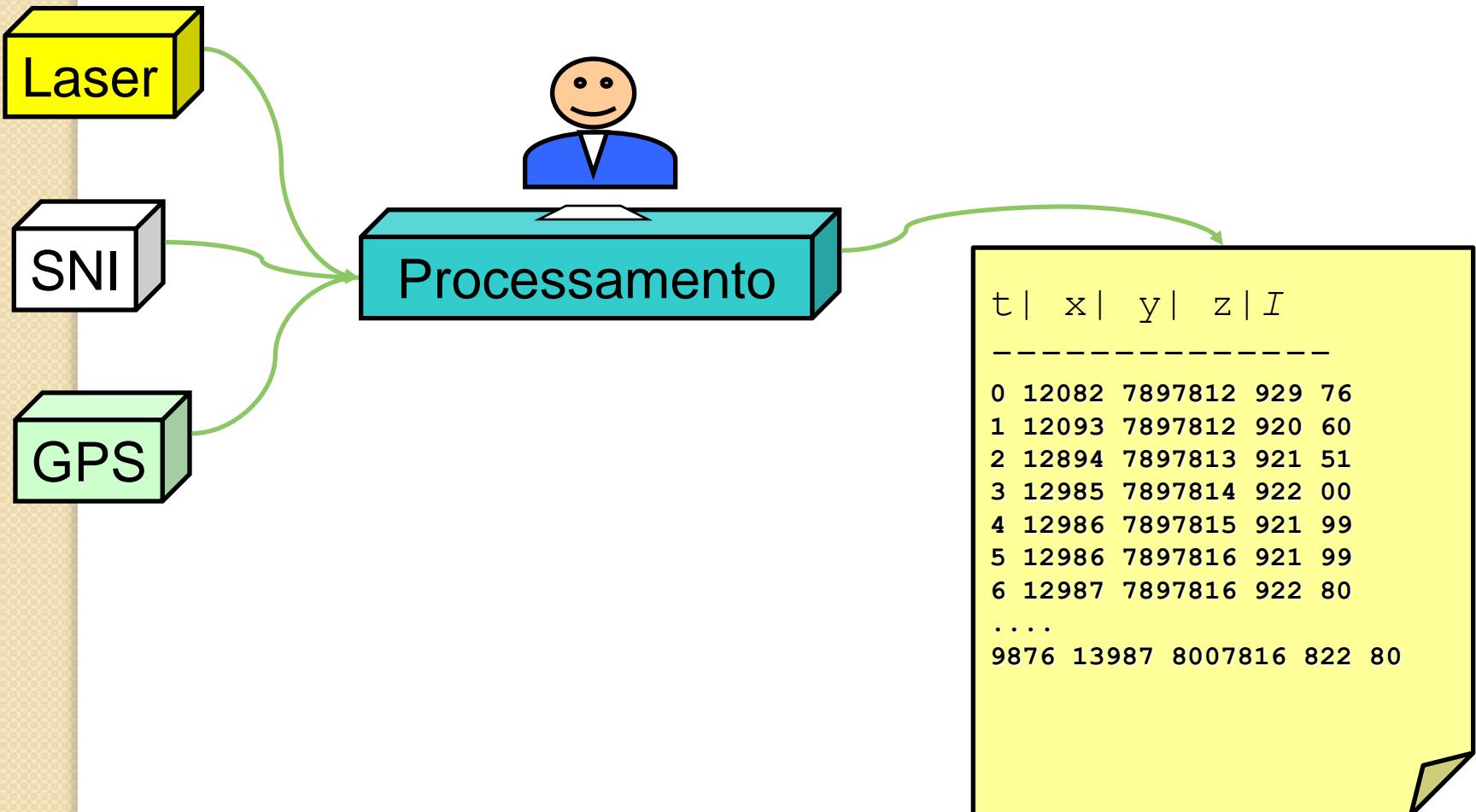
Full wave – O retorno completo é digitalizado (usando um equipamento auxiliar – digitizer), o que aumenta a quantidade de dados.

Em uma etapa posterior, o sinal registrado pode ser decomposto para detectar a presença de vários objetos.



