



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘÍCÍ TECHNIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

OPTICKÉ SNÍMAČE

OPTOSENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN JAKOUBEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDVÍK BEJČEK, CSc.

BRNO 2008

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Martin Jakoubek

Bytem: Dobronín 5, 58812

Narozen/a (datum a místo): 30.7.1983, Jihlava

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Optické snímače

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Ústav: Automatizace a měřicí techniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

tištěné formě – počet exemplářů 1

elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

1. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
2. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
3. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Vysoké Učení Technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav automatizace a měřicí techniky

Optické snímače

Diplomová práce

Obor: Kybernetika, automatizace a měření
Student: Bc. Martin Jakoubek
Vedoucí práce: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.
Konzultant: Ing. Jiří Vítek - Optovit Jihlava

Anotace:

Diplomová práce řeší problém detekce vozidel na velkou vzdálenost s využitím k řízení semaforů na křižovatkách. V první části práce je řešeno jakým způsobem by vozidla bylo možné detekovat a výběr dvou principů snímačů. Práce poté pokračuje průzkumem trhu se snímači jehož výsledkem je vybraný konkrétní mikrovlnný snímač. V poslední části práce je popsán vyrobený snímač včetně postupu výroby.

Klíčová slova:

Optický snímač, snímač, mikrovlnný snímač, vozidlo, semafor, detekce, radar

Bibliografická citace

JAKOUBEK, M. *Optické snímače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Brno University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Control, Measurement and Instrumentation

Optosensors

Master's Thesis

Specialization of study: Cybernetics, Control and Measurement
Student: Bc. Martin Jakoubek
Supervisor: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.
Consultant: Ing. Jiří Vítek - Optovit Jihlava

Annotation:

Master's Thesis solves a problem of vehicle detection for a system control of stoplights on crossroads for a long range. First, there is a resolution how it is possible to detect cars and select from two sensor's principles; second, chosen specific microwave detector is a result of sensor market research and finally, there is a description and processing of sensor.

Key words:

Optosensors, sensor, microwave detector, vehicle, semaphore, detection, radar

Bibliographic citation

JAKOUBEK, M. *Optosensors*. Brno: Brno University of technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, 2008. 60 s. Supervisor doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

P r o h l á š e n í

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma "Optické snímače" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

P o d ě k o v á n í

Děkuji tímto panu Ing. Jiří Vítkovi, doc. Ing. Ludvíku Bejčkovi, CSc. a doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

1. ÚVOD	9
2. ROZBOR MOŽNOSTÍ.....	10
3. FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY	12
3.1 Elektromagnetické vlny	12
3.2 Optické spektrum	13
3.3 Mikrovlnné spektrum	15
3.4 Čočky	16
3.5 Dopplerův jev.....	17
4. SNÍMAČE - ZÁKLADY.....	20
4.1 Optické snímače	20
4.2 Mikrovlnné snímače.....	22
5. PRŮZKUM TRHU	25
5.1 Optické snímače	25
5.1.1 AXIMA.....	25
5.1.2 Micro-Epsilon	26
5.1.3 ENVItch Bohemia s.r.o.....	26
5.1.4 Lavet s.r.o.	27
5.2 Mikrovlnné snímače.....	27
5.2.1 ENVItch Bohemia s.r.o.....	27
5.2.2 Tewiko systems	28
5.2.3 DOPIS, s.r.o.....	29
5.2.4 GEMOS CZ.....	29
5.3 Tabulkové porovnání	30
6. RADAR DETEKTOR.....	32
7. LASEROVÁ BEZPEČNOST.....	34
8. VÝPOČTY NUTNÉ PRO REALIZACI OPTICKÉHO SNÍMAČE.....	36
8.1 Určení ohniskové vzdálenosti čočky.....	36
8.2 Vzdálenost čočky od čidla	38
8.3 Výpočet délky impulsu laseru pro třídu 1	40
8.3.1 Laser 650 nm, 3mW	41

8.3.2 Laser 808 nm 200 mW	43
9. REALIZACE OPTICKÉHO SNÍMAČE.....	45
9.1 Generátor impulsů.....	45
9.2 Vyhodnocovací obvod	47
9.3 Charakteristiky snímače.....	51
10. SRHNUTÍ	55
11. ZÁVĚR	57
12. LITERATURA.....	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2-1: Snímač.....	10
Obrázek 2-2: Detekce optickou závorou.....	11
Obrázek 2-3: Dvě světelné závory	11
Obrázek 3-1: Optické spektrum	13
Obrázek 3-2: Úplný odraz.....	14
Obrázek 3-3: Reflexní odraz	14
Obrázek 3-4: Difusní odraz.....	14
Obrázek 3-5: Rádiové spektrum.....	15
Obrázek 3-6: Druhy čoček	16
Obrázek 3-7: Zobrazení plankonvexní čočkou	17
Obrázek 3-8: Modrý a rudý posun při Dopplerově jevu	19
Obrázek 4-1: Blokové schéma optického reflexního snímače.....	21
Obrázek 4-2: Jednocestná světelná závora.....	21
Obrázek 4-3: Dvoucestná světelná závora	21
Obrázek 4-4: Blokové schéma Dopplerova mikrovlnného radaru [16].....	22
Obrázek 4-5: Detekce objektu radarem pod úhlem α	23
Obrázek 4-6: Blokové schéma stereo Doppler radaru [16].....	24
Obrázek 5-1: Pouzdro snímače[18].....	26
Obrázek 5-2: Klasifikátor dopravy EB-SICK TC[4]	26
Obrázek 5-3: Možné umístění detektoru [4]	28
Obrázek 6-1: Wavetec radar[20].....	32
Obrázek 8-1: Čočka použitá pro snímač	36
Obrázek 8-2: Určení ohniskové vzdálenosti pomocí laseru.....	36
Obrázek 8-3: Detekce záření bez použití čočky.....	38
Obrázek 8-4: Detekce záření s použitím čočky.....	39
Obrázek 8-5: Nasměrování laserového paprsku snímače	41
Obrázek 8-6: Graf maximálních povolené AEL pro 650 nm.....	43
Obrázek 8-7: Graf maximální povolené AEL pro 808 nm.....	44
Obrázek 9-1: Schéma zapojení generátoru impulsů.....	45
Obrázek 9-2: Výstup generátoru	46

Obrázek 9-3: Detail impulsu	46
Obrázek 9-4: Obvod pro napájení laserové diody L-SLD80200A	47
Obrázek 9-5: Stabilizátor napětí.....	48
Obrázek 9-6: Zesilovač signálu z fotodiody	48
Obrázek 9-7: Aktivní horní propust	49
Obrázek 9-8: Komparátor	49
Obrázek 9-9: Monostabilní KO.....	50
Obrázek 9-10: Obrazec plošného spoje	51
Obrázek 9-11. Rozmístění součástek	51
Obrázek 9-12: Relativní citlivost snímače na barvy (laser 650 nm)	52
Obrázek 9-13: Relativní citlivost snímače na barvy (laser 808 nm)	52
Obrázek 9-14: Směrová charakteristika snímače	53
Obrázek 9-15: Citlivost snímače v závislosti na vzdálenosti.....	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 5-1: Srovnání vybraných snímačů	30
Tabulka 8-1: Vzorce pro výpočet limitů AEL pro $\lambda = 650 \text{ nm}$	42
Tabulka 8-2: Vzorce pro výpočet limitů AEL pro $\lambda = 808 \text{ nm}$	44

1. ÚVOD

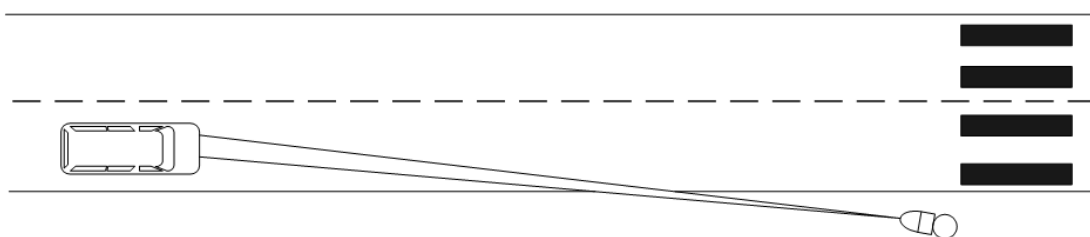
Cílem této diplomové práce bylo najít nebo vyrobit snímač, který by byl schopen detekovat přítomnost pohybujícího se automobilu před semaforem na vzdálenost padesáti metrů. Konkrétní aplikací by bylo možné automatické řízení semaforů na křižovatkách nebo přechodech pro chodce. Snímač by z místa semaforu vyhodnocoval přítomnost vozidel přijíždějících ke křižovatce a zjištěné údaje o přítomnosti či nepřítomnosti vozidla by byli předávány centrální jednotce, která by podle konkrétních požadavků řídila dopravu. Snímač mohl fungovat na libovolném fyzikálním principu s tím, že preferovaný je optický snímač.

V semestrálním projektu 1 byli popsány různé duhy snímačů používaných pro řízení dopravy, jako nejlepší pro tento projekt se jevil mikrovlnný radar další možnou variantou zůstal optický snímač. Vhodnou variantou by bylo použití kamerového systému, bohužel jeho cena je velmi vysoká.

2. ROZBOR MOŽNOSTÍ

Prvním krokem bylo promyslet možná řešení realizace zadaného úkolu. Omezujícími podmínkami pro tento projekt jsou snímací vzdálenost padesát metrů a umístění snímače na stožáru semaforu ve výšce dvou metrů. Snímač by měl být napájen přímo z přívodu napájení semaforu, kde je přivedeno síťové napětí 230 V, z toho vyplývá že snímač lze napájet prakticky libovolným napětím pomocí transformace síťového napětí 230 V. Posledním nejzásadnějším omezením je cena snímače, která má být co možná nejnižší.

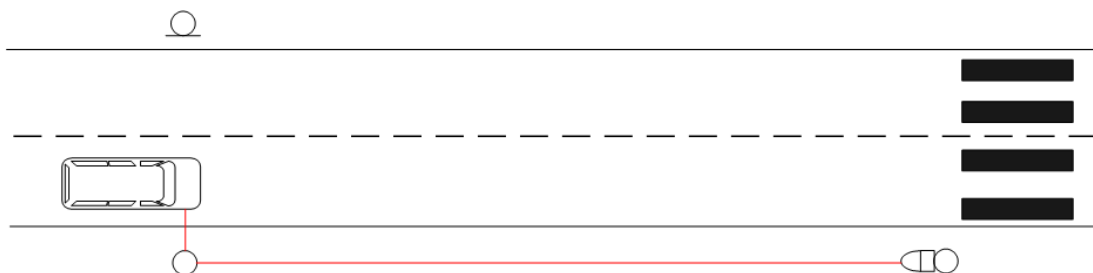
Prvním možným řešením je použití snímače, který je schopen z místa semaforu přímo detekovat projíždějící vozidla jak je naznačeno na obrázku 2-1. Tento snímač bude muset být schopen detekovat vozidla s co nejmenší závislostí na počasí, což nemusí být na zadanou vzdálenost snadné. Výhodou tohoto snímače by mohlo být snadné rozpoznání jednotlivých vozidel v jízdnicích pruzích. V semestrálním projektu 1 byl proveden průzkum v současné době používaných druhů snímačů pro řízení dopravy, pro první řešení by byl nejvhodnější mikrovlnný snímač, další možností by bylo použití reflexního optického snímače. Existuje i možnost použití kamerového systému případně infračerveného snímače, jejich cena je ovšem značně převyšující cenu mikrovlnných a reflexních optických snímačů.



Obrázek 2-1: Snímač

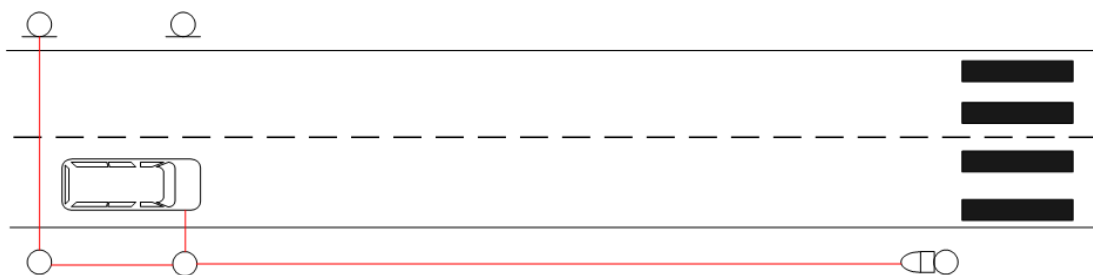
Další možností, která by splňovala zadání, alespoň z větší části, by bylo použití optických závor, snímač by byl umístěn na sloupu semaforu v zadané výšce a ve vzdálenosti 50 m před semaforem by musel být umístěn periskop, který by paprsek záření od snímače posunul do optimální výšky a nasměroval na odrazku umístěnou na druhé straně silnice, od odrazky by se paprsek odrazil a stejnou cestou by se vrátil zpět ke snímači. Snímač by vyhodnocoval situace, kdy dojde k přerušení

paprsku, což by odpovídalo projíždějícímu vozidlu. Situace je naznačena na obrázku 2-2. Aby nedocházelo k odrazům paprsku od projíždějících vozidel musel by být použit polarizační filtr u zdroje záření, nepolarizující odrazky a polarizační filtr u detektoru o 90° otočen oproti prvnímu filtru u zdroje.



Obrázek 2-2: Detekce optickou závorou

Protože je odrazka umístěna na druhé straně vozovky, docházelo by k detekci vozidel jedoucích v obou směrech, což je nežádoucí. Situaci lze vyřešit použitím dvou světelných závor jak je naznačeno na obrázku 2-3. Po přerušení první závor se bude očekávat přerušení druhé a tím lze snadno určit směr pohybu vozidla i zde může ale dojít k situaci, že dojde ke špatné detekci a to v případě, že se potkají dvě protijedoucí vozidla právě na místě světelných závor.



Obrázek 2-3: Dvě světelné závor

Protože se pro světelné závor musí u silnice umísťovat další zařízení, bude dále uvažována pouze varianta s mikrovlnným radarem a optickým reflexním snímačem.

3. FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY

3.1 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY

[9]

Elektromagnetické spektrum nemá žádnou principiální spodní ani horní hranici a nejsou v něm žádné mezery. Všechny elektromagnetické vlny ke svému šíření nepotřebují žádné hmotné prostředí a vakuem se šíří stejnou rychlostí c ($299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$) a to nezávisle na souřadném systému.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (3.1)$$

kde je ε_0 permitivita vakua

μ_0 permeabilita vakua

Ze vztahu 3.1 je patrné, že rychlost elektromagnetické vlny v prostoru je závislá pouze na prostředí, ve kterém se šíří. Elektromagnetická vlna se skládá z elektrického pole \vec{E} a magnetického pole \vec{B} , které jsou vždy kolmé samy na sebe a na směr šíření vlny a mají souhlasnou fázi. Podíl hodnoty elektrického pole ku hodnotě magnetického pole dává rychlost elektromagnetické vlny ve vakuu[9].

$$\frac{E}{B} = c \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (3.2)$$

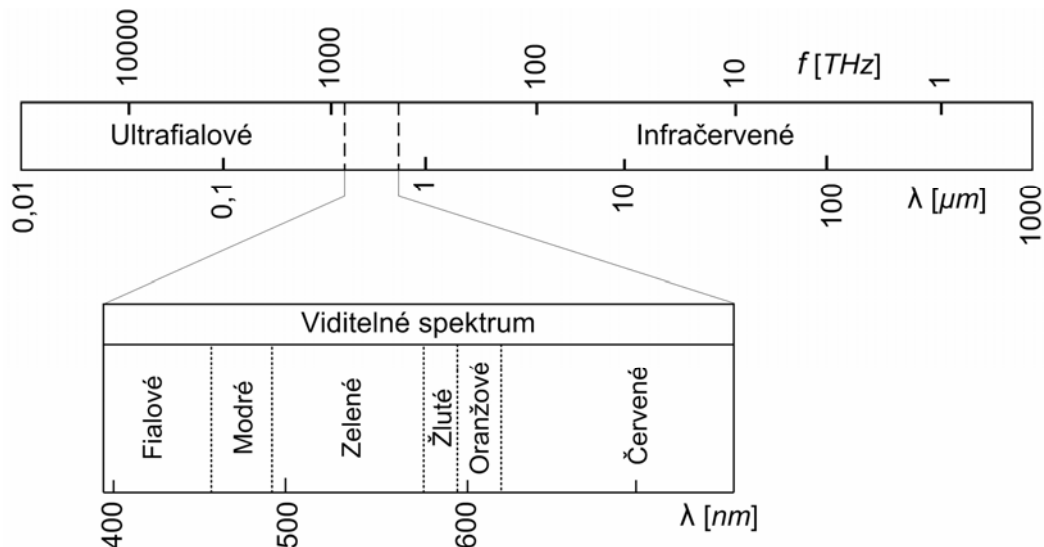
Elektromagnetické vlny jsou charakterizovány kvantovými a vlnovými vlastnostmi. Vlnové vlastnosti jsou ty, které lze popsat klasickou fyzikou jako lom, odraz, ohyb, interference, difrakce a polarizace vln, za kvantové vlastnosti jsou považovány ty, ve kterých se uvažuje diskrétní charakter vlny, foton. Kvantové vlastnosti záření se výrazně projevují při fotoelektrickém jevu.

