

Názov prednášky:

Fyzikálne a mechanické princípy merania pomocou laserového lúča

Osnova prednášky:

Základné pojmy

Princíp laserového skenovania

Metódy merania vzdialenosti

Klasifikácia

Trochu z histórie

STIMULOVANÁ EMISIA:

Albert Einstein

- V r. 1917 publikoval prácu "**Ku kvantovej mechanike žiarenia**", v ktorej hovoril o **stimulovanej (vynútenej alebo indukovanej) emisii**. Práve tá je základom dnešného laseru.

MASER

- V 40. a 50. rokoch 20. stor. chcel fyzik **Charles Townes** zostrojiť zariadenie, pomocou ktorého by mohol vytvoriť čo najkratšie vlny, aby mohol študovať molekulárne štruktúry. Podarilo sa mu vytvoriť predchodcu laseru - **maser**.
 - "**microwave amplification by stimulated emission of radiation**", čo v preklade znamená kvantový generátor mikrovln. Technológia je podobná laseru, nevyužíva však viditeľné svetlo
- V r. 1960 zostrojil **Teodor Maiman prvý rubínový laser**.
- Za **objavenie princípu lasera** vyznamenali v r. 1964 v Štokholme Nobelovou cenou rusov **Nikolaja G. Basova** a **Alexandra M. Prochorova** spolu s američanom **Charlesom H. Townesom**.



Theodore Harold Maiman (* 11. júl 1927, Los Angeles, Kalifornia, USA – † 5. máj 2007, Vancouver, Britská Kolumbia, Kanada)

- americký fyzik, ktorý zostrojil prvý laser.
- bol dvakrát nominovaný na Nobelovu cenu za fyziku, ale nikdy mu nebola udelená.

Základné pojmy

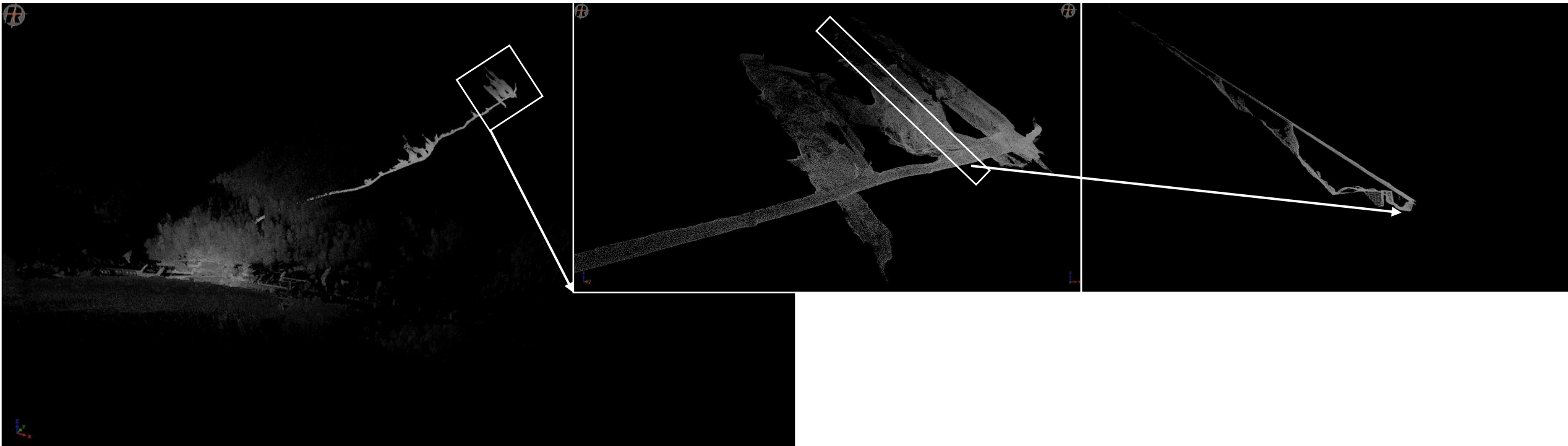
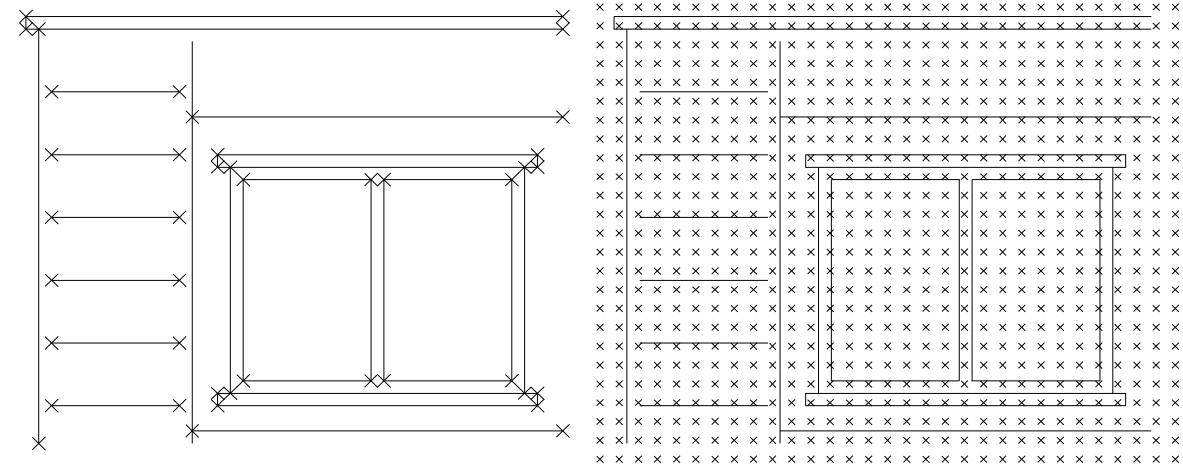
Laser - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- je zdroj monochromatického **koherentného** svetla, ktorý vznikne umiestnením zosilňovača svetla do optického rezonátora naladeného na príslušnú **vlnovú dĺžku**
- <https://www.youtube.com/watch?v=aRLPlmMWbUw>
- **Koherencia** je schopnosť zväzku elektromagnetického žiarenia (svetla) interferovať po prejdení určitej vzdialenosti (alebo uplynutí určitého času)
 - je podmienená zachovaním presnej frekvencie (monochromatickosti) a fázy na danom úseku
 - Interferencia - je vo fyzike skladanie (superpozícia) niekoľkých koherentných vlnení rovnakého druhu do jedného výsledného vlnenia
- **Vlnová dĺžka** je vzdialenosť medzi opakujúcimi sa periódami vlnenia.
 - Vlnová dĺžka závisí od frekvencie vlnenia a rýchlosti šírenia vlny:
$$\lambda = v/f ,$$
 - kde:
 - λ je vlnová dĺžka v m,
 - v je rýchlosť šírenia vlny v m/s,
 - f je frekvencia vlnenia v Hz

Laserové skenovanie

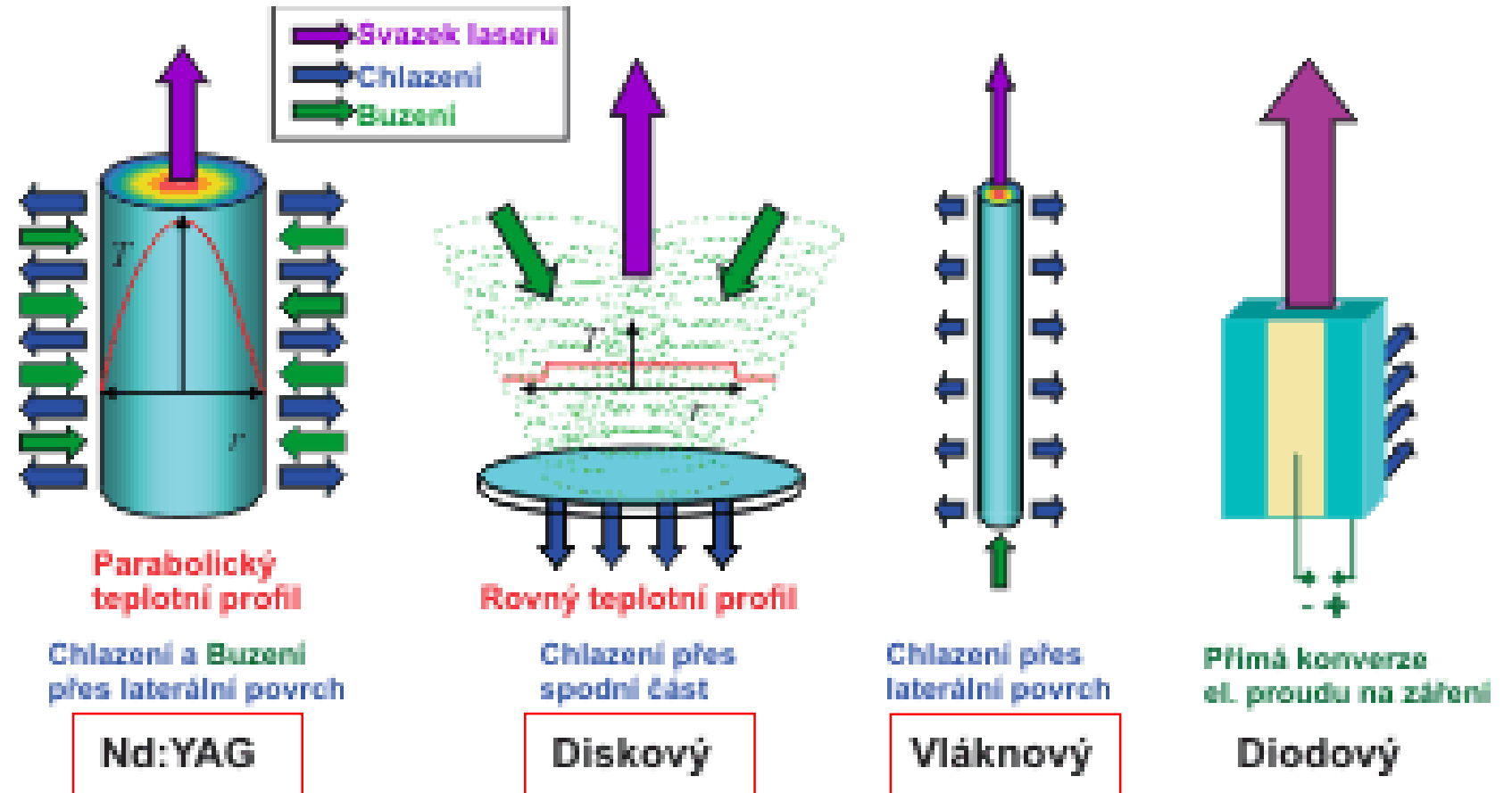
Hlavné znaky skenovania

- neselektívne určovanie 3D súradníc
- obrovská množstvo bodov (mračná), rádovo milióny
- veľká rýchlosť skenovania, 10 000 bodov za sekundu a viac (milióny)
- nutná nová forma spracovania do „čitateľnej“ podoby