- <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 <sup>2</sup> /h)	1.5 - 14.5
acurácia em distância	2cm
acurácia em posição (m):	< 0.5m (h:500m)
dimensões (cm):	30x35x40
peso (kg)	23



## ALTM (OPTECH)

- ALTM Airborne Laser Terrain Mapper



Now at **167 kHz**

# 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 $\pm 1^\circ$
•	Variable from 0 to $0.93 \times$ altitude m
• Swath width	Sawtooth, uniform across 96% of scan
• Spot distribution	33 kHz (max. altitude (AGL) 3.5 km)
• Laser repetition rate	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

- Especificações ...



Parameter	Specification
Laser wavelength	1064 nm
Horizontal accuracy	$1/5,500 \times \text{altitude}, 1\sigma$
Elevation accuracy	<5-20 cm, $1\sigma$
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	Up to 4 range, including 1,2,3,4 return
Full waveform capture	12-bit Optech IWD-2 Intelligent Waveform Digitizer (optional)

# Toposys: FALCON III

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)

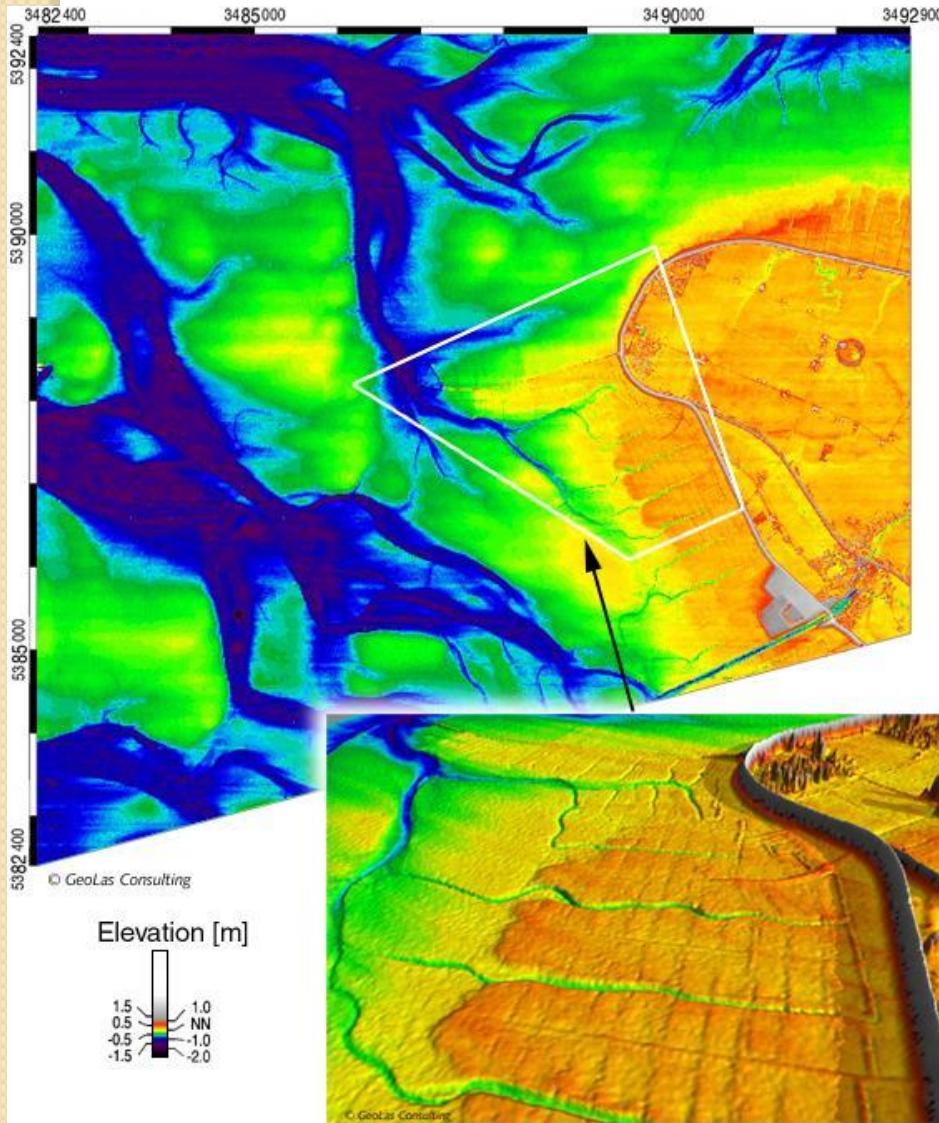
## SHOALS (OPTECH)

