



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra biomedicínské techniky

**Řízení a optimalizace délky pulsu
pikosekundového CPA diskového
laseru s výkonem > 100 W**

**Control and pulse length optimization
of a picosecond CPA-based disc laser
with power of > 100 W**

Diplomová práce

Studijní program:	Biomedicínská a klinická technika
Studijní obor:	Přístroje a metody pro biomedicínu
Autor diplomové práce:	Bc. Lucie Horáčková
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Martin Smrž, Ph.D.

Kladno 2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horáčková** Jméno: **Lucie** Osobní číslo: **374266**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra přírodovědných oborů**
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**
Studijní obor: **Přístroje a metody pro biomedicínu**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Řízení a optimalizace délky pulsu pikosekundového CPA diskového laseru s výkonem >100 W

Název diplomové práce anglicky:

Control and pulse length optimization of a picosecond CPA-based disc laser with power of > 100 W

Pokyny pro vypracování:

Tématem navržené diplomové práce je návrh a vytvoření kontrolního software pro zajištění bezpečnosti a zobrazení provozních parametrů pikosekundového diodově buzeného regenerativního zesilovače na bázi Yb:YAG tenkého disku, který zároveň využívá technologie CPA (zesilování čerpovaných pulsů). Důraz bude kladen zejména na parametr časové délky pulsu a jeho minimalizaci s pomocí programovatelného spektrálního filtru, který bude umístěn v řetězci předzesilovače. Diplomant by se měl seznámit se strukturou laserového systému, navrhnout parametry kritické pro bezpečný provoz laseru a zajistit jejich sledování. V další fázi by měl zejména navrhnout způsob analýzy zesíleného pulsu po průchodu kompresorem a navrhnout vhodný způsob detekce tak, aby poskytl dostatečnou zpětnou vazbu pro optimalizační algoritmus, který ovládá programovatelný spektrální filtr a minimalizuje délku pulsu, popř. generuje požadovaný tvar pulsu. Minimalizační algoritmus by měl být vytvořen v softwaru Labview. 1) Seznamte se s Yb:YAG pulsním tenkodiskovým laserovým systémem Perla C na pracovišti Hilase. 2) Analyzujte provozní parametry systému a navrhnete monitorovací systém zejména parametrů kritických pro bezpečný provoz laseru. 3) Seznamte se s technikami měření časové délky ultrakrátkých optických pulsů. 4) S pomocí vhodné techniky analyzujte puls systému Perla C a navrhnete a v Labview naprogramujte minimalizační algoritmus, který poskytne zpětnou vazbu pro laditelný amplitudový a fázový spektrální filtr Waveshaper v předzesilovači systému. Ověřte jeho funkčnost. 5) Navrhnete modifikaci detektoru a algoritmu pro řízení téhož systému s možností volby předdefinovaného tvaru pulsu. 6) Formulujte závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] D. Nguyen, M. U. Piracha, P. J. Delfyett, Transformlimited pulses for chirped-pulse amplification systems utilizing an active feedback pulse shaping technique enabling five time increase in peak power, Opt. Lett., ročník 23, 2012, 4913-4915 s.
- [2] National Instruments, Tutoriály a technické listy pro komunikaci v Labview, 2017, www.ni.com
- [3] J. C. Diehls, Ultrashort Laser Pulse Phenomena, ed. 2, Academic Press, 2006, ISBN 978-0122154935

Jméno a příjmení vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Martin Smrž, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Jan Mikšovský, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **22.02.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2019**

doc. Ing. Lenka Lhotská, CSc.
podpis vedoucí(ho) katedry

prof. MUDr. Ivan Dylevský, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student(ka) bere na vědomí, že je povinnen(a) vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

25.03.2019
Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Řízení a optimalizace délky pulsu pikosekundového CPA diskového laseru s výkonem $> 100 \text{ W}$ “ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám 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), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně 13.05.2019

.....

Bc. Lucie Horáčková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Martinu Smržovi, Ph.D. za vedení této práce a podnětné připomínky k vypracování a Ing. Janu Mikšovskému za možnost konzultace a nápomocné rady. Též děkuji Centru HiLASE a jeho zaměstnancům, především Ing. Jaroslavu Huynhovi za podporu během práce v laboratoři.

ABSTRAKT

Řízení a optimalizace délky pulsu pikosekundového CPA diskového laseru s výkonem >100 W

Cílem práce je navrhnout monitorovací systém pro pikosekundový tenkodiskový laser, vyvinout algoritmus pro minimalizaci délky pulsu a navrhnout možnosti složitějšího tvarování pulsů v čase. Modulace laserových pulsů umožňuje rozložení intenzity záření v čase na míru aplikaci, jako pulsní laserová depozice, nelineární mikroskopie či vláknová optika. Na základě spektra vlnových délek a relativní spektrální fáze měřených metodou FROG byl vypočítán amplitudový a fázový spektrální filtr programovatelného prostorového modulátoru světla. Metodou FROG byl zároveň měřen průběh intezity záření v čase. Bylo zjištěno, že optimalizaci délky pulsu lze zajistit čistě fázovým spektrálním filtrem v případě, že spektrum vlnových délek je spíše symetrické. Silně asymetrický průběh by bylo vhodné před minimalizací délky pulsu modulovat, neboť metoda FROG detekuje asymetrický puls nepřesně.

Klíčová slova

tenkodiskový laser, délka pulsu, programovatelný prostorový modulátor světla, frequency-resolved optical gating

ABSTRACT

Control and pulse length optimization of a picosecond CPA-based disc laser with power of > 100 W

The aim of the work is to design monitoring safety system for picosecond thin-disk laser, to develop pulse length optimization algorithm, and to design arbitrary pulse shapes generation method. Pulse temporal modulation has the ability to control the energy distribution over time to suit a particular application, e.g. pulsed laser deposition, nonlinear optical microscopy or fiber optics. Using spectral characteristics measured via FROG method the programmable spatial light modulator filter was established. It was found out the pulse length optimization handled by solely spectral phase filter is possible only when having symmetric spectrum. Pulses with asymmetric spectrum should be amplitude modulated, since FROG method detects asymmetric pulses inaccurately.

Keywords

Thin-disk laser, pulse length, programmable spatial light modulator, frequency-resolved optical gating

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	9
Seznam obrázků.....	10
1 Úvod.....	14
2 Součásti laserových systémů.....	15
2.1 Tenkodiskový laser.....	15
2.2 Regenerativní zesilovač.....	16
2.3 Zesilovač čerpovaných pulsů.....	17
3 Laserový systém Perla C.....	19
4 Techniky tvarování laserových pulsů.....	21
5 Současný stav řešení kontroly a řízení laserových systémů.....	27
5.1 Zajištění bezpečného provozu vysokovýkonného laseru.....	27
5.2 Řízení tvaru a délky pulsů pikosekundových tenkodiskových laserů.....	28
6 Techniky měření časové délky ultrakrátkých pulsů.....	30
6.1.1 Měření délky pulsů autokorelátoři.....	30
6.1.2 Měření intenzity a fáze laserového pulsu	33
7 Analýza laserového pulsu systému Perla C.....	38
8 Návrhy řídicích systémů a algoritmů.....	41
8.1 Návrh bezpečnostního systému pro laser Perla C.....	41
8.2 Návrh programu pro minimalizaci délky pulsu.....	45
8.3 Návrh algoritmu pro tvarování pulsu do předem definovaných tvarů.....	48
9 Realizace a testování.....	49
9.1 Realizace programu pro minimalizaci délky pulsu.....	49
9.1.1 Formáty dat.....	50

9.1.2	Převod dat pro optimalizaci délky pulsu tvarováním fáze.....	51
9.1.3	Inplementace programu pro minimalizaci délky pulsu.....	54
9.1.4	Uživatelské rozhraní.....	55
9.2	Testování programu pro minimalizaci délky pulsu.....	56
9.2.1	Blokační filtr.....	57
9.2.2	Filtr bez modulace.....	57
9.2.3	Minimalizační filtr.....	58
9.3	Modifikace algoritmu pro zahrnutí tvarování do předdefinovaných tvarů.....	64
10	Diskuze.....	69
11	Závěr.....	71
	Seznam použité literatury.....	74
	Příloha A: Uživatelské rozhraní programu pro minimalizaci délky pulsu.....	81
	Příloha B: Obsah příloženého CD.....	82