Aktívny materiál emitujúci laserový lúč

pre 3D laserové skenovanie



- Pre emitovanie úzkeho zväzku elektromagnetického žiarenia možno využiť viacero materiálov, zväčša synteticky vyrobených
- Aktívnym materiálom môže byť aj plyn (CO₂, Xe, Ar) alebo kvapalina

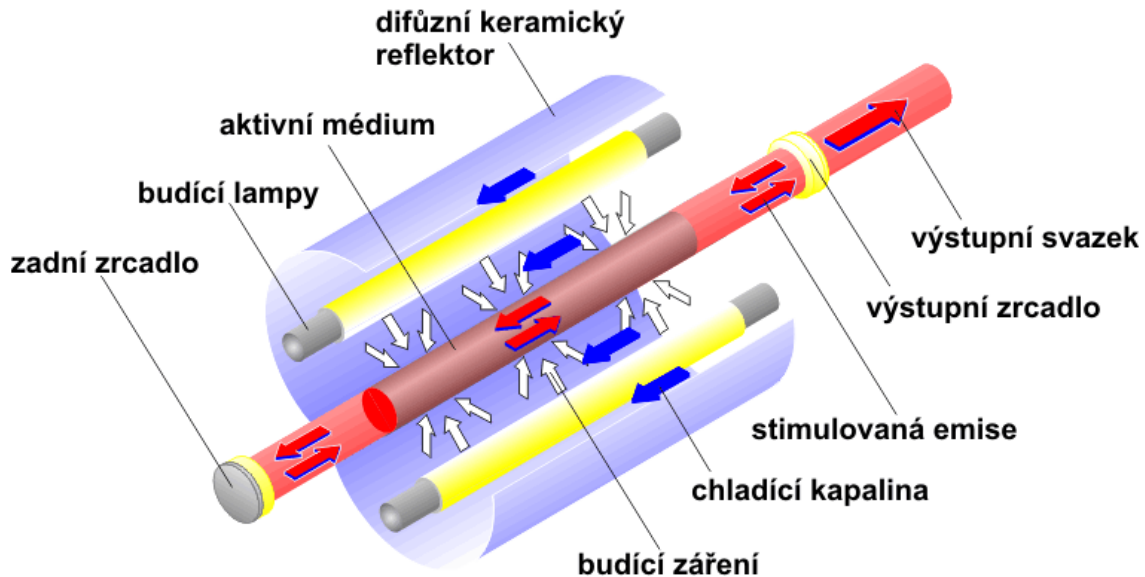
Laserové skenery na báze rôznych zlúčením

1 I A	2 II A	3 III B	4 IV B	5 V B	6 VI B	7 VII B	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 I B	12 II B	13 III A	14 IV A	15 V A	16 VI A	17 VII A	18 0
Vodík 1 H 1,00794(7)																	Helium 2 He 4,002602(2)
Lithium 3 Li 6,941(2)	Beryllium 4 Be 9,012182(3)																
Sodík 11 Na 22,989770(2)	Hořčík 12 Mg 24,3040(6)																
Draselík 19 K 39,0983(1)	Vápník 20 Ca 40,078(4)	Skandium 21 Sc	Titan 22 Ti 47,867(1)	Vanad 23 V 50,9415(1)	Chrom 24 Cr 51,9961(6)	Mangan 25 Mn 54,938049(9)	Železo 26 Fe 55,845(2)	Kobalt 27 Co 58,933200(9)	Nikl 28 Ni 58,6934(2)	Měď 29 Cu 63,546(3)	Zinek 30 Zn 65,39(2)	Gallium 31 Ga 69,723(1)	Germanium 32 Ge 72,61(2)	Arzen 33 As 74,92160(2)	Selen 34 Se 78,96(3)	Brom 35 Br 79,904(1)	Krypton 36 Kr 83,80(1)
Rb 37 85,4678(3)	Sr 38 87,62(1)	Yttrium 39 Y 88,90586(2)	Zirkon 40 Zr 91,224(2)	Nb 41 92,90638(2)	Mo 42 95,94(1)	Tc 43 (98,9063)	Ru 44 101,07(2)	Rh 45 102,90550(2)	Pd 46 106,42(1)	Ag 47 107,8682(2)	Cd 48 112,411(8)	In 49 114,818(3)	Sn 50 118,710(7)	Sb 51 121,760(1)	Te 52 127,60(3)	I 53 126,90447(3)	Xe 54 131,29(2)
Cs 55 132,90545(2)	Ba 56 137,327(7)	57-70 Lanthanoidy	Hafnium 72 Hf 178,49(2)	Ta 73 180,9479(1)	W 74 183,84(1)	Re 75 186,207(1)	Os 76 190,23(3)	Ir 77 192,217(3)	Pt 78 195,078(2)	Au 79 196,96655(2)	Hg 80 200,59(2)	Tl 81 204,3833(2)	Pb 82 207,2(1)	Bi 83 208,98038(2)	Po 84 (209,9824)	At 85 (209,9871)	Rn 86 (222,0176)
Fr 87 (223,0197)	Ra 88 (226,0254)	89-102 Aktinoidy	Rutherfordium 104 Rf (261,110)	Dubnium 105 Db (262,1144)	Seaborgium 106 Sg (263,1168)	Bohrium 107 Bh (264,12)	Hassium 108 Hs (265,1306)	Meitnerium 109 Mt (268)	Ununnilium 110 Uun (269)	Unununium 111 Uuu (272)	Ununbium 112 Uub (277)						
nekovy alkalické kovy alkalické zemní kovy vzácné plyny halogeny metalloidy přechodné kovy jiné kovy vzácné zemní prvky																	
název prvku protonové číslo značka prvku relativní atomová hmotnost																	
Lanthanoidy: Aktinoidy:																	
Lanthan 57 La 138,90549(2)	Cer 58 Ce 140,116(1)	Praseodym 59 Pr 140,90768(2)	Neodym 60 Nd 144,242(3)	Promethium 61 Pm (144,9127)	Samarium 62 Sm 150,36(3)	Europium 63 Eu 151,964(1)	Gadolinium 64 Gd 157,25(3)	Terbium 65 Tb 158,92534(2)	Dysprosium 66 Dy 162,50(3)	Holmium 67 Ho 164,93032(2)	Erbium 68 Er 167,26(3)	Thulium 69 Tm 168,93421(2)	Ytterbium 70 Yb 173,04(3)	Lutecium 71 Lu 174,967(1)			
Aktinium 89 Ac (227,0277)	Thorium 90 Th 232,0381(1)	Protaktinium 91 Pa 231,03588(2)	Uran 92 U 238,02891(1)	Neptunium 93 Np (237,0482)	Plutonium 94 Pu (244,0642)	Americium 95 Am (243,0614)	Curium 96 Cm (247,0703)	Berkelium 97 Bk (247,0703)	Kalifornium 98 Cf (251,0796)	Einsteinium 99 Es (252,0830)	Fermium 100 Fm (257,0951)	Mendelevium 101 Md (258,0984)	Nobelium 102 No (259,1011)	Lawrencium 103 Lr (262,110)			

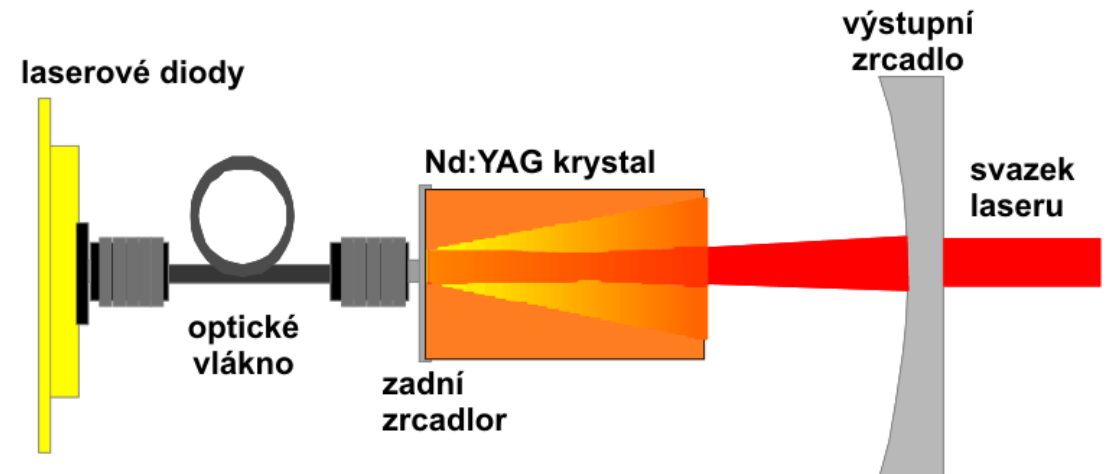
Nd:YAG laser

- v současnosti nejpoužívanější typ laseru na báze pevného kryštálu.
- aktivním materiálem je izotropný kryštál yttrium hliníkového granátu (Yttrium Aluminium Garnet) ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopovaný kationmi neodýmu (Nd^{3+}),
- farba monokryštálu je svetlo ružová až fialová v závislosti na koncentrácii atómu neodýmu.
- typicky produkuje laser s vlnovou dĺžkou 1064,1 nm
- s menšou účinnosťou emituje aj laser s vlnovými dĺžkami 946, 1120, 1320 a 1440 nm.