Využití různých vlnových délek elektromagnetických vln je vázáno na vlastnosti vln z hlediska jejich generování, vysílání, šíření, detekce a jejich případných účinků.

3.2 OPTICKÉ SPEKTRUM

[6]

Za optické pásmo se obvykle považuje oblast vlnových délek $0,01 \mu\text{m}$ až $1000 \mu\text{m}$, kde platí zákony optiky.



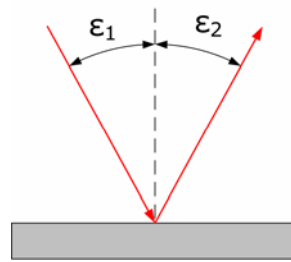
Obrázek 3-1: Optické spektrum

Třemi základními vlastnostmi[17] světla jsou svítivost (amplituda), barva (frekvence) a polarizace (úhel vlnění). Kvůli dualitě částic a vlnění má světlo vlastnosti jak vlnění tak částic. Rychlost světla c ve vakuu je $299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v jiném prostředí se světlo šíří rychlostí v , která je vždy nižší než c . Podíl těchto dvou rychlostí dává index lomu prostředí.

$$n = \frac{c}{v} \quad [-] \quad (3.3)$$

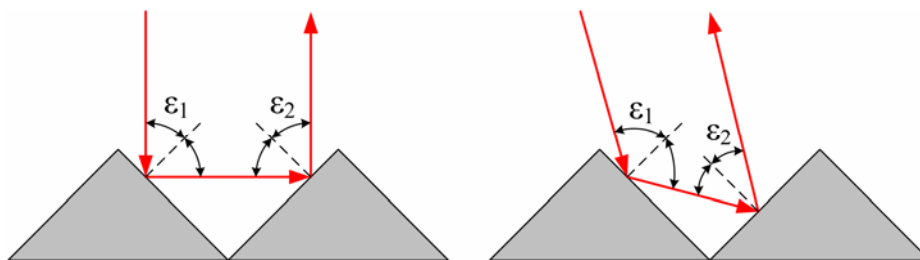
Světlo se za normálních okolností šíří prostorem přímočaře konstantní rychlostí. Pokud dopadne pod určitým úhlem na povrch nějakého objektu, část světla se odrazí a část vstoupí dovnitř objektu, kde se zároveň změní svoji rychlost. Světelný lom nastává na rozhraní dvou prostředí s různou optickou hustotou. Množství odraženého světla a typ odrazu určuje lesk a povrch materiálu. Mohou nastat tyto odrazy: úplný, reflexní a difúzní.

Úplný odraz nastává na vysoce lesklých plochách. Úhel dopadu je stejný jako úhel odrazu. Ztráty odrazu jsou v ideálním případě zanedbatelné.



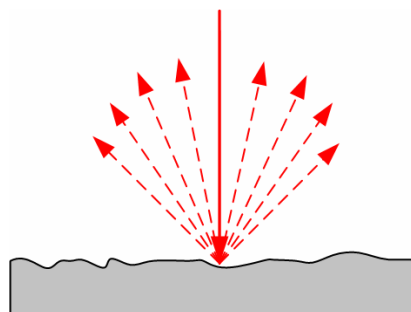
Obrázek 3-2: Úplný odraz

Reflexní odraz je způsobený dvěma zrcadly, které vzájemně svírají vertikální úhel. Dvojitý odraz způsobí, že se světelný paprsek odrazí zpět stejným směrem. Úhly dopadu se tak mohou měnit v relativně širokém rozsahu.



Obrázek 3-3: Reflexní odraz

Difusní odraz nastává na hrubém a drsném povrchu. To může být demonstrováno na různých špatně odrazejících a rozdílně orientovaných malých zrcátkách. Přicházející světlo je široce rozptýleno nad povrchem. Ztráty odrazu jsou tím vyšší, čím tmavší a matnější je konečný povrch.



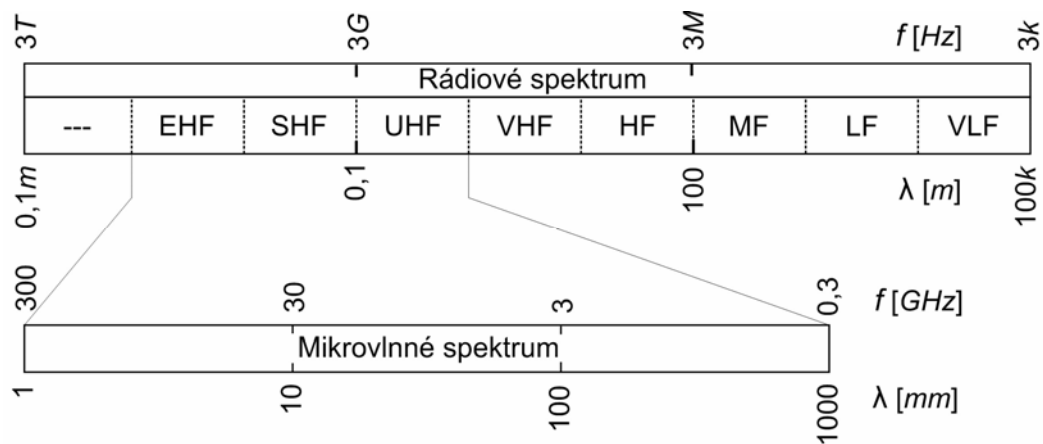
Obrázek 3-4: Difusní odraz

Při odrazu i lomu světla dochází vždy k pohlcení, absorpci světla látkou. Fotony jsou bržděny tepelnými pohyby stavebních částic látky a jejich energie se mění na jiné druhy energií, zejména tepelnou.

3.3 MIKROVLNNÉ SPEKTRUM

[16][13]

Mikrovlnné spektrum pokrývá část elektromagnetického spektra o vlnových délkách 1 mm až 1 m , které spadá do oblasti rádiových vln. Díky větší vlnové délce může mikrovlnné záření, oproti optickému, snadno proniknout mlhou, prachem a lehkým deštěm. Záření o větší vlnové délce není tolik náchylné k atmosférickému rozptylování, které ovlivňuje kratší, optické, vlnové délky. Pro frekvence od 1 GHz do 2 GHz a od 9 GHz do 10 GHz dosahuje absorpce mikrovlnného záření vodou maxima, proto se těchto frekvencí využívá v mikrovlnných troubách, ale ze stejného důvodu nejsou vhodné pro radarová měření, docházelo by k příliš vysokému pohlcování záření vodou například při dešti.



Obrázek 3-5: Rádiové spektrum

Mikrovlnné záření se stejně jako optické odráží od objektů na které dopadá, k tomu aby se odrazilo ovšem potřebuje větší plochu než optické záření.

3.4 ČOČKY

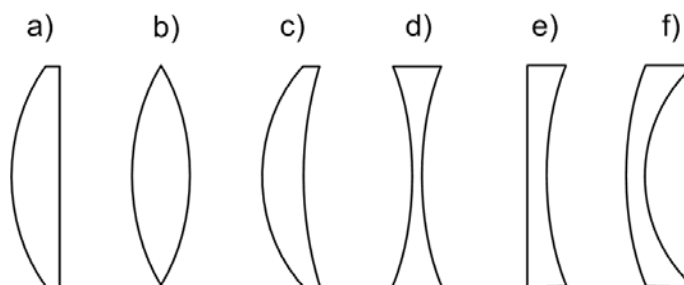
[10][5][1]

Čočky se používají k odklonění směru světelných paprsků a uspořádání do požadovaného tvaru. Pro výpočty týkající se čočky a jejích vlastností se používá geometrická optika, což je vědní disciplína respektující tyto zákony:

- Zákon přímočarého šíření světla
- Zákon o vzájemné nezávislosti chodu paprsků
- Zákon odrazu
- Zákon lomu

Čočky jsou útvary z opticky průhledného materiálu většinou skla, které se skládají z kulových ploch a lze je obecně rozdělit na tlusté a tenké. Podle toho, jestli poskytují skutečný nebo neskutečný obraz, se čočky dělí na spojky (konvexní) a rozptylky (konkávni). Na obrázku 3-6 jsou nakresleny nejčastější provedení čoček.

- a) plankonvexní
- b) bikonvexní
- c) konkávkonvexní
- d) bikonkávní
- e) plankonkávní
- f) konvexkonkávní



Obrázek 3-6: Druhy čoček

Optické vlastnosti čočky určuje její index lomu n_2 , který je dán materiálem ze kterého je čočka vyrobena, index lomu prostředí n_1 , ve kterém je čočka umístěna, a poloměry křivosti kulové plochy čočky r_1 a r_2 . Při znalosti uvedených hodnot lze snadno dopočítat ohniskovou vzdálenost čočky f [5]:

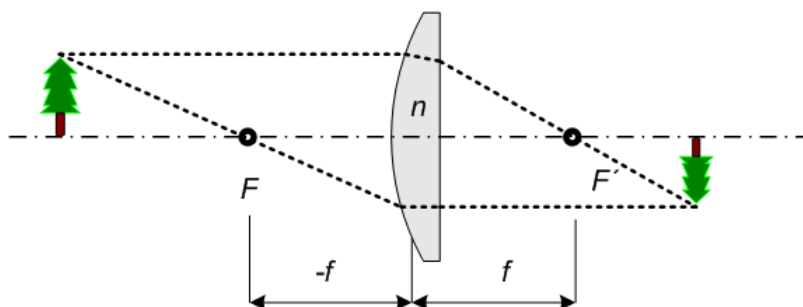
$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad [m^{-1}] \quad (3.4)$$

Pokud je čočka umístěna v atmosféře, potom lze vztah zjednodušit dosazením za index lomu prostředí n_1 hodnotu 1. Dále bude rozebrána pouze plankonvexní čočkou z důvodu praktického použití v projektu. Pro plankonvexní čočku je poloměr zaoblení jedné strany nekonečný, proto lze vztah 3.4 upravit na[5]:

$$\frac{1}{f} = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{r_1} \right) \quad [m^{-1}] \quad (3.5)$$

Plankonvexní čočky minimalizují sférickou vadu čočky, sférická vada nastává tehdy, pokud na čočku dopadá široký svazek paprsků, přičemž parciální paprsky se za čočkou setkávají v jiném bodě než okrajové paprsky širokého svazku. Tato vada způsobuje, že obrazem bodu není bod, ale rozmazaná kruhová ploška.

Nasměrováním čočky zakřivenou plochou k objektu lze dosáhnout maximálního ohniskového zaostření. Plankonvexní čočky vytvářejí reálné obrazy a paprsky se sbíhají v bodě pozitivního ohniska jak je naznačeno na obrázku 3-7.



Obrázek 3-7: Zobrazení plankonvexní čočkou

3.5 DOPPLERŮV JEV

[16][9]

Dopplerův jev popisuje změnu vlnové délky vlnění v závislosti na vzájemném pohybu pozorovatele a zdroje vlnění. Frekvence vlnění se zvyšuje, pokud se zdroj vlnění a pozorovatel blíží navzájem k sobě a naopak snižuje, pokud se

zdroj a pozorovatel od sebe vzdalují. Zvyšování frekvence respektive snižování vlnové délky se někdy označuje jako „modrý posun“ (modrá část viditelného spektra má kratší vlnovou délku) a zvětšování vlnové délky se označuje jako „rudý posun“.

Dopplerův jev byl nejprve objevený pro zvukové vlny, ale projevuje se také u elektromagnetických vln včetně mikrovln, rádiových a optických vln. Vysílaná frekvence zvukových vln je závislá nejen na generátoru zvukových vln, ale také na rychlosti pohybu zdroje zvuku, pohybem zdroje zvuku se mění frekvence vysílaného zvuku. Obecná rovnice Dopplerova jevu pro určení frekvence vlnění f_r přijímané detektorem při použití zvukových vln je [9]:

$$f_r = f_0 \frac{v \pm v_D}{v \pm v_Z} \quad [Hz] \quad (3.6)$$

kde je f_0 frekvence vysílaných vln zvuku $[Hz]$

v rychlost zvuku v daném prostředí $[ms^{-1}]$

v_D rychlost pohybu detektoru $[ms^{-1}]$

v_Z rychlost pohybu zdroje zvuku $[ms^{-1}]$

Obecná rovnice Dopplerova jevu však neplatí pro rychlosti pohybu zdroje nebo detektoru vyšší než je rychlost zvuku.

Zvukové vlny potřebují prostředí, ve kterém se mohou šířit, zatímco elektromagnetické vlny ne. Rychlost zvuku se vždy měří vzhledem k prostředí, zatímco rychlost elektromagnetických vln je stejná ve všech inerciálních systémech, a to ve všech směrech. Dopplerův jev u elektromagnetického záření závisí pouze na vzájemné rychlosti zdroje a detektoru.

Frekvenci odražených elektromagnetických vln f_r od objektu pohybující se rychlostí v lze vypočítat za pomoci teorie relativity takto [16]:

$$f_r = f_0 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}}{1 + \frac{v}{c_0}} \quad [Hz] \quad (3.7)$$

Kde je f_0 frekvence vlnění zdroje záření.

v rychlost pohybu objektu, pro přibližování objektu je záporná

c_0 rychlost světla ve vakuu

Pro praktické výpočty je $\left(\frac{v}{c_0}\right)^2$ velmi malé, proto ho můžeme zanedbat, potom vztah pro výpočet frekvence vlnění odražené vlny [16]:

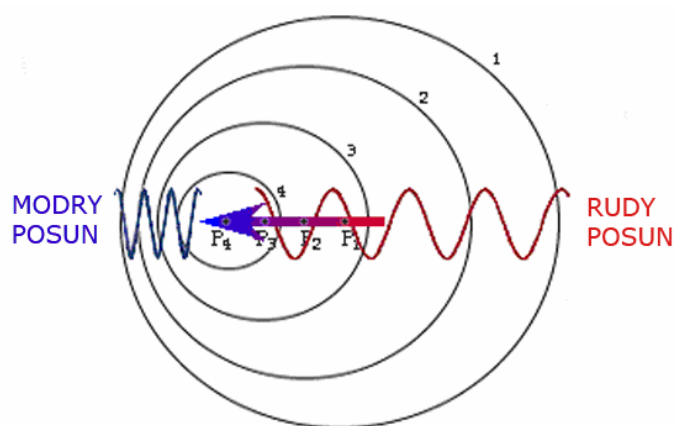
$$f_r = f_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c_0}} \quad [Hz] \quad (3.8)$$

Při měření Dopplerova jevu na optických vlnách je někdy snazší měřit vlnovou délku než frekvenci, v předchozí rovnici lze nahradit $f_0 = c/\lambda_0$ a $f_r = c/\lambda_r$, potom [9]:

$$\lambda_r = \lambda_0 \left(1 + \frac{v}{c_0}\right) \quad [m] \quad (3.9)$$

Tento jev se využívá u radarové detekce pro určení vzdálenosti, pohybu a povahy pohybu vzdáleného objektu pomocí rádiové vlny odražené od jeho povrchu.

