

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**  
**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Radovan Všelicha

**LASEROVÉ SKENOVÁNÍ**

Bakalářská práce

**2017**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K621**..... **Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Radovan Všelicha**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – LED – Letecká doprava**

Název tématu (česky): **Laserové skenování**

Název tématu (anglicky): Laser Scanning

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Laserové skenování
- Metody a technologie laserového skenování
- Zhodnocení využití laserového skenování pro letectví
- Možnost integrace laserového skenování s přesnými mapami pro bezpečné přistání v terénu






- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: E.P. Baltasvias: Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources, 1999  
Jie Shan, Charles K. Toth: Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, 2008  
P. W. Chan: LIDAR-Based Turbulence Intensity for Aviation Applications

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jakub Kraus, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **28. října 2016**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **28. srpna 2017**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

  
doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD. MBA  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy

   
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Radovan Všelicha  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 28. října 2016

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubu Krausovi, Ph.D. za cenné rady, postřehy, připomínky a odborné vedení po celou dobu mé práce. Rád bych také poděkoval mé rodině za podporu a velkou trpělivost.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám žádný závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze 23. srpna 2017



.....  
podpis

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta dopravní**

**Laserové skenování**

**Bakalářská práce**

**srpen 2017**

**Radovan Všelicha**

## **Abstrakt**

Předmětem bakalářské práce „Laserové skenování“ je popsat základní principy, technologie a metody laserového skenování. Dále se text věnuje možnostem využití laserového skenování v oboru letectví a konkrétně jeho možnostem ve využití pro přesné přiblížení a přistání v terénu. V páté kapitole jsou hodnoceny limity laserového skenování a uvedena možnost integrace laserového skenování s přesnými mapami pro přistání vrtulníku v terénu za podmínek snížené viditelnosti.

## **Abstract**

My bachelor thesis „Laser scanning“ describes principles, technologies and methods of laser scanning. In addition, the text focuses on the possibilities of laser scanning in the field of aviation and specifically about possibilities of accurate approach and landing in the field. The fifth chapter evaluates the limits of laser scanning and the possibilities of integration laser scanning with precise maps for landing helicopter in low visibility conditions in the field.

## **Klíčová slova**

Laser, skener, přesné mapy, vrtulník, přistání, terén, útlum atmosféry

## **Key words**

Laser, scanner, precision map, helicopter, landing, attenuation of atmosphere

# Obsah

<b>1.Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2.Laserové skenování .....</b>	<b>12</b>
2.1 Prostor .....	12
2.2 Souřadnice bodu .....	13
2.3 Transformace souřadnice .....	13
2.4 Metody určení souřadnic bodu .....	13
2.4.1 Kontaktní skenování objektů .....	14
2.4.2 Bezkontaktní skenování objektů .....	14
2.5 Výhody laserových skenerů .....	15
2.6 Historie laserového skenování .....	17
2.7 Dělení systémů laserového skenování .....	18
2.8 Struktura systémů laserového skenování .....	19
<b>3.Metody a technologie laserové skenování .....</b>	<b>20</b>
3.1 Laser .....	20
3.1.1 Aktivní prostředí .....	20
3.1.2 Optický rezonátor .....	21
3.1.3 Buzení.....	21
3.1.4 Výstup z laseru.....	22
3.1.5 Bezpečnost práce s lasery .....	23
3.2 Principy měření vzdálenosti .....	23
3.2.1 Impulsní systémy .....	24
3.2.2 Fázové systémy .....	24
3.2.3 Triangulační metody .....	25
3.2.4 Použití v systémech laserového skenování .....	26
3.3 Detekce záření .....	26
3.1 Detektivita .....	26

3.2 Spektrální citlivost .....	27
3.3 Časová odezva .....	27
3.4 Zpracování detekovaného signálu .....	28
3.4.1 Klasická detekce signálu .....	28
3.4.2 Spojitá detekce signálu .....	28
3.5 Energetická bilance laserového dálkoměru .....	29
3.6 Vychylovací soustavy .....	29
3.6.1 Skenery s rotačním odrazným prvkem .....	30
3.6.2 Skenery s oscilujícími odraznými prvky .....	30
3.6.3 Eliptický skener .....	30
3.6.4 Skener se svazkem optických vláken .....	30
3.7 Kontrolní jednotka .....	31
3.8 Geometrický základ laserového skenování .....	31
3.9 Zpracování dat z laserového skenování .....	33
3.9.1 Vizualizace naskenovaných bodů .....	33
3.9.1.1 Mračno bodů .....	33
3.9.1.2 Oktalový strom .....	34
3.9.1.3 K-D strom .....	34
3.9.1.4 Segmentace objektů .....	34
3.9.2 Filtrace .....	34
3.9.2.1 Morfologická filtrace .....	35
Dilatace .....	35
Eroze .....	35
Otevření .....	36
Uzavření .....	36
3.9.2.2 Filtry založené na porovnávání sklonu .....	37
3.9.3 Klasifikace .....	37



<b>4. Zhodnocení možností využití laserové skenování v letectví .....</b>	<b>38</b>
4.1 Letecké laserové skenování jako zdroj informací pro různé obory .....	38
4.1.1 Tvorba digitálního modelu terénu .....	38
4.1.2 3D modely objektů .....	39
4.1.3 Mapování vegetace .....	40
4.1.4 Mapování vodních ploch a jejich dna .....	41
4.2 Laserové skenování v letectví .....	42
4.2.1 Využití laserové skenování ve výrobě .....	42
4.2.2 Detekce překážek .....	44
<b>5. Možnost integrace laserového skenování s přesnými mapami pro bezpečné přistání v terénu .....</b>	<b>45</b>
5.1 Limity laserové skenování .....	45
5.1.1 Dosah laserového skeneru .....	45
5.1.2 Počet naskenovaných bodů .....	48
5.2 Přesné mapy .....	49
5.3 Laserové skenování jako samostatný prostředek pro přistání v terénu .....	50
5.4 Zhodnocení možnosti integrace laserového skenování s přesnými mapami .....	51
<b>6. Závěr .....</b>	<b>52</b>
<b>Použité zdroje .....</b>	<b>53</b>
<b>Seznam zkratk .....</b>	<b>55</b>
<b>Seznam použitých obrázků .....</b>	<b>56</b>
<b>Seznam použitých tabulek .....</b>	<b>57</b>

# 1. Úvod

Doba, ve které dnes žijeme, je charakteristická rychlým vývojem techniky napříč všemi různými odvětvími. Velké objevy vědy zpravidla proniknou do určité oblasti lidské činnosti, kde způsobí rozvoj daného odvětví a rozšíří možnosti a obzory člověka. Bližší zkoumání jednoho takového procesu bude ve své podstatě náplní této bakalářské práce.

První pilotovaný let člověka proběhl v prosinci roku 1903, první funkční laser byl sestaven roku 1960 a skenování objektů pomocí laseru započalo v 80. letech 20. století. Do současnosti již tedy uběhl dostatek času, aby se tyto technologie měly možnost spolu propojit a naučit se využívat jedna druhou.

Možností, jak může laserové skenování obohatit letectví je celá řada. Nemusíme dlouho přemýšlet abychom si představili, kde všude by se nám hodila technologie schopná vytvářet přesný digitální model okolního prostředí.

Ačkoliv se například za posledních několik desetiletí podařilo získat značnou nezávislost létání na povětrnostních podmínkách a viditelnosti, tak stále se můžeme setkat se situacemi, kdybychom potřebovali letět, ale počasí nám to zkrátka nedovolí. Pokud by existoval systém, umožňující lety za špatných atmosférických podmínek, jistě by našel velké uplatnění v celé řadě leteckých činností, zvláště pak například pro LZS, Policii ČR, vojenské letectví ale do jisté míry i pro běžné civilní letectví. Takový systém by pak mohl využívat právě možnosti laserového skenování v kombinaci s jinými vhodnými metodami.

Obráceně pak laserové skenování může využívat možnosti letectví a s jeho pomocí získávat digitální modely oblastí, které by jinak nebylo možné získat.

Ve druhé kapitole se tak soustředíme na základní vyhodnocení možností laserového skenování, jeho začlenění mezi ostatní druhy skenování a poukážeme na výhody, kterými oproti ostatním skenovacími prostředkům disponuje.

Ve třetí kapitole bude proveden popis základních principů, technologií a metod použitých v laserovém skenování.

Čtvrtá kapitola se již bude zabývat samotným procesem propojení laserového skenování s letectvím.

V páté kapitole se blíže zaměříme na konkrétní možnost propojení laserového skenování s letectvím a s přesnými mapami tak, aby mohlo být zajištěno přistávání vrtulníků v terénu za podmínek snížené viditelnosti.

Cílem této práce je podat obraz o současných možnostech laserového skenování, předvést možnosti propojení laserového skenování s letectvím a poukázat na možnost využití laserové skenování k přistání v terénu za podmínek snížené viditelnosti, spolu s přesnými mapami.

## 2. Laserové skenování

V mnoha technických oborech i každodenním životě se setkáváme s tím, že chceme získat informace o poloze, tvaru a rozložení objektů kolem nás. Tyto informace by měly být pokud možno co nejpřesnější, spolehlivé, jednoznačné a rychlé pro zpracování. Dále také chceme tyto informace uchovávat a mít možnost je dále zpracovat. V mnoha aplikacích také chceme získávat polohy bodů, které nám nejsou přístupné, případně chceme zjistit nebo ověřit jejich existenci. Těmto požadavkům vyhovují právě systémy laserového skenování.

Každý objekt si lze představit složený z bodů a systémy laserového skenování získávají výše zmíněné informace jako souřadnice bodů na povrchu tělesa v určité souřadné soustavě. Měření v dnešní době probíhá nejčastěji polární metodou, která spočívá v určení vzdálenosti bodů pomocí laserového paprsku a měřením dvou úhlů určujících směr vysílaného paprsku. Souřadnice jsou pak ukládány a je možno z nich pomocí vhodného programu vytvořit digitální model skenovaného objektu.

Obecně pro tvorbu 3 D modelů objektů existuje celá řada různých alternativ k systémům laserového skenování, jejichž vlastnosti jsou k našim požadavkům méně či více vhodné. Cílem této kapitoly tedy bude uvedení základních principů funkce skenovacích systémů a důvody proč je pro naše účely vhodné použít právě systém laserového skenování.

### 2.1 Prostor

K tomu abychom vůbec mohli začít uvažovat o tom, že chceme určovat polohu a tvar okolních objektů je potřeba obecně popsat prostor ve kterém se nacházíme. Pro další úvahy tedy vycházím z toho, že se nacházíme v prostoru, kde polohu každého bodu můžeme popsat třemi nezávislými souřadnicemi, tedy v třírozměrném světě, jak poprvé uvedl René Descartes ve své Geometrii. V tomto prostoru pak můžeme sestavit soustavu souřadnic obsahující jeden pevný bod a tři lineárně nezávislé orientované úsečky. Polohu bodu pak určíme jako jeho souřadnice v dané bázi, tedy jako souřadnice orientované úsečky vzhledem k uvedené bázi, která začíná v počátku a končí v uvažovaném bodě.

## 2.2 Souřadnice bodu

Souřadnice  $a_i$  obecného vektoru  $\vec{v}$  vůči dané bázi určené vektory  $\vec{e}_i$  získáme z rovnic:

$$\vec{v} = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \vec{e}_i \quad (1)$$

Pokud je daná báze ortogonální a délka bázových vektorů je jedním metrem, tak lze na tyto rovnice nahlížet tak, že  $i$  – tá souřadnice bodu je vlastně délka v metrech kolmého průmětu příslušného vektoru do  $i$  – tého bázového vektoru neboli  $a_i = \vec{v} \cdot \vec{e}_i$ , kde tečka značí standardní skalární součin na prostoru orientovaných úseček. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že polohy bodů je možné získat běžným měřením tří délek.

## 2.3 Transformace souřadnic

Až dosud jsme pro naše úvahy vycházeli z toho, že pro polohu bodů je nutno měřit tři délky příslušející průmětům průvodičů bodů do bázových vektorů. Pokud byly tyto bázové vektory ortogonální, získali jsme pak kartézské souřadnice. V praxi je však takovéto měření často nepoužitelné, a proto je vhodné si pro určení polohy bodu v prostoru zvolit jinou trojici nezávislých parametrů, než jsou kartézské souřadnice. Pro některé aplikace nám může stačit dokonce i jeden nebo dva nezávislé parametry. Tyto nezávislé parametry pak nazýváme křivočaré souřadnice a přechod od kartézských souřadnic ke křivočarým souřadnicím nazýváme transformací souřadnic. Transformační vztah je pak dán rovnicí  $x_i = f(q_1, q_2, q_3)$ , kde  $x_i$  je  $i$ -tá kartézská souřadnice a  $q_i$  jsou křivočaré souřadnice.

Nás bude nejvíce zajímat transformace od kartézských souřadnic ke sférickým souřadnicím, protože je jimi určená polární metoda výpočtu polohy bodu při laserovém skenování.

$$\begin{aligned} x_1 &= r \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\theta) \\ x_2 &= r \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\theta) \\ x_3 &= r \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

,kde  $r$  je přímá vzdálenost,  $\varphi$  a  $\theta$  jsou souřadné úhly.

## 2.4 Metody určení souřadnic bodu

V předchozím odstavci bylo ukázáno, že určení polohy bodu lze převést na měření vhodně zvolených délek a úhlů.

Polohy bodů tak lze určit mnoha různými způsoby. Všechny tyto metody použité u skenerů lze rozdělit do dvou skupin, a to na kontaktní a bezkontaktní.

### **2.4.1 Kontaktní skenování objektů**

V tomto případě jsou ke skenovanému objektu přikládána mechanická zařízení, ze kterých je možno odečíst polohu daného bodu. Pro měření objektů menších rozměrů to může být například robotické rameno, kde se poloha bodu určí ze vzájemné polohy části ramen pomocí různých polohových čidel. Pro větší objekty jako místnosti, budovy nebo terén už je zapotřebí metod založených na určení směru v jakém je měřený bod od počátku a přímého změření vzdálenosti ležící mezi počátečním a koncovým bodem. K tomuto účelu jsou pak použita pásma, latě nebo invariové dráty.