Lamp pumped solid state (LPSS)

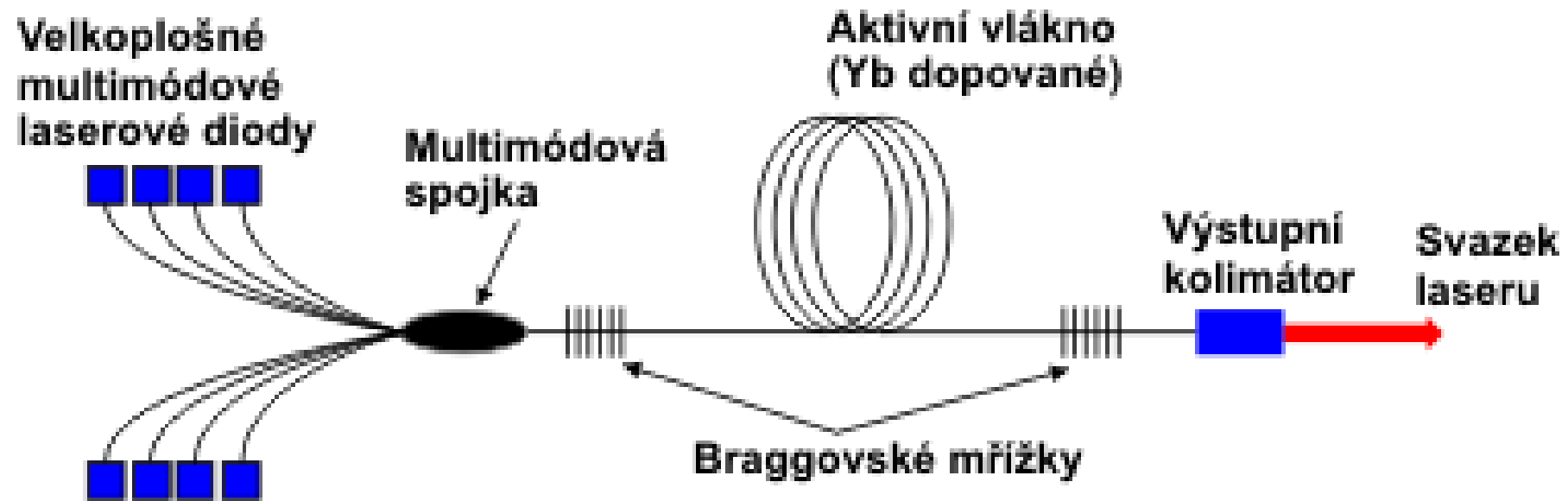


Diode pumped solid state (DPSS)

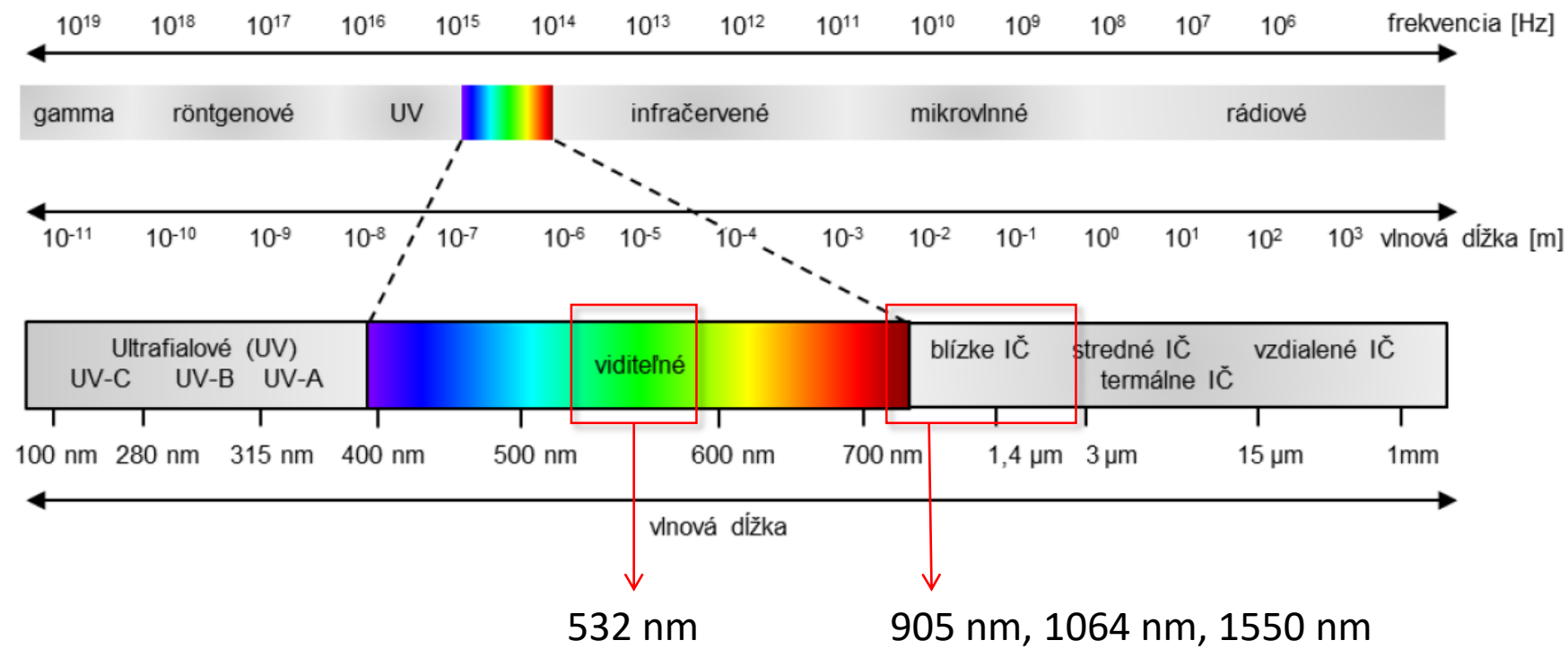


Vláknový laser

- používaný v laserových skeneroch najmä pre letecké skenovanie

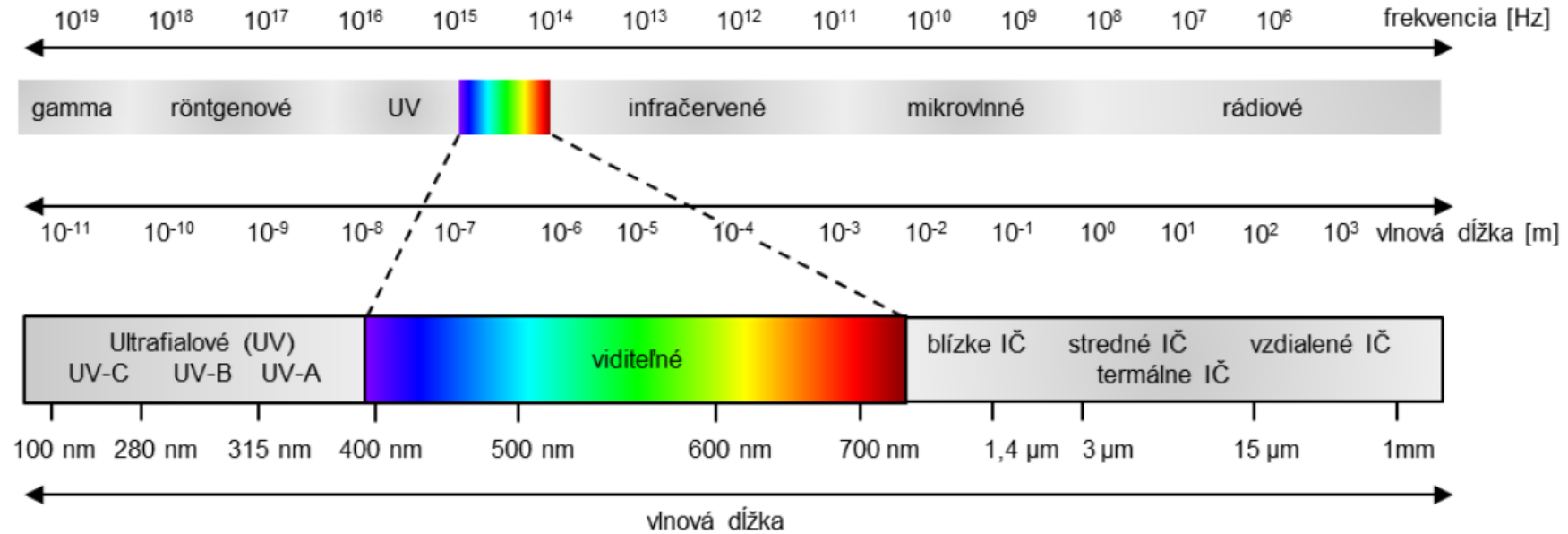


Fyzikálne princípy



Leica Scan Station C5, C10	FARO Focus 3D	Topcon GLS-2000	Riegl VZ-1000	Faro Focus 3D X330
532 nm	905 nm	1064 nm	1550 nm	1550 nm

Fyzikálne princípy



DPSS **diode** lasers, 905 nm

LPSS solid state lasers (fundamental wavelength), Nd:YAG, 1064 nm

LPSS solid state lasers (harmonics), Nd:YAG, 532 nm, (355 nm)