Doplerův jev se využívá také pro měření povětrnostních podmínek a dokonce může měřit rotaci větru během bouřky a tím rozpoznat možná tornáda. Další možnou aplikací Dopplerova jevu je systém pro zvýšení bezpečnosti vozidla, tím že detekuje nebezpečné přiblížení k jinému vozidlu a v případě nebezpečí začne systém automaticky brzdit.



Obrázek 3-8: Modrý a rudý posun při Dopplerově jevu¹

¹ Zdroj: <http://hea-www.harvard.edu/~efortin/thesis/html/Doppler.shtml>

4. SNÍMAČE - ZÁKLADY

4.1 OPTICKÉ SNÍMAČE

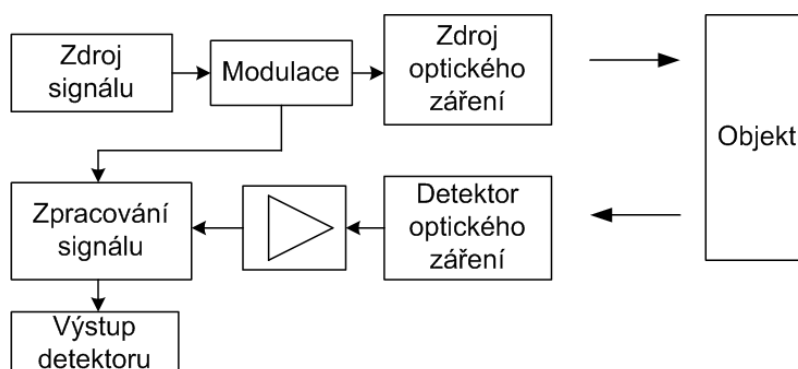
[5]

Optické snímače mění optické záření na elektrický proud, optickým zářením se myslí elektromagnetické záření na vlnových délkách v optickém pásmu, to je ta část elektromagnetického spektra, kde platí zákony optiky.

Optické snímače lze rozdělit na aktivní a pasivní, pasivní snímače detekují světelné záření přicházející od okolních zdrojů, zatímco aktivní vysílají do okolí vlastní optické záření a detekují zpět odražené záření. Oba typy snímačů používají optický kontrast k objektovému rozpoznávání.

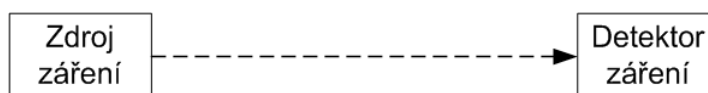
Aktivní optický snímač bývá složen ze zdroje optického záření, který většinou vysílá modulovaný optický signál, a detektoru záření. Zdrojem záření může být například laser nebo LED dioda. V případě optického reflexního snímače se vyslaný paprsek odráží od detekovaného předmětu, u kterého je potřeba znát jeho optické vlastnosti, pokud by totiž snímáný objekt neodrážel dostatečně snímačem vysílané záření, nebude snímač fungovat. Odražený paprsek se vrací zpět ke snímači, kde ho detekuje prvek citlivý na vysílané záření. Přijatý signál je zesílen a zpracován podle požadovaného výstupu. Při měření rychlosti objektu se přijatý signál porovnává s vyslaným a měří se fázový posun jednotlivých impulsů, z kterého se dopočítává rychlost objektu. Rychlost nemusí být vždy požadovaným výstupem, častěji stačí aby výstupem byla hodnota udávající, zda byl objekt detekován či nikoliv, v takovém případě stačí signál v ideálním případě dostatečně zesílit a přivést na komparátor, výstupem jsou poté dva stavy: je detekován objekt, není detekován objekt.

Detektorem záření může být fotoodpor, fotodioda a fototranzistor. Tyto typy fotodetektorů jsou založeny na fotoelektrickém jevu, při vnějším fotoelektrickém jevu dochází vlivem elektromagnetického záření k opouštění elektronů z krystalu, prvek se poté chová jako zdroj elektrického napětí, v případě vnitřního fotoelektrického jevu dochází ke zvyšování vodivosti daného prvku.



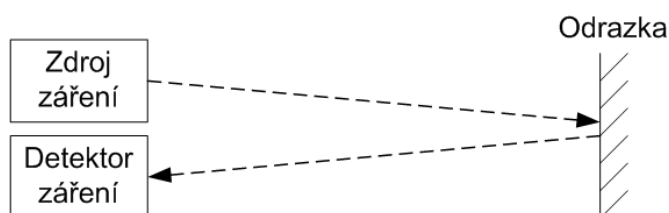
Obrázek 4-1: Blokové schéma optického reflexního snímače

Aktivní snímač lze použít jako světelnou závora, nejjednodušší variantou je jednocestná světelná závora, kdy je na jedné straně detekované oblasti zdroj záření a na druhé detektor záření, což může být v některých případech nevýhodou, protože musíme k detektoru přivést signálové a napájecí vedení.



Obrázek 4-2: Jednocestná světelná závora

Při požadavku umístění zdroje i detektoru na jednom místě se používá dvoucestná světelná závora, poté je ovšem potřeba umístit proti snímači v požadované vzdálenosti speciální odrazku. Pokud by byl požadavek snímání lesklých objektů, nemuselo by docházet k přerušení paprsku, proto se v tomto případě používá polarizované světlo.



Obrázek 4-3: Dvoucestná světelná závora

Dopadne-li polarizované světlo na lesklý objekt, pak bude bez změny polarizace odraženo směrem k detektoru. Před detektorem je umístěn polarizační filtr, jehož směr polarizace je vůči polarizaci vysílaného světla otočen o 90°, a proto světlo odražené lesklým povrchem nemůže dopadnout na detektor. Jestliže světlo

nedopadne na zrcadlíci se objekt, ale až na nepolarizující odrazku, bude odkloněno o 90° a může projít druhým depolarizačním filtrem na detektor

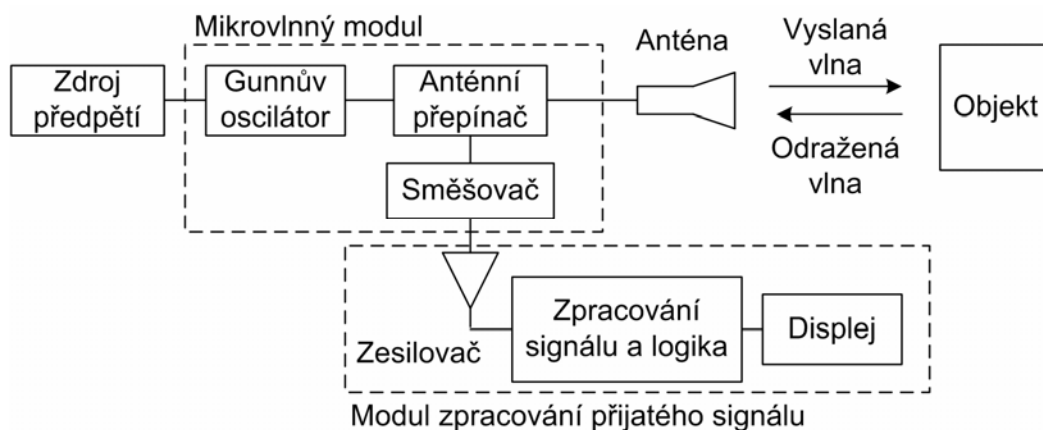
4.2 MIKROVLNNÉ SNÍMAČE

[16][13][7]

Mikrovlnné snímače mohou být alternativou k jiným snímačům zejména v případě potřeby pokrytí velké oblasti při velkém teplotním rozsahu a s velkou odolností proti parazitním vlivům jako jsou vítr, déšť, prach a akustický hluk.

Mikrovlnný radarový systém je založen na vysílání impulsů elektromagnetických vln do prostoru, z nichž se část odráží zpět od objektů v cestě paprsku. Odražené vlny jsou přijaté radarovou jednotkou, elektronicky zpracovány a převedeny na hodnoty smysluplné pro obsluhu radaru.

Nejběžněji používané frekvence mikrovlnných snímačů jsou $10,525\text{ GHz}$ a $24,125\text{ GHz}$. Tyto vlny jsou dostatečně dlouhé na to, aby prošli prostředím s parazitními vlivy a zároveň dost krátké na odraz od větších objektů.



Obrázek 4-4: Blokové schéma Dopplerova mikrovlnného radaru [16]

Mikrovlnná část snímače se skládá z Gunnova oscilátoru, antény a směšovací diody. Gunnův oscilátor je složen z diody připevněné v malé přesné dutině, která po přivedení napájení začne oscilovat v mikrovlnných kmitočtech. Generované elektromagnetické vlny jsou přivedeny vlnovodem ke směrové anténě, která vlnění směřuje do oblasti měřeného objektu. Zaostřující charakteristika antény udává, jak široký bude paprsek a volí se podle konkrétní aplikace snímače. Obecně pro užší

paprsek musí být použita větší anténa než pro širokoúhlé vysílání, ale při užším paprsku má anténa vyšší zisk, je citlivější na přijatý signál. Anténa se postupně přepíná mezi vysílačem v době vysílání vlny a detektorem v době příjmu odražené vlny, doba mezi přepnutím antény je zlomek mikrosekundy. Někdy jsou u Dopplerova radaru využívány dvě antény, jedna pro vysílání a druhá pro příjem vlny. Anténou vyzářené vlnění se šíří do měřeného prostoru až do doby, než narazí na měřený objekt, od měřeného objektu se odrazí a vrací se zpět ke snímači, pokud se objekt pohybuje, potom dojde ke změně frekvence signálu podle Dopplerova jevu. Odražený signál se přijímá anténou a je přiveden na Schottkyho směšovací diodu, která kombinuje vyslaný a přijatý signál. Na výstupu směšovače se objeví signál se složkou o frekvenci Δf , která je rovna rozdílu vyslané f_0 a odražené f_r frekvenci vlnění[16].

$$\Delta f = f_0 - f_r = f_0 \frac{1}{c_0/v + 1} \quad [Hz] \quad (4.1)$$

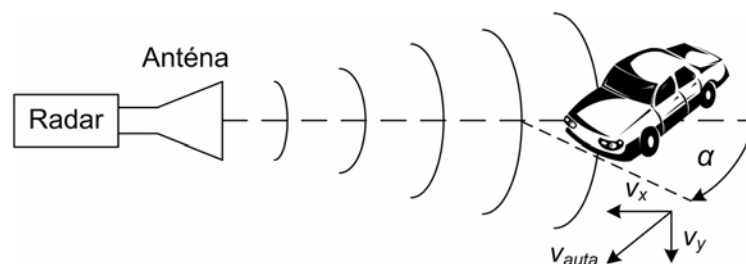
Pro rychlosti pohybu objektu v mnohem menší než je rychlost světla c_0 lze upravit vztah 4.1 na[16]

$$\Delta f \approx \frac{f_0}{c_0} v = \frac{v}{\lambda_0} \quad [Hz] \quad (4.2)$$

Rovnice je platná pouze pro pohyb objektu v přímém směru, pro pohyb pod úhlem α k čelu vlnoplochy je nutné rovnici 4.2 upravit na tvar

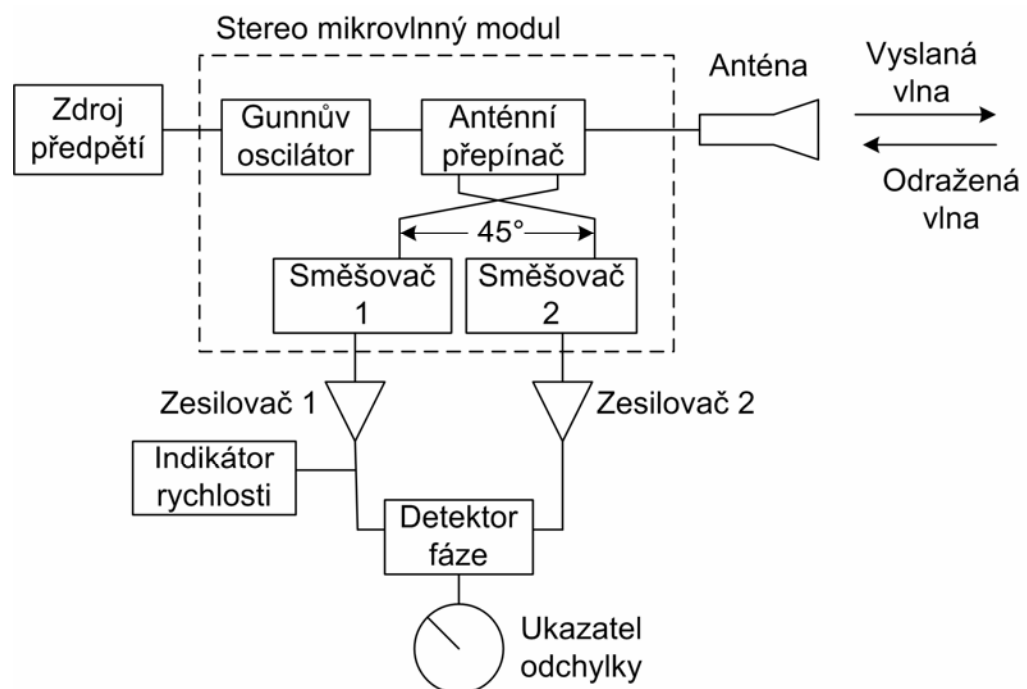
$$\Delta f = \frac{f_0}{c_0} v \cos \alpha \quad [Hz] \quad (4.3)$$

Z poslední rovnice vyplývá, že radarový snímač je schopen měřit pouze složku rychlosti v_x kolmé k vlnoploše vyzářovaného vlnění.



Obrázek 4-5: Detekce objektu radarem pod úhlem α

Nevýhodou radarových snímačů s jednou směšovací diodou je nemožnost zjistit, zda se měřený objekt vzdaluje či přibližuje, následkem toho může docházet vlivem parazitních vlivů k měření například větrem rozkmitaných předmětů, jako jsou dopravní značky nebo stožáry pouličního osvětlení případně jiných předmětů, například odvětrávacích ventilátorů v budovách, proto se do snímače přidává ještě jedna směšovací dioda, která směšuje stejné signály, ale o 45° posunutě, čehož se dosahuje vzájemným posunutím směšovacích diod o vzdálenost $\frac{1}{4}$ vlnové délky generovaného signálu. Výstupní signály z obou směšovacích diod jsou přivedeny na detektor fáze, který měří fázový úhel mezi signály. Pokud se bude měřený objekt přibližovat, bude předbíhat signál z první směšovací diody signál z druhé směšovací diody, při vzdalování objektu tomu je naopak. Při detekci kmitajících objektů se bude fáze periodicky měnit, potom se tento signál musí softwarově případně filtrem odstranit. Mikrovlnný Doppler radar se dvěma směšovacími diodami se označuje jako „stereo Doppler radar“.



Obrázek 4-6: Blokové schéma stereo Doppler radaru [16]

5. PRŮZKUM TRHU

Výsledkem práce může být nalezení komerčně vyráběného zařízení, proto bylo nutné ověřit zda se na trhu nevyskytuje zařízení, které by splňovalo zadané požadavky, případně jestli se již nevyrábí levné zařízení právě pro řízení křižovatek. Průzkum trhu byl zaměřen na již dva vybrané principy snímačů, optický a mikrovlnný.