Kontaktní metody našly své uplatnění ve strojírenství při skenování různých menších součástí. Získání modelu větších objektů pomocí těchto metod je však značně časově náročné. Dalším problémem také je, že můžeme měřit polohu pouze těch bodů, které jsou přístupné, případně víme, že existují.

### **2.4.2 Bezkontaktní skenování objektů**

U těchto principů se musí znovu určit směr v jakém daný bod leží. Směr se zpravidla opět určí nějakým polohovým čidlem umístěným přímo ve skenovacím zařízení. Délka se však již měří bezkontaktně pomocí různých metod nepřímého měření délek. První takováto měření byla prováděna pomocí trigonometrických vztahů, kdy ze znalosti kombinace délek a úhlů v trojúhelníku je dopočítávána požadovaná délka měřené strany.

Další možností byly optické metody, které pro své výpočty vychází z řešení pravoúhlého trojúhelníku. V praxi optické dálkoměry pracují s různými modifikacemi tohoto principu, existují tak například dálkoměry paralaktické, nitkové, dvojobrazové a analytické dalekohledy.

U všech těchto metod jsme schopni dosáhnout značné přesnosti, například pro ryskový dálkoměr je přesnost měření 1mm na 100m.

Tyto systémy ovšem rovněž nelze použít pro aplikace, kdy chceme zjistit přítomnost objektu případně je nám objekt jinak nedosažitelný. Pro tyto potřeby je nutno použít systémy pracující na principu vysílání vlastního vlnění, které se odráží od měřeného objektu a vrací se zpět na přijímací zařízení.

Vlnění, které budeme vysílat může být mechanického nebo elektromagnetického charakteru.

Všechny tyto principy jsou zpravidla založeny na dvou základních principech, které lze dělit na metody, které měří čas mezi vysláním a přijetím signálu a na metody, které vyhodnocují rozdílné fáze vysílaného a přijímaného signálu. Možnosti jejich použití v atmosférických podmínkách se značně liší, zatímco elektromagnetickými vlnami jsme schopni měřit řádově až na stovky kilometrů, tak mechanické vlnění se v atmosféře velmi rychle tlumí a prakticky se dá měřit maximálně v řádech desítek metrů. Své místo si však mechanické vlnění našlo při měření ve vodě, kde se využívá velmi malého útlumu ultrazvukových vln, zařízení pracující na tomto principu se nazývá SONAR.

## 2.5 Výhody laserových skenerů

V předchozí podkapitole jsme došli k závěru, že našim požadavkům nejvíce vyhovují systémy, které k měření vzdáleností používají elektromagnetické vlny.

To nás ovšem přivádí k problému, že vysílané vlnění se odráží od libovolného objektu, který mu stojí v cestě. Například při vyslání signálu z jednoduchého dipólu vysíláme vlnění prakticky do všech směrů a přijímaný signál se nám rovněž ze všech směrů také vrací, vyhodnocení takového signálu je pak velice obtížné. Proto je důležitým parametrem elektromagnetických dálkoměrů schopnost vyzařovat do určitého směru. Optickou soustavou jsme například schopni usměrnit světlo ze všesměrového zdroje do prostorového kužele. Výše popsaná metoda sebou v praxi přináší jisté technické problémy a proto se v praxi už nepoužívá ačkoli na jejím principu byl zkonstruován první světelný dálkoměr zvaný Bergstrandův geodimetr.

V praxi se však naprosto běžně pro měření vzdáleností užívají radiové vlny, které můžeme usměrňovat pomocí plošných antén, parabolických antén aj. do úzkého svazku až (10-100) mrad pro mikrovlny a (10-20) mrad pro milimetrové vlny. Klasickým zařízením pracujícím na tomto principu je primární radar.

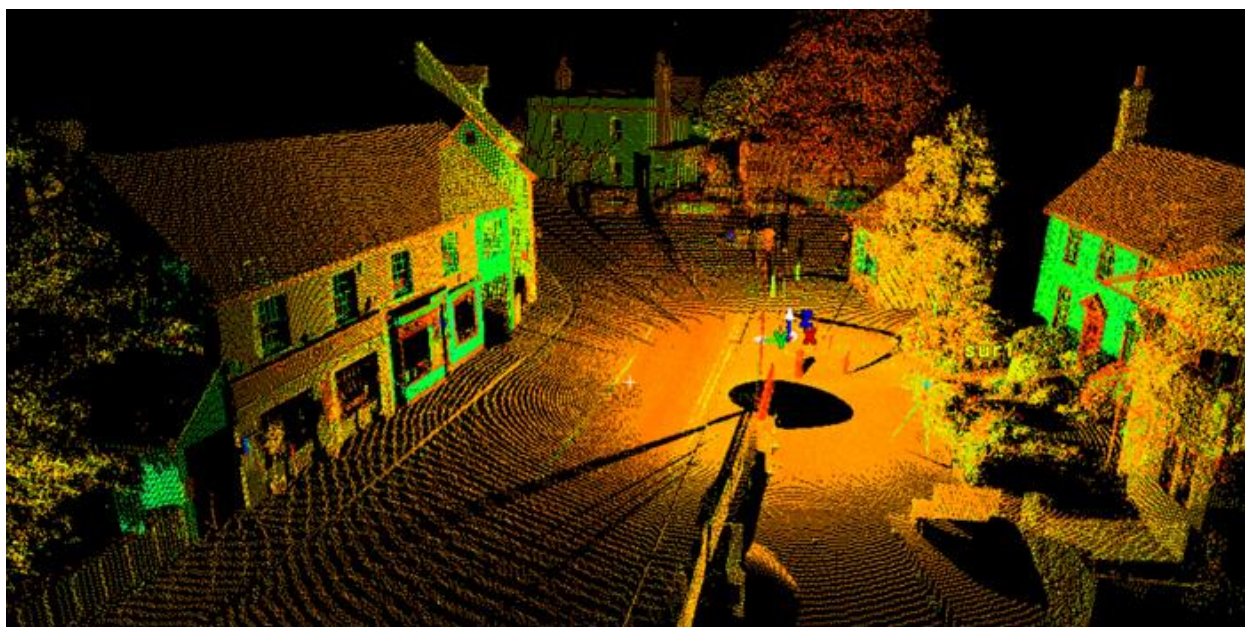
Rozlišitelnost objektů je úzce spojena s rozbíhavostí vysílaného svazku, a proto pro účely tvorby modelů okolí je vhodné mít zdroj záření o velmi malé rozbíhavosti. Nyní se tedy dostáváme k tomu, že vhodným zdrojem záření pro naše účely je laser, který dosahuje rozbíhavosti až 1 mrad. Laser pak má oproti jiným zdrojům záření další výhodné vlastnosti, jako koherentnost vysílaného záření, úzkou spektrální šířku a možnost použití vysokých výkonů. Výhodou systémů pracujících s laserovým dálkoměrem vůči klasickým radarům jsou také jejich mnohem menší rozměry a jednodušší zástavba do různých systémů. Nevýhoda těchto systémů pak vyplývá z použití velmi malých vlnových délek což má za následek větší útlum v atmosféře.

Na tomto místě je vhodné se zmínit, že za pomoci radaru se syntetickou aperturou (SAR) je možné

získat velice kvalitní modely objektů i za použití antén s relativně velkou rozbíhavostí výstupního svazku. Z důvodu použití delších vlnových délek než u laseru, stále nemají tyto systémy tak dobrou rozlišovací schopnost jako laserové skenery, ale jejich výstupy jsou velice kvalitní a velkou výhodou je nezávislost měření na atmosférických podmínkách.



Obr.1 Digitální model budovy získaný pomocí radaru SAR



Obr.2 Digitální model získaný metodou laserového skenování



## 2.6 Historie laserového skenování

První práce zabývající se možnostmi laserového skenování spadají do 60.let 20.století, tedy do doby, kdy byl vývoj a konstrukce laserů na samém počátku. Jako první se začal laser využívat jako prostředek k měření vzdáleností. První takové pokusy byly pro meteorologii, a to pro mapování oblačnosti. Dalším příkladem je pak měření vzdálenosti mezi zemí a měsícem za využití odražeče, který zde zanechalo Apollo 11. V této době však ještě nebyla technika na takové úrovni, aby bylo možné uskutečnit laserové skenování za účelem získání digitálních modelů objektů. A tak do této doby spadá jako větší úspěch například laserový výškoměr z Apolla 15. Postupem času šla však technika kupředu a v 80.letech byly na univerzitách v USA, Německu a dalších učiněny velké pokroky v této oblasti a byla prováděna první laboratorní laserová skenování.

V 90.letech již byly k dispozici systémy laserového skenování pro komerční využití, například od firem Leica Geosystem, Optech, IGI, Riegl, Toposys aj.



Obr.3 Totální stanice s laserovým skenerem Leica geosystem



Obr.4 Sestava laserového skeneru určeného pro letecké skenování

## 2.7 Dělení systémů laserového skenování

Laserové skenery lze rozdělit podle celé řady hledisek. Mezi nejzákladnější lze považovat následující.

Umístění skeneru při skenování:

- kinematické
- statické

Principu měření vzdálenosti:

- tranzitní čas
- fázový rozdíl
- triangulační metody

Dosahu:

- s velmi krátkým dosahem (0,1 m až 2,0 m)
- s krátkým dosahem (2 m až 10 m)
- se středním dosahem (10 m až 100 m)
- s dlouhým dosahem (100 m a více)

Rychlosti skenování:

- s velmi vysokou rychlostí (více jak 100 000 bodů za sekundu)
- s vysokou rychlostí (5000 – 100 000 bodů za sekundu)
- se střední rychlostí (1000 – 5000 bodů za sekundu)
- s nízkou rychlostí (méně než 1000 bodů za sekundu)

Způsobu použití:

- Ruční
- Automatické

## **2.8 Struktura systémů laserového skenování**

Základními konstrukčními prvky systémů laserového skenování jsou: laserová jednotka, skener a kontrolní jednotka.

Laserová jednotka má za úkol vysílat a přijímat elektromagnetické záření. Její součástí tvoří laser, kterým je v praxi nejčastěji polovodičová dioda, případně u výkonnějších systémů je použito pevných látkových Nd:Yag nebo rubínových laserů. Další součástí je detektor, kterým je světlo citlivá dioda spektrálně synchronizovaná na stejnou vlnovou délku jako je vysílané záření. Součástí laserové jednotky je také optická soustava, která má za úkol kolimaci vysílaného paprsku, soustředění dopadajícího paprsku na detektor, dělení vysílaného paprsku nebo jeho nasměrování do jiného směru.

Funkcí skeneru je rozmítání paprsku vycházejícího z laserové jednotky do požadovaných směrů. K tomuto účelu je zpravidla použito rotační, oscilující zrcadlo nebo odrazný hranol. Z polohy tohoto vychylujícího prvku je pak určován směr vysílání paprsku.

Kontrolní jednotka zpracovává data, které získává z laserové jednotky, skeneru, a na jejich základě vypočítává souřadnice měřených bodů. V podstatě kontrolní jednotku tvoří výkonný počítač s vhodným softwarem. Součástí tohoto počítače také musí být velice přesné hodiny pro měření doby letu měřícího signálu. Pro různé aplikace, jako například při leteckém laserovém skenování, může být kontrolní jednotka propojena se systémy určování vlastní polohy, jako GPS nebo inerciální navigace.

### 3. Metody a technologie laserového skenování

Systém laserového skenování tvoří řada podsystémů, které jsou spolu provázány a jejichž činnost je úzce spojena. V této kapitole se pokusím vystihnout základní vlastnosti a charakteristiky prvků tohoto systému laserového skenování tak, abychom v následujících kapitolách mohli provést zhodnocení možností laserového skenování v letectví.

#### 3.1 Laser

Laser je základním stavebním kamenem systému laserového skenování a jeho funkce má zásadní dopad na vlastnosti jako je dosah a přesnost. V základním přiblížení je laser zařízení, které ve svém okolí vytváří proměnné elektromagnetické pole, které je charakteristické koherencí, úzkou spektrální šířkou a vysokou výstupní energií soustředěnou do úzkého svazku.

Funkce laseru je založena na principu zesilování optického záření procházejícího prostředím, které je vyvedeno ze stavu termodynamické rovnováhy. Aby bylo dosaženo maximálního zesílení, je potřeba udržet záření v určitém omezeném prostoru. Z výše uvedeného tedy vyplývají základní části každého laseru a to: aktivní prostředí, optický rezonátor, buzení.

##### 3.1.1 Aktivní prostředí

Aktivní prostředí tvoří soubor kvantových soustav (atomů, iontů, molekul), které jsou vyvedeny ze stavu termodynamické rovnováhy. Zesilování záření v tomto prostředí je pak založeno na kvantovém popisu interakce mezi zářením a látkou. Pro tento popis je vhodné uvažovat záření jako proud částic s nulovou klidovou hmotností - fotonů, nesoucích energii rovnající se součinu Planckovy konstanty a frekvence daného záření.

Vázaná kvantová soustava se může nacházet jen v určitých diskrétních energetických stavech a přechod mezi těmito stavy může proběhnout pouze tak, že je soustavě dodána energie rovnající se rozdílu energií těchto stavů. Interakce mezi látkou a zářením pak probíhá tak, že kvantová soustava může absorbovat foton o vhodné vlnové délce a tím se sama soustava dostane do stavu s vyšší energií, foton v tomto případě zanikne. Po uplynutí určité doby zvané doba životnosti se soustava samovolně vrací do původního stavu, přičemž vyzáří foton náhodným směrem s náhodnou fází. Tento jev se nazývá spontánní emise. Pokud je kvantová soustava nacházející se ve vzbuzeném stavu

vystavena dalšímu fotonu, je tento foton absorbován a soustava opět přechází do původního stavu. V tomto případě jsou však při přechodu do původního stavu vyzářeny dva fotony stejným směrem a fází, jakou měl původní foton.

Za stavu termodynamické rovnováhy se obsazení energetických hladin kvantových soustav řídí Boltzmanovým rozdělením. Pokud prochází záření takovouto látkou, tak počet spontánně vyzářených fotonů převažuje nad fotony vyzářenými stimulovaně a záření se tak zeslabuje. Pokud se však podaří narušit termodynamickou rovnováhu a tím dosáhnout většího obsazení hladin s vyšší energií tak stimulovaná emise převáží nad spontánní a látka bude záření zesilovat. Tento stav se nazývá inverzí populací hladin.