fiber lasers, Er-doped, 1.55 μ m

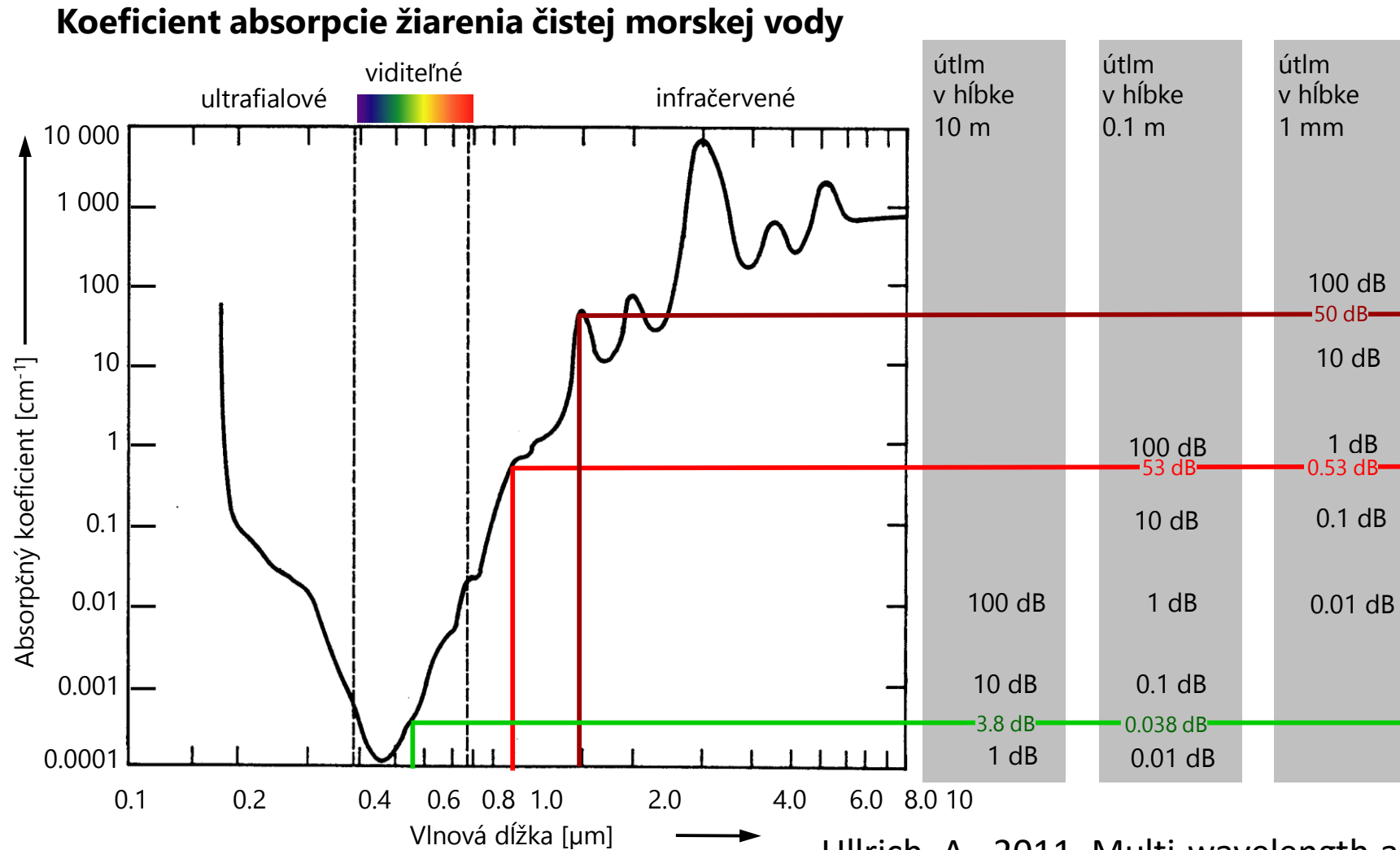
fiber lasers, Yt-doped, 1.06 μ m

fiber lasers, Ho-doped, 2.05 μ m

frequency-doubled **fiber** lasers, 532 nm

Pohlcovanie laserového žiarenia morskou vodou

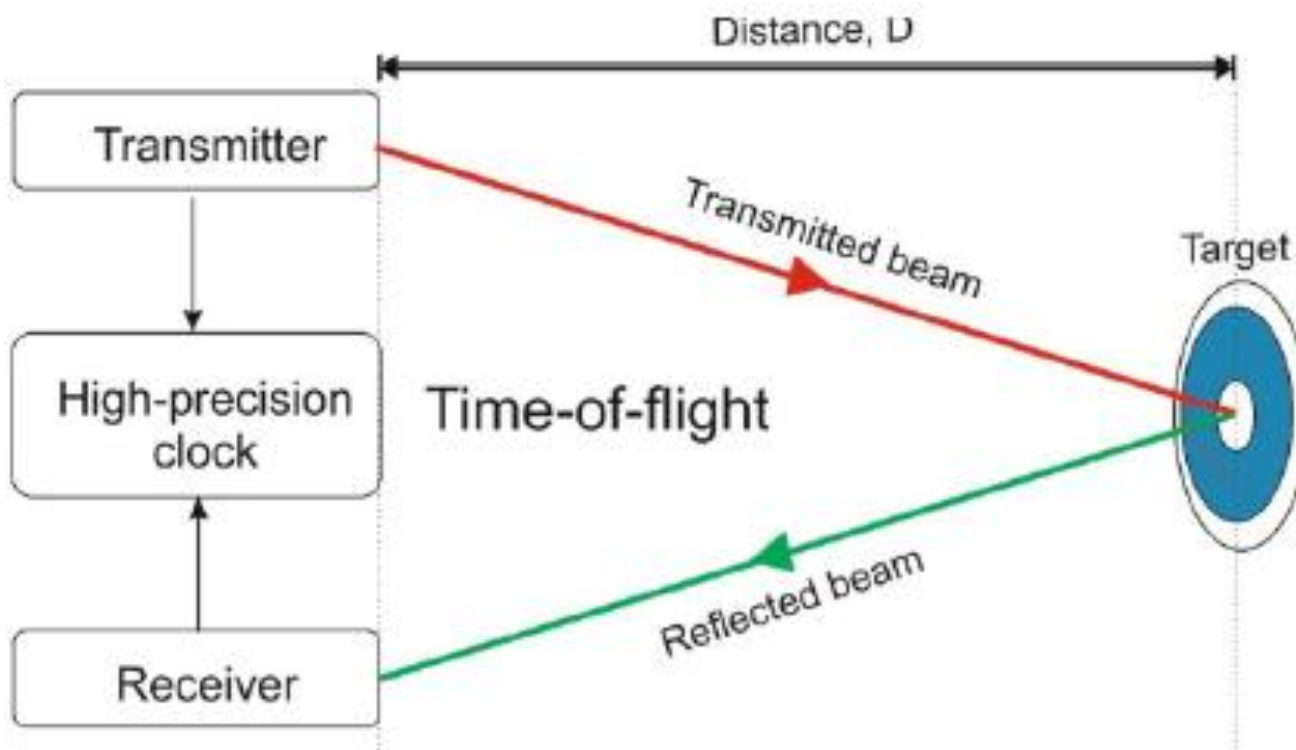
Pohlcovanie zeleného laserového žiarenia je veľmi nízke preto sa využíva pre mapovanie dna plytkých pobrežných zón



Ullrich, A., 2011. Multi-wavelength airborne laser scanning, RIEGL. Int. Lidar Mapping forum, New Orleans.

Metódy merania vzdialenosti LiDAR-om

Pulzný LiDAR (time-of-flight ranging)



$$R = c \frac{t}{2}; \quad \Delta R = c \frac{\Delta t}{2}$$

$$P_R \propto \frac{1}{\rho^4}$$

- Vyžiarený pulz spustí časomerač a vrátená časť pulzu ho zastaví.
- Vrátená časť pulzu musí byť amplifikovaná (zosilnená), lebo energia vrátenej časti pulzu (P_R) klesá so 4. mocninou vzdialenosti objektu, od ktorej sa odrazila.
- Trvanie pulzu (pulse length/duration) je rádov niekoľko nanosekúnd (1-5 ns)

Metódy merania vzdialenosti LiDAR-om

Pulzný LiDAR (time-of-flight ranging)

Rozlíšenie v smere vyžiareného lúča (Range resolution)

- má dva aspekty (zložky)

Rozlíšenie medzi dvomi objektmi $\delta\rho$ (minimum separation distance/range)

- Trvanie pulzu, τ , podmieňuje schopnosť rozlíšiť dva objekty pozdĺž tej istej línie merania
- Pre odlíšenie týchto dvoch objektov je nutné, aby vzájomná vzdialenosť medzi nimi bola aspoň $\frac{1}{2}$ dĺžky pulzu, inak budú pulzy zlúčené/preložené jeden cez druhý/objekty nerozlíšiteľné

$$\delta\rho = \frac{c\tau}{2}$$

Presnosť merania vzdialenosti k objektom $\delta\rho_m$ (range measurement resolution)

- je daná rozlíšením časomier δt (Interval timer resolution)
- presnosť merania vzdialenosti (napr. presnosť pravítka je v milimetroch)
- $c = 300 \text{ mm/ns}$, 1 mm rozlíšenie pozdĺž laserového lúča (δR) vyžaduje rozlíšenie časomier $6,7 \text{ pikosekúnd}$
 - $(0,0067 \text{ ns})$, pre porovnanie náramkové hodinky tykajú po sekundách.

$$\delta\rho_m = \frac{c\delta t}{2}$$

Metódy merania vzdialenosti LiDAR-om

Pulzný LiDAR (time-of-flight ranging)

Maximálna jednoznačná vzdialenosť $\rho_{\max}$ (maximum unambiguous range)

- Podmienená frekvenciou opakovania pulzov (pulse repetition frequency (PRF))
- Systém počká s vyslaním nového pulzu, pokiaľ sa energia z predošlého pulzu nevráti

$$\rho_{\max} = \frac{c}{2 \cdot \text{PRF}}$$

- Maximálny dosah je však viac limitovaný redukciou energie pulzu úmerne so vzrastajúcou vzdialenosťou od skenera

Presnosť merania

- Bolo navrhnutých viacero rovníc, napríklad:

$$\sigma_{\rho} = \pm \frac{c \cdot t_{\text{rise}}}{2\sqrt{\text{SNR}}}$$

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{photoelectric current}}}{P_{\text{thermal noise (detector \& amp)}}}$$

Signal-to-noise ratio (SNR)

- pomer medzi vyslaným signálom a šumom

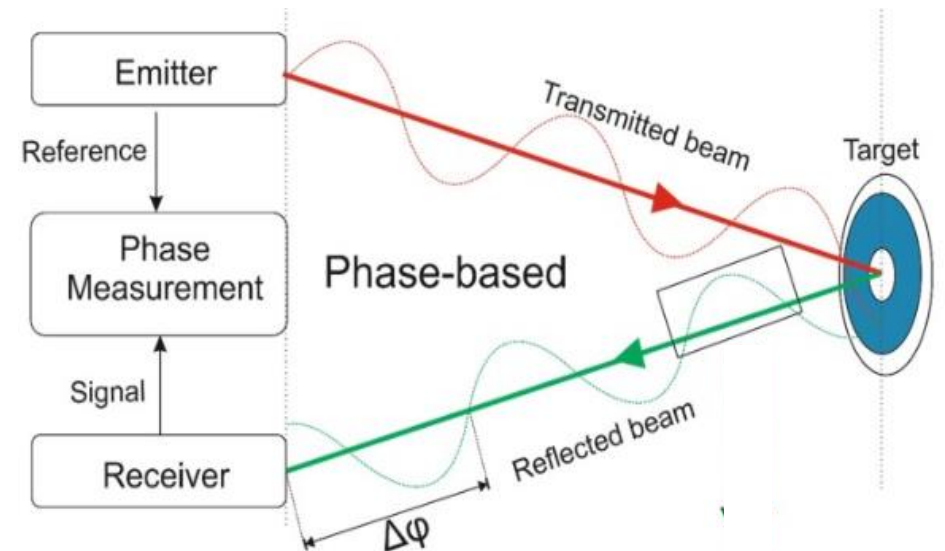
Metódy merania vzdialenosti LiDAR-om

Fázový LiDAR (phase ranging)

- Využíva sa kombinácia laserový žiarič a detektor
- Laser vysiela spojte, kontinuálny lúč (nepreerušovaný), continuous wave (CW) laser
- Laser vysiela laserový lúč smerom ku skenovaným objektom
- Pre určenie vzdialenosti k bodu odrazu laserového žiarenia (r) sa zaznamenáva fázový posun (rozdiel) medzi vyslanou fázou vlny a prijatou fázou (*delta fí v radiánoch*)

$$r = \Delta\varphi / (2 \cdot \pi) \cdot \lambda / 2 + \lambda / 2 \cdot n, \quad D = \frac{c}{4\pi f_m} \frac{\Delta\varphi}{f_m}$$

- Pričom n je neznámy počet cyklov (vlnových dĺžok) medzi systémom senzora a bodom odrazu laserového lúča, λ je vlnová dĺžka žiarenia.