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
AOPDF	Akustooptický programovatelný disperzní filtr
BD	Pohlcovač svazku (beam dump)
BOZP	Bezpečnost a ochrana zdraví při práci
CPA	Zesilování čerpovaných pulsů (chirped pulse amplification)
DS	Dělič svazku
FM	Sklopné zrcátko (Flip-flop mirror)
FR	Faradayův rotátor
FROG	Frekvenčně rozlišené optické klíčování (Frequency-Resolved Optical Gating)
FWHM	Plná šířka v polovině maxima (full width at half maximum)
LabVIEW	Programovací prostředí (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)
M	Zrcátko (mirror)
MM	Motorizované zrcátko (Motorized mirror)
NI	National Instruments
PC	Pockelsova cela
PTF	Tenkvrstvý polarizátor
SPIDER	Spektrálně fázová interferometrie pro přímou rekonstrukci elektrického pole (Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction)
STED	Vyčerpání stimulovanou emisí (Stimulated Emission Depletion)
QMH	Struktura producenta a protřebitele (Queued message handler)
TD	Tenký disk (Thin disk)
Yb:YAG	Ytterbiem dopovaný yttrito-hlinitý granát
$\lambda/2$	Půlvlnová destička
$\lambda/4$	Čtvrtvlnová destička

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Schéma tenkodiskového laseru.....	15
Obr. 2.2: Schéma regenerativního zesilovače: DS - dělič svazku, FR - Faradayův rotátor, $\lambda/2$ - půlvlnová destička, PTF – tenkovrstvý polarizátor, $\lambda/4$ - čtvrtvlnová destička, PC - Pockelsova cela, M1 - zrcadlo, M2 - zrcadlo, TD - tenký disk.....	16
Obr. 2.3: Schématické zobrazení zesilovače čerpovaných pulsů.....	18
Obr. 3.1: Schéma laserového systému Perla C: DS - dělič svazku, FR - Faradayův rotátor, $\lambda/2$ - půlvlnová destička, PTF - tenkovrstvý polarizátor, $\lambda/4$ - čtvrtvlnová destička, PC - Pockelsova cela, M1 - zrcadlo, M2 - zrcadlo, TD - tenký disk, BD – pohlcovač svazku.....	19
Obr. 3.2: Spektrum laserového pulsu systému Perla C [14].....	20
Obr. 4.1: Schéma akustooptického programovatelného disperzního filtru.....	23
Obr. 4.2: Schéma programovatelného prostorového modulátoru světla	24
Obr. 4.3: Schéma jednoho pixelu tekutých krystalů v prostorovém modulátoru světla: a) bez přiloženého napětí, b) s přiloženým napětím.....	25
Obr. 4.4: Schéma fungování metody skládání pulsů: MM1 až MM4 jsou motorizovaná zrcátka.....	26
Obr. 6.1: Schéma interferometrického autokorelátoru s Michelsonovým interferometrem: MM – motorizované zrcadlo, M – zrcadlo, DS – dělič svazku.....	31
Obr. 6.2: Schéma intenzitního autokorelátoru: DS – dělič svazku, MM – motorizované zrcadlo, M – zrcadlo.....	32
Obr. 6.3: Schéma měřicí metody FROG: DS – dělič svazku, MM – motorizované zrcadlo, M – zrcadlo.....	34
Obr. 6.4: Schéma iterativního výpočetního algoritmu měřicí metody FROG	35
Obr. 6.5: Schéma metody SPIDER: DS1, DS2, DS3 – děliče svazku, M1, M2, M3 – zrcadla.....	36

Obr. 7.1: Spektrum generované vláknovým oscilátorem ANDi Yb:sklo.....	38
Obr. 7.2: Spektrum a spektrální fáze pulsu oscilátoru ANDi Yb:sklo vypočtené metodou FROG (rozlišení 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření).....	39
Obr. 7.3: Časový průběh intenzity a fáze pulsu oscilátoru ANDi Yb:sklo vypočtené metodou FROG (rozlišení 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření).....	39
Obr. 7.4: Spektrum a spektrální fáze pulsu oscilátoru ANDi Yb:sklo vypočtené metodou FROG (rozlišení 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření).....	40
Obr. 7.5: Časový průběh intenzity a fáze pulsu oscilátoru ANDi Yb:sklo vypočtené metodou FROG (rozlišení 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření).....	40
Obr. 8.1: Schématický návrh rozložení detektorů v laseru Perla C: DS je dělič svazku.	43
Obr. 8.2: Vývojový diagram návrhu monitorovacího systému; Pth - prahový výkon, tmin - minimální provozní teplota, tmax - maximální provozní teplota, ds - maximální možná odchylka svazku, t - měření teplota, P – měřený výkon, s – měřená odchylka svazku.....	44
Obr. 8.3: Schématický návrh rozložení detektoru FROG a Waveshaperu v laseru Perla C: DS je dělič svazku.....	46
Obr. 8.4: Vývojový diagram návrhu programu pro minimalizaci délky pulsu.....	47
Obr. 9.1: Ukázka dat k nahrání do Waveshaperu - v prvním sloupci je frekvence [THz], ve druhém zeslabení [dB], ve třetím požadovaný fázový posun [rad], poslední sloupec odkazuje na port Waveshaperu [60].....	50
Obr. 9.2: Ukázka několika řádků dat exportovaných z přístroje FROG.....	51
Obr. 9.3: Vývojový diagram algoritmu pro převod tabulky z FROG pro Waveshaper: M je počet řádků dat z měření FROG, fN je N-tá frekvence z dat FROG, fN+1 je (N+1). frekvence z dat FROG, FK je K-tá frekvence a FK+1 je (K+1). frekvence z tabulky Waveshaperu.....	54
Obr. 9.4: Komunikační diagram realizovaného programu pro minimalizaci délky pulsu	55
Obr. 9.5: Schéma testovací optické soustavy: FM - sklopné zrcátko.....	57

Obr. 9.6: Poměr mezi spektrem detekovaným před aplikací a spektrem detekovaným po aplikaci filtru bez modulace.....	58
Obr. 9.7: Spektrum modulovaném pásmovým Gaussovským optickým filtrem.....	59
Obr. 9.8: Schéma testovací optické soustavy se spektrálním filtrem: FM - sklopné zrcátko.....	59
Obr. 9.9: Spektrum a spektrální fáze pulsu modulovaného Gaussovským filtrem vypočtená metodou FROG před aplikací minimalizačního filtru.....	60
Obr. 9.10: Časový průběh intenzity a fáze pulsu modulovaného Gaussovským filtrem vypočtený metodou FROG před aplikací minimalizačního filtru.....	60
Obr. 9.11: Spektrum a spektrální fáze pulsu modulovaného Gaussovským filtrem vypočtená metodou FROG po první aplikaci minimalizačního filtru.....	61
Obr. 9.12: Časový průběh intenzity a fáze pulsu modulovaného Gaussovským filtrem vypočtený metodou FROG po první aplikaci minimalizačního filtru.....	61
Obr. 9.13: Spektrum a spektrální fáze pulsu vypočtená metodou FROG po aplikaci minimalizačního filtru (rozlišení 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření).....	62
Obr. 9.14: Časový průběh intenzity a fáze pulsu vypočtený metodou FROG po aplikaci minimalizačního filtru (rozlišení 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření).....	63
Obr. 9.15: Spektrum a spektrální fáze pulsu vypočtená metodou FROG po aplikaci minimalizačního filtru (rozlišení 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření).....	63
Obr. 9.16: Časový průběh intenzity a fáze pulsu vypočtený metodou FROG po aplikaci minimalizačního filtru (rozlišení 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření).....	64
Obr. 9.17: Náčrt časového průběhu obdélníkového pulsu o délce T	65
Obr. 9.18: Fourierova transformace obdélníkového pulsu o délce trvání T do frekvenční domény.....	66
Obr. 9.19: Intenzita pole vykresleného na Obr. 9.18.....	66

Obr. 9.20: Spektrální fáze odpovídající intenzitě na Obr. 9.19.....	67
Obr. 9.21: Vývojový diagram algoritmu pro tvarování pulsu do předdefinovaných tvarů	68

1 Úvod

Modulace časového průběhu intenzity záření laserových pulsů přináší možnost jak zkracovat nebo prodlužovat puls či rozložit intenzitu v čase [1, 2]. Komprese pulsu umožní zvýšení špičkového výkonu, roztažení v čase způsobí naopak nižší špičkový výkon [3]. Tvarování intenzity v čase je způsob, jakým je možné rozložit energii na míru aplikacím, jako pulsní laserová depozice [1], vláknová optika a nelineární mikroskopie [4].