Podle druhu použití aktivního prostředí lze lasery dělit na – pevnolátkové, plynové, kapalinové, plazmatické, polovodičové.

### **3.1.2 Optický rezonátor**

Toto zařízení je schopné po určitou dobu uchovávat a hromadit energii optického záření v určitém omezeném prostoru. V principu jej tvoří dvě zrcadla, z nichž jedno je totálně odrazné a druhé polopropustné. V laseru je pak mezi tato zrcadla vloženo aktivní prostředí. Pomocí zrcadel je do aktivního prostředí vraceno stále více fotonů ve směru podélné osy optického rezonátoru, které pak v aktivním prostředí vybudí pomocí stimulované emise další fotony ve směru podélné osy. Pokud by neexistovaly ztráty, tak by mohla energie uvnitř rezonátoru růst nade všechny meze. Díky ztrátám, které jsou způsobeny únikem energie okolo zrcadel, útlumu v prostoru mezi zrcadly a nedokonalou odrazivostí zrcadel, se výsledné elektromagnetické pole uvnitř rezonátoru ustálí na jedné hodnotě, kolem které dále fluktuuje.

### **3.1.3 Buzení**

Každá izolovaná soustava částic setrvává ve stavu, kdy jsou všechny stavové veličiny v čase konstantní a je-li z tohoto stavu vyvedena, tak se do ní po uplynutí určitého doby zvané relaxační doba, samovolně vrací. K tomu abychom získali soubor částic ve stavu termodynamické nerovnováhy, je zapotřebí na látku kontinuálně z vnějšku působit.

Podle toho, jak na látku působíme, můžeme buzení a lasery rozdělit na systémy s buzením: optickým, chemickým, elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, elektrickým proudem, rekombinačním nebo expanzí stlačeného plynu.

### 3.1.4 Výstup z laseru

Výstupem z laseru je optické záření, které může být popsáno jako elektromagnetické vlnění o dané vlnové délce, charakteristické podle použitého aktivního prostředí nebo jako proud částic vystupujících z laseru – fotonů. Vzhledem k malé vlnové délce optického záření, která je (1-10)  $\mu\text{m}$  je pro popis výstupu laseru výhodnější využit částicový popis.

Polopropustným zrcadlem optického rezonátoru vystupuje do prostoru svazek záření. Geometrické charakteristiky a prostorové uspořádání součástí laseru definuje šířku tohoto výstupního svazku.

Ne všechny fotony se šíří přímo ve směru osy optického rezonátoru, a tak se postupně tato šířka svazku zvětšuje. Veličinou vystihující tuto skutečnost je divergence (úhlová rozbíhavost) paprsku. Nejmenší rozbíhavosti je dosaženo v pevnolátkových laserech 1 mrad. Naopak pro polovodičové lasery je tato rozbíhavost největší a může se pohybovat až v řádu několika stupňů.

Plošná hustota výkonu neboli intenzita záření není podél průřezu svazku konstantní, ale je určena Gaussovou křivkou, mluví se pak o Gaussovu svazku.

Každou plochou zasahující do svazku záření prochází určitá energie a její derivací podle času je výkon záření dopadající na tuto plochu. Podle časové závislosti tohoto výkonu na výstupu z laseru, lze lasery dále dělit. Pokud je výkon na výstupu v čase konstantní, případně se jeho velikost pozvolna mění v čase a celý tento jev probíhá v řádu sekund tak mluvíme o laserech pracujících v kontinuálním režimu. Doba trvání emitování záření však může být až v řádu pikosekund až femtosekund. Pak se jedná o lasery pracující v pulzním režimu. Ke generaci mikrosekundových pulzů se používá časová závislost buzení, pro pikosekundové pulzy se je využíváno Q-spínání a pro femtosekundové pulzy metoda synchronizace modů.

Pro lasery pracující v kontinuálním režimu, může být dosaženo výstupního výkonu až v řádu několika stovek wattů, například pevnolátkový laser s aktivním prostředí Nd:Yag až 100W. Lasery pracující v pulzním režimu dosahují vysokých špičkových výkonů až v řádu MW. Celková energie vyzářená v jednom pulzu je pak jen několik joulů. Například pro pevnolátkový rubínový laser je v jednom pulzu trvajícím ( $10^{-7} - 10^{-9}$ )s vyzářena celková energie o velikosti do 5 J.

### 3.1.5 Bezpečnost práce s lasery

Schopnost laseru vysílat vysoce směrované záření o velké energii sebou nese i nebezpečí pro lidskou tkáň. Největší riziko pak přináší pro lidské oko a lidskou kůži. Při posuzování úrovně nebezpečnosti laseru se musí vycházet z použité vlnové délky, výkonu nebo celkové vyzářené energie, dobou ozáření a šířkou výstupního svazku.

Podle účinku záření na lidskou tkáň můžeme lasery rozdělit do čtyř tříd. Pouze u první třídy je zaručena bezpečnost lidského zraku při přímém pohledu do svazku. Lasery použité u systému laserového skenování, kde není vyloučena přítomnost osob ve skenované oblasti, musí náležet do první třídy. Případně je nutné udat minimální vzdálenost, ve které se může nacházet osoba, aby pro ni bylo emitované záření bezpečné.

Třída	Vlnová délka [nm]	Trvání [s]	Výkon/energie
I.	630 (He-Ne)	$10 < \tau < 10^4$	$P = 3 \cdot 10^{-7} \text{ W}$ $E = 3 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
II.	514,5 (argon) 630 (He-Ne)	$t > 2, 5 \cdot 10^{-1}$ kontinuál.	$P = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ $P = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W}$
III.a	630 (He-Ne)	kontinuál.	$1 \cdot 10^{-3} < P < 5 \cdot 10^{-3}$
III.b	530 (Nd:YAG, 2harm.)	$1 \cdot 10^{-4}$	$E = 0,6 \text{ J}$
		$1 \cdot 10^{-8}$	$E = 3 \cdot 10^{-2} \text{ J}$
	694 (rubín)	$1 \cdot 10^{-3}$	$E = 1, 2 \text{ J}$
		$1 \cdot 10^{-8}$	$E = 3 \cdot 10^{-2}$
		$1 \cdot 10^{-4}$	$E = 2 \text{ J}$
1060 (Nd:YAG)	$1 \cdot 10^{-8}$	$E = 1 \cdot 10^{-1} \text{ J}$	
IV.	vše nad výše uvedené hodnoty pro III.b třídu		

Tab.1 Příklady nejvyšších přípustných hodnot záření

### 3.2 Principy měření vzdáleností

Metody měření vzdáleností pomocí laseru lze rozdělit do tří základních skupin:

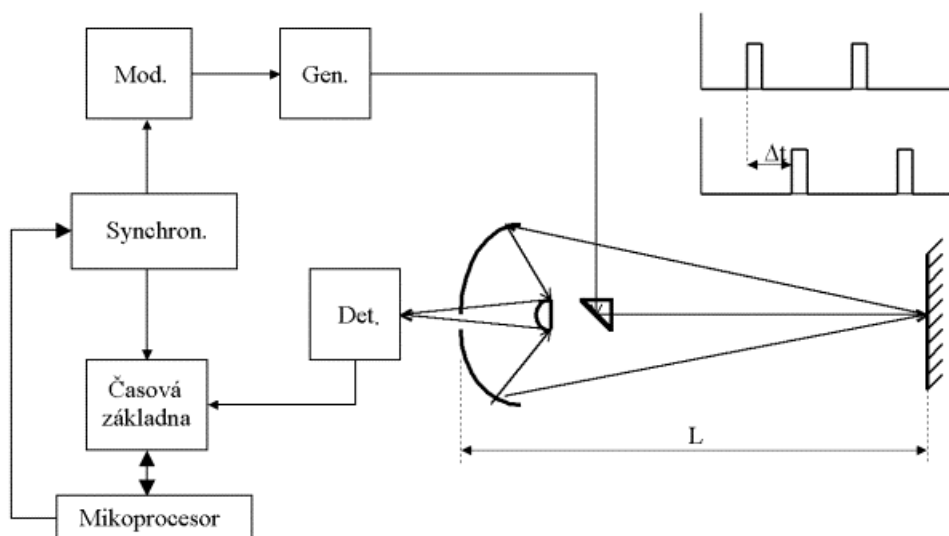
- impulsní systémy
- fázové systémy
- triangulační systémy

### 3.2.1 Impulsní systémy

U těchto systémů je výstupem z laseru krátký pulz záření, který se šíří k objektu, jehož vzdálenost chceme určit. Od tohoto objektu se následně odráží a dopadá na detektor. Z času, který uběhl mezi vysláním a přijetím pulzu, se pak vypočítá vzdálenost ležící mezi dálkoměrem a měřeným objektem. Výpočet pak vychází ze vzorce:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (3)$$

kde  $d$  je měřená vzdálenost,  $c$  je rychlost světla v daném prostředí,  $t$  je tranzitní čas.



Obr.5 Schéma impulsního systému

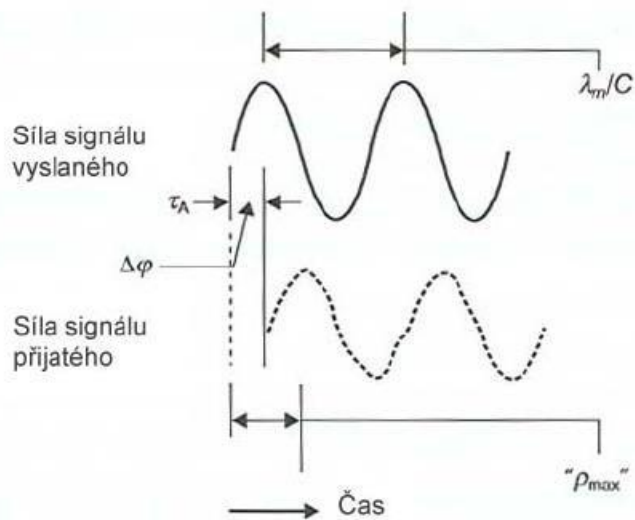
### 3.2.2 Fázové systémy

V těchto systémech je výstupem z laseru záření, které má harmonický charakter. Vzdálenost se pak určí ze znalosti počtu proběhlých period a fázovým rozdílem mezi vyslaným a přijatým signálem. Výpočet pak vychází ze vzorce:

$$d = \frac{c}{2} \cdot \left( \frac{\varphi}{2\pi} T + nT \right) \quad (4)$$

,kde  $d$  je měřená vzdálenost,  $c$  je rychlost světla v daném prostředí,  $T$  je perioda modulace,  $\varphi$  je fázový posun.

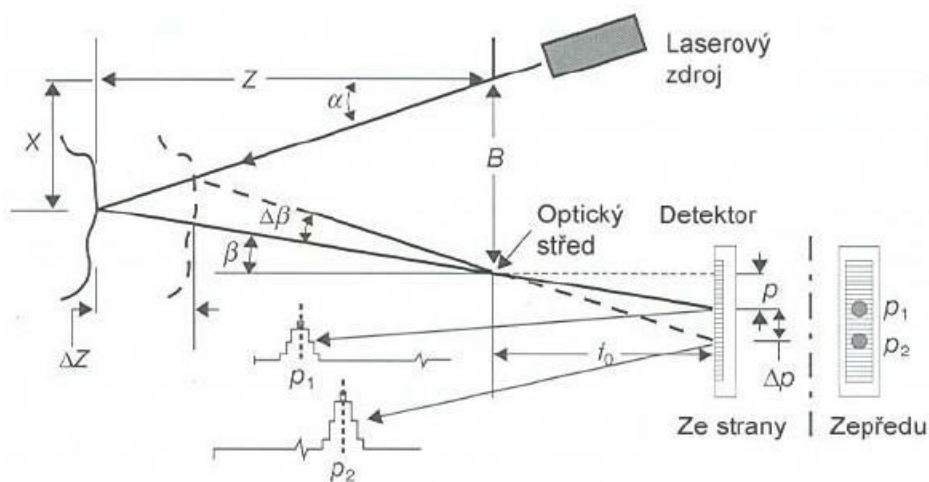




Obr.6 Princip fázového systému pro měření vzdálenosti

### 3.2.3 Triangulační metody

Tyto systémy používají k měření vzdálenosti toho, že pokud se paprsek odráží od detekovaného objektu pod jednotným úhlem, je vzdálenost dopadu odraženého paprsku na plochu senzoru úměrná vzdálenosti detekovaného objektu. Díky tomu se pro vyhodnocení vzdálenosti objektu nevyužívá doba letu paprsku ale místo, kam odražený paprsek na snímači dopadl.



Obr.7 Princip triangulační metody měření vzdálenosti

### 3.2.4 Použití v systémech laserového skenování

V současných systémech laserového skenování se pro skenování probíhající řádově na stovky metrů nejčastěji používají impulsní systémy, jejichž dosah může být až několik km při použití výkonných laserů, při této vzdálenosti se nepřesnost určení vzdálenosti pohybuje kolem 0,15m. S klesající vzdáleností se bude postupně snižovat i nepřesnost určení vzdálenosti, která může být při 400m přibližně 0,05m. V některých skenovacích systémech se používají dálkoměry na principu fázových systému, jejichž vlastnosti jsou v podstatě srovnatelné s impulsními. Rozdíl nastává hlavně v omezenějším dosahu, protože pro správné vyhodnocení vzdálenosti je nutné přijímat kvalitní signál. Systémy využívající triangulační metody se na větší vzdálenosti nepoužívají, jejich význam je hlavně v měření velmi malých vzdáleností maximálně do 25 m.

### 3.3 Detekce záření

Schopnost detekovat optické záření je v systémech laserového skenování zásadní. Vzhledem k použití vlnových délek v řádech stovek nm je nutné k detekci využít nepřímých metod. Detekce tak probíhá přeměnou energie obsažené v záření na energii tepelnou, elektrickou nebo chemickou. V současných systémech laserového skenování se používají výhradně fotoelektrické systémy, konkrétně pak nejčastěji fotodiody.

Pro účely poslední kapitoly je vhodné na tomto místě zavést základní parametry popisující detektory optického záření.