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



# SHOALS

Hydrographic mode	SHOALS-3000	SHOALS-1000
Measurement rate	3,000 Hz	1,000 Hz
Operating altitude (for maximum depth)	300-400 m	200-400 m
depth measurement accuracy (25 cm, 1 σ)	IHO Order I	IHO Order I
Horizontal accuracy (25 cm, 1 σ)	IHO Order I	IHO Order I
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

Twin Engine Aircraft

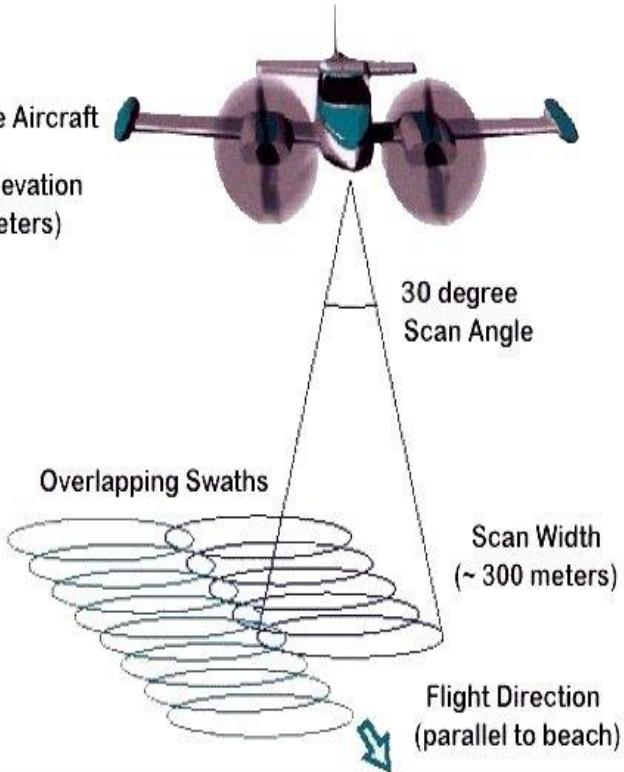
Aircraft Elevation  
(~ 700 meters)

30 degree  
Scan Angle

Overlapping Swaths

Scan Width  
(~ 300 meters)

Flight Direction  
(parallel to beach)



sistema: onda contínua CW

ângulo de varredura (°): 27.2 and 38

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

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

velocidade de vôo (km/h): 270

área varrida (km<sup>2</sup>/h): 80

acurácia em distância (cm): 10

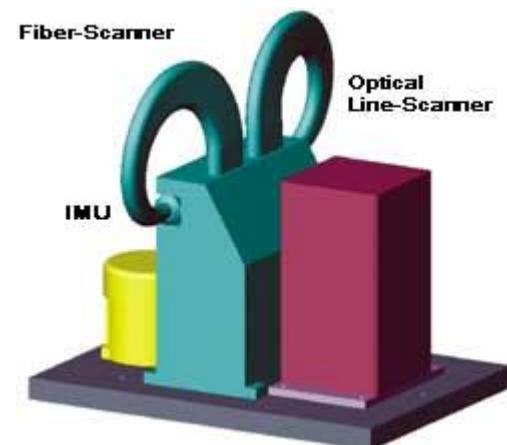
acurácia em posição (m): 1 (h:700m)

dimensões (cm): 50x50x85

Peso (kg): 56

# Toposys - Características

sistema:	pulso
ângulo de varredura (°):	14
Largura da faixa (m):	0.25*h
footprint (m):	0.3 (h:600 m)
velocidade de vôo (km/h):	250
área varrida (km <sup>2</sup> /h):	mar/20
acurácia em distância (cm):	1
acurácia em posição (m):	< 0.5 % * 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