5.1 OPTICKÉ SNÍMAČE

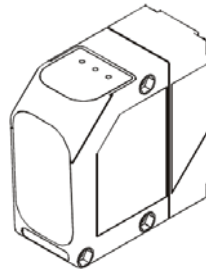
5.1.1 AXIMA

[18]

AXIMA s.r.o. dodává optické snímače SensoPart pro měření vzdálenosti, kontrolu kvality a pozice, měření tloušťky materiálu a podobné aplikace. Pro tento projekt jsou zajímavé dva jimi dodávané snímače vzdálenosti, FR91 a FR90, oba snímače jsou lze zakoupit ve verzích pro difúzní nebo reflexní měření, požadovaných hodnot při měření vzdálenost však dosahují pouze reflexní snímače. Snímač FR90 je schopen měřit vzdálenosti 0,5 m až 250 m s rozlišením ± 2 mm, snímač FR91 měří vzdálenosti 0,5 m až 50 m s rozlišením ± 5 mm, pro správnou funkci musí mít snímače pro odraz laserového paprsku speciální odrazku. Snímače měří čas od vyslání pulsu po jeho přijetí, což má za následek vysoký měřicí rozsah při vysoké přesnosti. Měřicí laser pracuje na vlnové délce 900 nm a operační frekvenci 1 kHz, tento laser spadá do laserové ochranné třídy 1. Snímače jsou vybaveny laserovým paprskem ve viditelném spektru pro správné nastavení snímače.

Komunikace se snímačem může probíhat přes sériové rozhraní RS 422 nebo SSI. Napájecí napětí lze požit v rozmezí 18 – 30 VDC při spotřebě 4,5 W. Za podmínky nepřetržitého provozu lze snímač používat v rozmezí teplot okolí -20 °C až $+50$ °C.

Snímače Fx9x jsou určeny například pro kontrolu pozice pro kolejová montážní zařízení, regálové zakladače, zvedací přístroje, výtahy, jeřáby, veškeré úlohy pro měření vzdálenosti a pozice v automatizace, kontrolu robotů a podobně.



Obrázek 5-1: Pouzdro snímače[18]

5.1.2 Micro-Epsilon

Snímač ILR 1021 je shodný se snímačem FR90 a ILR 1020 je shodný s FR91, snímače se liší pouze označením a barvou pouzdra.

5.1.3 ENVItech Bohemia s.r.o.

[4]

ENVItech Bohemia s.r.o. dodává snímače pro monitorování životního prostředí a jevů s tím spojených, jedním z jimi dodávaných zařízení je klasifikátor dopravy EB-SICK TC pracující na principu Laserového scanneru s dosahem snímání do 50 m. Klasifikátor je schopný snímat čtyři jízdní pruhy zároveň v obou směrech jízdy. Pro nezávislé snímání na světelných podmínkách má instalovaný filtr záření. Zařízení je určeno pro montáž kolmo nad vozovku případně vedle vozovky v dostatečné výšce pro snímání napříč vozovku. V případě nízkých teplot se automaticky spustí vyhřívání klasifikátoru. Komunikace se snímačem probíhá přes sériové rozhraní RS 232.



Obrázek 5-2: Klasifikátor dopravy EB-SICK TC[4]

5.1.4 Lavet s.r.o.

[19]

Laserový měřič rychlosti LIDAR využívá k měření vozidel pulsní laserový paprsek v neviditelném spektru o vlnové délce 904 nm a středním výkonu $22 \cdot 10^{-6}\text{ W}$ v 30 mm svazku. Okamžitá rychlost a vzdálenost vozidla je radarem vypočítána z doby zpoždění mezi vysláním a přijetím impulsu laseru, šířka vyslaného impulsu radarem je 10 ns až 18 ns s opakovacím kmitočtem 200 Hz . Radar je schopný měřit projíždějící vozidla v obou směrech jízdy a díky průměru stopy laseru 30 cm ve vzdálenosti 100 m zajišťuje radar snadné rozpoznání jednotlivých vozidel. Rozsah změřitelných rychlostí je 5 km/h až 250 km/h s rozlišením $\pm 3\text{ km/h}$. Teoretická vzdálenost měření rychlosti vozidel je až $1,8\text{ km}$, ale praktická maximální měřicí vzdálenost je 350 m . Měřicím místem na vozidle je přední nebo zadní část karoserie, kterou musí zaměřit pomocí hledáčku obsluha radaru.

Tento radar je určen jako náhrada za policejní mikrovlnné radary.

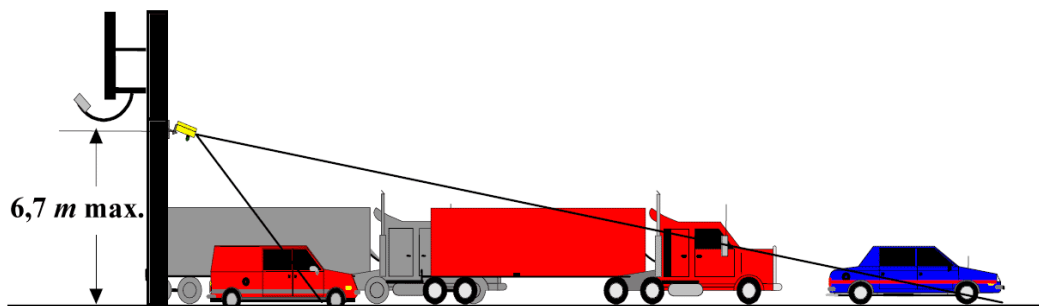
5.2 MIKROVLNNÉ SNÍMAČE

5.2.1 ENVitech Bohemia s.r.o.

[4]

RTMS je mikrovlnné čidlo pro sledování silničního provozu, které zjišťuje přítomnost vozidel v jednotlivých jízdních pruzích nebo detekčních zónách. Čidlo dodává informace o objemu, počtu cestujících, rychlosti vozidel a třídí je do jednotlivých, až osmi jízdních pruhů nebo detekčních zón. Výstupní informace jsou předávány výpočetnímu systému přes sériové porty RS-232 nebo RS-485. Jediné čidlo RTMS je schopno nahradit několik detektorů s indukční smyčkou a obslužný řídicí systém. Dosah RTMS je definován výškovým úhlem 40° , azimutem 15° a dosahem 3 až 60 m . Snímač je schopen pracovat v rozsahu teplot $-37\text{ }^\circ\text{C}$ až $+74\text{ }^\circ\text{C}$. Napájecí napětí snímače lze použít v rozsahu 12 V až 24 V střídavých nebo stejnosměrných, lze použít i napájení 115 V stř..

Snímač je určen k řízení dopravních signálů na křižovatkách, zjišťování nehod, měření rychlosti, zjišťování jízdy na červenou, sčítání počtu vozidel a další podobné aplikace.



Obrázek 5-3: Možné umístění detektoru [4]

5.2.2 Tewiko systems

[15]

Radar detektor (wavetec radarový detektor) je radarový hlásič určený pro detekování pohybu, případně rychlosti pohybu objektu. Oblast využití nalezme zejména tam, kde jsou důležitá rychlostní měření, tj. v běžném provozu, při dopravních analýzách, ale také při ostraze objektu. Data detektor lze použít přímo jako součást semaforu, čímž lze nahradit systém indukčních smyček. Detektor k měření využívá stereo-Doppler-radar s pracovní frekvencí 24,125 GHz, který je schopný změřit rychlost vozidla na vzdálenost až 300 m. Detektor lze napájet libovolným napětím v rozsahu 9 VDC až 40 VDC nebo 8 VAC až 230 VAC. Rozsah pracovních teplot detektoru je -20 °C až +70 °C. Výstupem detektoru může být prakticky cokoli například sériová linka RS-232, ale i výkonové relé 100 VDC / 10 A.

Další specializací TEWIKO Systems jsou informační ukazatele rychlosti projíždějících vozidel. Informační panel rychlosti je zařízení fungující s vysokou efektivitou na poli prevence. Radarové měření úsekové rychlosti je vhodným řešením pro lokality, kde v minulosti docházelo k častým konfliktům mezi vozidly a chodci a častým dopravním nehodám. Informační panel, jak již napovídá název, informuje řidiče o jejich aktuální rychlosti pomocí velkoplošného displeje, při překročení nastavené maximální rychlosti displej navíc bliká. Základním prvkem ukazatele je mikrovlnný Dopplerův radar s frekvencí 24,125 GHz a výkonem 5 mW, který je zabudovaný v integrované skříni společně s displejem, elektronikou.

Tewiko systems dodává několik variant ukazatelů rychlosti, které se liší nejen vzhledem, ale i zobrazovaným rozsahem rychlostí. Detekční vzdálenost vozidla je u všech uvedených typů 200 m. Napájení ukazatelů je možné jak z 12V baterie, tak z napájecí sítě 230 V. Komunikace s panely je možná pouze přes sériové rozhraní.

Typy WSD 70.50 RS a WSD 70.50 RT měří a ukazují rychlosti od 0 do 99 km/h, typy WSD 90.60 RS a WSD 90.60 vyhodnocují rychlosti od 1 do 199 km/h.

5.2.3 DOPIS, s.r.o.

[3]

Firma DOPIS, sídlící v Třebíči, dodává ukazatele rychlosti s podobným radarovým modulem jako Tewiko systems. Frekvence radaru je 24,125 GHz a výkon 5 mW. Rozsah měřitelných hodnot rychlosti je od 3 do 255 km/h s přesností měření ± 3 %. Detekční vzdálenost pro osobní automobil je 80 m a pro nákladní 120 m. Napájení panelu je možné jak z baterie 12 V, tak ze síťového napětí 230 V. Ukazatele GR32 a GR42 jsou dodávány v osmi variantách, lišících se pouze velikostí, formátem a barvou. Komunikace s přístrojem je možná pomocí bezdrátové technologie Bluetooth.

5.2.4 GEMOS CZ

[8]

Stejně jako u předchozích firem, tak i GEMOS CZ dodává ukazatel okamžité rychlosti vozidel s mikrovlnným radarem přijímačem zabudovaným v integrované skříni. Rychlost vozidel je schopný měřit do vzdálenosti 80 m od radaru v obou směrech jízdy. Rozsah měřených rychlostí má 10 až 99 km/h s přesností ± 3 km/h. Přenos dat z ukazatele je možný pomocí GPRS modemu. Ukazatel je možné napojit do informačního systému SYDO Traffic (informační systém pro dopravní liniové stavby). GEMOS CZ dodává dvě varianty ukazatelů, GEM CDU 2605 a GEM CDU 2605 light. Druhá varianta je odlehčená varianta první, cedule je pouze měřicí bez statistiky a SW vybavení.

5.3 TABULKOVÉ POROVNÁNÍ

Tabulka 5-1: Srovnání vybraných snímačů

Výrobce	Označení	Typ ¹	Dosah [m]	Rozsah [km/h]	Cena [Kč]	Komunikace
AXIMA s.r.o.	FR90ILA	O	<250		61 425	RS 422
	FR91LA	O	<50		31 850	SSI
Micro-Epsilon	ILR 1021	O	<250			RS 422 SSI
Lavet s.r.o.	PL-DOK I	O	< 350	5 - 250		Wifi USB
ENVItch	EB-SICK TC	O	< 50	5 - 250		RS-232
Bohemia s.r.o.	RTMS	M	3 - 60		200 000,-	RS-485
Tewiko systems	Radar detektor	M	0 - 200	0,5 - 255	26 500,-	RS-232
	WSD 70.50 RS	M	>100	0 - 99	59 000,-	
	WSD 90.60	M	>100	1 - 199		
DOPIS s.r.o.	GR32	M	>80	3 - 255	83 900,-	Bluetooth
	GR 42	M	>120		98 900,-	
GEMOS CZ	GEM CDU 2605	M	>80	10 - 99	124 000,-	GRPS
	GEM CDU 2605 light	M			56 000,-	

Na trhu byli hledány dva druhy snímačů, optické a mikrovlnné, z průzkumu je patrné, že mikrovlnných snímačů pro měření v dopravě lze najít nepoměrně víc než optických, což je pravděpodobně dáno tím, že mikrovlnné snímače jsou již zaběhnutou a relativně levnou technologií zatímco optické snímače jsou novu a stále se vyvíjející technologií. Nejlevnější optický snímač, který by alespoň z části splňoval zadaná kritéria stojí více jak 30 000 Kč, snímač ovšem dokáže pouze změřit vzdálenost k měřenému objektu, který musí být schopen odrážet laserový paprsek

¹ O = optický snímač

M = mikrovlnný snímač

zpět ke snímači, což lze splnit pouze v některých případech a nelze prakticky zajistit, aby všechna vozidla laserový paprsek bez většího útlumu odrazili zpět ke snímači.

Nejlevnější mikrovlnný snímač nalezený v průzkumu stojí 25 000 Kč, což není o moc méně než optický, ale oproti optickému snímači splňuje všechna zadaná kritéria a v některých případech kritéria převyšuje, mimo to je přímo určen pro zadanou aplikaci, proto ho lze okamžitě bez jakýchkoliv úprav použít. Vybraný detektor bude v další kapitole popsán podrobněji.

6. RADAR DETEKTOR

[20]

Radar detektor dodávaný firmou TEWIKO Systems byl vybrán jako ideální řešení pro tuto diplomovou práci, výrobcem detektoru je firma Wavetec sídlící Solingenu v Německu. Detektor lze zakoupit ve třech základních variantách Basic, Data a Net.



Obrázek 6-1: Wavetec radar[20]

Detektor funguje na principu stereo Dopplerova radaru, vysokofrekvenční signál o frekvenci $24,125\text{ GHz}$ a výkonu 5 mW je vysílán anténou, pokud bude v cestě signálu objekt, signál se odrazí zpět k detektoru a bude jím přijatý. Detektor měří fázový posun mezi vyslanou a přijatou frekvencí signálu.

Detektor je určen k měření rychlostí vozidel pro policii, sledování a následného řízení provozu, zjišťování přítomnosti chodců u přechodu nebo v zabezpečeném areálu případně měření rychlosti sportovců například lyžařů.

Wavetec radar je podle výrobce schopen změřit jakýkoli pohybující se objekt o nejmenší velikosti zbraňové kulky. Množství odraženého signálu závisí na velikosti a materiálu měřeného objektu, mikrovlnný signál prochází plastovým, skleněným i dřevěným objektem, nejvíce se odráží od kovových materiálů. Množstvím odraženého signálu je dáno na jakou vzdálenost je radar schopen změřit daný objekt, pokud v případě měření vozidel vztáhneme maximální měřitelnou vzdálenost k osobnímu vozidlu tj. $=100\%$, potom dostáváme:

Nákladní automobil	150 %
Osobní vozidlo	100 %
Motocykl	50 %

Cyklista 30 %

Chodec 15 %

Hodnoty jsou přibližné, protože přesné hodnoty závisí na tvaru vozidla, částečně i na barvě, proto je při měření s wavetec radarem nutné počítat s dálkovou rezervou pro měření.

Důležitým parametrem detektoru je použitá anténa, lze použít dvě varianty širokoúhlou a směrovou anténu:

Širokoúhlá standardní anténa ($30^\circ \times 40^\circ$):

- Nižší cena
- Směrová kalibrace paprsku je snadná
- Identifikační pole je širší
- Osobní vozidlo lze změřit do vzdálenosti 100 m

Směrová volitelná anténa ($12^\circ \times 12^\circ$):

- Osobní vozidlo lze změřit do vzdálenosti 200 m
- Minimalizuje se rušení na hranicích snímání

Rozsah měřitelných rychlostí je od 1 km/h do 250 km/h, což umožňuje software v mikrokontroléru.

Základní verzí radaru je Basic detektor, který se používá pro samostatné měření, výstupem detektoru je výkonové relé. Basic detektor je určen jako náhrada za indukční smyčky a lze s ním měřit do vzdálenosti max. 200 m. Instalační úhel proti objektu pro měření se může pohybovat mezi 0° až 90° .

Verze data detektor se liší od předchozí verze výstupem, kterým je mimo výkonového relé také sériová linka RS-232 a lze pomocí ní komunikovat s PC. Dalším rozdílem je měřitelná vzdálenost, která může být až 300 m.