#### 3.3.1 Detektivita

Pro činnost detektoru je důležité, jaký minimální signál je ještě schopný rozpoznat. Velikost tohoto signálu je pak dána šumem detektoru. Veličina, která vystihuje tuto skutečnost je právě detektivita.

Definovaná vztahem:

$$P_{min} = \frac{\sqrt{\Delta f}}{D} \quad (5)$$

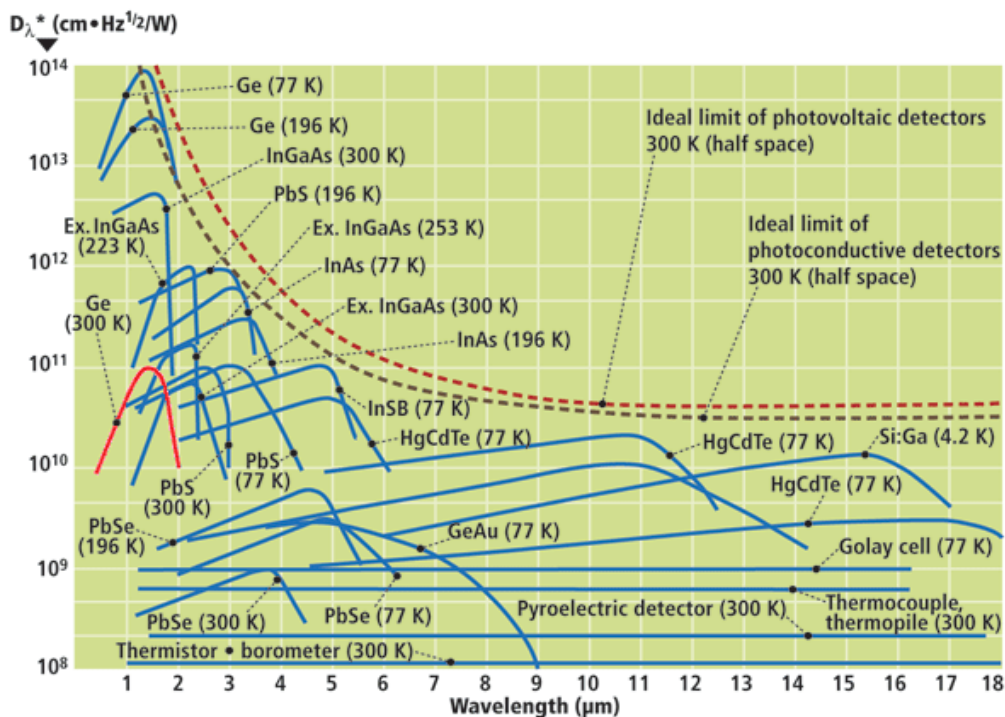
, kde  $\Delta f$  je šířka frekvenčního pásma detektoru,  $D$  – detektivita,  $P_{min}$  – minimální detekovaný optický výkon.

U plošných detektorů je šum závislý i na velikosti plochy detektoru, proto se zavádí veličina normovaná detektivita vztahem:

$$P_{min} = \frac{\sqrt{\Delta f S}}{D_n} \quad (6)$$

, kde S značí plochu detektoru a  $D_n$  normovanou detektivitu.

Nejlepší tepelné detektory dosahují detektivitu v rozmezí  $(10^{10} - 10^{11})W^{-1}Hz^{1/2}$ . Elektrické detektory pak dosahují detektivitu až  $10^{15}W^{-1}Hz^{1/2}$ .



Obr.8 Závislost měrné detektivitu na vlnové délce pro různé detektory

### 3.3.2 Spektrální citlivost

Detektivita detektorů se liší podle dopadající vlnové délky záření. Pokud je citlivost detektorů konstantní pro široké pásmo vlnových délek, pak se detektory nazývají neselektivní. Je-li tomu naopak, tak se jedná o detektory selektivní.

### 3.3.3 Časová odezva

Tento parametr vystihuje časový interval, za který se změní výstupní signál po skokové změně dopadající intenzity záření. V praxi tak bývá označován časový interval za který výstupní signál dosáhne hodnoty  $(1 - 1/e)$  násobku maximální hodnoty. Časová odezva může být u nejjednodušších tepelných detektorů až několika sekund, naopak pro elektrické foto detektory je časová odezva kolem  $(10^{-9} - 10^{-10})s$ .

### 3.4 Zpracování detekovaného signálu

Podle principu, jakým je přijímaný signál vyhodnocován, lze systémy rozdělit na:

1. Klasickou detekci signálu
2. Spojitou detekci signálu

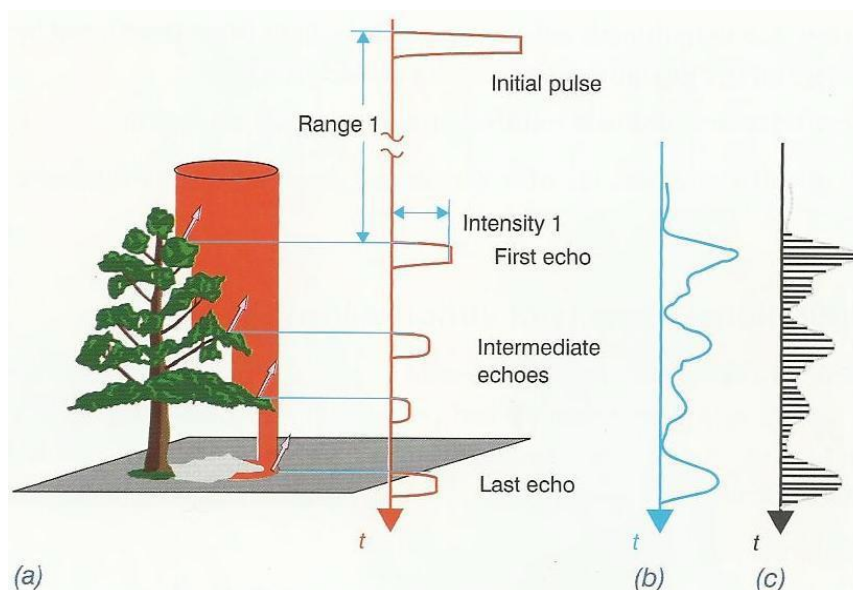
#### 3.4.1 Klasická detekce signálu

Obecně úkolem detektoru je zaznamenat dopadající signál, aby při jeho přijetí byla zastavena časomíra a z uběhlého času mezi vysláním a přijetím signálu byla vypočtena vzdálenost. Klasická detekce signálu tedy z dopadajícího signálu vybere jeden význačný bod, který použije jako značku k zastavení časomíry.

Postupem času nebyl zaznamenáván jen jeden bod, ale mohlo jich být více. Tímto způsobem se tak dá zjistit charakter povrchu, od kterého se svazek odrazil. Princip funkce je patrný z obrázku č.9.

#### 3.4.2 Spojitá detekce signálu

Tato metoda je vlastně logický postup, jakým se mohlo laserové skenování ubírat, kdy od detekce jednotlivých odrazů se došlo k vyhodnocování celého přijímaného signálu. Tyto systémy se většinou označují jako FW (Full Waveform). Pomocí těchto systému se pak dají určit bližší informace o objektu od kterého se paprsek odrazil. Princip funkce je znovu patrný z obrázku č.9.



Obr.9 Princip klasických a spojitých metod detekce signálu

### 3.5 Energetická bilance laserového dálkoměru

Během měření vysíláme puls, který se šíří daným prostředím, odráží se od cíle a vrací se zpět. Abychom mohli něco změřit, je nutné, aby dopadající výkon záření na detektor překonal určitou minimální hranici, tak aby signál nezanikl v šumu. Tento dopadající výkon je pak významně ovlivněn vlastnostmi atmosféry, cíle a laserové jednotky. Rozhodnout, v jaké vzdálenosti jsme ještě schopni měřit a případně jaký výkon záření dopadající na detektor můžeme očekávat, je důležitý pro laserové dálkoměry a současně tedy pro systémy laserové skenování.

Rovnice určující dopadající výkon na plochu detektoru má tvar:

$$P = P_0 \delta e^{-2(\alpha_{abs} + \alpha_{scat})L} t_1 t_2 \frac{d_{cil}^2 d^2}{8L^2 (d_0 + \theta L)^2} \quad (7)$$

kde  $P_0$  je výstupní výkon,  $\delta$  je difuzní odrazivost cíle,  $t_1$  resp.  $t_2$  je útlum vysílací, resp. přijímací optiky,  $L$  je vzdálenost cíle,  $\alpha_{abs}$  je útlum absorbcí,  $\alpha_{scat}$  je útlum rozptylem,  $d_0$  je průměr výstupního svazku,  $d_{cil}$  je průměr stopy svazku na cíli,  $d$  je průměr přijímací optiky,  $\theta$  je divergence svazku.

V některých případech, kdy se celá stopa svazku nachází na cíli a průměr výstupního svazku lze vzhledem k ostatním členům zanedbat lze rovnice (5) zjednodušit do tvaru:

$$P = P_0 \delta e^{-2(\alpha_{abs} + \alpha_{scat})L} t_1 t_2 \frac{d^2}{8L^2} \quad (8)$$

,kde význam použitých veličin je stejný jako v předchozím případě.

Těmito rovnicemi se budeme blíže zabývat v kapitole č.4.

### 3.6 Vychylovací soustavy

Z principu činnosti laserového skenování vyplývá potřeba rozmítání laserové paprsku do různých směrů. K tomuto účelu se pak nejčastěji využívají různé odrazné prvky jako zrcadla, hranoly nebo svazky optických vláken. Rozmítání paprsku může být rovněž zajištěno pohybem celého laserového skeneru. V literatuře se často místo pojmu vychylovací soustava užívá označení skener.

Konstrukce vychylovacích soustav je specifická podle aplikace laserového skenování a může v sobě obsahovat různé kombinace těchto základních principů. Pro účely dalších kapitol tak budou zmíněny druhy vychylovacích soustav používané v současné době pro letecké laserového skenování. Společným rysem všech těchto vychylovacích soustav je využití relativní rychlosti letadla nesoucího skener a skenovaného povrchu.

Podle základních principů lze vychylovací soustavy rozdělit na: skenery s rotačním odrazným prvkem, oscilujícím odrazným prvkem, eliptický skener a skener s optickými vlákny.

### **3.6.1 Skenery s rotačním odrazným prvkem**

V tomto případě se pro vychylování paprsku používá zrcadlo nebo hranol, který rotuje konstantní úhlovou rychlostí a tím odráží paprsek do různých směrů. Směr, kterým je paprsek vyslán je určován z polohy elektromotoru, nebo je k zrcadlu upevněn úhlový senzor. Výhodou této konstrukce je její jednoduchost a malá chyba při měření polohy zrcadla. Nevýhodou však je, že při rotaci zrcadla je paprsek po určitou dobu vychylován do směrů mimo zorné pole skeneru.

### **3.6.2 Skenery s oscilujícím odrazným prvkem**

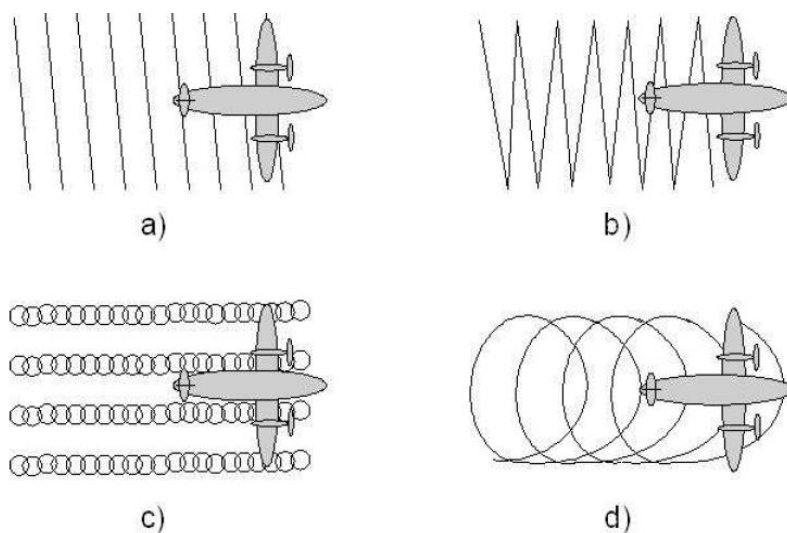
Základem této konstrukce je oscilující odrazný prvek. Výhodou této metody je, že paprsek může být směřován stále do zorného pole skeneru. Nevýhodou tohoto systému pak je, že při oscilaci dochází ke krutu hřídele, na kterém je zrcadlo umístěno. V důsledku toho se projeví chyba v určení polohy zrcadla.

### **3.6.3 Eliptický skener**

Tato vychylovací soustava se skládá ze dvou zrcadel, které vychylují paprsek takovým způsobem, že stopa paprsku na skenovaném objektu opisuje elipsu. Výhodou těchto systémů je, že každý skenovaný bod je naskenován dvakrát. Nevýhodou je pak větší složitost celého systému.

### **3.6.4 Skener se svazkem optických vláken**

V tomto typu je použito malé zrcadlo, které směřuje svazek záření do svazku optických vláken. Optickým vláknem je pak záření vedeno do různých směrů. Výhodou tohoto systému je, že obsahuje méně pohyblivých dílů. Díky tomu se pak může zvýšit rychlost snímání. Nevýhodou pak je relativně malý zorný úhel skeneru cca  $7^\circ$ .



Obr.10 Trajektorie stopy paprsku při leteckém skenování při použití odlišných typů vychylovacích soustav a) rotační odrazný prvek b) oscilující odrazný prvek c) skener se svazkem optických vláken d) eliptický skener

### 3.7 Kontrolní jednotka

Kontrolní jednotka zpracovává, řídí a propojuje laserovou jednotku se skenerem. Jsou v ní prováděny výpočty souřadnic měřených bodů a skrz ni je umožněno přesunutí dat do počítače, kde mohou být data dále zpracována.

V praxi pak také zpracovává data z GPS přijímače, tak aby mohla být naskenovaná data převedena z lokální báze do globálního souřadnicového systému. Pokud se provádí mobilní skenování pozemní nebo letecké, je kontrolní jednotka propojena rovněž i s inerciální navigací.