Modulace pulsů v čase lze dosáhnout například disperzními mřížkami, na čemž je založen princip zesilovače čerpaných pulsů [5, 6], nebo skládáním pulsů aplikací různých vzájemných zpoždění mezi jednotlivými pulsy [7]. Programovatelný prostorový modulátor světla umožňuje tvarování spektra i relativní spektrální fáze nezávisle na sobě. Modulace čistě relativní spektrální fáze bez tvarování spektra zachová celkovou energii pulsu [8], avšak některé časové průběhy nelze generovat bez úpravy relativní spektrální fáze a spektra zároveň [9, 10].

Jedním z cílů této diplomové práce je navrhnout monitorovací systém provozních parametrů tenkodiskového laseru Perla C s aktivním prostředím Yb:YAG pracujícím na střední vlnové délce 1030 nm, který je umístěn na pracovišti HiLASE v Dolních Břežanech. Monitorovací systém by měl zajistit bezpečnost tenkodiskového zesilovače, aby v případě poruchy nedocházelo k jeho poškození tepelnými jevy. Dalším cílem je navržení, realizace a otestování programu pro minimalizaci délky laserového pulsu a navržení algoritmu umožňujícího tvarování pulsu v čase do předdefinovaných tvarů.

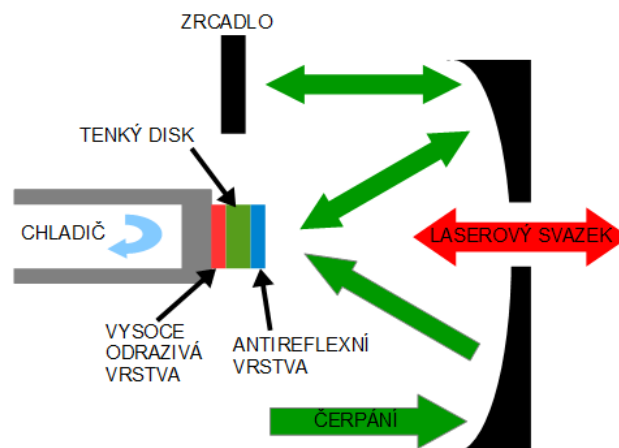
K optimalizaci délky laserového pulsu je vázána hypotéza, že bez ohledu na průběh intenzity v závislosti na vlnové délce a bez ohledu na průběh relativní spektrální fáze by mělo být možné dosáhnout optimální délky pulsu výhradně modulováním relativní spektrální fáze. Tvarování pulsů nebylo doposud aplikováno na systémy založené na tenkém disku, tato práce je první, která se zabývá modulováním pulsů tenkodiskového laseru.

2 Součásti laserových systémů

V této kapitole jsou popsány části laserových systémů, které nejsou zahrnuty do výuky na oboru Přístroje a metody v biomedicině. Pro pochopení a řešení problematiky obsažené v zadání je důležitá znalost principů tenkodiskového laseru, regenerativního zesilovače nebo zesilovače čerpaných pulsů. Tyto pojmy jsou dále popsány a vysvětleny.

2.1 Tenkodiskový laser

Jak samotný název napovídá, aktivní prostředí tenkodiskového laseru má tvar tenkého disku, jeho tloušťka se pohybuje v řádu stovek mikrometrů a jeho průřez je kulatý s průměrem typicky 8-30 mm. Přední stěnou, které je opatřena antireflexní vrstvou, je tenký disk čerpán. Na zadní stěně disku je vrstva s vysokou odrazivostí. Schéma tenkodiskového systému je uvedeno na Obr. 2.1. Teplo generované při laserové akci je odváděno přes zadní část až do chladiče upevněného na zadní stěně. Chladič tenkého disku je obvykle aktivně chlazený vodou. [5, 11, 12]



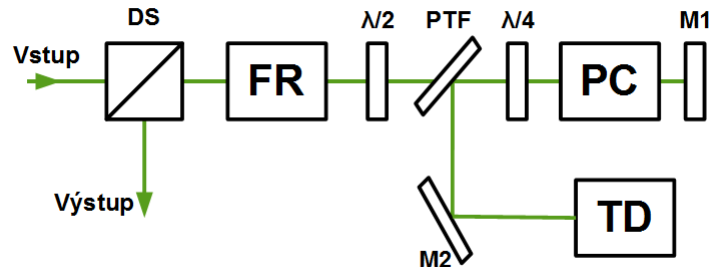
Obr. 2.1: Schéma tenkodiskového laseru

Krátkou optickou dráhou pulsu v tenkém disku je zachována kvalita svazku a zároveň malá tloušťka aktivního prostředí s aktivním chlazením zajišťuje minimální termální deformace, což je velkou výhodou systémů založených na tenkém disku.

Na druhé straně efektivní využití čerpání je podmíněno mnohonásobným průchodem čerpacího svazku diskem. Vícenásobný průchod bývá zajištěn parabolickými zrcadly či koutovými odražeči, jak je naznačeno na Obr. 2.1. Nízké zesílení jednoho průchodu lze také kompenzovat kombinací tenkodiskového aktivního prostředí a regenerativního zesilovače, viz dále. [5, 11, 12, 13]

2.2 Regenerativní zesilovač

Regenerativní zesilovač byl vyvinut pro zesilování laserových pulsů, vstupní puls obvykle o energii několika nJ je zesílen na energii v řádech mJ. Typickými a základními součástmi regenerativního zesilovače jsou Pockelsova cela, čtvrtvlnová destička a polarizátor. Zesilovač dále obsahuje Faradayův rotátor, půlvlnovou destičku a druhý polarizátor (či dělič svazku), tyto 3 prvky oddělují vstup od výstupu. Regenerativní zesilovač může jako zesilující aktivní prostředí využívat tenký disk, avšak není to nezbytnou podmínkou. [5, 14] Schéma regenerativního zesilovače je uvedeno na Obr. 2.2, pro ilustraci s tenkým diskem.



Obr. 2.2: Schéma regenerativního zesilovače: DS - dělič svazku, FR - Faradayův rotátor, $\lambda/2$ - půlvlnová destička, PTF – tenkovrstvý polarizátor, $\lambda/4$ - čtvrtvlnová destička, PC - Pockelsova cela, M1 - zrcadlo, M2 - zrcadlo, TD - tenký disk

Princip fungování regenerativního zesilovače lze rozdělit do tří částí: čerpací fáze, zesilovací fáze a vyvedení pulsu ven ze zesilovače. V první fázi horizontálně polarizovaný puls vstupující do zesilovače skrze dělič svazku získá průchodem Faradayovým rotátorem a půlvlnovou destičkou vertikální polarizaci. Puls dále prochází tenkovrstvým polarizátorem. Dvojným průchodem skrze čtvrtvlnovou destičkou

a Pockelsovou celou s přiloženým nulovým napětím je polarizace otočena opět o 90° , tedy polarizace pulsu je nyní horizontální. Puls je na tenkovrstvém polarizátoru odražen na zrcadlo M2. Puls projde tenkým diskem beze změny polarizace, je znovu odražen polarizačním tenkým filmem, dvakrát projde čtvrtvlnovou destičkou a Pockelsovou celou (s nulovým napětím), čímž dojde k otočení polarizace z horizontální na vertikální a na tenkovrstvém polarizátoru je a puls vyveden ven ze zesilovače. [5]