Poslední verzí snímače je Net detektor, který má výstupem místo RS-232 sběrnici RS 485 na kterou lze připojit až 32 detektorů. Rychlostní hranice, při kterých má detektor spínat lze kdykoli měnit pomocí připojeného PC.

7. LASEROVÁ BEZPEČNOST

[2][11]

Optické záření z laseru se díky vysoké koherenci a malé rozbíhavosti odlišuje od ostatního záření z klasických zdrojů, při větším výkonu může vyvolat poškození nechráněných částí kůže nebo oka. Ve spektrálním rozsahu 400 nm až 1400 nm jsou vstupní části oka transparentní a nejvíce je ohrožena sítnice. Záření o vlnových délkách nad 1400 nm ohrožuje především rohovku.

Základním parametrem pro rozdělení do bezpečnostních tříd je limit přípustné energie AEL, který vyjadřuje maximální přípustnou úroveň záření povolenou v dané třídě. Pro rozdělení do tříd z hlediska bezpečnosti obsluhy je rozhodující maximální přípustná dávka ozáření MPE, která udává úroveň laserového záření, jemuž mohou být za normálních okolností vystaveny osoby, aniž by se u nich projeví nepříznivé vlivy ozáření. Hladiny MPE jsou závislé na vlnové délce záření, trvání impulsu nebo době ozařování, spektru vlnových délek, druhu ozáření a úhlovém rozpětí zdroje záření.

Lasery jsou rozděleny do následujících tříd:

Třída 1: lasery o malém výkonu, které jsou za provozních podmínek bezpečné. Není zde riziko překročení MPE ani při přímém pohledu do svazku laseru okem, tak i při použití optických pomůcek (mikroskop).

Třída 2: přístroje vyzařující viditelné záření v rozsahu vlnových délek 400 nm až 700 nm. Ochrana zraku je zajištěna fyziologickými reakcemi oka.

Třída 3A: laser bezpečný pro sledování nechráněným okem, přímý pohled do svazku pomocí optických pomůcek může být nebezpečný. Nebezpečné mohou být při přímém pohledu do svazku po dobu delší než 0,25 s.

Třída 3B: Přímý pohled do svazku je vždy nebezpečný. Sledování difúzních odrazů je bezpečné.

Třída 4: Lasery schopné produkovat nebezpečné difúzní odrazy, mohou způsobit poškození pokožky a vnik požáru.

Laserové zařízení se klasifikuje do jednotlivých tříd na základě kombinace výstupních výkonů a vlnových délek dosažitelných laserovým zařízením v celém

jeho funkčním rozsahu v době životnosti zařízení. Ke správnému výpočtu AEL pro zařazení zařízení do třídy se používají korekční faktory definované normou.

Norma dále definuje pravidla pro zařazení laseru do příslušné třídy, které jsou rozděleny podle počtu vlnových délek laseru, ohledu na vystavení osob záření, plošného záření a časové základny.

Předchozí řazení bylo definované pouze pro jeden impuls, pro stanovení limitů přípustné emise AEL pro opakované ozáření se používá maximální omezení z následujících požadavků:

- Ozáření jedním impulzem z řady nesmí překročit hodnotu AEL pro jeden impuls
- Střední výkon pro řadu impulsů o délce T nesmí překročit výkon odpovídající limitů AEL jednoho impulsu o délce T .
- Ozáření způsobené jedním impulzem v řadě nesmí přesáhnout limit AEL pro jeden impuls násobený korekčním činitelem.

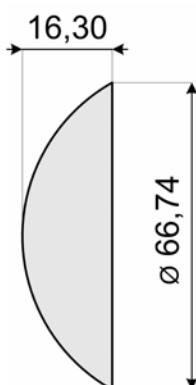
Každé laserové zařízení musí být označeno výstražným štítkem s nápisem podle požadavků normy. Štítek musí být trvale upevněn na zřetelně viditelném místě zařízení. Dále musí být na zařízení umístěn štítek s uvedenou hodnotou maximálního výkonu laserového zařízení.

8. VÝPOČTY NUTNÉ PRO REALIZACI OPTICKÉHO SNÍMAČE

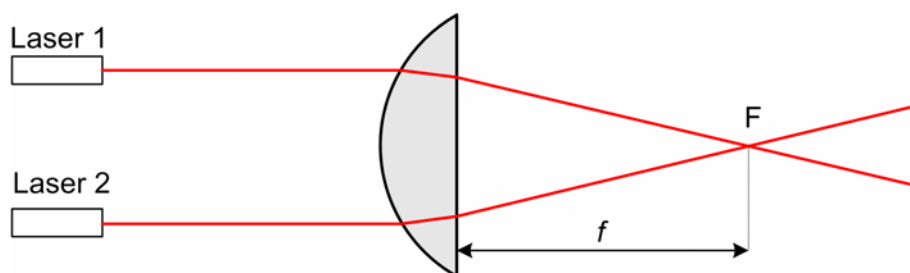
Před samotnou realizací optického snímače bylo nutné provést několik nezbytných výpočtů týkajících se umístění čočky vzhledem k čidlu a délky laserového impulsu a jeho frekvence.

8.1 URČENÍ OHNISKOVÉ VZDÁLENOSTI ČOČKY

Jak už bylo dříve uvedeno, pro realizaci optického snímače byla použita plankonvexní čočka, její velikost je uvedena na obrázku 8-1. K čočce ovšem nebyly uvedeny žádné její parametry, ale pro správné umístění čočky ve snímači bylo nutné znát její ohniskovou vzdálenost a index lomu.



Obrázek 8-1: Čočka použitá pro snímač



Obrázek 8-2: Určení ohniskové vzdálenosti pomocí laseru

K prvnímu určení ohniskové vzdálenosti plankonvexní čočky bylo využito faktu, že se rovnoběžné paprsky, které dopadají kolmo na čočku, sbíhají za čočkou v jejím ohnisku. Pomocí dvou laserů byly vytvořeny dva rovnoběžné světelné

paprsky, které dopadaly kolmo na čočku, za čočkou se paprsky sbíhaly právě v ohnisku, poté byla změřena vzdálenost mezi plochou stranou čočky a bodem křížení paprsků, která byla 68,26 mm.

Pro přesné určení ohniskové vzdálenosti předchozí metodou by bylo nutné znát přesné souřadnice optického středu čočky, proto pro přesnější určení ohniskové vzdálenosti čočky byla použita metoda dvojího zvětšení. U této metody se měří příčné zvětšení obrazu předmětu Y' ve dvou různých vzdálenostech a' , hodnoty se poté dosazují do vztahu 8.1 a jednoduše se vypočítá ohnisková vzdálenost[14].

$$f = \frac{|a'_1 - a'_2|}{\left| \left(\frac{Y'}{Y} \right)_2 - \left(\frac{Y'}{Y} \right)_1 \right|} \quad [m] \quad (8.1)$$

Pro metodu dvojího zvětšení byla použita stejná soustava laserových paprsků jako je naznačeno na obrázku 8-2, ale měřila se vzdálenost laserových paprsků od sebe ve vzdálenosti $a'_1 = 100 \text{ mm}$ a $a'_2 = 200 \text{ mm}$ od čočky. Vzájemná vzdálenost laserových paprsků před čočkou Y byla 24,07 mm, změřená vzdálenost paprsků ve vzdálenosti a'_1 byla 20 mm a ve vzdálenosti a'_2 54,8 mm. Po dosazení do vztahu 8.1 byla stanovena ohnisková vzdálenost čočky na 70 mm.

$$f = \frac{|100 - 200|}{\left| \left(\frac{54,8}{24,07} \right) - \left(\frac{20}{24,07} \right) \right|}$$

$$f = 69,2 \approx 70 \text{ mm}$$

Vypočtená hodnota je o něco málo vyšší než hodnota změřená přímo pomocí dvojice laserů, z hodnoty ohniskové vzdálenosti a znalosti rozměrů čočky lze vypočítat index lomu materiálu čočky, který je potřebný k dalším výpočtům. Index lomu lze vypočítat dosazením hodnot do vztahu 3.5, který popisuje plankonvexní čočku. Předem je nutné dopočítat poloměr zaoblení čočky, ten lze snadno spočítat pomocí Pythagorovi věty, protože je známá šířka čočky (tj. výška kruhové úseče h) a výška čočky (tj. délka úsečky vytínající kruhovou úseč w), pro poloměr zaoblení platí

$$r^2 = (r - h)^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2 \quad (8.2)$$

Po úpravě vychází vztah pro výpočet poloměru zaoblení r :

$$r = \frac{h^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2}{2h} \quad [m] \quad (8.3)$$

Po dosazení vychází hodnota zaoblení čočky:

$$r = \frac{16,3^2 + \left(\frac{66,74}{2}\right)^2}{2 \cdot 16,3}$$

$$r = 42,31 \text{ mm}$$

Při znalosti poloměru zaoblení čočky a ohniskové vzdálenosti lze dosadit do vztahu 3.5 a vypočítat index lomu materiálu čočky

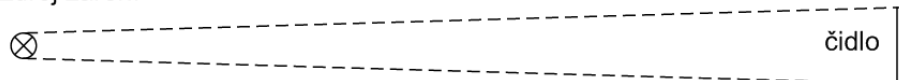
$$\frac{1}{70} = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{42,31} \right) \Rightarrow n_2 = 1,6$$

8.2 VZDÁLENOST ČOČKY OD ČIDLA

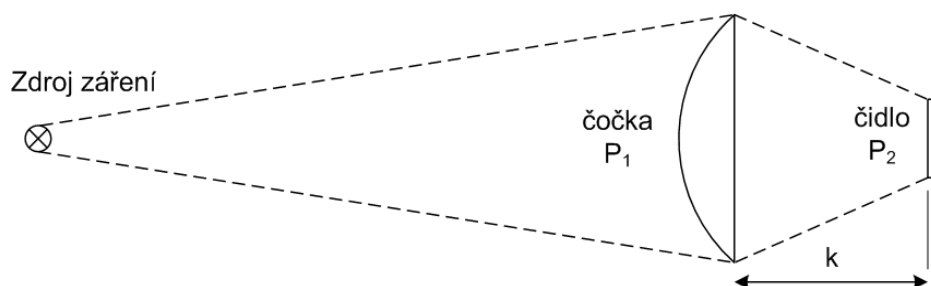
[5]

Hodnota výstup čidla je úměrná přijatému světelnému výkonu a fotocitlivé ploše čidla. Hodnota výstupu se může dramaticky zvýšit při použití čočky, ale může dojít i k opačnému efektu. Libovolné prostorové umístění čočky by mohlo snížit efektivitu celého detektoru, proto je potřeba toto umístění podrobně zvážit.

Zdroj záření



Obrázek 8-3: Detekce záření bez použití čočky



Obrázek 8-4: Detekce záření s použitím čočky

Z Obrázek 8-3 je vidět, že plocha kterou čidlo detekuje bez použití čočky je závislá pouze na ploše samotného čidla P_2 , zatímco z obrázek 8-4 je patrné, že lze detekovanou plocha záření zvýšit na plochu čočky P_1 , která záření směřuje na čidlo. Vzdálenost, do které má být umístěn fotocitlivý prvek je dána ohniskovou vzdáleností čočky a požadovanou velikostí detekční plošky. Ohnisková vzdálenost čočky určená v kapitole 8.1 je 70 mm , velikost detekční plošky snímače určuje velikost citlivé plošky fotopravku, vzhledem k malé plošce fotopravků bylo zapotřebí vytvořit pole více fotocitlivých prvků. Velikost pole se odvíjí z velikosti požadovaného světelného bodu za čočkou, vertikální pozice bodu se ovšem se vzdáleností objektu od snímače mění, proto bylo nutné vytvořit pole obdélníkového tvaru, výsledná velikost byla na základě pokusu stanovena na $10 \times 20 \text{ mm}$.

Tato pole bylo potřeba umístit do správné vzdálenosti od čočky, jsou dvě možnosti, umístit ho před nebo za ohnisko čočky, v rámci zmenšování velikosti snímače bylo pole umístěno před ohnisko čočky. Bod vytvořený čočkou musel být schopen osvětit celou šířku fotocitlivého pole, proto výsledná vzdálenost čočky od pole byla 60 mm .

Z plochy čočky a fotocitlivého pole lze vypočítat o kolik se zvýší citlivost R snímače podle následujícího vztahu[5]

$$R \approx \frac{P_1}{P_2} \left[1 - 2 \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right] \quad [-] \quad (8.4)$$

kde n je index lomu materiálu čočky.

P_1 je plocha čočky

P_2 je plocha fotocitlivé části čidla

Plocha čočky je dána její velikostí, v případě tohoto projektu je průměr čočky 66,74 mm, čočka musí být umístěna v držáku, proto se efektivní průměr sníží přibližně na 65 mm, plocha čočky je potom $P_1 = \pi r^2 = \pi 32,5^2 = 3318 \text{ mm}^2$. Plocha využití fotocitlivého pole je 100 mm^2 . Po dosazení vypočtených hodnot do vztahu 8.4 byla vypočtena.

$$R \approx \frac{3318}{100} \left[1 - 2 \left(\frac{1,6-1}{1,6+1} \right)^2 \right]$$

$$R \approx 29,6$$

Citlivost snímače se použitím čočky zvýší 29,6 krát.

8.3 VÝPOČET DÉLKY IMPULSU LASERU PRO TŘÍDU 1

[2]

Pro správné zařazení laseru do třídy musíme znát jeho vlnovou délku a optický výkon nebo zářivou energii. Pro výpočet zářivé energie platí vztah[2]

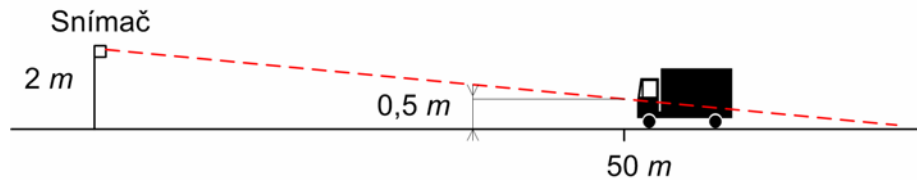
$$Q = \int_{\Delta t} \Phi dt \quad [J] \quad (8.5)$$

kde Φ je optický výkon [W]

Pokud známe vlnovou délku a výkon laseru musíme zjistit, na jakou nejdelší dobu může dojít k ozařování osoby respektive jeho nejcitlivější části, oka. Pro tuto diplomovou práci je zadána snímací vzdálenost 50 m a výšky umístění snímače nad vozovkou 2 m, jaký úhel má svírat vysílaný laserový paprsek s vozovkou není snadné určit vzhledem k rozmanitosti tvarů a rozměrů vozidel. Úhel vysílání paprsku určuje, v jaké výšce budou vozidla v padesátimetrové vzdálenosti detekována, pokud by byl úhel příliš veliký, docházelo by k detekci vozidel na kratší vzdálenost, pokud by byl úhel příliš malý, nemuselo by k detekci docházet vůbec. Úhel vysílání lze snadno spočítat z výšky, ve které chceme vozidla detekovat, v tomto případě by mohla být výška detekce 0,5 m. Je to dostatečně vysoko na to, aby laserový paprsek mířil alespoň do výšky předního nárazníku vozidla. Úhel lze potom snadno dopočítat:

$$\varphi = \arctan((2 - 0,5) / 50)$$

$$\varphi = 1,7^\circ$$



Obrázek 8-5: Nasměrování laserového paprsku snímače

Pokud se vozidlo bude přibližovat ke snímači, bude laserový paprsek na autě postupně stoupat, až se dostane do pozice čelního skla, kde by mohlo dojít k ozáření očí řidiče. Jako kritickou můžeme uvažovat výšku, která odpovídá průměrné výšce hlavy 25 cm, toto je nejpravděpodobnější výška, při které by řidič mohl paprsek sledovat. Výška 25 cm odpovídá při nastavení laserového paprsku 1,7° ujetí vozidla na vozovce 8 m. Při rychlosti vozidla 50 km/h bude hlava řidiče ozařována 0,56 s, pokud by se vozidlo z jakéhokoli důvodu pohybovalo pomaleji, musí být také zaručeno, že nedojde k poškození zraku řidiče, proto budeme uvažovat rychlost pohybu vozidla 10 km/h (doba ozařování 2,9 s). Pokud by došlo k zastavení provozu, například červenou barvou semaforu, musí být snímač na tuto dobu uveden mimo provoz.