Důležitou součástí kontrolní jednotky jsou také přesné hodiny, pomocí kterých se měří časové intervaly doby letu pulsu. Pokud je kontrolní jednotka propojena se systémem GPS, pak jsou tyto vnitřní hodiny pravidelně synchronizovány s GPS pomocí tzv. puls per second signálů.

Podle druhu laserové skeneru pak musí tato kontrolní jednotka zpracovávat až více než 1 000 000 bodů/s.

### 3.8 Geometrický základ laserového skenování

Obecně se při určování polohy bodu souřadnice bodu vztahují vůči souřadné soustavě, která je pevně spojená se samotným skenerem. Takto získané souřadnice bodů nejsou vztaženy k nějakému specifickému bodu v prostoru a takovéto skenování se uplatní například při skenování interiérů budov nebo strojních součástí.

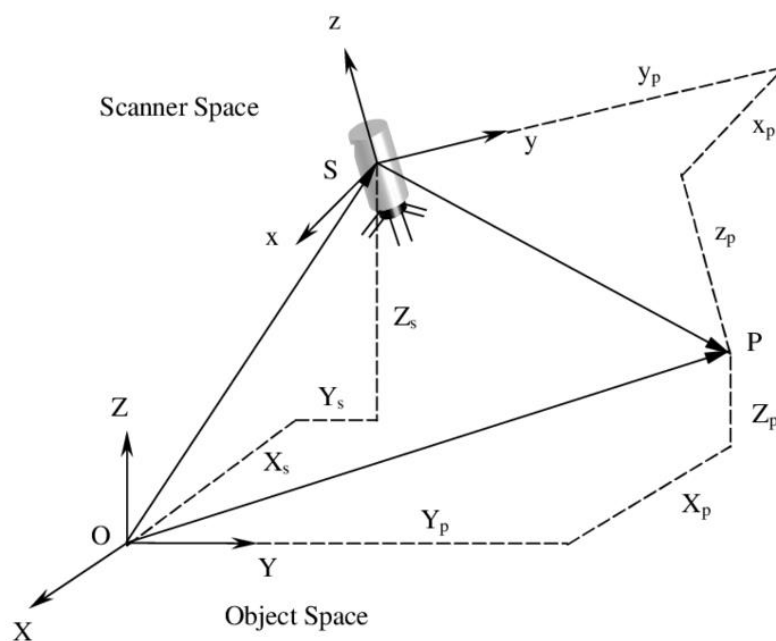
Při mnoho aplikacích a zejména pak například při tvorbě digitálních modelů terénu je nutné, aby

výstupem z laserového skeneru bylo mračno bodů, jejichž souřadnice jsou určeny k nějakému globálnímu souřadnému systému. Globální souřadnou soustavou zde může být například souřadná soustava WGS 84.

Vztah mezi jednotlivými veličinami je následující:

$$r_i = r'_i + A_{ik}r_k^S \quad (9)$$

, kde  $r_i$  jsou souřadnice bodu v globální souřadné soustavě,  $r'_i$  - souřadnice skeneru v globální souřadné soustavě,  $A_{ik}$  - matice rotace od báze spojené se skenerem ke globální bázi,  $r_k^S$  - souřadnice bodů v souřadné soustavě pevně spojené s laserovým skenerem.



Obr.11 Geometrie laserového skenování

Z využití polární metody určování souřadnic skenovaných bodů pak vyplývá:

$$r^S = (r\sin(\theta)\cos(\gamma), r\sin(\theta)\sin(\gamma), r\cos(\theta)) \quad (10)$$

, kde  $r$  je přímá vzdálenost,  $\theta$  a  $\gamma$  jsou souřadné úhly.



### 3.9 Zpracování dat laserového skenování

Výstupem z kontrolní jednotky laserového skeneru je množina bodů, která jsou popsány jejich kartézskými souřadnicemi. Zpracování těchto bodů probíhá v několika krocích, kterými jsou:

- Vizualizace
- Filtrace
- Klasifikace

#### 3.9.1 Vizualizace naskenovaných dat

Tato část zpracování je určena k prezentaci výstupu z kontrolní jednotky v určitém grafickém rozhraní. Výsledek laserového skenování tak může být prezentován jako: mračno bodů, oktalový strom, K-D strom nebo se může použít segmentace objektů.

##### 3.9.1.1 Mračno bodů

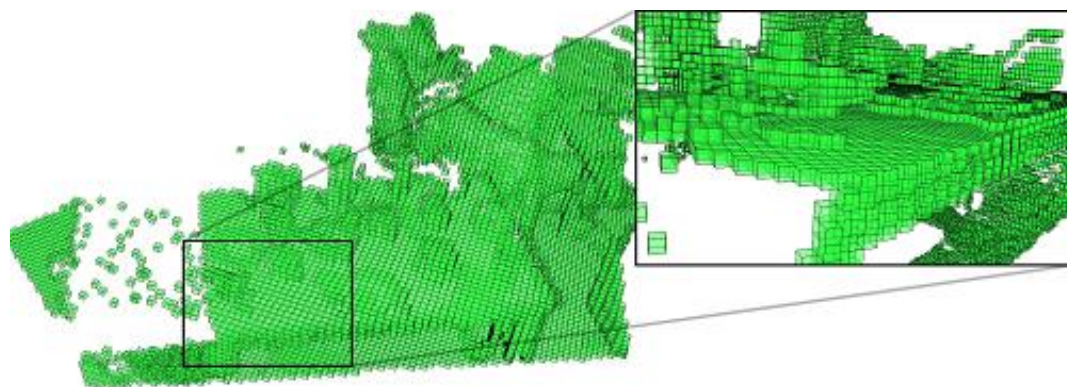
Jedná se o nejjednodušší znázornění naskenovaných dat, které zobrazí body pomocí jejich souřadnic do trojrozměrné souřadné soustavy. Může se jednat o konečný výstup nebo může být použito pro další zpracování. Z těchto dat lze získat polohu jednotlivých bodů v prostoru a vzdálenost mezi nimi.



Obr.12 Mračno bodů

### 3.9.1.2 Oktalový strom

Samotné mračno bodů může být nepřehledné, a proto jsou snahy o zjednodušení prezentovaných dat. Oktalový strom je tedy algoritmus, který z mračna bodů vytvoří zjednodušený model. Průběh tohoto algoritmus si lze zjednodušeně představit tak, že se celý prostor obsahující body vloží do krychle nazývajících se uzly. Tento uzel je pak dále dělen pomocí tří kolmých rovin na další uzly. Pokud uzel vzniklý po dělení neobsahuje žádný bod, označí se za listový a dále se nedělí. Ostatní buňky jsou děleny až do okamžiku, kdy je dosaženo předem definované délky strany buňky.



Obr.13 Oktalový strom

### 3.9.1.3 K-D strom

V tomto případě se jedná opět o algoritmus určený pro zjednodušení a zpřehlednění výstupních dat. Naskenované body se opět vloží do krychle. Tato krychle je následně řezy dělena na prostorové elementy takovým způsobem, aby se v každém tomto elementu nacházel právě jeden bod.

### 3.9.1.4 Segmentace objektů

Principem této metody zpracování je propojení vhodné množiny bodů do různých geometrických tvarů, jako krychle, kvádr, koule aj. Výsledný výstup je pak celý vytvořený z těchto geometrických tvarů. Výhodou tohoto způsobu zpracování je lepší čitelnost a srozumitelnost výstupních dat pro člověka.

## 3.9.2 Filtrace

Výstupem z laserového skenování je obecně mračno bodů, které je určeno pro další analýzu. V praxi nás ovšem nemusí zajímat celé toto mračno bodů, ale jen jeho určitá část. Zejména se tento problém objevuje v případě leteckého nebo terestriálního laserového skenování za účelem získání modelu terénu, kdy je potřeba z naskenovaných bodů odebrat ty, které vznikli odrazem od budov nebo vegetace.

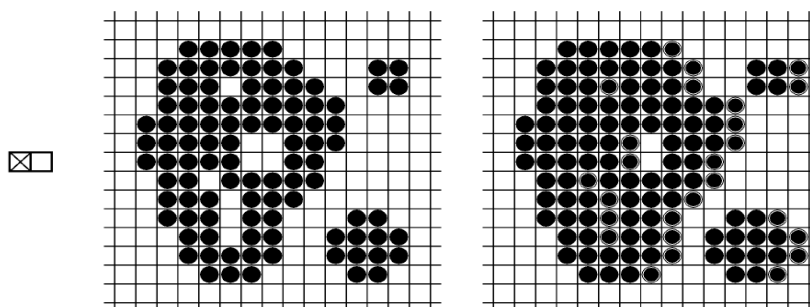
Pro všechny systémy laserového skenování jsou společné filtry založené na morfologické filtraci, dalších metod filtrací je celá řada lišících se jak provedením, tak i principem funkce. V této kapitole tak bude navíc uvedena jen filtrace týkající se přímo leteckého skenování, a to konkrétně filtrace založená na porovnávání sklonu.

### 3.9.2.1 Morfologické filtry

Tyto filtry jsou založeny na základních morfologických operátorech, kterými jsou dilatace a eroze. Další možností jsou jejich kombinace, čímž dostáváme otevření a uzavření. Pomocí těchto filtrů pak můžeme rekonstruovat a extrahovat z mračna bodů požadované objekty. Princip funkce je založen na vytvoření strukturálního elementu, kterým se postupně prochází celý prostor naskenovaných bodů. Na vlastnostech zvoleného elementu neboli masky pak výrazně závisí celý výsledek filtrace.

#### Dilatace

Operátor dilatace při aplikaci na data zvětšuje a vyhlazuje objekty, zaplňuje díry a dutiny v objektu. Princip funkce tohoto filtru je znázorněn na následujícím obrázku 14. .

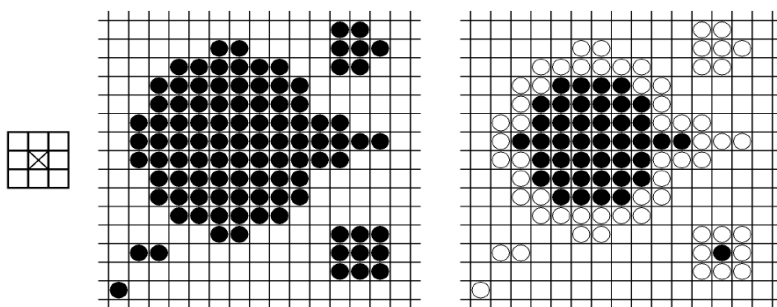


Obr.14 Princip funkce operátoru dilatace

Zde je situace znázorněna pro dvoudimenzionální případ, pro tři dimenze je postup analogický. Na každé políčko obrazu a masky (nacházející se vlevo) se díváme jako na prvek matice. Hlavní bod masky je označen křížkem. Tento hlavní bod spolu s celou maskou je pak postupně přikládán na prvky matice. Pokud se po přiložení na matici pod libovolným prvkem masky objeví objekt (prvek označený černou barvou) je označen černou barvou bod pod hlavním prvkem masky.

#### Eroze

Tento operátor při aplikaci na data odstraní úzké a malé bodové objekty. Velikost strukturálního elementu zde ovlivňuje maximální velikost objektů, které jsou celé vymazány a velikost zmenšení ostatních objektů. Princip funkce je znázorněn na následujícím obrázku 15. .

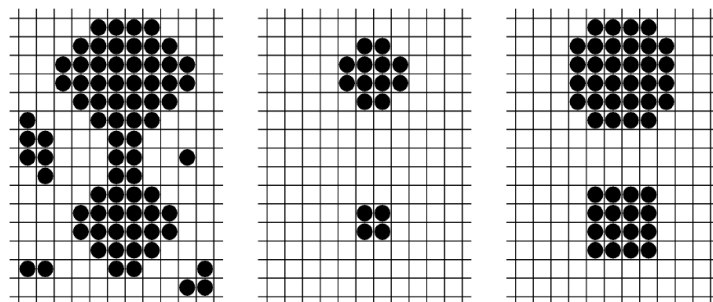


Obr.15 Princi funkce operátoru eroze

Hlavní prvek masky spolu s maskou je zde opět postupně přikládán na prvky matice reprezentující obraz. Prvek matice nacházející se pod hlavním prvkem masky je označen bílou barvou, pokud se pod alespoň jedním prvkem masky nenachází objekt.

## Otevření

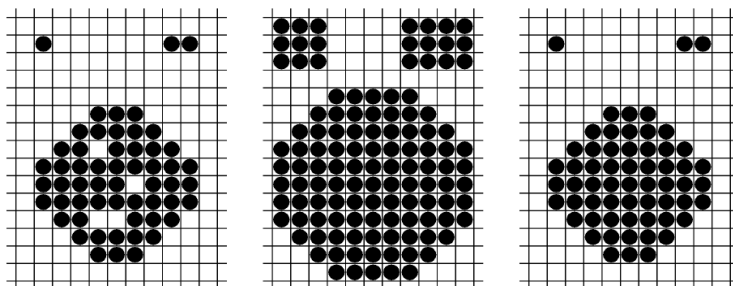
Jedná se o postupnou aplikaci již zmíněných operátorů, a to v pořadí první eroze a druhá dilatace. Tento operátor při aplikaci na data vede k oddělení blízkých objektů, které by jinak mohli být považovány za jeden. Funkce tohoto operátoru je na obrázku 16. .



Obr.16 Princi funkce operátoru otevření za použití masky o rozměru 3x3

## Uzavření

Jedná se o filtraci podobnou otevření ovšem v opačném pořadí dílčích operátorů. První je zde dilatace následovaná erozí. Po aplikaci tohoto operátoru jsou zaplněny dutiny a díry v objektu pomocí dilatace a následně jsou objekty díky erozi navraceny do přibližně stejné velikosti. Průběh této filtrace je na obrázku 17. .



Obr.17 Princip funkce operátoru uzavření za použití masky o rozměru 3x3

### 3.9.2.2 Filtry založené na porovnávání sklonu

Tato metoda se používá při vytváření digitálních modelů terénu pomocí leteckého laserového skenování. V tomto případě se pro určení toho, zda bod leží na terénu vychází z porovnávání jeho horizontálních a vertikálních vzdáleností s jeho sousedními body. Z těchto vzdáleností je pak určen sklon spojnice vyhodnocovaného a sousedního bodu. Pokud je sklon spojnice menší než předem definovaná mez, vyhodnotí se bod jako ležící na terénu.