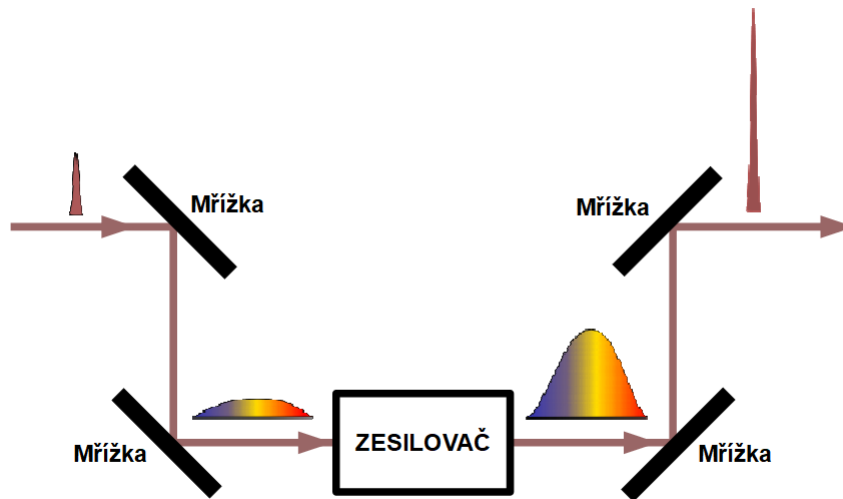
Při zesilovací fázi je na Pockelsově cele přiloženo čtvrtvlnové napětí, jakmile puls opouští Pockelsovu celu ve směru k zrcadlu M2. Souhrnná rotace polarizace je nulová (přesněji 2π) a tím je puls zachycen v rezonátoru. Puls následně obíhá rezonátorem, dokud není vyváznán ze zesilovače ven změnou napětí na Pockelsově cele. Počet oběhu rezonátorem závisí na zesílení aktivního prostředí a na časovém nastavení změny napětí přiloženém na Pockelsovu celu. [5]

Půlplnové nebo nulové napětí je na Pockelsovu celu přiloženo, obdobně jako během druhé fáze, po průchodu pulsu celou ve směru k zrcadlu M2. Změna napětí zajistí rotaci polarizace z horizontální na vertikální, čímž je puls vyveden ven z regenerativního zesilovače. [5]

2.3 Zesilovač čerpovaných pulsů

Zesilovač čerpovaných pulsů, v angličtině *chirped pulse amplifier* (CPA), byl vyvinutý z důvodu omezení špičkového výkonu v zesilovači tak, aby nedocházelo k saturaci či případnému poškození zesilovače. [5]

Tato metoda zesilování je založena na disperzních prvcích, například na disperzních mřížkách, jak je naznačeno na Obr. 2.3. Disperzním systémem umístěným před zesilovačem je puls roztažen v čase a frekvenčně modulován (tzv. čerpování), těmito dvěma mřížkami se říká prodlužovač (anglicky *stretcher*), poté je zesílen zesilovačem a špičková intenzita tak zůstává pod prahem poškození zesilovače. Po zesílení dochází dalšími disperzními prvky k opětovné kompresi na původní délku pulsu. Při konstruování zesilovače čerpovaných pulsů je nutné vzít v úvahu i disperzi aktivního prostředí zesilovače. [3, 5, 15]

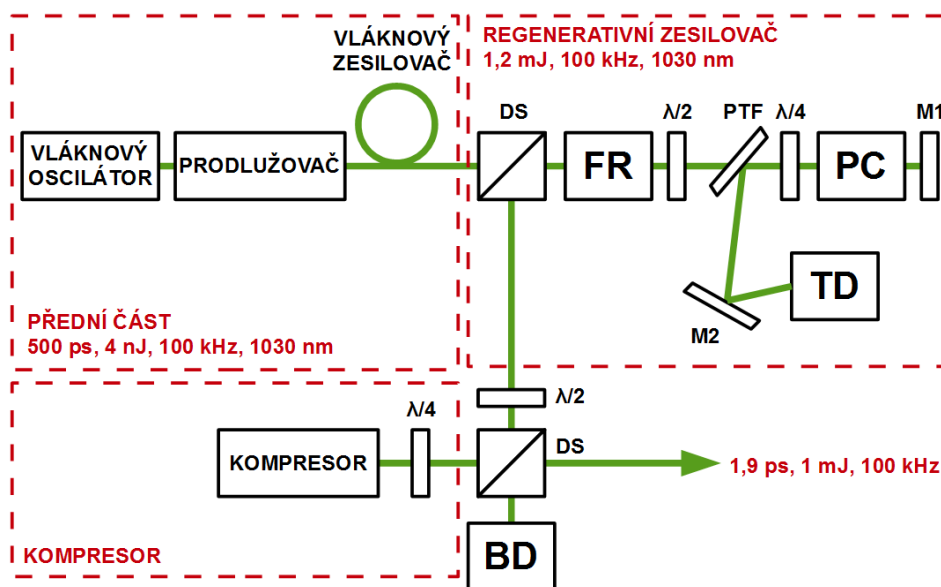


Obr. 2.3: Schématické zobrazení zesilovače čerpaných pulsů

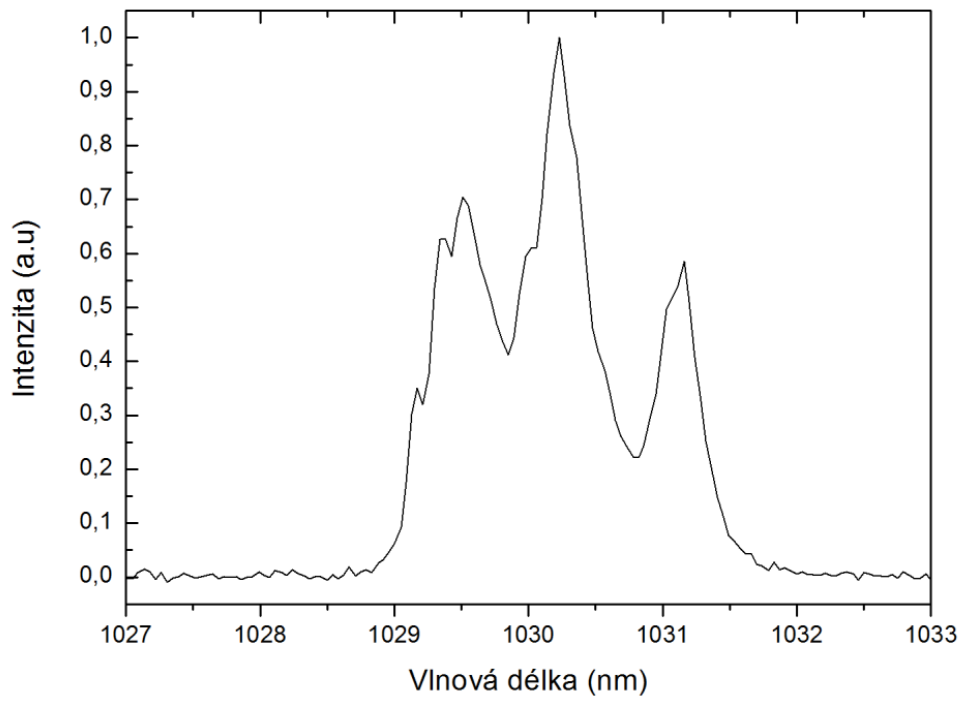
3 Laserový systém Perla C

Laserový systém s názvem Perla C byl vyvinutý ve výzkumném centru HiLASE Fyzikálního ústavu AV ČR a je zde také umístěn. Schéma laseru Perla C je zobrazeno na Obr. 3.1. V přední části je umístěn pulsní ytterbiem dopovaný vláknový oscilátor generující na vlnové délce 1030 nm s pulsy o délce 5 ps, které jsou prodlužovačem (*stretcher*) roztaženy na délku zhruba 500 ps a vláknovým zesilovačem zesíleny na 4 nJ. [11, 14]

Laserové pulsy o frekvenci 100 kHz jsou dále vedeny do regenerativního zesilovače, který se skládá z děliče svazku, Faradayova rotátoru, půlplnové destičky, tenkovrstvého polarizátoru, čtvrtplnové destičky, Pockelsovy cely, zrcadel a tenkého disku z aktivního materiálu Yb:YAG, jak je naznačeno na schématu na Obr. 3.1. Takto zesílené výstupní pulsy jsou komprimovány v kompresoru na finální délku kolem 1,9 ps s energií pulsu 1 mJ. Umístění regenerativního zesilovače mezi prodlužovač pulsů a kompresor pulsů umožňuje realizovat zesilování čerpovaných pulsů (CPA). Spektrum laserového pulsu na výstupu ze systému je zřejmé z Obr. 3.2. [11, 14]



Obr. 3.1: Schéma laserového systému Perla C: DS - dělič svazku, FR - Faradayův rotátor, $\lambda/2$ - půlplnová destička, PTF - tenkovrstvý polarizátor, $\lambda/4$ - čtvrtplnová destička, PC - Pockelsova cely, M1 - zrcadlo, M2 - zrcadlo, TD - tenký disk, BD - pohlčovač svazku



Obr. 3.2: Spektrum laserového pulsu systému Perla C [14]

4 Techniky tvarování laserových pulsů

Tvarování laserových pulsů umožňuje generování téměř libovolných pulsů v časové a spektrální doméně, lze měnit i polarizaci [3, 8, 16, 17]. Na míru modulované pulsy mohou zvýšit účinnost či přesnost aplikace laserového záření [1, 3, 9, 10, 17]. Jelikož práce se zabývá modulování pulsů ve spektrální a časové doméně, tato kapitola se v popisu způsobů a využití tvarování omezí právě na modulaci v čase a ve spektru.