V navrženém snímači jsou testovány dva lasery, jeden o vlnové délce 650 nm, výkonu 3 mW a druhý o vlnové délce 808 nm a výkonu 200 mW, pro oba lasery je potřeba spočítat AEL a dobu impulsu, aby je bylo možné zařadit do laserové třídy 1 a používat je pro detekci. Jako první bylo potřeba vytvořit graf, ve kterém bude znázorněna závislost výkonu laseru na délce impulsu pro danou vlnovou délku laseru. Z tohoto grafu lze určit podle optického výkonu, jak dlouhý pro daný laser může být impuls.

8.3.1 Laser 650 nm, 3mW

Norma definuje pro různé rozmezí vlnových délek a různé rozmezí délek světelných impulsů vztahy pro výpočet AEL, vztahy pro laser 650 nm jsou uvedeny v tabulce 8-1.

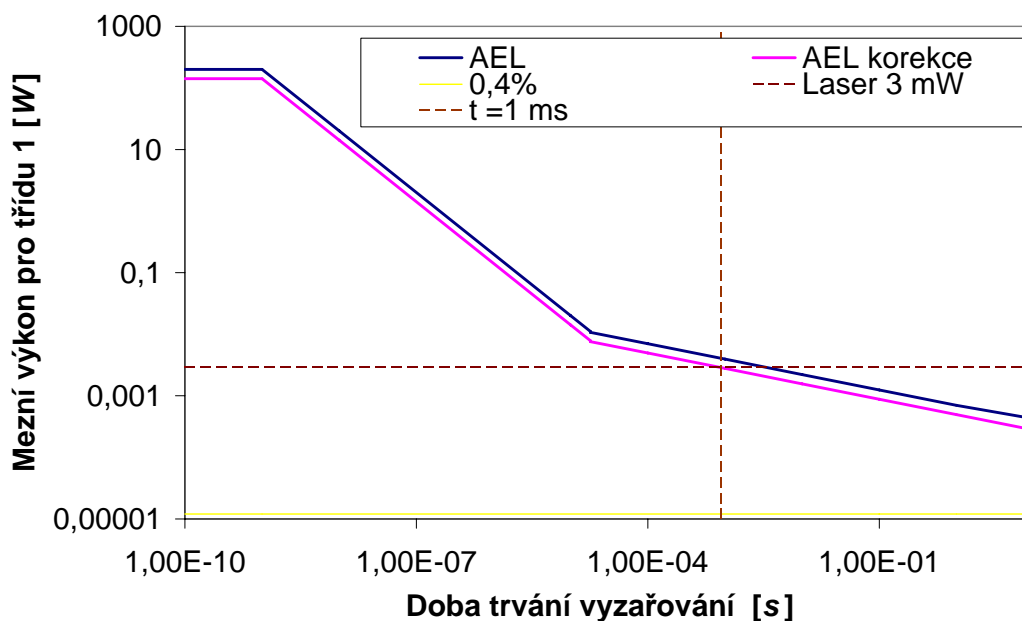
Tabulka 8-1: Vzorce pro výpočet limitů AEL pro $\lambda = 650 \text{ nm}$

Čas vyzařování [s]	$< 10^{-9}$	$10^{-9} - 1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5} - 10$
Vzorec pro výpočet	$200C_6 \text{ W}$	$2 \cdot 10^{-7} C_6 \text{ J}$	$7 \cdot 10^{-4} t^{0,75} C_6 \text{ J}$

Konstanta C_6 se volí podle toho pod jakým rovinným úhlem α leží zdánlivý zdroj záření, v případě použitých laserů vychází světelný svazek z bodového zdroje, proto se hodnota 1. Pro stanovení základního času pro výpočet maximální povolené AEL pro jeden impuls z řady nebudeme uvažovat náhodné sledování laserového paprsku a protože laser pracuje ve viditelném spektru bude doba ozáření oka omezena mrkacím reflexem na $0,25 \text{ s}$, pro jistotu ale základní čas byl zvolen 1 s . Po dosazení do jednotlivých vztahů z tabulky 8-1 vyjde graf AEL v obrázku 8-6 určující maximální AEL pro jeden impuls, pro výpočet AEL pro jeden impuls z řady opakujících se impulsů musí být předchozí graf vynásoben korekčním činitelem[2]:

$$AEL_{train} = AEL_{single} \cdot C_5 \quad (8.6)$$

Korekční činitel C_5 se stanovuje z počtu impulsů v daném základním čase viz. norma. Předpokládaný počet impulsů v čase 1 s jsou čtyři, výsledkem přepočtu je přísnější mez maximální povolené AEL uvedené v obrázku 8-6 jako AEL korekce. V grafu je hnědým křížem znázorněna pozice zvolených hodnot, tj. laser 3 mW , délka impulsu laseru 1 ms a frekvence impulsů 4 Hz , z grafu je patrné, že zvolené hodnoty jsou mezní.



Obrázek 8-6: Graf maximálních povolené AEL pro 650 nm

Dalším důležitým výpočtem je hodnota středního výkonu laseru, pro zvolené hodnoty je střední výkon laseru:

$$\Phi_{stř.} = \Phi_{laseru} \cdot t_{impulsu} \cdot f$$

$$\Phi_{stř.} = 0,003 \cdot 0,001 \cdot 4 = 1,2 \cdot 10^{-5} W$$

Střední hodnota je vyznačená v grafu na obrázku 8-6 žlutou barvou, střední výkon je natolik nízký, že by jím mohl být člověk ozařován dobu delší než 10 s, tato hodnota je v tomto případě nejméně omezující. Laser o optickém výkonu 3 mW s délkou impulsů ne delší než 1 ms a frekvencí 4 Hz lze zařadit do třídy 1 laserové bezpečnosti. Při kratší době impulsu může být zvýšena frekvence opakování impulsů, bohužel použitý laser má mezní dobu impulsu 1 ms, při kratším impulsu strmě klesá jeho výkon.

8.3.2 Laser 808 nm 200 mW

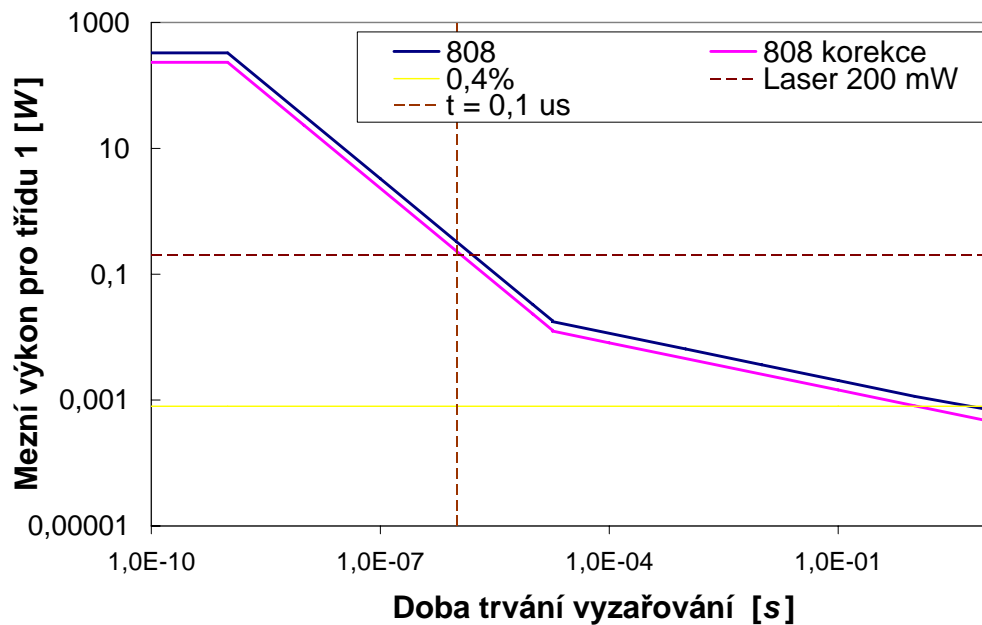
U laserů s vlnovou délkou 808 nm se k výpočtu maximální AEL používají vztahy uvedené v tabulce 8-2. Konstanta C_6 se volí opět jako v předchozím případě 1, konstanta C_4 se vychází z vlnové délky použitého laseru, vzorec pro výpočet je následující[2]:

$$C_4 = 10^{0,002(\lambda-700)} \quad (8.7)$$

Po dosazení vyjde hodnota konstanty $C_4 = 1,64$.

Tabulka 8-2: Vzorce pro výpočet limitů AEL pro $\lambda = 808 \text{ nm}$

Čas vyzařování [s]	$< 10^{-9}$	$10^{-9} - 1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5} - 10$
Vzorec pro výpočet	$200C_4C_6 W$	$2 \cdot 10^{-7} C_4C_6 J$	$7 \cdot 10^{-4} t^{0,75} C_4C_6 J$



Obrázek 8-7: Graf maximální povolené AEL pro 808 nm

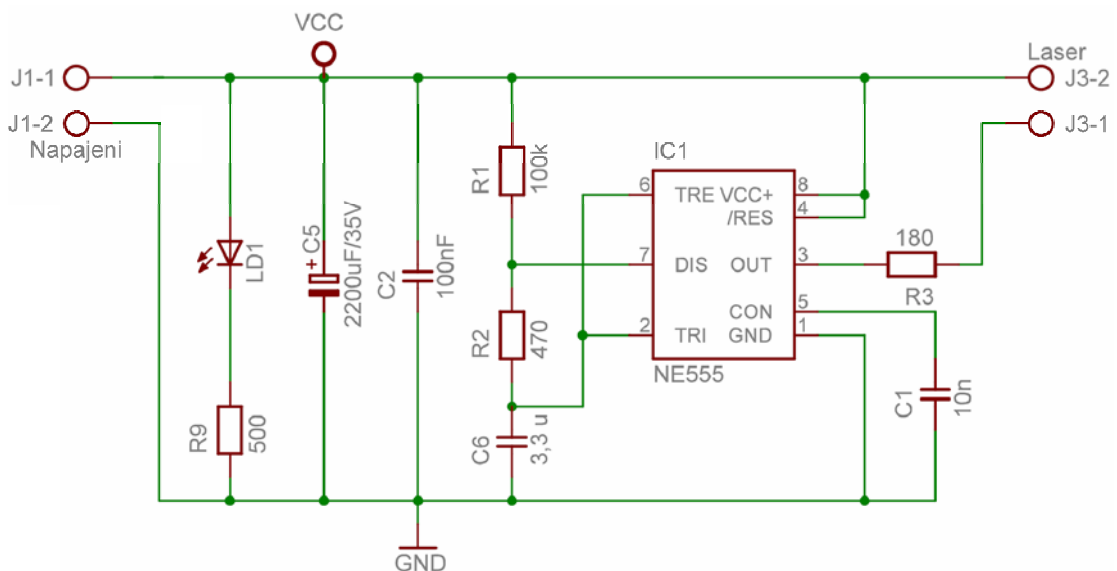
Z grafu na obrázku je opět hnědým křížem zobrazen nejdelší možný čas pro výkon laseru, vzhledem k tomu, že tento laser má vysoký optický výkon, musel by být použit impuls o délce menší než $0,1 \mu s$, což není možné daným laserem vytvořit. Řešením by bylo snížit optický výkon laseru nebo použít laser pro impulsní režim. I přes to, že laser nelze zařadit do třídy 1 laserové bezpečnosti, byl otestován ve snímači, aby bylo zjištěno jak veliký vliv má na kvalitu detekce použití laseru o vyšší vlnové délce.

9. REALIZACE OPTICKÉHO SNÍMAČE

Vytvořený optický snímač se skládá ze dvou hlavních částí, generátoru a detektoru s vyhodnocovacím obvodem.

9.1 GENERÁTOR IMPULSŮ

Hlavní částí generátoru impulsů je časovač 555 zapojený jako astabilní klopný obvod. Výstupem generátoru jsou impulsy v délce 1 ms a frekvencí 4 Hz.



Obrázek 9-1: Schéma zapojení generátoru impulsů

Schéma zapojení generátoru vytvořené v programu *Eagle* je zobrazeno na obrázku 9-1. Obvod je určen k připojení k napájecímu zdroji stejnosměrného napětí 12 až 15 V, pro indikaci připojeného napětí slouží zelená LED dioda *LD1*. Kondensátory *C2* a *C5* jsou určeny pro filtraci připojeného stejnosměrného napětí. K ovládní RS klopného obvodu časovače 555 slouží rezistory *R1* a *R2* a kondensátor *C6*, jejich hodnoty jsou určeny ze vztahů pro časovač 555 v zapojení jako astabilní klopný obvod a požadovaných časových velikostí impulsů, kde je T_1 doba mezi jednotlivými impulsy a T_2 doba jednotlivých impulsů.

$$T_1 = 0,693(R_1 + R_2)C \quad [s] \quad (9.1)$$

$$T_2 = 0,693R_2C \quad [s] \quad (9.2)$$

Požadovaná doba jednoho impulsu určená z normy je 1 ms , ze vztahu 9.2 lze určit hodnotu odporu R_2 při použitím kondensátoru $3,3\ \mu\text{F}$

$$0,001 = 0,693R_2 3,3 \cdot 10^{-6}$$

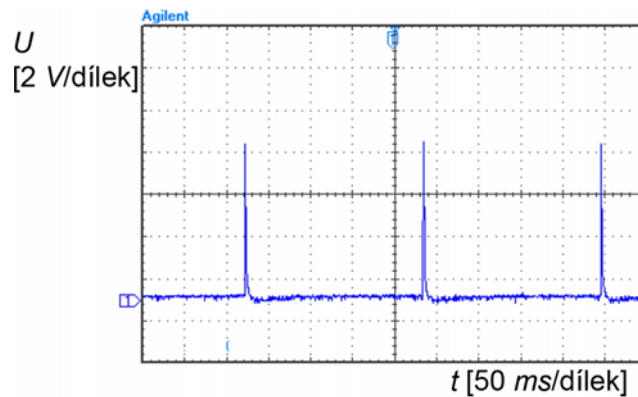
$$R_2 = 437\ \Omega \approx 470\ \Omega$$

Při frekvenci $4\ \text{Hz}$ by měl čas T_1 být $250\ \text{ms}$, po dosazení do vztahu 9.1 dostáváme:

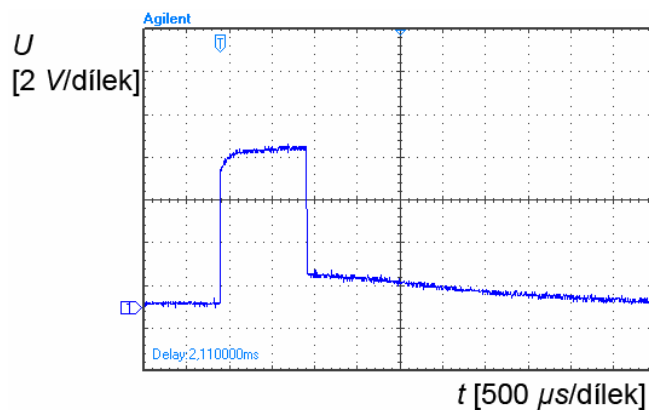
$$0,250 = 0,693(R_1 + 470)3,3 \cdot 10^{-6}$$

$$R_1 = 108\ \text{k}\Omega \approx 100\ \text{k}\Omega$$

Výstup generátoru, s použitím vypočtených hodnot rezistorů, je znázorněn na obrázku 9-2, graf byl naměřen přímo na výstupu 3 obvodu 555. Odpor R_3 na výstupu slouží ke snížení napětí napájené modul laserové diody.