Určitou analogií je proložení bodů plochou (rovinou, spline) a hledání maximálních sklonů na této ploše. V případě, že sklon nepřesáhne předem definovanou mez, jsou body vyhodnoceny jako na terénu.

### 3.9.3 Klasifikace

Tento druh zpracování dat se používá pro všechny druhy laserového skenování. Zpracování spočívá v rozdělení bodů do různých tříd, tyto třídy jsou pak při vizualizaci zpravidla barevně rozlišené. Třídy mohou být zvoleny v podstatě libovolně podle potřeb analýzy, která bude s konečnými daty prováděna.

Metody klasifikace se opírají o dva základní pilíře. Prvním je využití různých druhů filtrací, kdy odfiltrovaná data nejsou vymazána, ale zařazena do dané třídy. Druhým je pak detailní zpracování odraženého signálu, zejména jeho charakteristik jako intenzita a průběh. Na základě rozdílů těchto parametrů různých bodů, jsou body rozřazeny do tříd.

## **4. Zhodnocení možností využití laserového skenování v letectví**

Laserové skenování nabízí široké využití v řadě oblastí lidské činnosti a v letectví tomu není jinak. V současném letectví se využití laserového skenování vyvíjí dvěma odlišnými směry.

Prvním směrem je umístění laserového skeneru na letadle, čímž se získá možnost získat digitální modely oblastí, které by pomocí pozemního skenování trvaly značně delší dobu nebo by ani nebyli uskutečnitelné. Výstup tohoto skenování je pak zpravidla určený pro obory jako kartografie a jiné obory zabývající se mapováním terénu, vegetace a zástavby. Výstup tak většinou neslouží primárně pro obor letectví.

Druhým směrem je pak využití laserového skenování přímo pro účely letectví. Může se jednat o využití jednak ve výrobě, provozu nebo i pro vojenské účely.

### **4.1 Letecké laserové skenování jako zdroj informací pro ostatní obory**

Podle využití získaných dat lze letecké skenování rozdělit na:

- Tvorba digitálního modelu terénu
- 3D modely objektů
- Mapování vegetace
- Mapování vodních ploch a jejich dna

#### **4.1.1 Tvorba digitálního modelu terénu**

V současné době se jedná o nejčastější využití laserového skenování v letectví. Vytváření digitálního modelu terénu pomocí laserového skenování začíná pomalu nahrazovat fotogrammetrii, protože pro získání modelu terénu není nutné každé místo snímat ze dvou různých poloh a rovněž se tím zvyšuje přesnost určení souřadnic měřených bodů. Další výhodou laserového skenování je možnost získání modelu terénu i v oblastech pokrytých vegetací, jelikož je velká pravděpodobnost, že vyslaný paprsek projde skrze vegetaci až k terénu.

Výsledné mračno bodů je pak zpravidla zpracováváno filtračními technikami, které byly zmíněny v předchozí kapitole.

Od roku 2009 se začalo s tvorbou digitálního modelu terénu na území celé ČR. Výstupem z tohoto skenování jsou pak digitální modely reliéfu čtvrté a páté generace a digitální model povrchu první

generace. Skenování celého území bylo dokončeno roku 2013 a v současné době se provádějí aktualizace tohoto digitálního modelu.



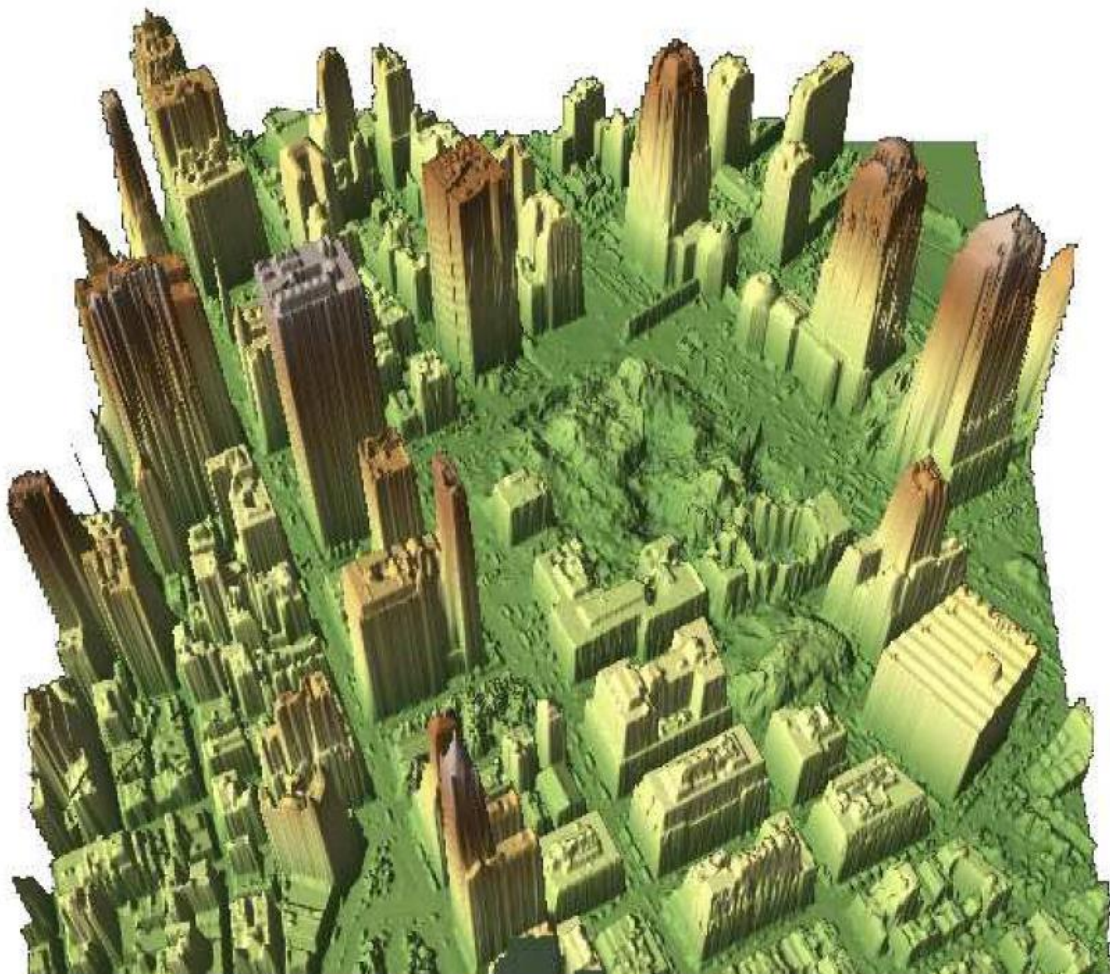
Obr. 18 Digitální model reliéfu získaný pomocí leteckého laserového skenování

#### 4.1.2 3D modely objektů

Laserové skenování se rovněž používá k přesnému zaměření objektů jako budov, mostů a jiných staveb. Případně je možné vytvářet 3D modely celých oblastí jako městských částí a celých měst. Dalším velmi často skenovaným objektem mohou být různé liniové stavby jako silnice nebo vysoké vedení. Velmi dobré vizualizace naskenovaných objektů se může dosáhnout připojením ortofoto map nebo nafocených fasád budov.

Výstup se pak často používá pro aplikace jako vytváření technické dokumentace skenovaných objektů. Při skenování městských částí se výstup může využívat pro simulace pohybu ve městech, plánování nové zástavby nebo pro určení optimálního rozmístění vysílačů telekomunikační sítě.





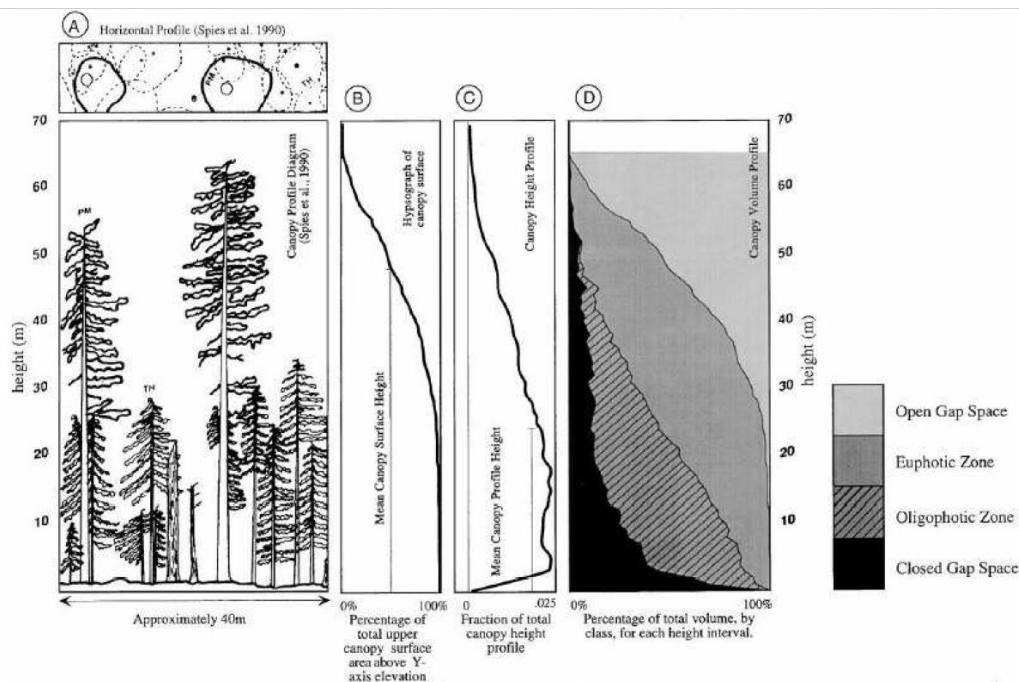
Obr.19 Digitální model města získaný za pomoci laserového skenování

### 4.1.3 Mapování vegetace

Při této aplikaci se využívá postupného odrazu laserového paprsku při jeho průchodu oblastmi pokrytými vegetací.

Výstup je pak využíván pro biometrické analýzy, kterými mohou být: určování objemu biomasy, poškození biomasy, výška porostu, počet stromů a druhová skladba lesa.





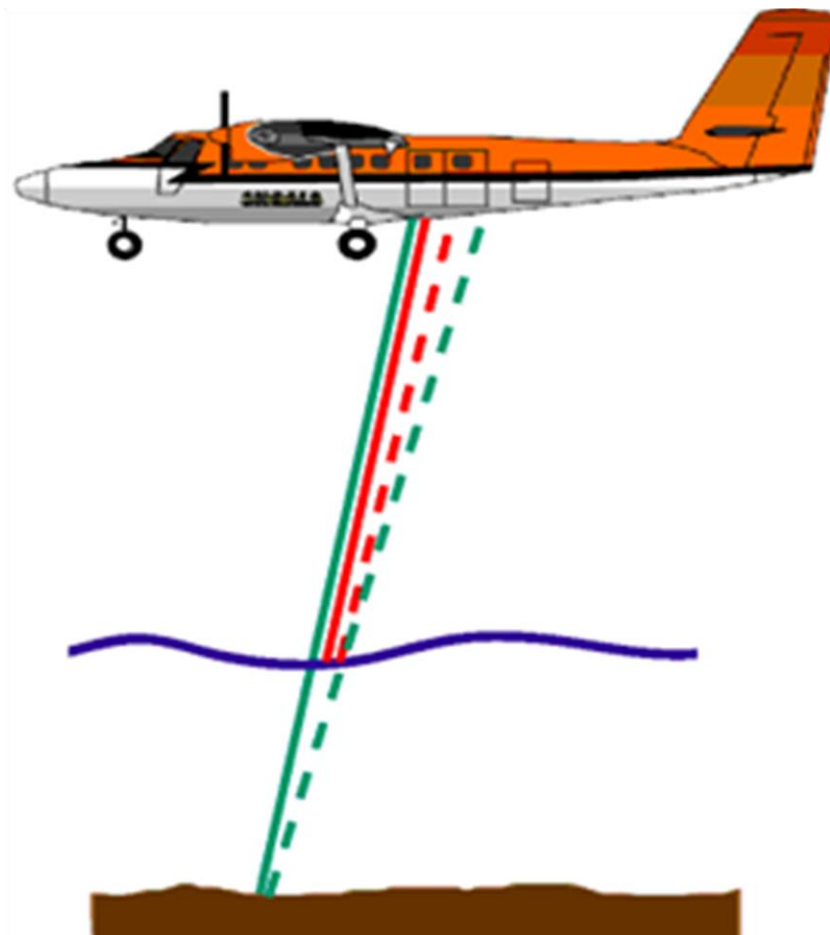
Obr.20 Princip mapování vegetace pomocí laserového skenování

#### 4.1.4 Mapování vodních ploch a jejich dna

V principu se jedná o obdobu aplikace pro tvorbu digitálního modelu terénu. Rozdíl zde však nastává při výběru vhodné vlnové délky. Pro běžné laserové skenování se používají lasery s vlnovými délkami v oblasti infračervené části spektra. Ze spektrálních charakteristik vody však vyplývá, že tato vlnová délka je ve vodě značně pohlcována, a proto je nutné použít záření v modrozelené části spektra.

V praxi se také často využívá systému DIAL, který v sobě spojuje mapování vodní hladiny pomocí infračerveného laseru, při současném mapování dna pomocí laseru využívajícího modrozelenou část spektra.

Při průzračné vodě a klidné hladině je možno měřit až do hloubky 50m pod hladinou.



Obr.21 Princip mapování hladiny a dna vodních ploch

## 4.2 Laserové skenování v letectví

Podle aplikace lze skenování rozdělit na oblasti:

- Využití laserového skenování ve výrobě
- Detekce překážek

### 4.2.1 Využití laserového skenování ve výrobě

Při výrobě a montáži rozměrných konstrukčních prvků u kterých není možné, aby jimi manipuloval sám člověk, je nutné použít různou manipulační techniku. Aby tato manipulační technika byla soběstačná, tedy nezávislá na člověku, je nutné ji vybavit zařízením, které je schopné detekovat tvary a polohy různých objektů v prostoru. K tomuto účelu se právě hodí laserové skenování.