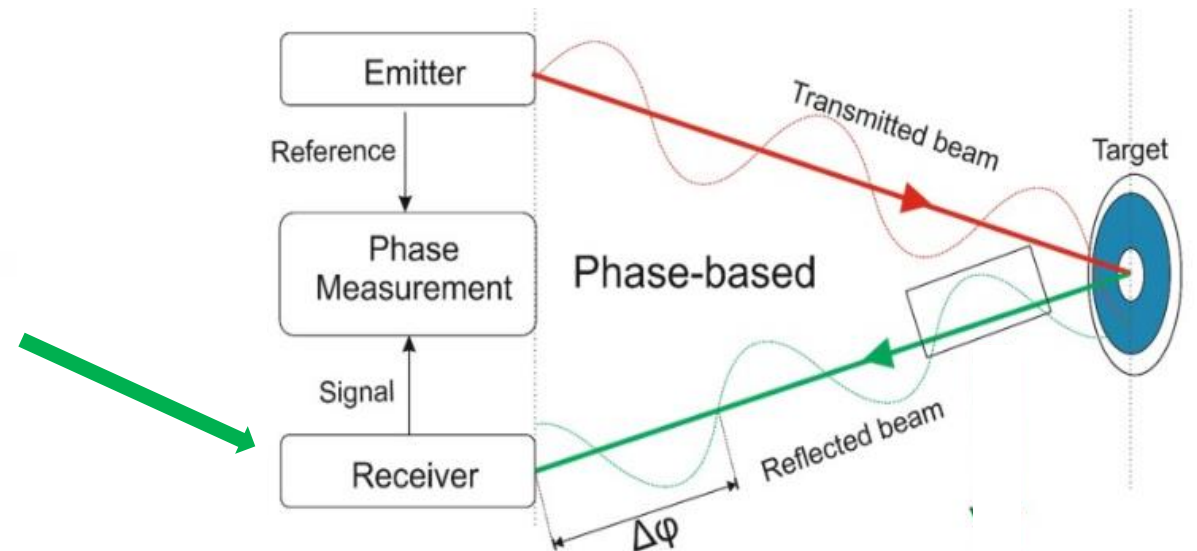
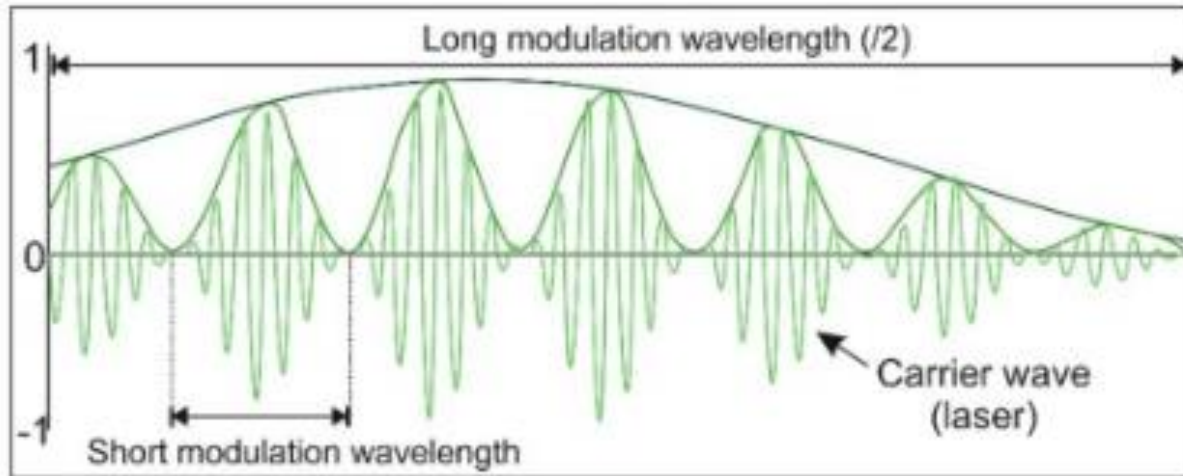


Metódy merania vzdialenosti LiDAR-om

Fázový LiDAR (phase ranging)

- Pri použití $\lambda = 100$ m, dokážeme jednoznačne určiť vzdialenosť k objektu, ktorý je do $\frac{1}{2}$ vlnovej dĺžky (do 50 m)
- Fázový rozdiel sa dá určiť s presnosťou na 1% fázy, ak $\lambda = 100$ m, potom presnosť merania je 50 cm
- Avšak počet cyklov nie je možné určiť
- Preto sa používa tzv. modulovaný laser, s modulovanou amplitúdou (amplitude modulated AM-CW laser),
- používajú dve až tri frekvencie, teda rôzne vlnové dĺžky,
- Na dlhšej vlne je modulovaná kratšia vlna a na nej ešte kratšia vlna, atď.
- Najdlhšia vlna definuje maximálny dosah určenia vzdialenosti AM-CW laserom
- Najkratšia vlna definuje presnosť merania

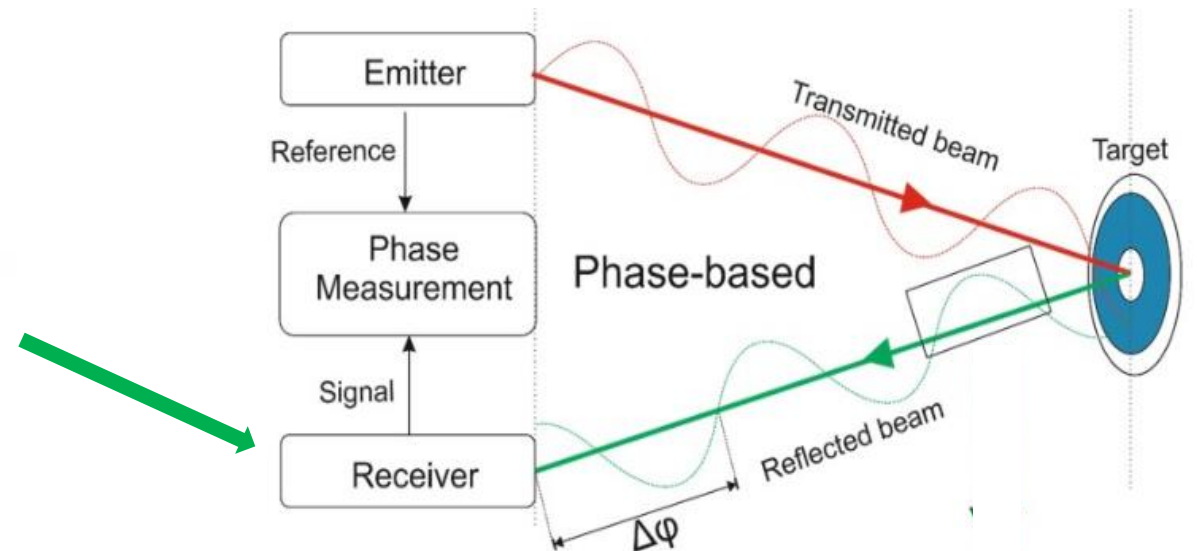
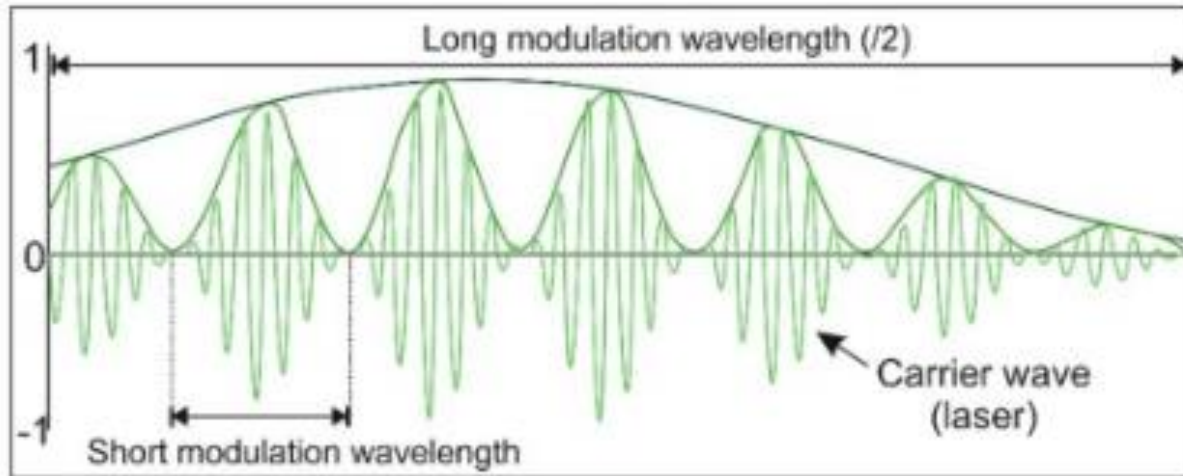
$$R_{\max} = \frac{\lambda_{\text{long}}}{2}$$



Metódy merania vzdialenosti LiDAR-om

Fázový LiDAR (phase ranging)

- Emitované svetlo je amplitúdovo modulované s konštantnou frekvenciou, f , sinusoid
- Oveľa vyššie miery merania: niekoľko 100 kHz (pulzné: niekoľko kHz)
- Nameraný fázový posun medzi emitovaným a prijatým signálom, $\Delta\phi$, sa používa na výpočet času letu, kde n je celé číslo plných vlnových dĺžok
- Rozlíšenie rozlíšenia závisí od rozlíšenia merania fázového rozdielu a frekvencie modulačnej vlny



Metódy merania vzdialenosti LiDAR-om

Aktívna triangulácia

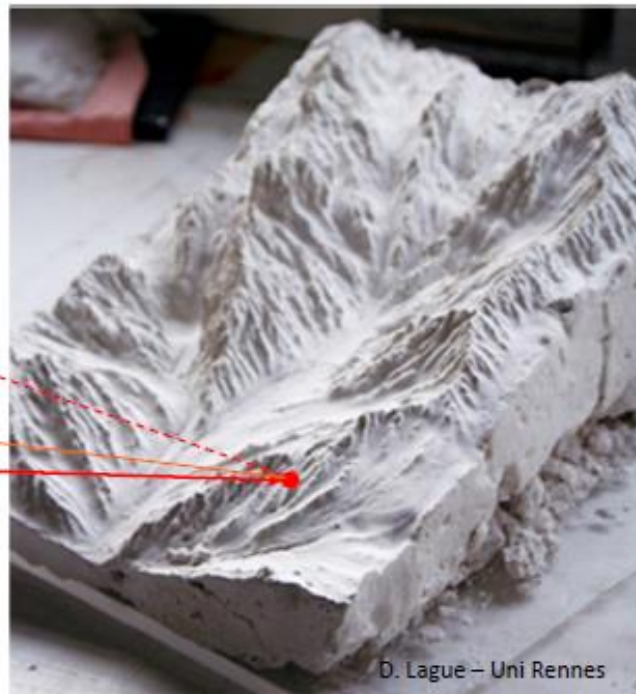
- Využíva sa kombinácia lasera a digitálnej kamery
- Laser vysiela laserový lúč smerom ku skenovaným objektom
- Kamera zaznamenáva obraz miesta odrazu laserového lúča
- Poloha obrazu laserom ožiareného bodu v rámci zobrazovacej roviny kamery závisí od vzdialenosti miesta, od ktorého sa laserový lúč odrazil
- Laserový žiarič, bod odrazu lúča a jeho obraz v rovine kamery tvoria trojuholník, preto triangulácia, aktívna lebo ide o meranie vlastným lúčom energie.