Popis pulsu v časové doméně $E(t)$ je Fourierovou transformací popisu v doméně frekvenční $\bar{E}(\omega)$ (kde nadtržení naznačuje, že jde o Fourierovu transformaci) vztahem

$$\bar{E}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \exp(-i\omega t) dt . \quad (4.1)$$

Inverzní Fourierova transformace je dána rovnicí

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{E}(\omega) \exp(i\omega t) d\omega . \quad (4.2)$$

Intenzitu pole $\bar{E}(\omega)$ lze dále popsat pomocí spektra $E(\omega)$ a spektrální fáze $\varphi(\omega)$ vztahem

$$\bar{E}(\omega) = \sqrt{S(\omega)} \exp[-i\varphi(\omega)] . \quad (4.3)$$

Spektrum pulsu a spektrální fáze jsou svázány s časovým průběhem pulsu skrze Fourierovu transformaci. Tvarování pulsu v časové doméně je tedy možné docílit jak úpravou spektrální fáze, tak modulací spektra, případně také kombinací obojího [9, 18, 19, 20].

Modulování laserového pulsu v časové doméně přináší možnost zkracovat nebo prodlužovat puls či rozložit intenzitu v čase tak, jak je požadováno [1, 2, 21, 22]. Komprese pulsů způsobuje vyšší špičkový výkon, roztažení v čase zajistí nižší špičkový výkon [3]. Tvarování intenzity v čase je způsob, jakým rozložit energii na míru aplikaci

jako pulsní laserová depozice [1], generování elektronů v urychlovačích [10], vláknová optika a nelineární mikroskopie [4]. Při modulování čistě spektrální fáze bez tvarování spektra se zachová celková energie [8], avšak některých časových průběhů nelze dosáhnout jinak než modulováním spektrální fáze a spektra zároveň (obdélníkový puls, puls s více maximy apod.) [9, 10].

Nejkratší možná délka pulsu je závislá na šíři spektra skrze princip neurčitosti [5, 23], součin nejkratší možné délky pulsu t_p (FWHM) a šířky frekvenčního spektra $\Delta\nu$ (FWHM) lze zapsat rovnicí

$$t_p \Delta\nu = c_p, \quad (4.4)$$

kde c_p je spektrálně časová konstanta určená tvarem pulsu [5, 19]. Hodnoty c_p jsou známy pro Gaussovský puls a pro tvar odpovídající druhé mocnině hyperbolického sekansu a jsou uvedeny v Tab. 4.1 [5]. Puls s nejkratší možnou délkou se nazývá transformačně omezený a jeho spektrální fáze je konstantní [9, 18, 19, 24].

Tab. 4.1: Hodnoty spektrálně časové konstanty c_p pro vybrané tvary pulsů [5]

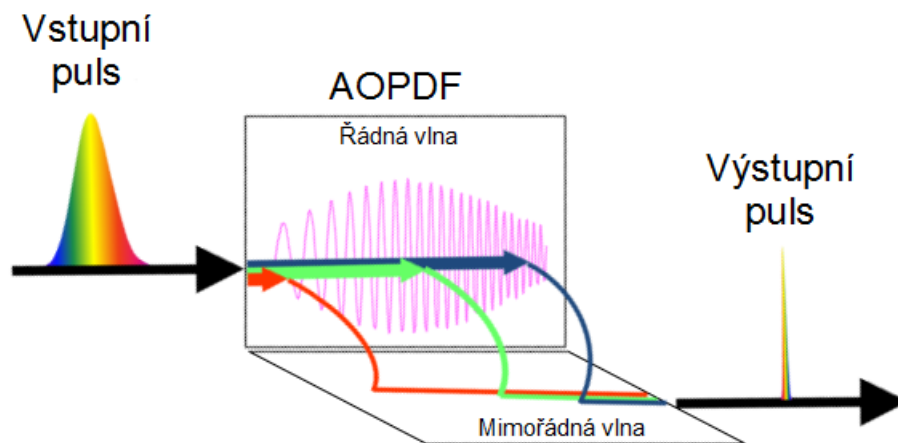
Tvar	c_p
Gauss	0.44
Sech ²	0.32

Zjednodušeně řečeno, důvody k modulaci spektra jsou dva: omezení nehomogenního rozšíření spektra v zesilovačích laserových systémů [17, 25, 26] nebo získání v čase kvalitnějšího pulsu [27, 28]. Laserový puls s Gaussovským či parabolickým tvarem spektra je například během zesilování zesilovačem čerpovaných pulsů stabilnější, zachovává se tvar spektra během zesilování, čehož se využívá například v optické komunikaci [27, 28]. Potlačit rozšiřování spektrální čáry během zesilování lze zajistit pouhým etalonem [29] nebo etalonem s piezoelektrickou zpětnou vazbou [25]. Pasivním prvkem schopným tvarovat spektrální doménu laserového pulsu je také na míru systému vytvořená mikrostruktura s modulovanou odrazivostí doplněná disperzním optickým prvkem [30]. Několikvrstvý dielektrický film je vyroben tak, aby pro každou vlnovou délku byla zajištěna požadovaná hodnota odrazivosti. [30]

Další možnosti tvarování spektra nabízí akustooptický programovatelný disperzní filtr (AOPDF). V AOPDF je generována postupná akustická vlna podél optické osy laserového svazku, jak je naznačeno na Obr. 4.1. Jestliže se lokálně vyskytuje pouze jedna frekvence akustické vlny, pak dochází k difrakci totožné frekvence optického záření. Průběh spektra $E_{OUT}(\omega)$ na výstupu z AOPDF je pak úměrný vstupnímu průběhu spektra $E(\omega)$ a filtrující funkci $S(\omega)$ akustické vlny dle vztahu

$$E_{OUT}(\omega) \propto E(\omega) S(\omega) . \quad (4.5)$$

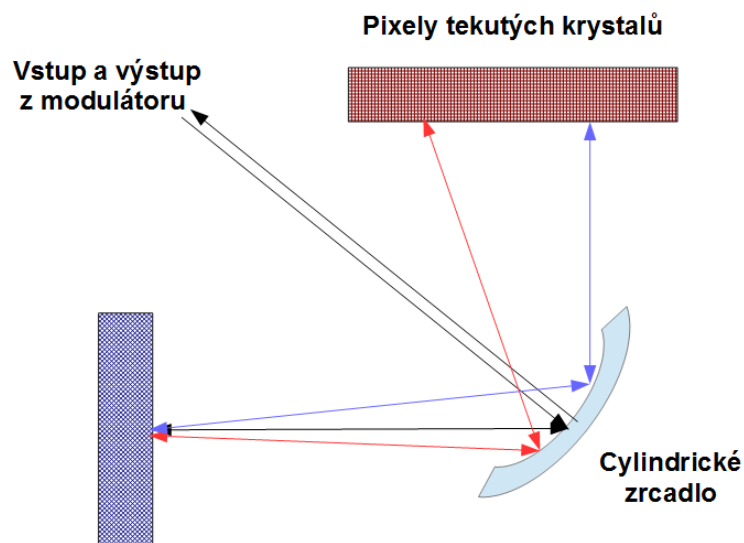
Neboť je AOPDF programovatelný, lze generovat akustickou vlnu na míru systému tak, aby akustický signál obsahoval takové frekvence, které chceme zachovat v optickém signálu. AOPDF je tvořen anizotropním prostředím. Během difrakce na mřížce vytvořené akustickým signálem dochází k otočení polarizace o 90° . V závislosti na čase, v jakém je daná frekvence difraktována, lze udělit každé frekvenci jiné časové zpoždění a modulovat tak laserový puls nejen ve spektrální doméně, ale i v čase a získat na výstupu například kratší puls než jaký do AOPDF vstupoval, jak je naznačeno na Obr. 4.1. [31, 26, 4]



Obr. 4.1: Schéma akustooptického programovatelného disperzního filtru

Zkracování či prodlužování pulsů je možné realizovat také zobrazovacím systémem s difrakčními mřížkami, kterými se realizuje přechod do Fourierovy roviny. Toho se využívá například v již zmíněném zesilovači čerpaných pulsů (viz kapitola 2.3) [5, 6].