V letectví, kde jsou kladeny vysoké, nároky na každou část výrobního procesu, tak právě tato technologie začíná nacházet své uplatnění pro přesnou montáž nebo obrábění konstrukčních prvků letadel a leteckých motorů.

Příkladem takového systému používaného v leteckém průmyslu je laserový skener MV 260 od firmy Metris. Jehož parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

<b>Rychlost skenování</b>	<b>1000 bodů/s</b>
<b>Měřicí vzdálenost</b>	Od 1m do 60m
<b>Zorné pole</b>	Azimut 360° , Náklon ± 45°
<b>3D přesnost</b>	16 $\mu\text{m}$ pro 1 m 102 $\mu\text{m}$ pro 10 m 240 $\mu\text{m}$ pro 24 m
<b>Bezpečnostní třída laseru</b>	1.třída

Tab.2 Parametry laserového skeneru určeného pro výrobu



Obr.22 Metris MV 260

## 4.2.2 Detekce překážek

Jedná se o velice zajímavou aplikaci laserového skenování pro letectví, která je zatím na samém počátku vývoje. Takovéto systémy by měli umožnit bezpečné lety v nízké letové hladině nebo přistání na neupravených plochách v podmínkách snížené viditelnosti.

Samotný tento systém však není dostačující pro všechny druhy aplikace, jelikož je limitován značným útlumem laserového záření v mlze, kouři nebo dešti. Z tohoto důvodu jsou tyto systémy zpravidla doplňovány radary pracujícími s milimetrovými vlnami, případně infračervenými kamerami a klasickými kamerami.

## 5. Možnost integrace laserového skenování s přesnými mapami pro bezpečné přistání v terénu

V posledním článku předchozí kapitoly bylo zmíněno využití laserového skenování pro přistání v terénu nebo pro lety v nízké viditelnosti. Samotné laserové skenování není pro tento účel samostatně dosti vhodné, a proto je nutné jej obohatit o další systémy, které byly uvedeny v předchozí kapitole.

Každý z těchto přidaných systémů však znamená zvýšení hmotnosti samotného letounu, případně aerodynamického odporu a celkově se celý systém stává robustnější a složitější.

Objevují se však i alternativní metody, které by mohly dosáhnout stejného cíle. Jednou z nich je konkrétně propojení přesných map s laserovým skenováním tak, aby pilotovi byla dodána dostatečná informace potřebná k přiblížení a přistání v neznámém terénu.

Myšlenka celého tohoto systému spočívá ve dvou krocích:

1.krok – pomocí přesných map najít vhodné plochy pro přistání

2.krok – pomocí laserového skenování provést ověření vhodnosti těchto ploch k přistání

Je evidentní, že celá situace se zjednoduší, pokud se budeme soustředit na přistání v terénu pro vrtulníky.

### 5.1 Limity laserového skenování

Limitujícími faktory, které budou ovlivňovat možnosti využití laserového skenování budou dosah laserového dálkoměru a počet bodů, které je schopný laserový skener získat za daný časový interval.

#### 5.1.1 Dosah laserového skeneru

Pro zhodnocení využití laserového skenování pro bezpečné přistání v terénu je nutné znát dosah, na který je ještě laserový skener schopný měřit. Tuto vzdálenost získáme jako řešení rovnice (7) nebo (8) pro neznámou  $L$ , při zafixování hodnot ostatních parametrů. V našem případě se omezíme na řešení rovnice (8), které je jednodušší a pro možnosti zhodnocení je dostačující.

Pro další úvahy také upravíme rovnici (8) do dekadického tvaru, tedy místo exponenciály o základu  $e$  budeme uvažovat desítkový základ. Tento krok provedeme, protože dostupné hodnoty útlumů jsou

zpravidla v decibelové míře. Rovnice (8) pak bude mít tvar:

$$P_i = P_0 \cdot \delta \cdot 10^{\frac{-(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot 2 \cdot L - \alpha_3 - \alpha_4}{10}} \cdot \frac{d_i^2}{L^2} \quad (12)$$

První, co je nutné určit pro výpočet je vlnová délka laseru. Tento parametr bude mít důležitý dopad na dosah, jelikož útlum atmosféry je funkcí právě vlnové délky. Pro měření v atmosférických podmínkách je vhodné využívat vlnové délky ležící v pásech propustnosti atmosféry. Tyto pásy se nachází kolem 850nm, 1060nm, 1250nm a 1550nm.

Pro naše účely je tedy nejvhodnější zvolit vlnovou délku 1064,1nm emitovanou Nd:Yag laserem. Tento laser se také nejčastěji používá při leteckém laserovém skenování.

Dalším parametrem je pak výstupní výkon laseru. Pro zjednodušení výpočtu budeme předpokládat, že laser emituje pravoúhlý puls a výkon je tedy v průběhu pulsu konstantní.

Limitujícím faktorem pro výstupní výkon bude bezpečnost pro oči. Laser tedy bude muset náležet do 1. třídy bezpečnosti. Výstupní výkon tak získáme z následujících tabulek.

Vlnový rozsah $\lambda$ [nm]	Doba trvání emise záření $t$ [s]	$P_{\max}$ [W]/ $Q_{\max}$ [J]	Průměr limitního otvoru
200 < $\lambda$ ≤ 400	$t \leq 3 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^{-5} k_1$ [J]	1
	$t > 3 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^{-10} k_1$ [W]	
400 < $\lambda$ ≤ 1 400	$10^{-9} < t \leq 1,8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7} k_1$ [J]	7
	$1,8 \cdot 10^{-9} < t \leq 10$	$7 \cdot 10^{-4} k_1 t^{3/4}$ [J]	
	$10 < t \leq 10^4$	$3,9 \cdot 10^{-3} k_1 k_2$ [J]	
	$10^4 < t$	$3,9 \cdot 10^{-7} k_1 k_2$ [W]	
1 400 < $\lambda$ ≤ 13 000	$10^{-9} < t \leq 10^{-7}$	$7,9 \cdot 10^{-5} k_1$ [J]	1
	$10^{-7} < t \leq 10$	$4,4 \cdot 10^{-3} t^{1/4}$ [J]	
	$10 < t$	$7,9 \cdot 10^{-4}$ [W]	

Tab.4 Nejvyšší přípustné hodnoty pro lasery I.třídy

Vlnová délka [nm]	$k_1$
1060	5

Tab.5 Koeficient  $k_1$  pro vlnovou délku 1060nm

V praxi se délka pulsu pohybuje řádově 10ns – 15ns. Pokud zvolíme hodnotu 10ns, získáme pro maximální výstupní výkon při pravoúhlém pulsu 100 W.

V dalším kroku je nutné vybrat vhodný detektor. Z obrázku 8 lze vyčíst, že pro námi zvolenou vlnovou délku je nejvhodnější InGaAs fotodioda. Pro další výpočet tak budeme uvažovat tuto fotodiodu, konkrétně pak její provedení od výrobce Edmund Optics, jejíž parametry deklarované výrobcem, spolu s parametry vypočítanými z (5) jsou uvedeny v následující tabulce.

Parametry	Hodnota
Průměr aktivní plochy	3 mm
Detektivita	$4.25 \cdot 10^{14} \text{ W}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$ .
Spektrální šířka	700nm – 1700nm
Minimální dopadající optický výkon	37,3 nW

Tab.6 Parametry zvoleného detektoru

Propustnost vysílací a přijímací optiky převezmu z [11], kde na jejich základě byl získán kvalitní numerický model. Rovněž odtud převezmeme průměr přijímací optiky.

Parametr	Hodnota
Útlum vysílací optiky	3 dB
Útlum přijímací optiky	3 dB
Průměr přijímací apertury	6 cm

Tab.7 Parametry přijímací a vysílací části laseru

Koeficient odrazivosti se liší podle odrazného materiálu a pohybuje se v intervalu hodnot  $\langle 0,1 \rangle$ . Pro náš příklad zvolím hodnotu 0,17, která odpovídá odrazivosti asfaltové silnice.

Posledními a nejdůležitějšími parametry jsou koeficienty absorpce a rozptylu. Jelikož jsme použili laser o vlnové délce příslušející oknu propustnosti, můžeme koeficient absorpce zanedbat. Pro nás bude zásadní koeficient rozptylu, jehož velikost je přímo ovlivněna aktuální viditelností. Tento koeficient lze získat z následujícího empirického vzorce [13]:

$$\alpha_{scat} = \frac{17}{V_m \cdot \left(\frac{555}{\lambda}\right)^q} \quad (13)$$

,kde  $V_m$  je meteorologická dohlednost v km.

$\lambda$  vlnová délka v nm

q závisí na  $V_m$  : pro  $V_m > 50$  km je  $q=1,6$

pro  $6 \text{ km} < V_m \leq 50 \text{ km}$  je  $q=1,3$

pro  $1 \text{ km} < V_m \leq 6 \text{ km}$  je  $q=0,16V_m + 0,34$

pro  $0,5 < V_m \leq 1 \text{ km}$  je  $q=V_m - 0,5$

pro  $V_m \leq 0,5$  je  $q=0$

Nyní máme všechny parametry, které jsou potřebné pro výpočet maximální vzdálenosti skenovaného objektu. V následující tabulce se tedy nachází maximální dosah laserového skeneru vypočítaný jako řešení rovnice (12) spolu s příslušným koeficientem útlumu určeného z rovnice (13).

Popis	Přímá viditelnost [km]	Útlum [dB/km]	Dosah laseru [m]
Čistá atmosféra	23	1,72	209
	10	3,96	191
Opar	4	8,04	167
	1	23,53	119
Mlha	0,5	34	102
	0,2	85	64
	0,1	170	43
	0,05	340	27
	0,01	1700	8

Tab.8 Závislost koeficientu útlumu a dosahu laseru na přímé viditelnosti

Z tohoto numerického modelu pak lze získat obraz o možnostech laserového skenování. Na první pohled je zřejmé, že dosah laserové skeneru nepřekračuje hodnotu přímé viditelnosti, tedy, že pomocí laserového skeneru nikdy nebudeme schopni vidět „za“ mlhu.

### 5.1.2 Počet naskenovaných bodů

Druhým limitujícím faktorem je schopnost laserového skeneru, konkrétně jeho kontrolní jednotky, zpracovávat a vizualizovat naskenované body. Obecně je laserový skener schopný naskenovat až 1 000 000 bodů/s. Tolik naskenovaných bodů však kontrolní jednotka není schopná okamžitě zpracovat a tyto body jsou jen ukládány do paměti ze které jsou dodatečně vytaženy a zpracovávány.



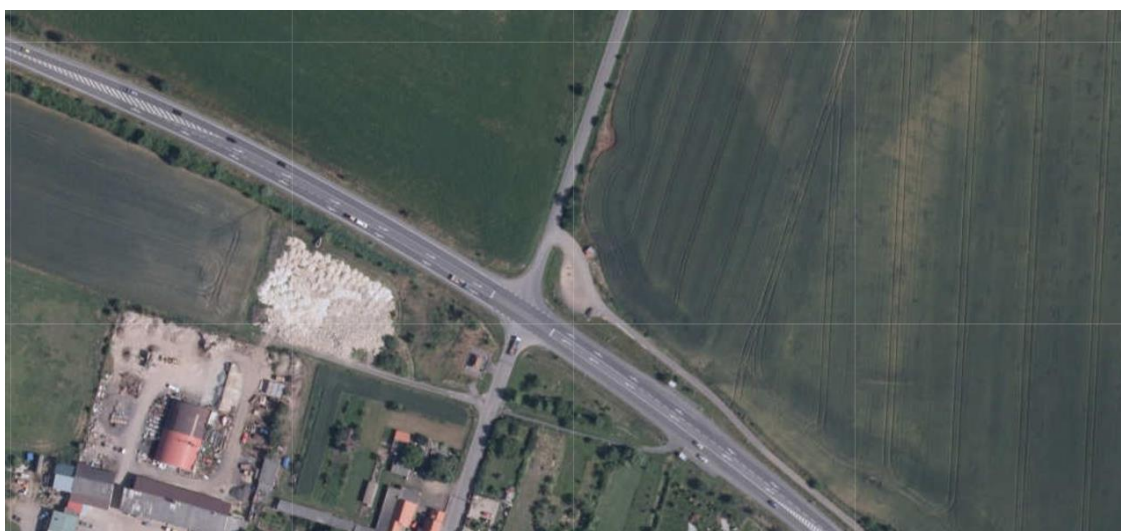
Pokud budeme chtít použít laserový skener pro přistání v terénu je evidentní, že je potřeba naskenované body co nejrychleji zpracovat a ideálně okamžitě prezentovat pilotovi. V současné době jsou laserové skenery schopné takto prezentovat kolem 10 000 bodů/s. Pro námi zamýšlené využití laserové skenování se tak může stát, že naskenování celého potřebného prostoru může trvat i několik desítek sekund.

## 5.2 Přesné mapy

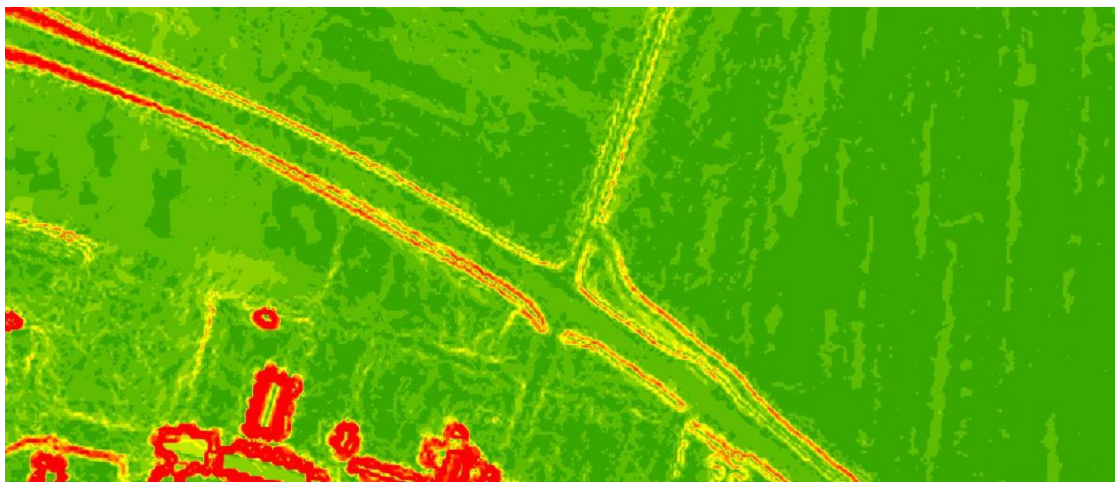
V současné době existuje celá řada mapových podkladů území ČR. Běžnými mapami jsou základní mapy ČR od měřítek 1:5000 až 1:200 000, katastrální mapy nebo ortofoto. Tyto mapy pro naše účely nejsou samy o sobě příliš vhodné, avšak dají se z nich vyčíst doplňkové informace.