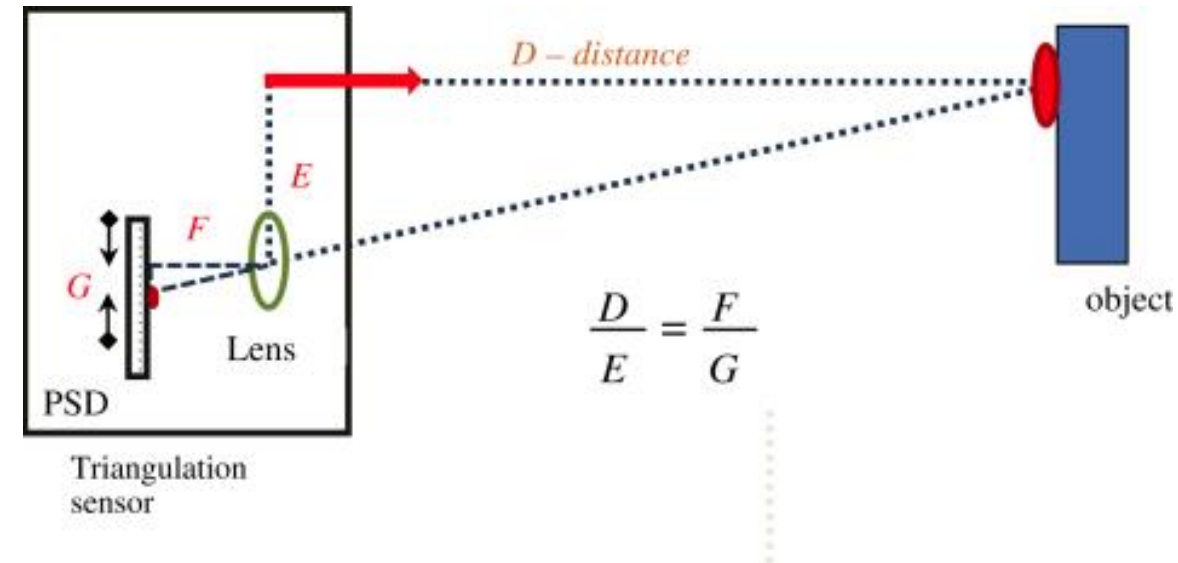
Metódy merania vzdialenosti LiDAR-om

Aktívna triangulácia

- Polohu bodu odrazu lúča v priestore vzhľadom na SSS možno určiť na základe veličín
 - Vzdialenosť medzi laserovým žiaričom a kamerou je známa (d = baseline)
 - Uhol alfa, pod ktorým je vyslaný lúč
 - Uhol ϕ medzi zobrazovacou rovinou kamery a spojnicou bodu odraz lúča a jeho obrazu v rovine kamery .



$$\text{range} = d * [\tan\alpha * \tan\phi / (\tan\alpha + \tan\phi)]$$



Metódy merania vzdialenosti LiDAR-om

Aktívna triangulácia

Vo väčšine prípadov sa premieta laserová čiara namiesto jedného bodu pre urýchlenie skenovania



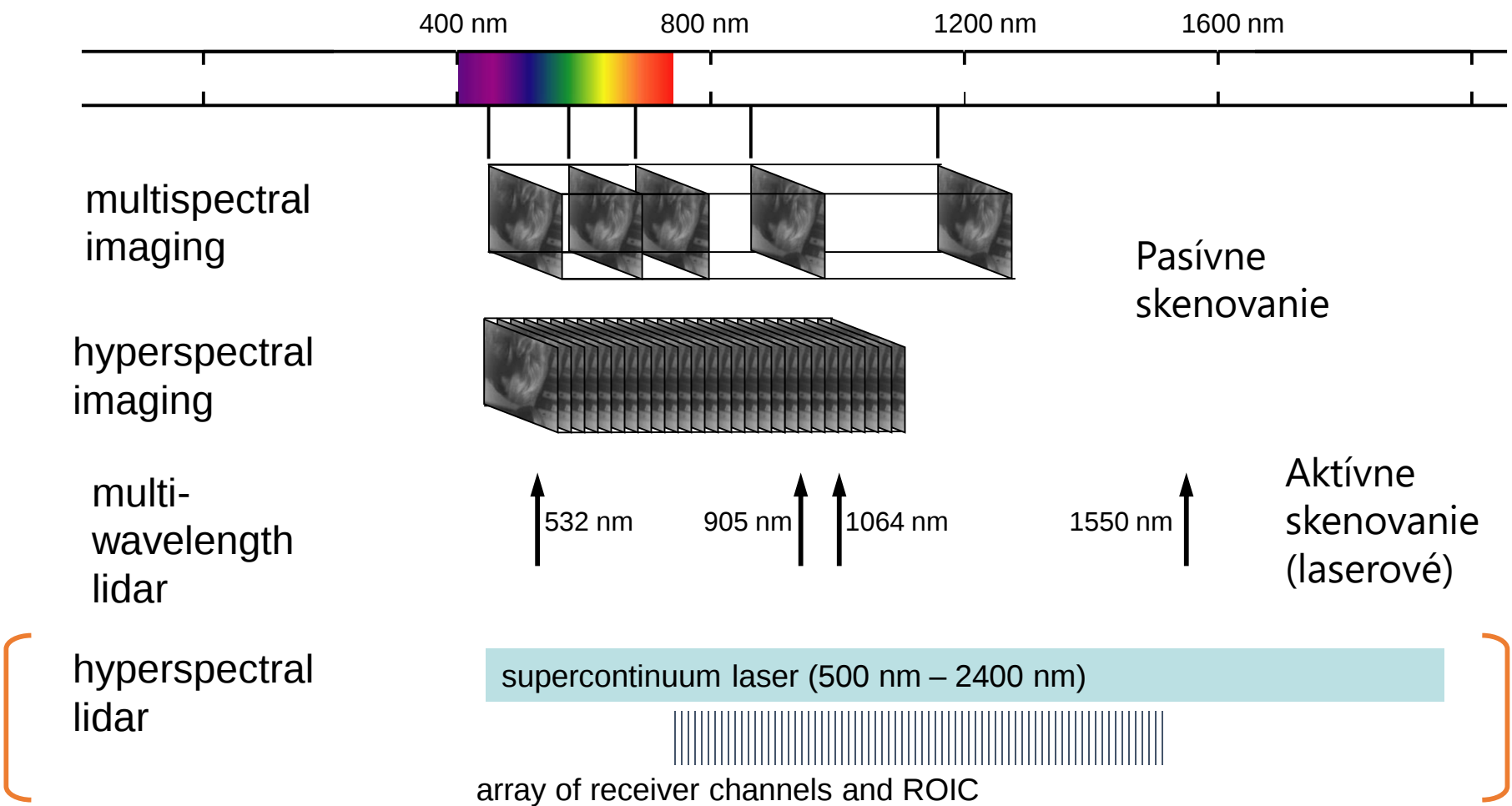
Metódy merania vzdialenosti LiDAR-om

Porovnanie

	Maximálny dosah	Presnosť merania	Frekvencia skenovania bodov	
	Max range [m]	Accuracy [mm]	Speed [pt/sec]	
Pulzný lidar	Time of flight	3000	10	1 - 10 ⁴
Fázový (AM-CW) lidar	Phase	100	1-5	10 ⁵ - 10 ⁶
Triangulačný lidar s CCD kamerou	Triangulation	10	0.1	10 ⁵

Budúcnosť mapovania LiDAR-om

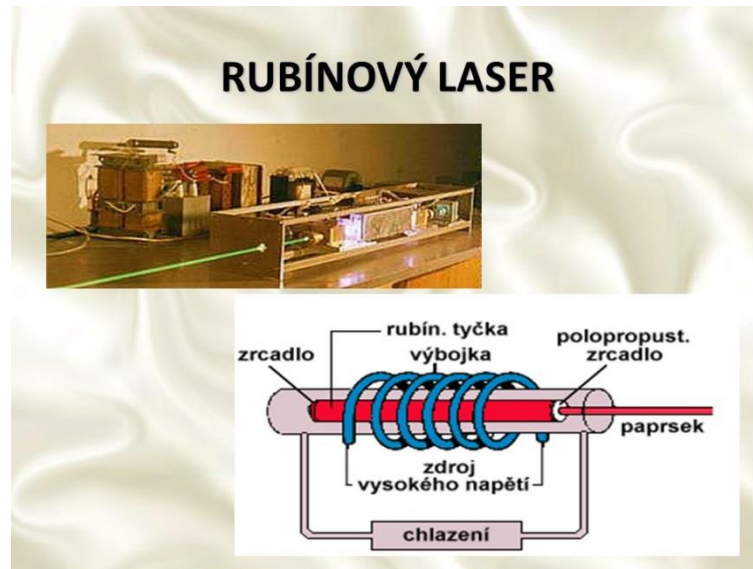
Multi/hyperspektrálny LiDAR



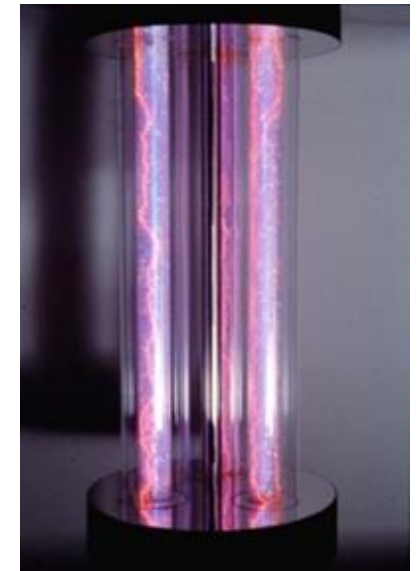
Klasifikácia

Podľa typu laserujúceho prostredia

- 1) lasery s **pevným** laserovým prostredím (rubínový laser, neodymový laser)
- 2) lasery s **kvapalným** laserovým prostredím (farebný laser)
- 3) lasery s **plynným** laserovým prostredím (CO₂-laser, laser argónový a laser hélium- neónový, excimerový laser)
- 4) lasery **polovodičové** (laserová dióda)



Pevnolátkový neodymový laser (Nd-YAG)



Hélium-neónový laser

Klasifikácia

Podľa spôsobu čerpania energie:

Optické lasery (napr. výbojka)

Elektrické lasery

Chemické lasery

Termodynamické lasery (zahrievaním, ochladzovaním plynu)

Lasery vznikajúce z jadrovej energie (reaktorom, jadrovým výbuchom)