# **Sensoriamento Remoto II**

## **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

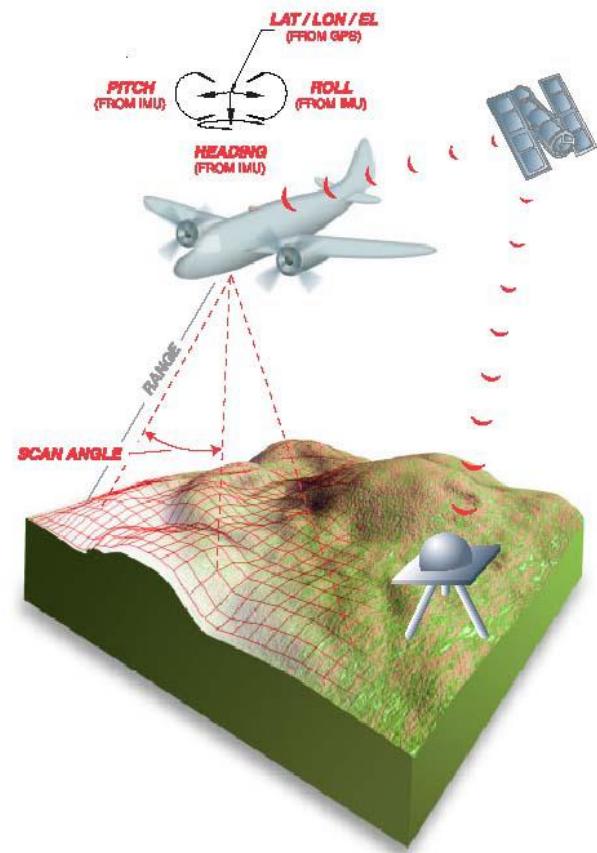
- Freqüência de varredura ( $r$ )
- Ângulo de varredura ( $\theta$ )
- Altura de vôo ( $h$ )
- Velocidade da aeronave ( $v$ )
- Taxa de amostragem ( $f$ )

Largura da faixa:

Pontos por linha:

Distância entre pontos ao longo da varredura

Distância entre linhas de varredura

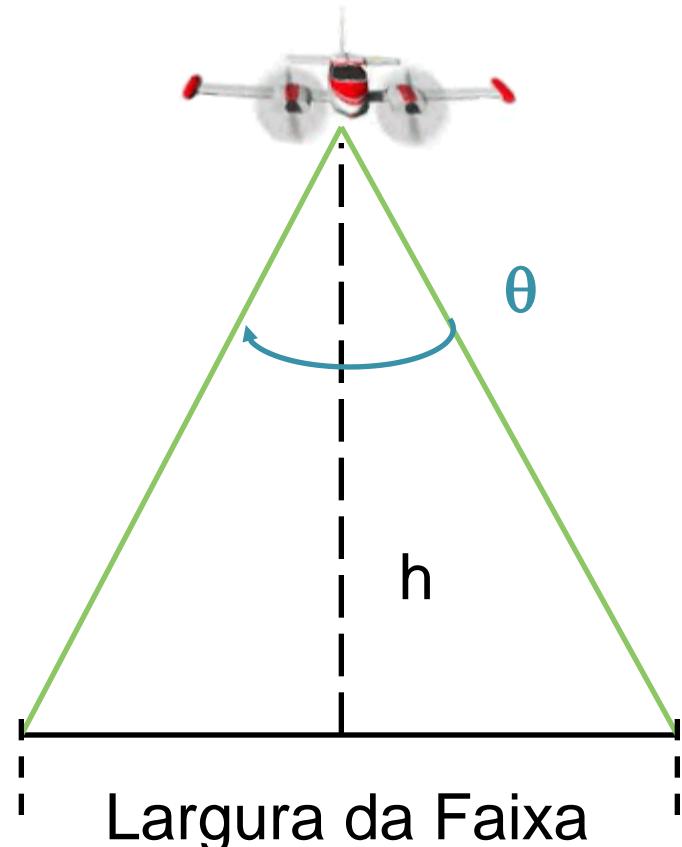


# Parâmetros Configuráveis / Calculados

Largura da faixa:

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

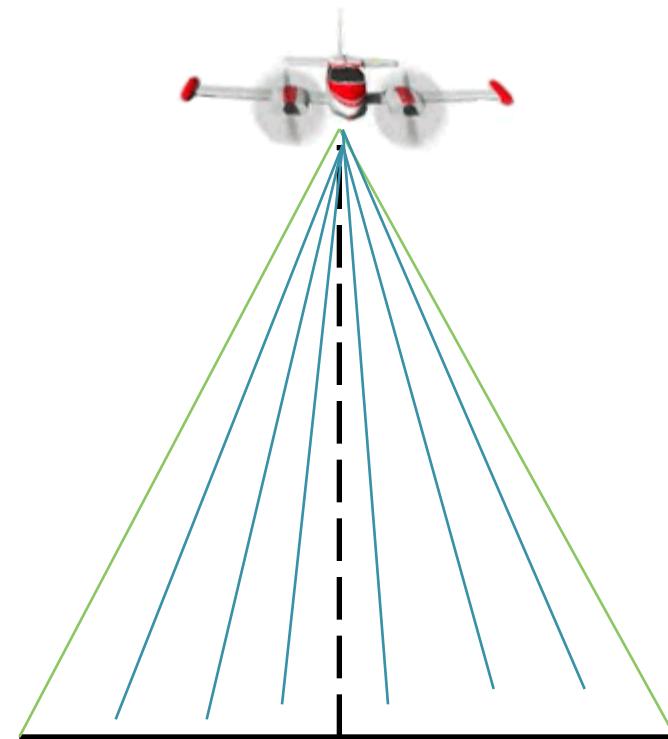
- Ângulo de varredura ( $\theta$ )
- Altura de vôo ( $h$ )



# Parâmetros Configuráveis / Calculados

Pontos por linha (N):

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



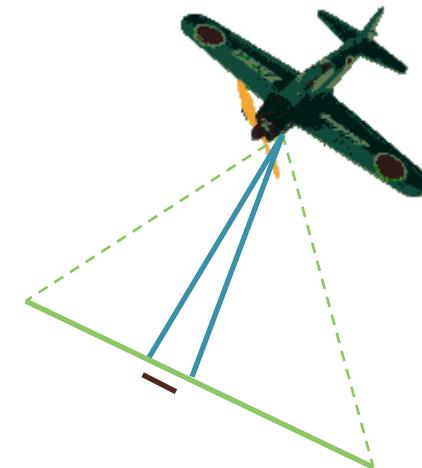
- f: Taxa de amostragem (kHz). Taxa ou freqüência de repetição do pulso (f).
- r: Freqüência de varredura (*scan rate*), em Hz. Número de linhas varridas por segundo.

# Distância entre pontos

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

$$Dp = L/N$$

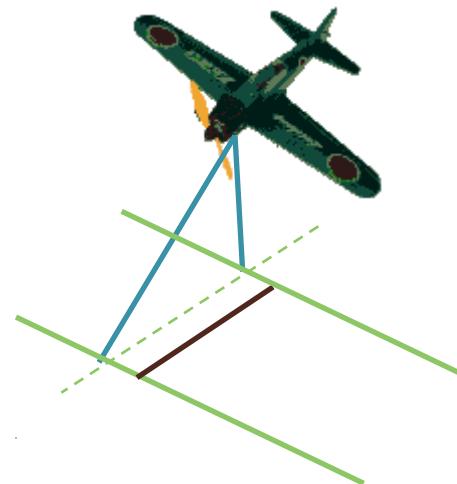
L: Largura da faixa  
N: Pontos por linha.



Distância entre pontos ao longo da linha e vôo:

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

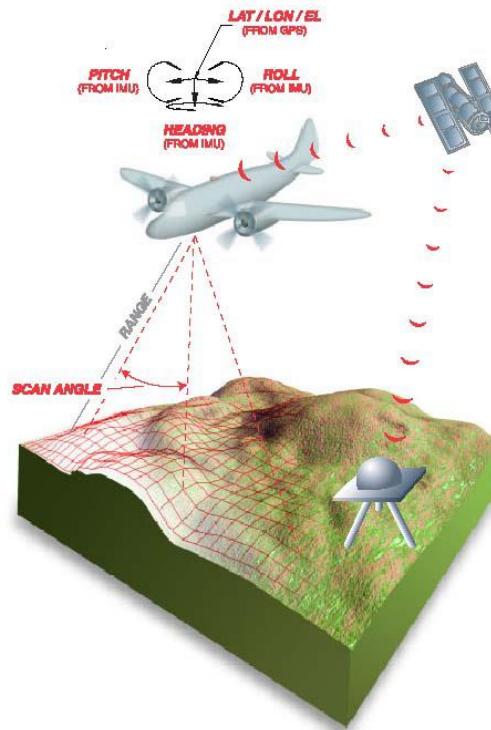
v= velocidade da aeronave  
f: Taxa de amostragem



# Distância entre pontos

Distância entre pontos no terreno:

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



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