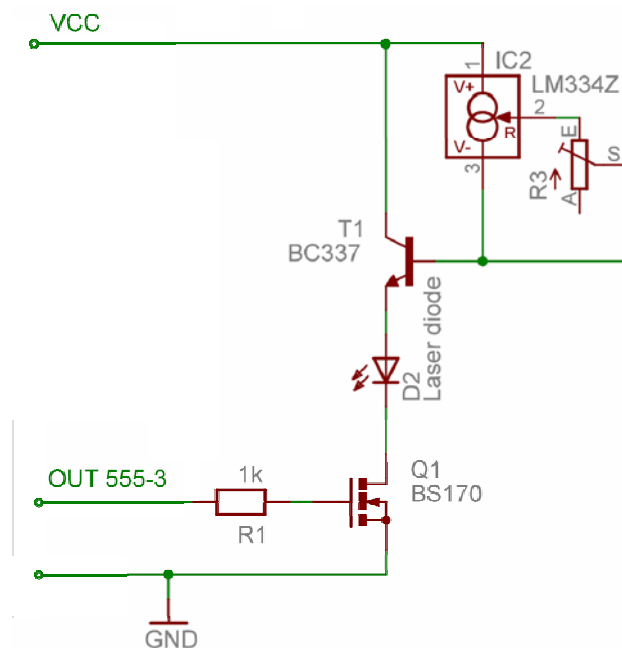
Obrázek 9-2: Výstup generátoru



Obrázek 9-3: Detail impulsu

Generátorem je přímo napájen laserový modul HLDPM-650-3, který obsahuje první testovanou laserovou diodu s optickým výkonem 3 mW a vlnovou délkou 650 nm .

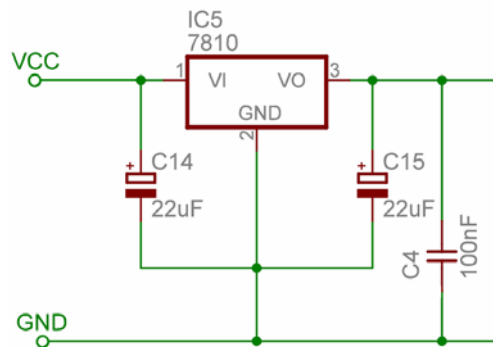
Při testování laserové diody L-SLD80200A bylo pro ni nutné vytvořit proudový zdroj, dioda má být napájena proudem 260 až 280 mA . Proudový zdroj pro tuto diodu je znázorněn na obrázku 9-4, základem obvodu je proudový zdroj LM 334, který je nastavován trimrem $R3$, zdroj se schopen dodávat proud až 10 mA což je málo, proto byl posílen tranzistorem $T1$. Řídicí signál z generátoru je přiveden přes rezistor $R1$ na bázi MOSFED tranzistoru BS 170.



Obrázek 9-4: Obvod pro napájení laserové diody L-SLD80200A

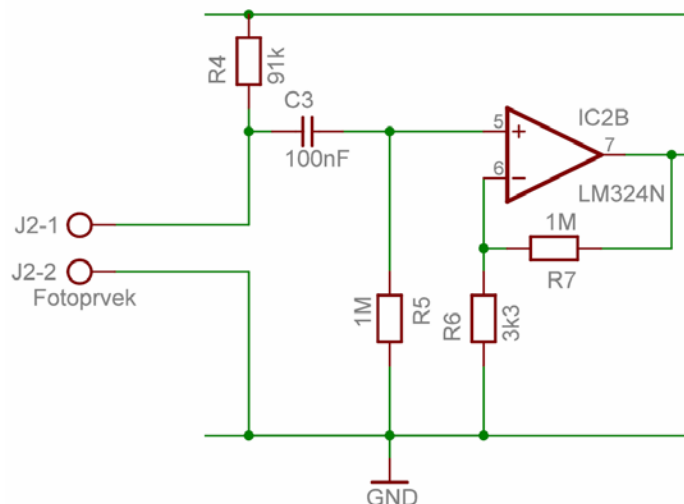
9.2 VYHODNOCOVACÍ OBVOD

Obvod je napájen stejným napětím jako generátor impulsů, v generátoru vzniká díky nabíjení a vybíjení kondensátoru značné rušení, proto musel být pře vyhodnocovací obvod umístěn stabilizátor napětí na 10 V 7810, který rušení značně potlačuje. Pře umístěním stabilizátoru před obvod kolísala ustálená hodnota napětí před komparátorem (viz. níže) $\pm 60\text{ mV}$, po umístění se hodnota zmenšila na $\pm 1\text{ mV}$.



Obrázek 9-5: Stabilizátor napětí

Bezprostředně u vývodů stabilizátoru jsou umístěny dva tantalové blokovací kondensátory $C14$ a $C15$ s hodnotou kapacity $22 \mu F$, na výstupu stabilizátoru je navíc připojen keramický kondensátor $C4$.



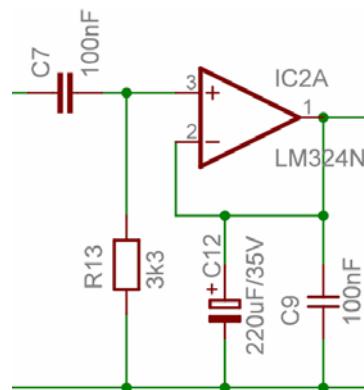
Obrázek 9-6: Zesilovač signálu z fotodiody

Další částí vyhodnocovacího obvodu je zesilovač změny úbytku napětí na poli paralelně zapojených fotodiody. Fotodiody jsou zapojené v závěrném směru, jejich pracovní bod je nastaven odporem $R4$ o velikosti $91 k\Omega$. Pro snímání laserového záření z laseru s vlnovou délkou $650 nm$ byly použity fotodiody BPW 34, pro laser s vlnovou délkou $808 nm$ byly použity fotodiody HSDL-5420#011. Konkrétní fotodiody byly voleny zejména podle své citlivosti na danou vlnovou délku, která musela být co možná nejvyšší a citlivosti na ostatní vlnové délky, která měla být co nejnižší. Dalším parametrem při výběru byla co možná největší velikost

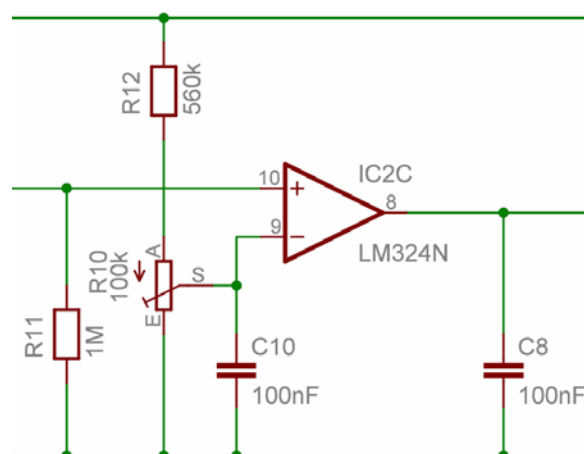
fotocitlivé plochy fotodiody a veliký úhel směrové citlivosti, který se požadoval alespoň 20° při zachování vysoké citlivosti.

Dalším prvkem v obvodu je kondensátor C3, který způsobuje, že zesilovačem jsou zesíleny pouze střídavé složky signálu, odpor R5 snižuje vstupní odpor zesilovače pro možnost vybíjení kondensátoru C3. Střídavá složka signálu je zesílena operačním zesilovačem LM324 s nastaveným zesílením 303.

Zesílený signál je přiveden na aktivní horní propust s mezní frekvencí 482 Hz. Propust by neměla propouštět signál vytvořený pouličním osvětlením, které je zdrojem světla o frekvenci 100 Hz. Za výstupem zesilovače je umístěn kondensátor C12 přidržuje přijaté, zesílené a vyfiltrované impulzy.



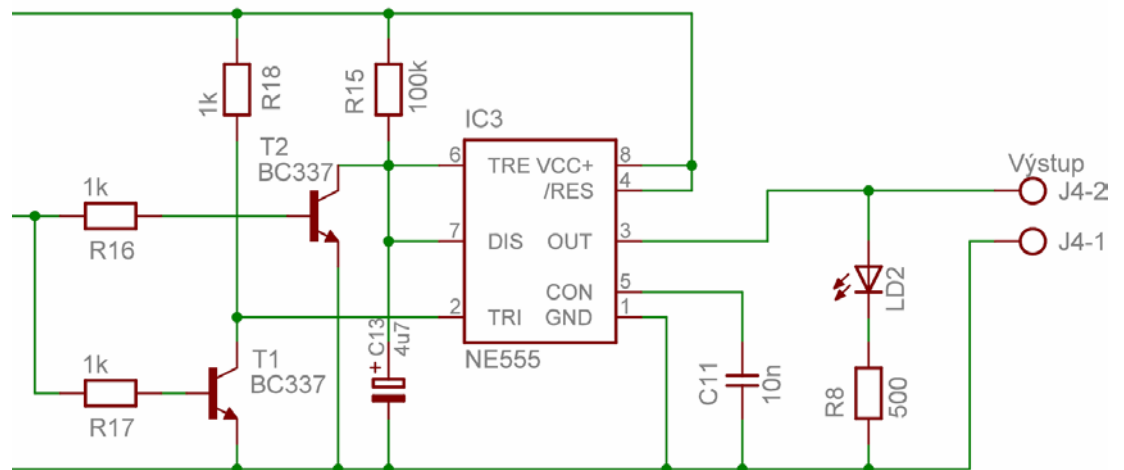
Obrázek 9-7: Aktivní horní propust



Obrázek 9-8: Komparátor

Výstup z aktivní horní propusti je přiveden na komparátor, jehož základem je operačním zesilovačem LM324. Trimrem R10 se nastavuje mezní úroveň napětí, při

kterém má mít komparátor na výstupu plné napětí. Rezistor R_{12} zvyšuje citlivost nastavování mezní úrovně trimrem R_{10} .



Obrázek 9-9: Monostabilní KO

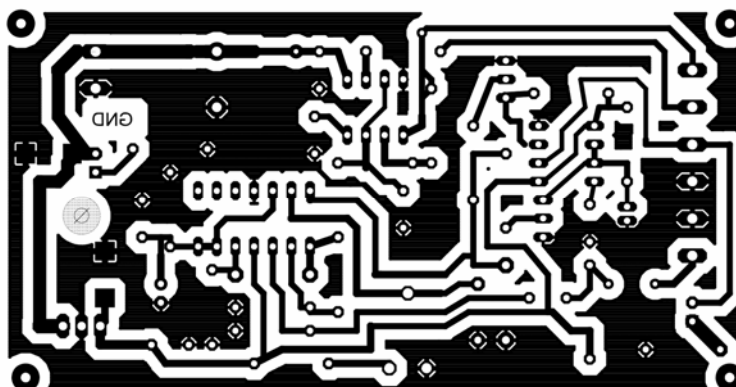
Posledním blokem vyhodnocovací části snímače je obvod na přidržování signálu, pokud na vstup bloku přijde každou 0,5 s alespoň jeden impuls, potom je na výstupu stále maximální napětí, pokud impuls nepřijde, výstup se přeploží do nuly. Základem obvodu je časovač 555 v zapojení jako monostabilní klopný obvod, čas po jakou dobu má být časovač sepnutý udává rezistor R_{15} s kondensátorem C_{13} . Sepnutím tranzistoru T_1 se vytvoří spouštěcí impuls, po kterém se výstup časovače přeploží do log. 1 a časovač začne časovat. Pokud nepřijde žádný další impuls, tak se výstup časovače po uplynutí nastaveného času přeploží zpět do stavu nula. Přijde-li ovšem impuls ještě před ukončením časování, sepne se tranzistor T_2 a zkratuje kondensátor C_{13} , čímž ho vybijí. Obvod poté pokračuje v časování od začátku.

Na výstupu z časovače je připojená červená LED dioda LD_2 , která signalizuje sepnutý stav snímače.

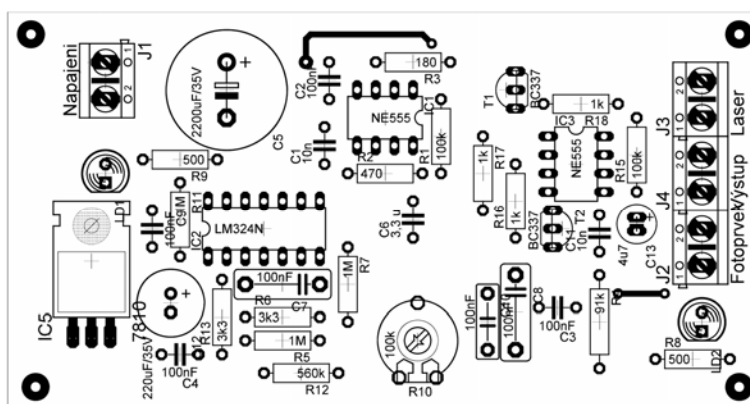
Schéma celého zapojení je vloženo v příloze 1 této práce.

Při návrhu plošného spoje bylo nutné dodržet několik základních zásad, tantalové kondensátory u stabilizátoru napětí musejí být umístěn v jeho těsné blízkosti a podobně všechny blokové keramické kondensátory musejí být v těsné blízkosti obvodu, pro který jsou určeny. Finální v pořadí čtvrtá podoba plošného spoje je nakreslena na obrázku 9-10, rozmístění součástek je potom na obrázku 9-11.

Generátor impulsů je na plošném spoji umístěn uprostřed horní části plošného spoje, zatímco vyhodnocovací obvod je v celé dolní části a přidržovací obvod s časovačem 555 je v pravé horní části.



Obrázek 9-10: Obrazec plošného spoje

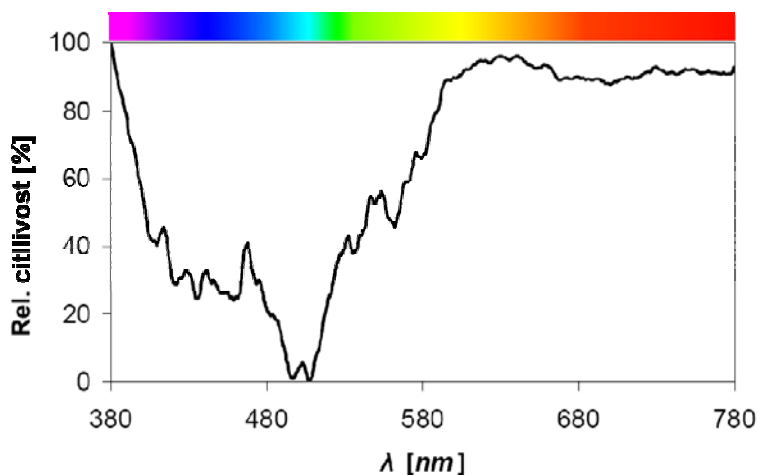


Obrázek 9-11. Rozmístění součástek

9.3 CHARAKTERISTIKY SNÍMAČE

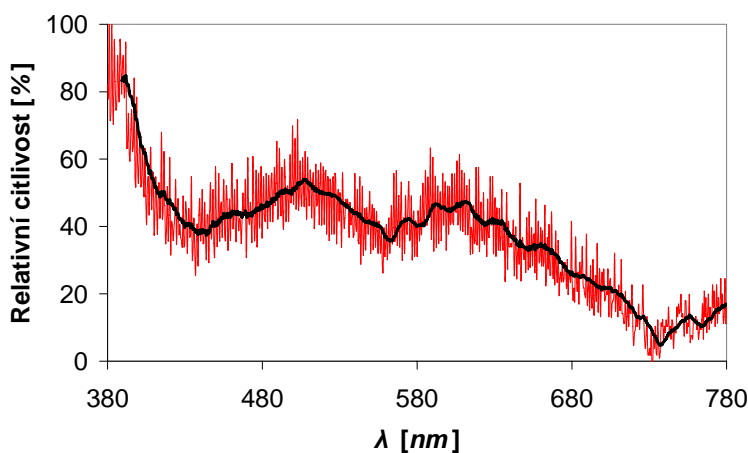
Jako první charakteristika pro vytvořený snímač byla naměřena citlivost snímače na objekt různé barvy, měření bylo provedeno pro oba testované lasery, vzdálenost snímače od objektu byla dva metry. Na obrázku 9-12 je graf relativní citlivosti snímače na barvě objektu pro laser o vlnové délce 650 nm, z grafu vyplývá, že nejnižší citlivost snímače je na modrou, světle modrou a zelenou barvu, nejvyšší citlivost je na červenou barvu protože ta nejlépe odráží červený laser. Velikost napětí

při různé barvě byla měřena za prvním operačním zesilovačem ve snímači, maximální naměřená hodnota byla 2,5 V, nejnižší potom 0,8 V z čehož vyplývá velká závislost citlivosti snímače na barvu objektu.