Pro naše účely bude nejvhodnější využití digitálního topografického modelu území ČR, který se nazývá ZABAGED (Základní báze geografických dat). Tento digitální model ČR se skládá z polohopisných a výškopisných dat. Každá z těchto sad dále obsahuje řadu dalších podsouborů. Pro účely zvolení vhodného místa pro přistání v terénu se jako nejvhodnější zdá využití výškopisných dat, konkrétně dat z Digitálního modelu povrchu terénu (DMP 1G). Tento model zachycuje celé území ČR včetně všech budov a rostlinného pokryvu ve formě nepravidelné bodové sítě. Výšková přesnost tohoto modelu je 0,4m pro přesně vymezené objekty a 0,7m pro nepřesně vymezené objekty.

Tento digitální model povrchu terénu by pak v praxi mohl být podložen základními mapami ČR nebo ortofotami, které by přispěly k čitelnosti dané oblasti. Pro zvýšení bezpečnosti by také bylo vhodné připojit Registr výškových budov.



Obr.23 Situace na ortofotu



Obr.24 Digitální model povrchu terénu

### 5.3 Laserové skenování jako samostatný prostředek pro přistání v terénu

Z článku o limitech laserového skenování vyplývá, že použití samotného laserového skenování pro účely přistání v terénu je značně omezené. Dosah sám o sobě ve dne nepřekročí hranici lidské viditelnosti a čas potřebný k naskenování oblasti vhodné pro přistání může trvat i několik desítek sekund. Pro příklad můžeme uvažovat, že vhodná plocha pro přistání vrtulníku musí mít minimálně 44 m v průměru (tato hodnota byla určena odhadem na základě předpisu L14-H) a požadovaná hustota bodů je 112 bodů/m<sup>2</sup> (tato hodnota kopíruje požadovanou hustotu bodů systému laserového skenování pro přistání na Marsu [10]). Z tohoto vyplývá potřeba minimálně 170 300 bodů. Pokud je laserová jednotka schopná zpracovat 10 000 bodů/s, dostaneme čas potřebný k naskenování této oblasti 17 s. Ačkoliv se tento čas nemusí zdát příliš dlouhý, tak je třeba vzít v úvahu, že pokud vrtulník poletí ve špatné viditelnosti podle pravidel létání IFR k místu zamýšleného přistání bude se nacházet minimálně ve výšce 1000 ft. Pokud by pak měl být zajištěn jeho odstup od překážek předepsanou vzdáleností, musela by být rychlost sestupu taková, aby při daném dosahu laserového skeneru, rychlosti skenování, reakční době pilota a maximálním stoupavém zrychlení mohl pilot stroj zastavit v této předepsané vzdálenosti od identifikovaného bodu.

V praxi se dá tato předepsaná bezpečnostní vzdálenost odhadnout kolem 10 m. Je pak evidentní, že pro malý dosah laserového skeneru za nízké viditelnosti, který se pohybuje za přímé viditelnost například na 50 m kolem hodnoty 27 m a relativně dlouhé době skenování, by se sestupová rychlost blížila k nule. V okamžiku, kdy by dosah laserového skeneru klesl pod předepsanou vzdálenost mezi vrtulníkem a překážkou, stal by se systém zcela nevyhovující. Další problém by pak nastal při hledání vhodného místa k přistání, kdyby byl vrtulník nucen manévrovat v malé výšce s jen velmi malou představou o okolních překážkách, což je dle výpovědi pilotů bez autopilota prakticky nemožné.

## **5.4 Zhodnocení možnosti integrace laserového skenování s přesnými mapami**

Z výše uvedeného problému pak vyplývá jednoduchá myšlenka o propojení přesných map s laserovým skenováním pro přistání v terénu. Pomocí těchto map by totiž mohl pilot zvolit přesné souřadnice vhodného místa přistání a ověřit sestupovou trajektorii k zamýšlenému místu již během letu. Laserové skenování by zde pak bylo hlavně pro ověření vhodnosti místa pro přistání, a ne pro jeho nalezení a přiblížení se k němu. Možnosti přistání by tak byly limitované pouze vzdáleností, na kterou by se mohl vrtulník přiblížit k terénu jen za pomoci přesných map. Velikost této vzdálenosti by musela být předmětem důkladné analýzy kvality a přesnosti veškerých map použitých k tomuto účelu, avšak lze nahlédnout, že při současné přesnosti zaměření digitálního modelu povrchu a přesnosti GPS ve spolupráci se systémem EGNOS by tato vzdálenost mohla být maximálně v desítkách metrů.

## 6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo podat obraz o základních principech, metodách a technologiích použitých v současných systémech laserového skenování. V závěrečných kapitolách byly také zhodnoceny možnosti těchto systémů pro letectví.

Laserové skenování je technologie, která v sobě ukrývá obrovský potenciál pro řadu různých oborů. V letectví se s touto technologií setkáváme dosud hlavně jako s nástrojem pro získávání informací pro ostatní obory nebo jako s nástrojem pro automatizaci výrobních procesů v letectví.

Myslím, že je jen otázkou času, kdy laserové skenování pronikne do automatických systémů zajišťujících bezpečný let a přistání. Podle současné úrovně poznání se však zdá, že laserové skenování nebude schopné tuto úlohu plnit samostatně, ale bude muset být sloučeno s dalšími systémy, které budou doplňovat jeho nedostatky. Tyto nedostatky se týkají hlavně dosahu laserového dálkoměru v podmínkách snížené viditelnosti a omezeného počtu skenovaných bodů, které je kontrolní jednotka schopná zpracovat. Zatímco druhý nedostatek by se mohl odstranit rychlým vývojem počítačové techniky, tak první nedostatek se odvíjí od vlastností atmosféry a nutnosti použití relativně nízkého výstupního výkonu laseru, což má za následek poměrně nízký dosah laserového skeneru.

V současné době jsou v podstatě dvě možnosti odstranění těchto nedostatků, prvním je pomocí palubních radarů zvětšit oblast, kde jsme schopni detekovat překážky. Druhou možností je pak vytvoření mapového podkladu, který zachycuje povrch země a ve kterém se pak může letoun pomocí GPS v určitých mezích bezpečně pohybovat.

V páté kapitole pak byla předvedena možnost využití jako vhodného mapového podkladu Digitální model povrchu DMP 1. Pokud by však tento digitální model měl sloužit k výše uvedenému účelu, bylo by nutné zajistit spolupráci příslušných úřadů tak, aby byly zaznamenávány jeho jakékoli změny a byly prováděny jeho pravidelné aktualizace. Tento mapový podklad spolu se systémy GPS a EGNOS by pak mohl zajistit možnost přiblížit se k povrchu země na takovou vzdálenost, z jaké by bylo možné použít laserový skener k získání přesného modelu lokálního povrchu země.

Díky své práci jsem se blíže seznámil se systémem laserového skenování a numericky jsem si ověřil jeho současné možnosti. Ze svého pohledu věřím, že cíl mé bakalářské práce byl splněn a velice rád bych na tuto práci navázal ve svém dalším studiu.

- [1] DOLANSKÝ, Tomáš. *Lidary a letecké laserové skenování*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. Acta Universitatis Purkynianae. ISBN 80-7044-575-0.
- [2] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01108-9.
- [3] ENGST, Pavel a Milan HORÁK. *Aplikace laserů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Populární přednášky o fyzice.
- [4] HORÁK, Richard. *Fyzikální základy laserových dálkoměrů a gyroskopů*. Olomouc: Chlup.net, 2012. ISBN 978-80-903958-6-2.
- [5] HRACH, Rudolf. *Počítačová fyzika*. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2003. ISBN 80-7044-521-1.
- [6] VOSELMAN, George. a Hans-Gerd. MAAS. *Airborne and terrestrial laser scanning*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2010.
- [7] ALLFlight - A full scale enhanced and synthetic vision sensor suite for helicopter applications (PDF Download Available). *ResearchGate - Share and discover research* [online]. Copyright © 2008 [cit. 20.08.2017]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/225001820\\_ALLFlight\\_-\\_A\\_full\\_scale\\_enhanced\\_and\\_synthetic\\_vision\\_sensor\\_suite\\_for\\_helicopter\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/225001820_ALLFlight_-_A_full_scale_enhanced_and_synthetic_vision_sensor_suite_for_helicopter_applications)
- [8] *Optics - Imaging - Photonics - Optomechanics - Lasers* | *Edmund Optics* [online]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/testing-detection/detectors/ingaas-detector-3000um-dia-to-5-20mohm-shunt/#resources>
- [9] Free Space Optical Communications — Theory and Practices | InTechOpen. *InTech - Open Science Open Minds* | *InTechOpen* [online]. Copyright © The Author [cit. 20.08.2017]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/contemporary-issues-in-wireless-communications/free-space-optical-communications-theory-and-practices>
- [10] CiteSeerX — Full-scale Static Testing of the Lidar-based Autonomous Planetary Landing System (LAPS). [online]. Copyright © 2007 [cit. 22.08.2017]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/citations;jssessionid=D9C70AE0AEF0CD0D8070110ECD1DA98E?doi=10.1.1.547.1678>
- [11] Výkonová bilance laserového dálkoměru *Elektrorevue* [online]. Copyright © 2013 [cit. 22.08.2017]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/vykonova-bilance-laseroveho-dalkomeru-1-1/>
- [12] BAJER, Jiří. *Mechanika. 2., rozš. a dopl. vyd.* Olomouc: Vladimír Chlup, 2012. ISBN 978-80-903958-1-7.
- [13] KVÍČALA, Radek. *CHYBOVOST A DOSTUPNOST ATMOSFÉRICKÝCH OPTICKÝCH SPOJŮ* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009 [cit. 2017-08-22]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/7976>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Otakar Wilfert.

- [14] RUSU, R.B. Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments. München: Technische Universität. Institut für Informatik, 2009. 284 s., Vedoucí disertační práce Univ.-Prof. Nassir Navab, Ph.D.
- [15] L 14H Letecký předpis heliporty [PDF dokument] ŘLP-LIS, 2013 [cit. 2017-08-22] Dostupné z: [https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14-H/data/print/L-14-H\\_cely.pdf](https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14-H/data/print/L-14-H_cely.pdf)
- [16] *Optoelektronika, Ústav mikroelektroniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně* [online]. Copyright © [cit. 23.08.2017]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/oks/cz/pdf/skripta.pdf>
- [17] Geoportál ČUZK přístup k mapovým podkladům a službám resortu [online] Copyright © [cit. 23.08.2017]. Dostupné z: <http://geoportal.cuzk.cz>

## **Seznam zkratek**

DIAL - Differential absorption lidar

GPS - Global positioning system

LZS - Letecká záchranná služba

EGNOS - European Geostationary Navigation Overlay Service

## Seznam obrázků

- Obr.1 Digitální model budovy získaný pomocí radaru SAR ([www.eas.ee](http://www.eas.ee))
- Obr.2 Digitální model získaný metodou laserového skenování (<http://www.terrainsurveys.co.uk>)
- Obr.3 Totální stanice s laserovým skenerem Leica geosystem (<http://leica-geosystems.com/>)
- Obr.4 Sestava laserového skeneru určeného pro letecké skenování (<http://leica-geosystems.com/>)
- Obr.5 Schéma impulsního systému [6]
- Obr.6 Princip fázového systému pro měření vzdálenosti [6]
- Obr.7 Princip triangulační metody měření vzdálenosti [6]
- Obr.8 Závislost měrné detektivity na vlnové délce pro různé detektory (<http://www.vision-systems.com>)
- Obr.9 Princip klasických a spojitých metod detekce signálu [6]
- Obr.10 Trajektorie stopy paprsku při leteckém skenování při použití odlišných metod vychylovacích soustav a) rotační odrazný prvek b) oscilující odrazný prvek c) skener se svazkem optických vláken d) eliptický skener [1]
- Obr.11 Geometrie laserového skenování ([www.researchgate.net](http://www.researchgate.net))
- Obr.12 Mračno bodů (<http://www.doc.ic.ac.uk>)
- Obr.13 Oktalový strom [14]
- Obr.14 Princip funkce operátoru dilatace [5]
- Obr.15 Princip funkce operátoru eroze [5]
- Obr.16 Princip funkce operátoru otevření za použití masky o rozměru 3x3 [5]
- Obr.17 Princip funkce operátoru uzavření za použití masky o rozměru 3x3 [5]
- Obr. 18 Digitální model reliéfu získaný pomocí leteckého laserového skenování (<http://geoportal.cuzk.cz>)
- Obr.19 Digitální model města získaný za pomoci laserového skenování [1]
- Obr.20 Princip mapování vegetace pomocí laserového skenování [1]
- Obr.21 Princip mapování hladiny a dna vodních ploch [1]
- Obr.22 Metris MV 260 (<http://www.metris3d.hu>)
- Obr.23 Situace na ortofotu (<http://geoportal.cuzk.cz>)
- Obr.24 Digitální model povrchu země (<http://geoportal.cuzk.cz>)



## Seznam tabulek

Tab.1 Příklady nejvyšších přípustných hodnot záření [2]

Tab.2 Parametry laserového skeneru určeného pro výrobu (<http://www.metris3d.hu>)

Tab.3 Nejvyšší přípustné hodnoty pro lasery I.třídy [2]

Tab.4 Koeficient  $k_1$  pro vlnovou délku 1060nm [2]

Tab.5 Parametry zvoleného detektoru [8]

Tab.6 Parametry přijímací a vysílací části laseru [11]

Tab.7 Závislost koeficientu útlumu a dosahu laseru na přímé viditelnosti (vlastní)