Podľa vyžarovanej vlnovej dĺžky:

Lasery s viditeľným svetlom

Infračervené lasery

Ultrafialové lasery

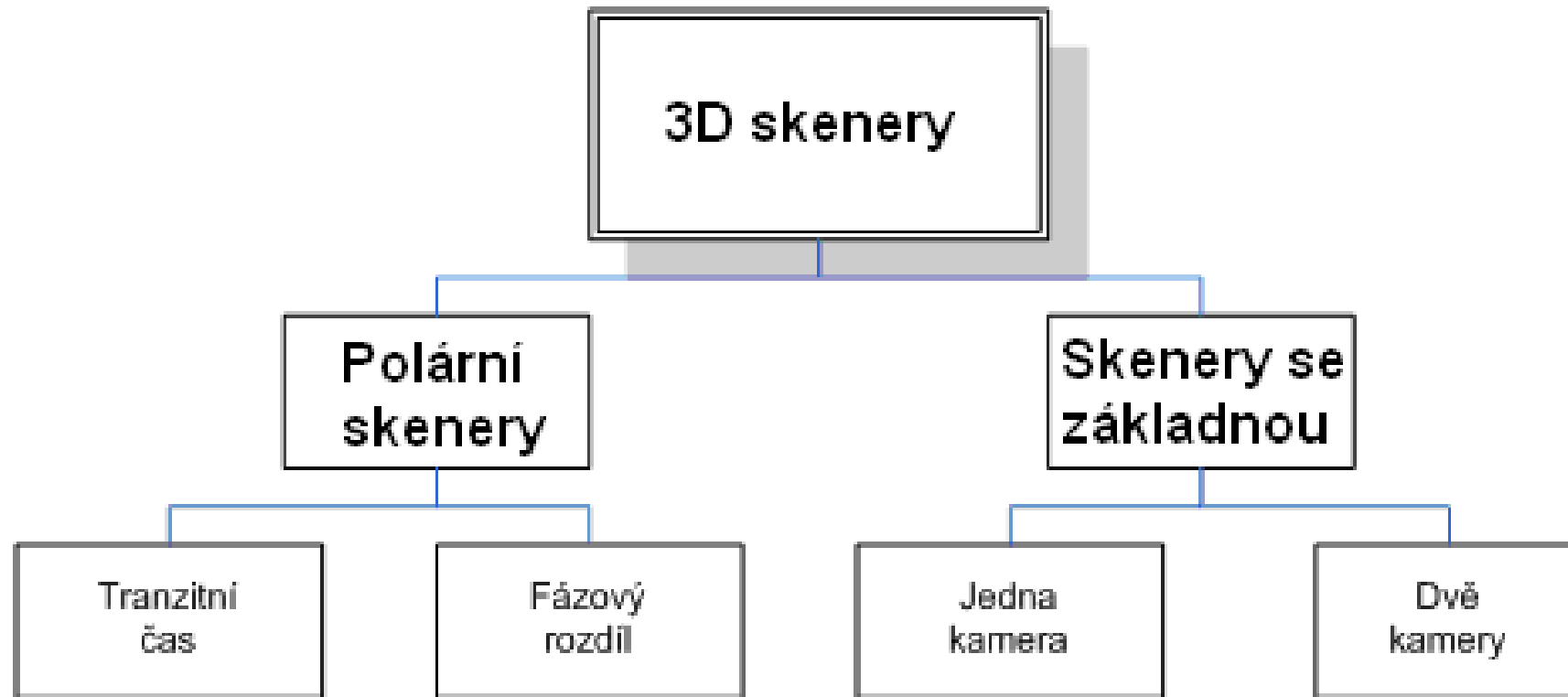
Röntgenové lasery



Klasifikácia

skenery

- prístroje, ktoré určujú 3D polohu diskretných bodov na základe laserového skenovania

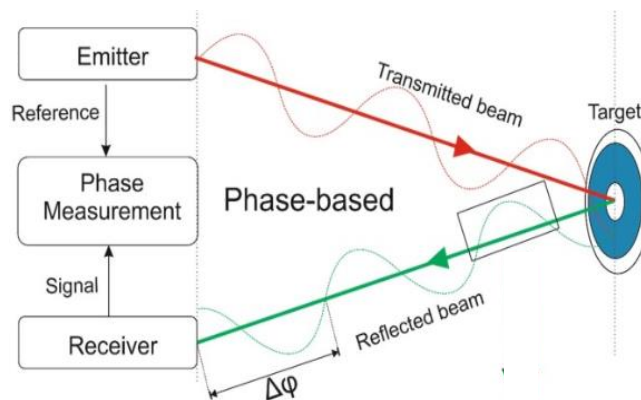
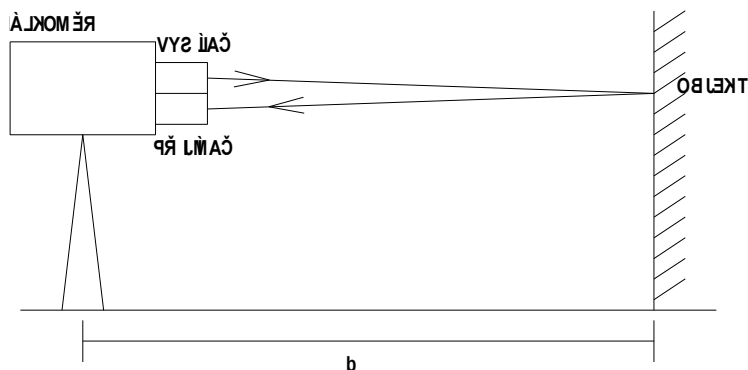


Pozemné skenery - klasifikácia

Polárny skener

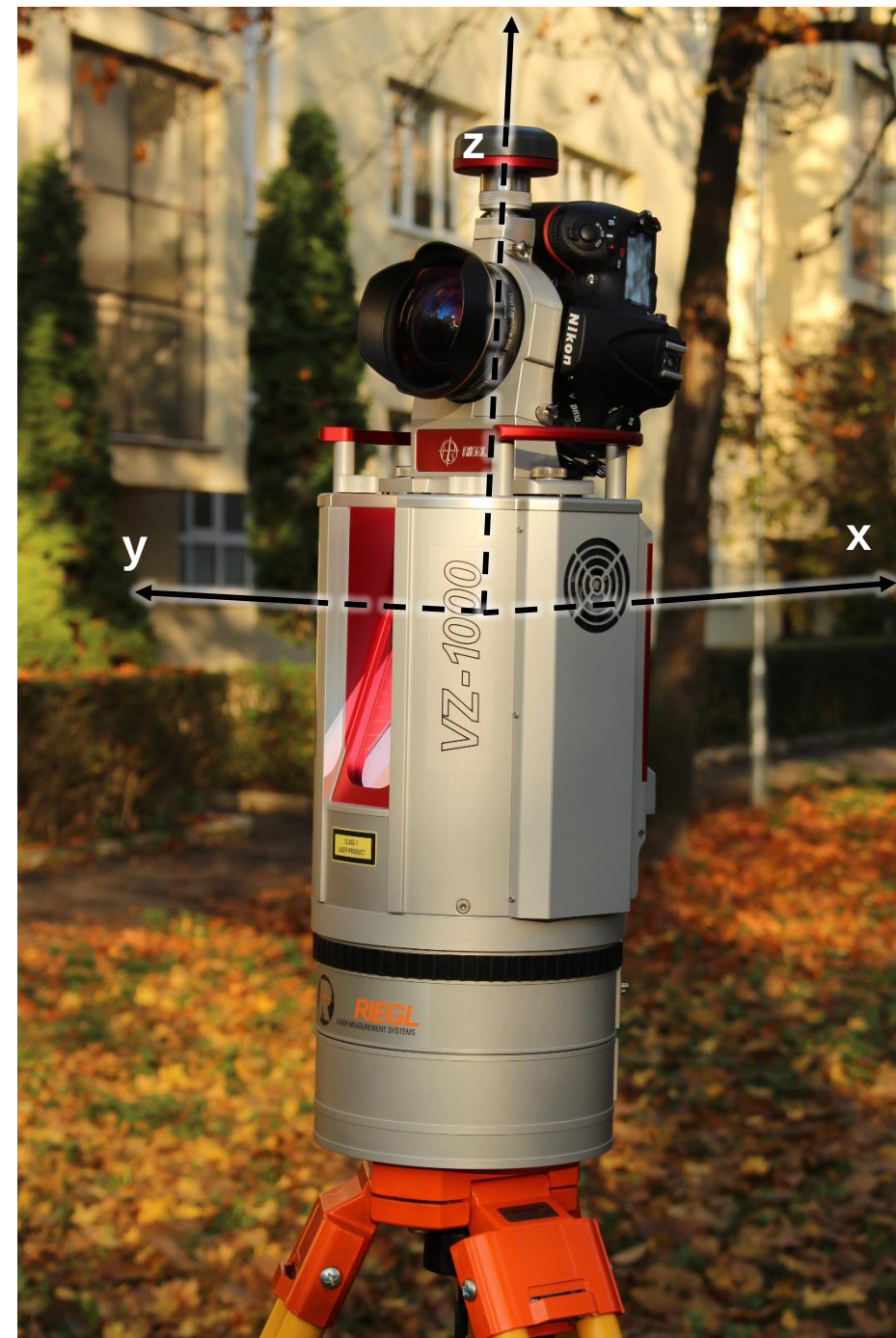
Z hľadiska princípu sa jedná o **totálnu stanicu s bezhranovým diaľkomerom** (nie prevedením).

Diaľkomer pracuje na princípe merania **tranzitného času** (pulzný skener) alebo **fázového rozdielu**.