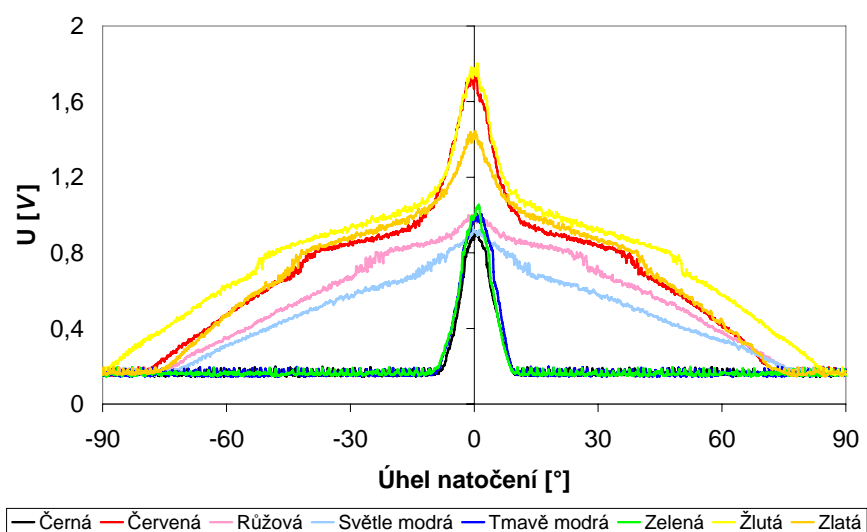
Obrázek 9-12: Relativní citlivost snímače na barvy (laser 650 nm)

Pro porovnání byla závislost naměřena i s laserem o vlnové délce 808 nm, graf závislosti je na obrázku 9-13. Z grafu je patrné, že citlivost na barvu od fialové směrem k červené klesá, ovšem rozdíl maximální a minimální hodnoty napětí je pouze 0,1 V narozdíl od předchozího použitého laseru, kde byl rozdíl 1,7 V. Z měření citlivosti snímače na barvu je zřejmé, že při použití laseru o vyšší vlnové délce významně klesá citlivost na barvu detekovaného objektu.



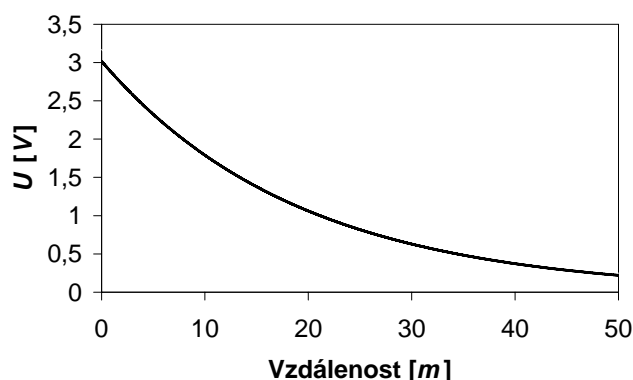
Obrázek 9-13: Relativní citlivost snímače na barvy (laser 808 nm)

Na obrázku 9-14 je směrová charakteristika snímače s laserem 650 nm, charakteristika byla změřena na objektu vzdáleném 2 m od snímače. Z grafu citlivosti na barvu se dalo předpokládat, že nejvyšší citlivost i při různém úhlu natočení bude mít snímač na objekt červené a žluté barvy, vozidla těchto barev by mělo být snadné detekovat, i když laserový paprsek nebude kolmo dopadat na detekované vozidlo, naopak v případě vozidla zelené, tmavě modré nebo černé barvy bude nutné dodržet kolmý směr dopadání laserového paprsku, jinak k detekci nedojde.



Obrázek 9-14: Směrová charakteristika snímače

Poslední změřenou charakteristikou je závislost velikosti zesíleného signálu na vzdálenosti objektu, detekovaný objekt byl zelené barvy, proto aby bylo ověřeno, zda snímač dokáže na zadanou vzdálenost detekovat objekt této barvy. Charakteristika je naznačena na obrázku 9-15, je zde vidět, že při vzdálenosti 50 m je zesílení napětí opravdu minimální a to za ideálních podmínek, proto je možné, že v reálných podmínkách by v této vzdálenosti k detekci nedošlo.



Obrázek 9-15: Citlivost snímače v závislosti na vzdálenosti

Pro zlepšení snímače by bylo nutné použít impulsní laser o vlnové délce 900 nm s optickým výkonem alespoň 5 W. Tento laser by musel vytvářet impulsy o délce 10 ns s opakovací frekvencí 100 Hz, proud protékající tímto laserem se potom pohybuje okolo 8 A, což vyžaduje rychlé výkonové polovodičové prvky. K vytvoření impulsu požadované délky by pravděpodobně bylo nutné použít krystal a mikroprocesor, časovač 555 je schopen teoreticky vytvořit impuls 0,2 μ s, prakticky se lze dostat na hodnotu 0,5 μ s, což je 50krát delší čas než je požadováno. Fotocitlivé čidlo by potom ale muselo být také schopné reagovat na takto krátký impuls.

Parametry jsou převzaty z komerčně vyráběného laserového radaru, jehož cena značně převyšuje cenu mikrovlnného radaru.

10. SRHNUTÍ

Prvním krokem ke splnění diplomové práce bylo zjištění, co se v dnešní době používá za snímače pro řízení dopravy a zejména křižovatek, kompletní průzkum typů snímačů byl proveden v semestrálním projektu 1, který již není v diplomové práci uveden. Během průzkumu bylo zjištěno, že nejčastějším snímačem pro řízení křižovatek jsou levné indukční smyčky, čím dál častěji se používá také kamerový systém, který je ovšem nesrovnatelně dražší. Dalšími snímači jsou mikrovlnné radary, infračervené, optické a ultrazvukové snímače a rádiová detekce. Jako nejvhodnějšími snímači pro splnění zadání byly vybrány optické snímače a mikrovlnné radary.

Pro oba druhy snímačů bylo nutné rozhodnout, jakým způsobem by bylo možné je použít. První variantou bylo jejich použití přesně podle zadání, umístěné na stožáru semaforu a detekovat s nimi na vzdálenost 50 m přijíždějící vozidla, druhou, později zavrženou, variantou bylo použití optického snímače jako světelné závory, bohužel by bylo nutné k silnici přidělat další zařízení, což by zadání zcela nesplnilo.

Následující průzkum trhu se snímači byl zaměřen na mikrovlnné radary a reflexní optické snímače, na trhu bylo nalezeno několik firem zabývajících se prodejem informačních panelů rychlosti, které pro měření rychlosti používají mikrovlnný radar s dosahem měření až 200 m, cena těchto panelů se pohybuje od 50 do 120 tisíc korun, panely mají většinou možnost komunikace s externím zařízením, většinou počítačem, pokud by byl panel umístěn v blízkosti křižovatky, potom by se nechal využít k připojení na zařízení řídící semaforu křižovatky. Toto by ovšem nebylo nejlepší řešení, dalším nalezeným radarem byl TEWIKO Systems dodávaný wavetec detektor, tento detektor je přímo určen k řízení křižovatek a splňuje ve všech směrech zadání. Detektor si lze objednat v různém provedení, jednotlivá provedení se liší výstupem, použitou anténou a vyhodnocovacím softwarem v detektoru, lze si objednat detektor přímo na míru. Snímač je schopný rozpoznat směr jízdy vozidla a dle dodavatele detekuje jednotlivá vozidla téměř se stoprocentní úspěšností, jedinou nevýhodou je, že detektoru splývají dvě souběžně jedoucí vozidla v jedno, což ale pro tento projekt není důležité.

Na trhu byly nalezeny i optické snímače schopné detekovat objekt na zadanou vzdálenost, ale aby této vzdálenosti dosáhli, museli mít na snímaném objektu speciální odrazku nebo jejich cena byla velmi vysoká.

Posledním krokem v diplomové práci bylo ověřit, zda se nedá vyrobit levný optický snímač schopný detekce na zadanou vzdálenost. Ke zvoleným laserům pro použití v optickém snímači byly předem spočítány hodnoty AEL laserové bezpečnosti, z těchto hodnot byla určena optimální doba impulsu laseru a opakovací frekvence. Dále se dle použité čočky byly spočítány rozměry samotného snímače dané ideální vzdáleností fotocitlivého prvku od čočky. Posledním krokem bylo samotné navržení generátoru impulsů a vyhodnocovacího obvodu snímače. Vyrobený laserový optický snímač je schopný detekovat za ideálních podmínek objekty kolmo natočené proti snímači na zadanou vzdálenost padesáti metrů, bohužel již není schopen správně detekovat objekty za zhoršených podmínek. Citlivost snímače s použitím červeného laseru je nejvíce citlivý na červenou barvu, při použití neviditelného laseru se citlivost na barvy eliminuje. Velkou výhodou laseru v neviditelném spektru je necitlivost na světelné podmínky prostředí, bohužel zvolený neviditelný laser nelze použít, protože nesplňuje požadavky na laserovou bezpečnost.

Řešením jak vyrobit funkční a hlavně spolehlivý optický snímač by bylo použití impulsního laseru v neviditelném spektru s velmi vysokým výkonem a velmi krátkým impulsem.

11. ZÁVĚR

Prvním krokem v diplomové práci je vytvořený průzkum trhu, z něhož plyne, že vhodným snímačem pro splnění zadání je wavetec Doppler radar splňující všechny body zadání, je výkonný a zároveň relativně levný. Výsledkem průzkumu je také zjištění, že nelze koupit levný optický snímač, který by mohl konkurovat mikrovlnným snímačům. Jediný optický snímač, který se používá v dopravě pro detekci automobilů je laserový radar LIDAR, jehož cena je ovšem příliš vysoká.

Protože mikrovlnný snímač lze koupit přímo pro tuto aplikaci, byl jako protiváha vyroben vlastní optický snímač. Postup výroby včetně snímače samotného je detailně popsán v poslední části diplomové práce, snímač se skládá z generátoru impulsů, jehož základem je časovač 555, druhou částí snímače je vyhodnocovací obvod složený z operačního zesilovače a časovače 555. Snímač dokáže detekovat objekty na vzdálenost 50 m za laboratorních podmínek a objekt musí být kolmo natočen ke snímači.

Výrobou snímače bylo potvrzeno, že není snadné vyrobit levný a spolehlivý optický snímač, který by byl schopen detekovat vozidla na vzdálenost 50 m.

12. LITERATURA

- [1] ABRAMOWITZ, M., NEAVES, S.H., DAVIDSON, M.W.. *Molecular expressions: Science, Optics & you: Light and color - Introduction to Lenses* [online]. c1998-2008, Last modification: Friday, Aug 01, 2003 at 11:42 AM [cit. 2008-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://micro.magnet.fsu.edu/optics/lightandcolor/lenses.html>>.
- [2] ČSN EN 60825-1 *Bezpečnost laserových zařízení Část 1: Klasifikace zařízení, požadavky a pokyny pro používání*, březen 1994 +oprava únor 1995
- [3] DOPIS s.r.o.. *Ukazatele rychlosti GR32 a GR42* [online]. [cit. 2007-10-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.dosip.cz/gr32.html>>.
- [4] ENVITECH-BOHEMIA s.r.o.. *Monitorovací systémy životního prostředí* [online]. c1992-2007 [cit. 2008-11-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.envitech-bohemia.cz>>.
- [5] FRADEN, J.. *Handbook of modern sensors: Physics, Designs, and Applications*. 3rd edition. New York: AIP Press, c2004. 608 s. ISBN 0-387-00750-4.
- [6] FUKÁTKO, T.. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1.vydání Praha: BEN-technická literatura, 2007, ISBN 978-80-7300-193-3
- [7] *Fundamentals Of Commercial Doppler Systems: Speed, Motion and Distance Measurements*. RF Globalnet [online]. Published By: Microwave Device Technology, 07/06/2006, [cit. 2008-04-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.rfglobalnet.com/Downloads/Detail.as>>
- [8] GEMOS CZ, s.r.o.. *Měření rychlosti vozidel* [online]. c2006 [cit. 2007-12-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.gemos.cz/radar/radar1.htm>>.
- [9] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.. *Fyzika*. Obdržálek, J.. 2003. Dotisk 1. českého vydání [s.l.] Brno: VUTIUM, c2000, ISBN 80-214-1868-0.
- [10] KRATA, F.. *Aplikovaná optika*. 2. vydání Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. 114 s. ISBN 80-01-03335-X.

- [11] KUCHARSKI, M.. *Radiační bezpečnost v optických komunikacích* [online]. [2002] [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/bezpecnost.pdf>>.
- [12] MICRO-EPSILON. *Senzory, systémy a řešení pro měření, testování a automatizaci* [online]. [cit. 2007-11-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.micro-epsilon.cz>>.
- [13] *Natural Resources Canada: Fundamentals of Remote Sensing* [online]. Date Modified: 2008-01-29 [cit. 2008-03-14]. Dostupné z WWW: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter3/01_e.php>.
- [14] PELANT, I. *Fyzikální praktikum III : Optika*. 3. přeprac. a dopl. vydání Praha: Matfyzpress, 2005. 272 s. ISBN 80-86732-67-3.
- [15] TEWIKO SYSTEMS, s.r.o.. *Úsekové měření okamžité rychlosti vozidel – Radar display* [online]. c2007 [cit. 2007-12-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.ukazatelrychlosti.cz>>.
- [16] WEBSTER, J., G.. *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. Boca Raton: CRC Press LLC, c1999, ISBN 0-8493-2145-X
- [17] *Wikipedie, otevřená encyklopedie : Světlo* [online]. 2007 , Stránka byla naposledy editována 2. 11. 2007 [cit. 2007-12-01]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%9Btlo>>.
- [18] AXIMA s.r.o.. *Průmyslová automatizace* [online]. [cit. 2007-11-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.axima.cz>>.
- [19] LAVET. *Speciální elektronika* [online]. [cit. 2008-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.lavet.cz>>.
- [20] WAVETEC. *Radar solutions* [online]. c2004 [cit. 2008-05-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.wavetec-online.de/px?docid=464ab81b-5c2d-47d5-ba04-7b84a0a8b03c>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol Jednotka Popis

AEL	J	Max. přípustná úroveň záření povolená v dané třídě
\vec{B}	T	Vektor magnetické indukce
c_0	ms^{-1}	Rychlost světla ve vakuu
C	F	Označení kondensátoru
\vec{E}	Vm^{-1}	Intenzita elektrického pole
f	Hz	Frekvence
f	m	Ohnisková vzdálenost
h	m	Výška kruhové úseče
MPE	J/m^2	Max. přípustná dávka ozáření
n	-	Index lomu
P	m^2	Plocha
r	m	Poloměr zaoblení čočky
R	Ω	Označení rezistoru
T	s	Časová délka impulsu
U	V	Elektrické napětí
v	ms^{-1}	Rychlost
w	m	Délka úsečky vytínající kruhovou úseč
Y	m	Velikost předmětu
Y'	m	Velikost obrazu předmětu
ε_0	Fm^{-1}	Permitivita vakua
λ	m	Vlnová délka
μ_0	Hm^{-1}	Permeabilita vakua
π	-	Ludolfovo číslo
Q	J	Zářivá energie
Φ	W	Optický výkon

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Schéma zapojení vytvořeného optického snímače

Příloha 1