Stejně jako v případě AOPDF i programovatelný prostorový modulátor světla založený na tekutých krystalech umožňuje úpravy spektra i spektrální fáze. Na vstupu do systému je umístěn disperzní prvek, který rozloží laserový puls na jednotlivé vlnové délky, které přes zobrazovací soustavu dopadají na prostorový modulátor, jak je naznačeno na Obr. 4.2. Ten je tvořen dvěma skleněnými destičkami, mezi kterými jsou pixely z podlouhlých nematických tekutých krystalů a elektricky vodivého filmu na obou vnitřních stěnách skleněných destiček. Vodivý film je na jedné straně dělen také do pixelů (elektrod), na straně druhé vede skrze celý modulátor. Jeden pixel tekutých krystalů je vyobrazen na Obr. 4.3a). Pixely tekutých krystalů jsou anizotropní a jsou vyrobeny tak, že bez přiloženého napětí které zachovávají svou orientaci podél modulátoru. Jakmile je napříč pixelem přiloženo napětí, krystaly se naklání. Velikost úhlu mezi podélnou osou modulátoru a podélnou osou krystalů je přímo závislý na velikosti přiloženého napětí mezi vodivými filmy, schéma příkladu natočení krystalů při přiloženém napětí je uvedeno na Obr. 4.3b). Modulátor musí umožňovat úpravu spektrální fáze alespoň o 2π , aby modulování spektrální fáze nemělo žádná omezení. [2, 21, 22, 4].



Obr. 4.2: Schéma programovatelného prostorového modulátoru světla

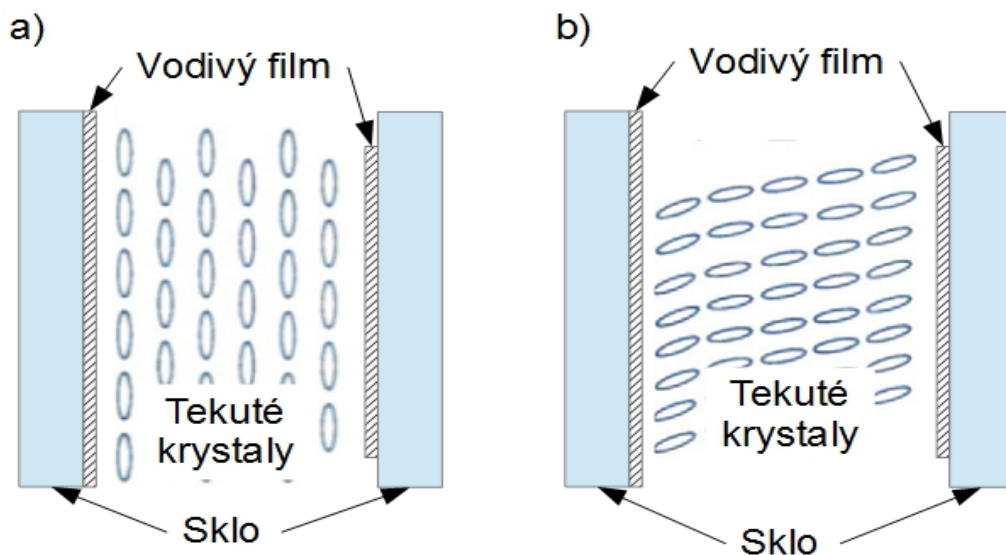
Má-li prostorový modulátor upravovat také intenzitu jednotlivých vlnových délek, pak musí být uvnitř systému umístěny za sebou dvě vrstvy pixelů tekutých krystalů,

avšak druhá vrstva krystalů má klidovou orientaci kolmou k vrstvě první. Modulátor pak funguje podobně jako polarizátor. Výstupní intenzitu I_{out} je možné zapsat rovnicí

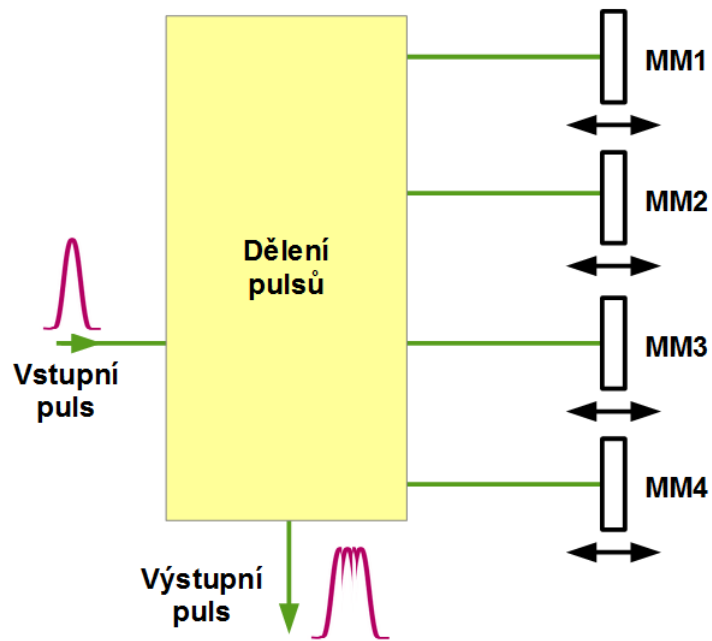
$$I_{out} = I_0 \sin^2 \left[\frac{\Delta\Phi(V)}{2} \right], \quad (4.6)$$

kde I_0 je vstupní intenzita a $\Delta\Phi(V)$ je rozdíl mezi úhly rotace tekutých krystalů ve dvou pixelech umístěných za sebou, úhel rotace je závislý na velikosti přiloženého napětí V . [4].

O něco odlišným přístupem k tvarování pulsů v čase je tzv. skládání pulsů. Laserový puls je několika děliči svazků rozdělen do požadovaného počtu kopií (několik jednotek až desítek). Každé kopii je udělen časový rozdíl pomocí motorizovaných zrcadel, jak je naznačeno na schématu na Obr. 4.4. V procesu není zapotřebí zásahu do amplitudy jednotlivých vlnových délek nebo do spektrální fáze, upravuje se pouze vzájemné časové zpoždění mezi jednotlivými kopiemi prvotního pulsu. Takovým způsobem lze generovat v podstatě libovolný tvar pulsu, avšak jednotlivá časová zpoždění je nutné přesně vypočítat a optimalizovat, neboť metoda skládání pulsů je na vzájemném časovém zpoždění mezi kopiemi pulsů vysoce citlivá. [7]



Obr. 4.3: Schéma jednoho pixelu tekutých krystalů v prostorovém modulátoru světla:
a) bez přiloženého napětí, b) s přiloženým napětím.



Obr. 4.4: Schéma fungování metody skládání pulsů: MM1 až MM4 jsou motorizovaná zrcátka

5 Současný stav řešení kontroly a řízení laserových systémů

Tato kapitola obsahuje rešerši současných poznatků týkajících se monitorovacích systémů pro vysokovýkonné lasery, minimalizace délky pulsu a tvarování pulsů v čase.

5.1 Zajištění bezpečného provozu vysokovýkonného laseru

Bezpečnost provozu laserových zařízení můžeme dělit na „osobní bezpečnost“ a bezpečnost „přístrojovou“ [32, 33, 34, 35]. V prvním případě je cílem ochránit operátory před jakýmkoliv úrazem ve smyslu například zajištění pohyblivých částí. Ve druhém případě je nutné zajistit, aby přístroj nezničil při provozu sám sebe. Ochrana osob samozřejmě zahrnuje použití vhodných ochranných pracovních pomůcek a bezpečné obsluhování zařízení, poučení operátora v tomto rozsahu splní pravidelné školení *Bezpečnost a ochrana zdraví při práci*. [5, 36]

Přístrojová bezpečnost laserů je technickým, nikoli vědeckým problémem. Ve vědecké literatuře najdeme pouze informace o existenci bezpečnostního systému v laserovém zařízení, avšak detaily se o konkrétním provedení, sledovaných parametrech a postupu naprogramování obvykle nepublikují [32, 33, 34, 37]. Na druhé straně bývá zvykem monitorovaný systém vypnout při zaregistrování jakékoliv jeho chyby či výpadku [38].