Polárny skener meria:

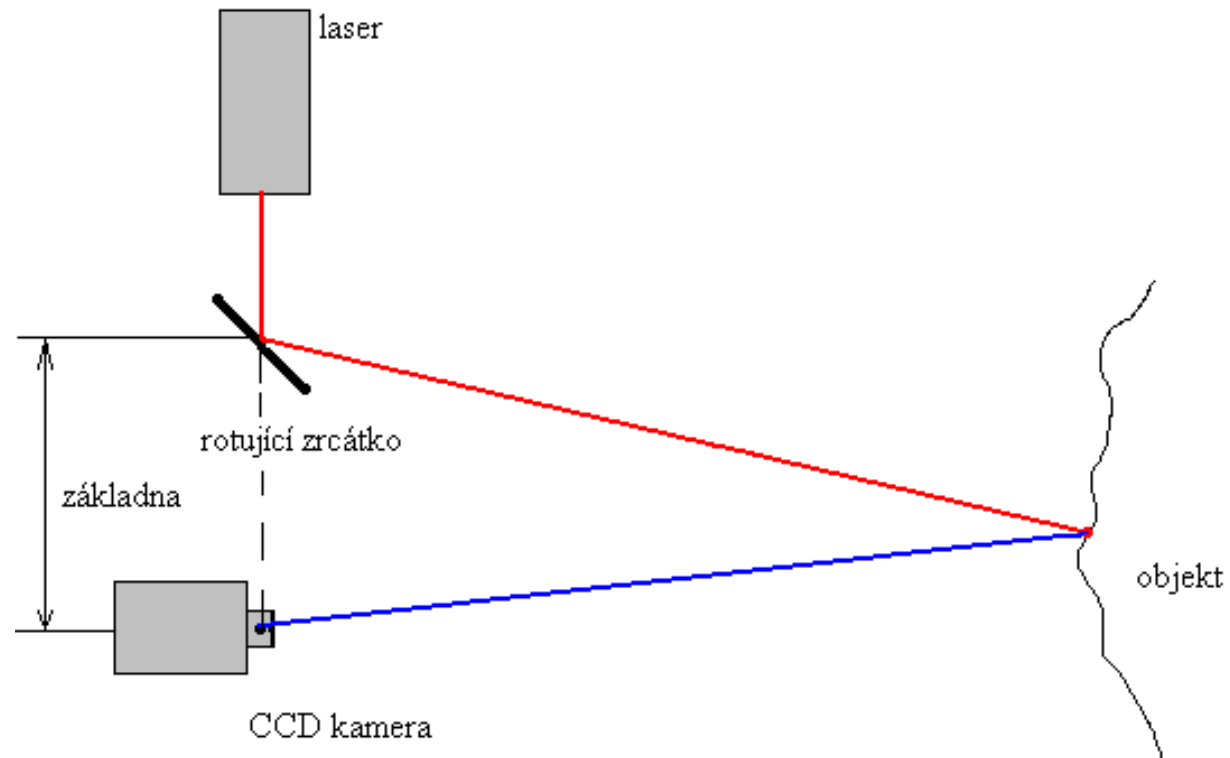
- **vodorovný smer**
- **zvislý uhol**
- **šikmú dĺžku/vzdialenosť** (fázový alebo impulzný, t.j. časový diaľkomer)
- intenzita odrazu
- + **poskytuje obrazové dáta** - digitálne fotografie interné a externé



Pozemné skenery - klasifikácia

Skener so základňou - jednokamerový

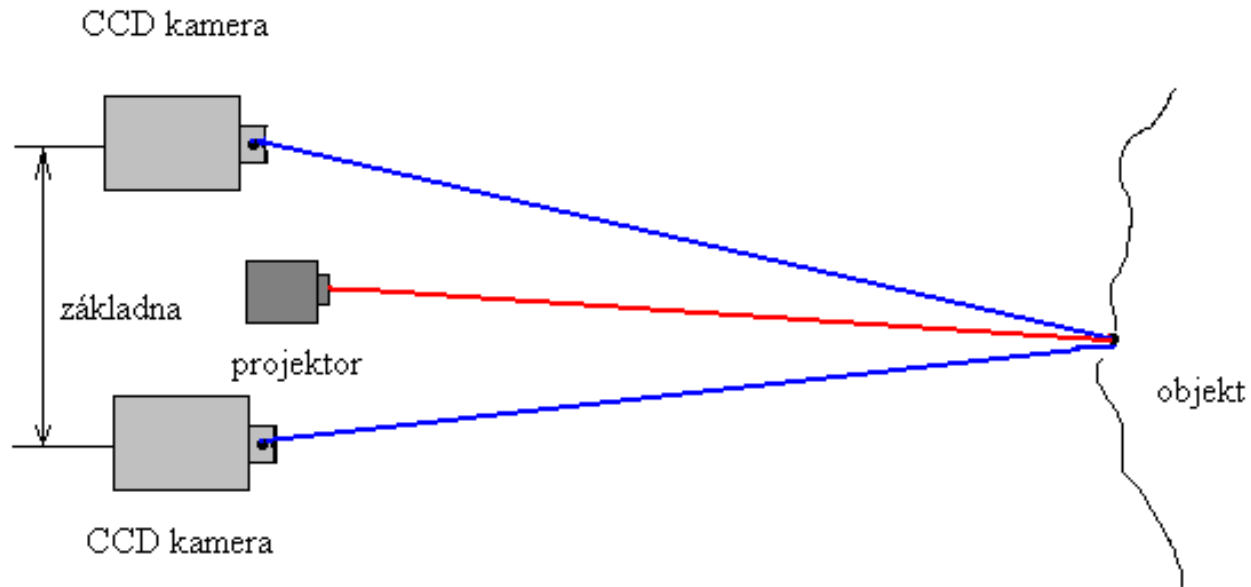
Súradnice sú určované na základe "pretínania z uhlov" zo základne



Pozemné skenery - klasifikácia

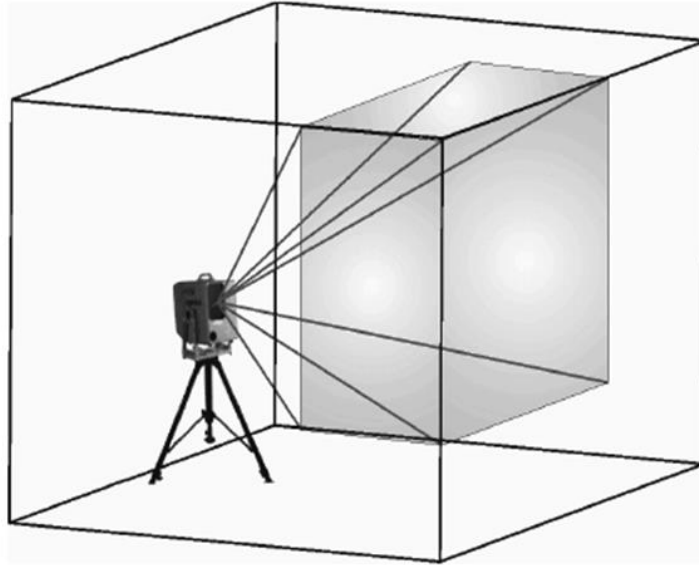
Skener so základňou - dvojkamerový

Súradnice sú určované na základe "pretínania z uhlov" zo základne, projektor slúži len na označenie bodov

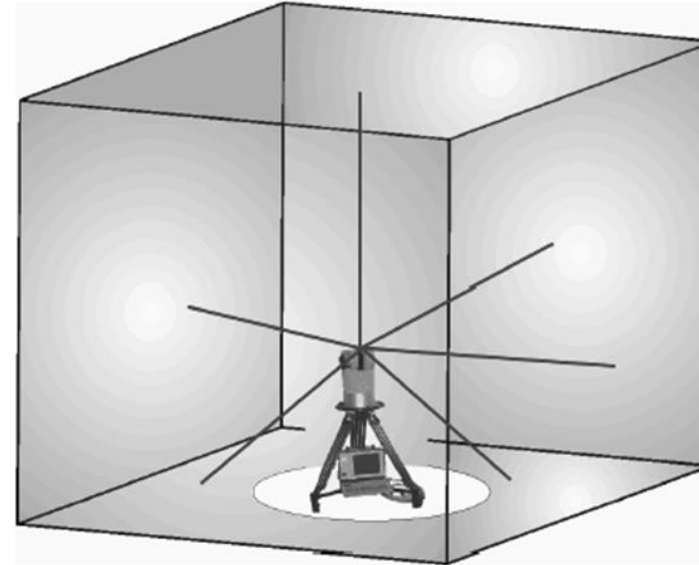


Pozemné skenery - klasifikácia

Podľa zorného poľa



Kamerový



Panoramatický



Pozemné skenery - klasifikácia

Podľa spôsobu rozmetania laserového lúča

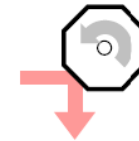
Skenery určujú súradnice bodov v po sebe nasledujúcich profiloch. Profily sa vytvára rozmetaním zväzku lúčov (lúčov laserového žiarenia).

1. pomocou rotujúceho (kmitajúceho) zrkadla
2. pomocou rotujúceho odrazového hranola
3. pomocou nutácie (kolísania) zrkadla (tzv. Palmerovo skenovanie*)
4. rotáciou zdroja žiarenia
5. pomocou optických vlákien
6. pomocou statického optického elementu
 - Vytvára v priestore výseč svetelnej roviny (oproti ostatným trvalo)
 - Používa sa u skenerov s meraním dĺžky pomocou optickej základne

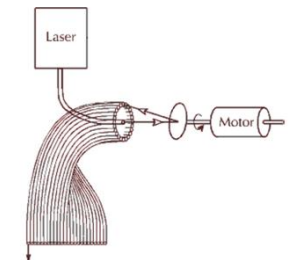
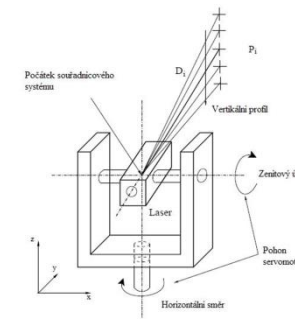
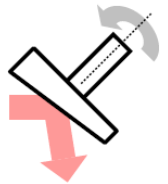
Oscillating mirror



Rotating polygon



Nutating mirror (Palmer scan)



Lasery a bezpečnosť

Podľa spôsobu rozmetania laserového lúča

Dôležitým bodom pre hodnotenie rizika pri práci s lasermi vydávajúcimi kontinuálne žiarenia vo viditeľnom odbore je hustota vývinu energie $25 \text{ W} / \text{m}^2$ patriaci k dobe 0,25 s žmurkacieho reflexu (čo je zhruba doba oneskorenia fyziologického reflexu človeka na oslnenie, človek preruší jeho pôsobenie na oko žmurknutím a prípadne odvrátením hlavy od zdroja).

Pôsobenia neviditeľného žiarenia nechráni oko človeka žiadny reflex a ak má toto žiarenie vlnovú dĺžku, ktorá prechádza očné šošovkou a sústredí sa na malú plošku na sietnici, je nutné dodržať prípustnú hustotu výkonu dopadajúceho na rohovku oka patriaci k predpokladanej dobe pôsobenia, ktorá v tomto prípade môže byť podstatne dlhšia ako 0,25 s.

Bezpečnostné triedy:

I.: Je možný trvalý pohľad do zväzku lúčov.

II.: Kontinuálne a viditeľné žiarenie, priamy pohľad do zdroja možný, oko ochráni žmurkajúcej reflex.

III. a): To isté ako II., ale oko už môže byť poškodené pri pohľade do zdroja pomocou optickej sústavy (napr. ďalekohľadu)

III. b): Nebezpečenstvo poškodenia oka, nutné používať ochranné pomôcky (aj pri pozorovaní odrazu), max. emisia $0,5 \text{ W}$

IV. : To isté ako III. b), emisia prekračuje výkon $0,5 \text{ W}$.