Při zakoupení laserového zdroje získá zákazník samozřejmě manuál k ovládání. Takový manuál obsahuje pouze pokyny ve smyslu BOZP, podrobnosti k bezpečnostním systémům zahrnuté nejsou [39, 40]. Bezpečnostní systém je vždy vytvářen na míru danému zařízení, výrobci i vědci své poznatky střeží.

5.2 Řízení tvaru a délky pulsů pikosekundových tenkodiskových laserů

V této podkapitole je uvedena rešerše použitých optomechanických či elektro-optických komponent a způsob tvarování pulsů pikosekundových laserů. Jelikož laser Perla C je systém založený na tenkodiskovém regenerativním zesilovači, který je kombinovaný s CPA, je rešerše zaměřena na tvarování pikosekundových laserů s CPA, regenerativním zesilovače nebo tenkým diskem se zpětnou vazbou.

Jak bylo naznačeno v předchozí podkapitole 5.1, detaily řízení laserových systémů ve vědecké literatuře spíše nenalezneme. Řešení tvarování pulsů v čase z pohledu naprogramování nebývá zvykem uvádět v literatuře s tematikou vývoje laserových systémů. V takových zdrojích jsou uvedeny obvykle jen optomechanické či elektro-optické komponenty využitě pro tvarování a samozřejmě výsledky experimentů.

Ačkoliv je možné tvarovat pulsy pikosekundových laserů například mřížkami [5, 6], saturací v aktivním prostředí [17], etalonem [5, 29, 36] či mikrostrukturou s modulovanou odrazivostí [30], takové způsoby jsou pasivní a nedovolují upravovat modulaci pomocí zpětné vazby. Modulace časového průběhu pulsů se zpětnou vazbou byla s úspěchem provedena pouze u jediného pikosekundového laseru systému s regenerativním zesilovačem [21] a jednoho s CPA [9]. Data o tvarování pulsů laseru založeného na tenkém disku nejsou dostupná.

Laser uvedený v [21] je systém s regenerativním zesilovačem s prostředím Yb:YLF (nejedná se o tenký disk). Cílem výhradně fázové modulace bylo dosažení kratšího pulsu při zachování spektra [21]. V případě ytterbiového CPA vláknového laseru byla využita modulace spektra k docílení požadovaného obdélníkového spektra a spektra s maximy pro dané vlnové délky [9]. Parametry obou laserových systémů jsou shrnuty v Tab. 5.1. V publikaci [9] je navíc k výsledkům experimentu přiložen i vývojový diagram použitého algoritmu. Po startu programu je zapnut prostorový modulátor světla, poté je naměřeno spektrum na výstupu z laseru a je vypočten žádaný útlum v závislosti na vlnové délce, funkce útlumu je aplikována do modulátoru [9]. Pokud výsledné spektrum neodpovídá požadavku, program celou smyčku opakuje [9].

Tab. 5.1: Souhrn parametrů pikosekundových lasery s modulovanými pulsy

Prostředí	Laser			Tvarování		Ref.
	λ	f	t	Prostředek	Způsob	
Yb:YLF	1017 nm	10 Hz	2,2 ps	Prostorový modulátor světla	Fáze	[21]
Ytterbiové vlákno	1045 nm	40 MHz	60 ps	Prostorový modulátor světla	Amplituda i fáze	[9]

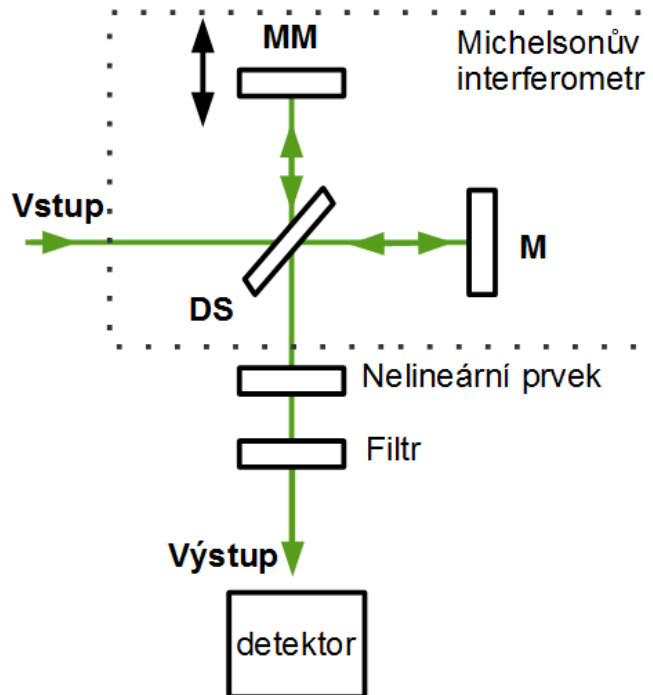
6 Techniky měření časové délky ultrakrátkých pulsů

Laserové pulsy o délce v jednotkách ps a kratší přinášejí nové potřeby technik měření, neboť běžně dostupné detektory jsou příliš pomalé [41]. Doposud bylo vyvinuto několik postupů splňujících nároky takto krátkých pulsů, metody měření časové délky ultrakrátkých pulsů jsou založeny na měření intenzity nebo měření spektra [42]. V obou případech se navíc obvykle využívá interference nebo dalších nelineárních optických jevů [42]. V současné době jsou nejběžněji využívány autokorelační metody, déle metoda FROG a SPIDER [43], které jsou dále více popsány s větším důrazem na metodu FROG, neboť ta bude využita v praktické části této diplomové práce.

6.1.1 Měření délky pulsů autokorelátorů

Pro měření se používají takzvané autokorelátorů, v nichž koreluje puls se svou kopií v závislosti na vzájemném zpoždění [23, 44]. Autokorelátorů samotné lze dále dělit na interferometrické (kolineární) a intenzitní (nekolineární), oba dva typy jsou níže podrobněji popsány. Měření pomocí autokorelátorů umožňuje detekování délky pulsu, informace o spektru či spektrální fázi získat nelze [23, 43, 45].

Srdcem interferometrického autokorelátoru je Michelsonův interferometr, na jeho výstupu je umístěn nelineární krystal, například pro generaci druhé harmonické frekvence, jak je zobrazeno na schématu na Obr. 6.1. Na výstupu z interferometru spolu pulsy interferují v závislosti na posunu motorizovaného zrcadla a procházejí nelineárním prvkem. Mezi nelineárním prvkem a detektorem se vkládá filtr, který propouští pouze generované vyšší harmonické frekvence, nikoli základní harmonická frekvence zdrojového záření. [23, 43, 45]



Obr. 6.1: Schéma interferometrického autokorelátoru s Michelsonovým interferometrem: MM – motorizované zrcadlo, M – zrcadlo, DS – dělič svazku

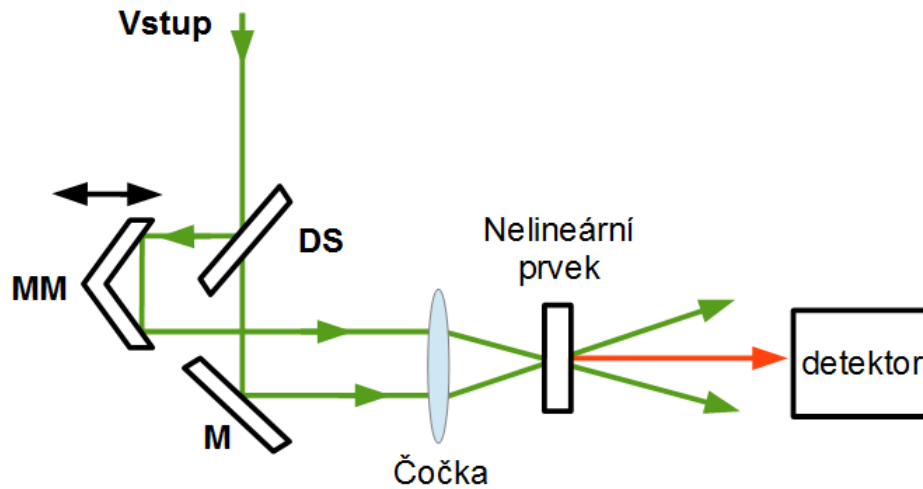
Průběh autokorelačního signálu I_{AC} v závislosti na vzájemném časovém posunu τ mezi oběma pulsy v režimu generace druhé harmonické frekvence je možné popsat rovnicí

$$I_{AC}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} (E(t) + E(t-\tau))^4 d\tau, \quad (6.1)$$

kde $E(t)$ je intenzita elektrického pole prvního pulsu v čase t a $E(t-\tau)$ je intenzita elektrického pole druhého pulsu v čase posunutém o τ [20].

Na vstupu do intenzitního autokorelátoru jsou vytvořeny děličem svazku dvě kopie pulsu, jak je schématicky naznačeno na Obr. 6.2. Každý svazek má rozdílnou optickou osu a pomocí motorizovaného zrcadla lze měnit vzájemné časové zpoždění τ obou svazků. Oba svazky jsou čočkou nekolineárně fokusovány do nelineárního prvku (opět například krystalu pro generaci druhé harmonické

frekvence), detekována je intenzita I_{AC} generovaných vyšších harmonických frekvencí v závislosti na vzájemném zpoždění τ vstupujících pulsů. [23, 42, 43]



Obr. 6.2: Schéma intenzitního autokorelátoru: DS – dělič svazku, MM – motorizované zrcadlo, M – zrcadlo

Vzhledem k nekolineární konfiguraci není detekována interference, detekovaný signál je hladký a neosciluje [23, 42, 43]. Průběh autokorelačního signálu I_{AC} v závislosti na vzájemném časovém posunu τ mezi oběma pulsy v režimu generace druhé harmonické frekvence je možné popsat rovnicí

$$I_{AC}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) \cdot I(t-\tau) d\tau, \quad (6.2)$$

kde $I(t)$ je intenzita prvního pulsu v čase t a $I(t-\tau)$ je intenzita druhého pulsu v čase posunutém o τ [20, 23, 46]. Vztah mezi délkou laserového pulsu a délkou naměřeného průběhu intenzity v závislosti na zpoždění při použití krystalu pro generaci druhé harmonické frekvence je pro běžné tvary pulsů tabelován [47]. Příklady přepočtů mezi délkou pulsu t_P (FWHM) a délkou intenzitní autokorelace t_{AC} (FWHM) jsou uvedeny v Tab. 6.1.

Tab. 6.1: Přepočítání mezi délkou pulsu t_p (FWHM) a délkou intenzitní autokorelace druhého řádu t_{AC} (FWHM) pro vybrané tvary pulsů [47]

Tvar pulsu	t_p/t_{AC}
Obdélníkový	1
Gaussovský	0,0701
Lorentzovský	0,50
Parabolický	0,8716

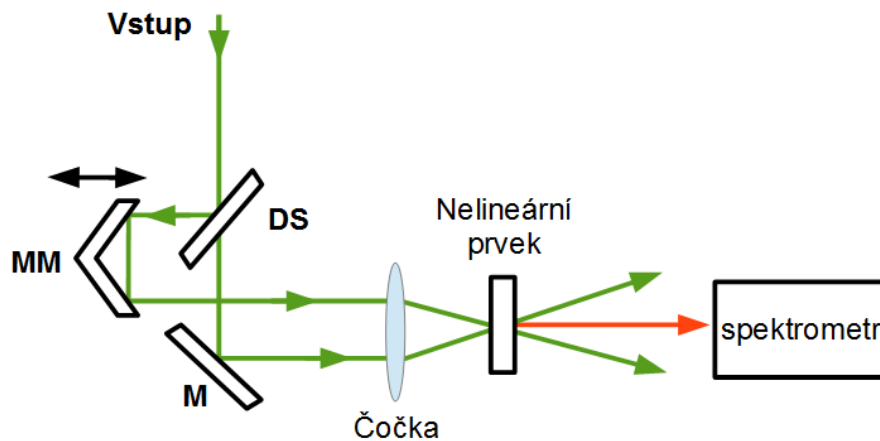
6.1.2 Měření intenzity a fáze laserového pulsu

Měření intenzity a fáze pulsu vyžaduje na rozdíl od měření autokorelátorem dodatečnou informaci získanou například měřením tvaru spektra. Proto se často jako detektor namísto fotodiody využívá spektrometr. Typickými technikami jsou měření spektrálně rozlišená intenzitní autokorelace (FROG) či nebo spektrálně interferometrická technika SPIDER. [41, 42]

Název metody FROG je zkratkou pro *Frequency-resolved Optical Gating*, tento název lze volně přeložit jako *frekvenčně rozlišené optické klíčování*. Schéma umístění optiky a optomechaniky je podobné jako u intenzitního autokorelátoru s tím rozdílem, že namísto detektoru výkonu je použit spektrometr, jak je ukázáno na Obr. 6.3. Na vstupu jsou vytvořeny děličem svazku dvě kopie pulsu a pomocí motorizovaného zrcadla lze měnit vzájemné časové zpoždění τ obou svazků. Oba svazky jsou čočkou fokusovány do nelineárního prvku (generaci vyšší harmonické frekvence). Spektrometrem je detekována intenzita záření v závislosti na vlnové délce a zároveň na zpoždění vytvořeném motorizovaným zrcadlem. Naměřený spektrogram $I(\omega, \tau)$ v případě využití generace druhé harmonické frekvence v závislosti na frekvenci ω a vzájemném časovém zpoždění τ obou pulsů je možné popsat rovnicí

$$I(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t) E(t - \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2, \quad (6.3)$$

kde $E(t)$ je amplituda měřeného elektrického pole v čase t , $E(t - \tau)$ je amplituda měřeného elektrického pole pulsu v čase posunutého o τ , $\exp(-i\omega t)$ popisuje fázový faktor [18, 20].

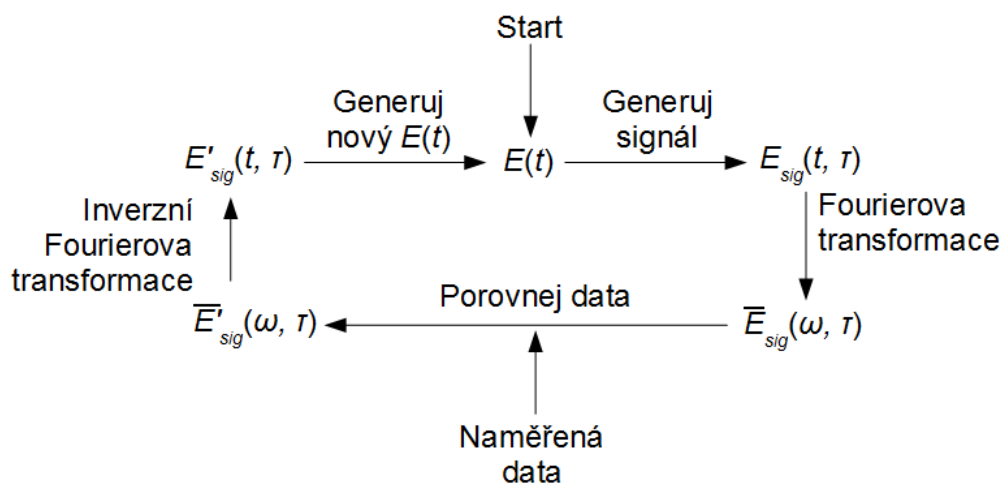


Obr. 6.3: Schéma měřicí metody FROG: DS – dělič svazku, MM – motorizované zrcadlo, M – zrcadlo

Detekovaný signál je následně zpracován iterativně Fourierovou transformací, schéma FROG algoritmu je nastíněno na Obr. 6.4. Algoritmus začíná na předem nafinovaném odhadu (reálnému pulsu nepodobném) průběhu $E(t)$ a vypočítá $E_{sig}(t, \tau)$ dle vztahu

$$E_{sig}(t, \tau) = E(t) E(t - \tau), \quad (6.4)$$

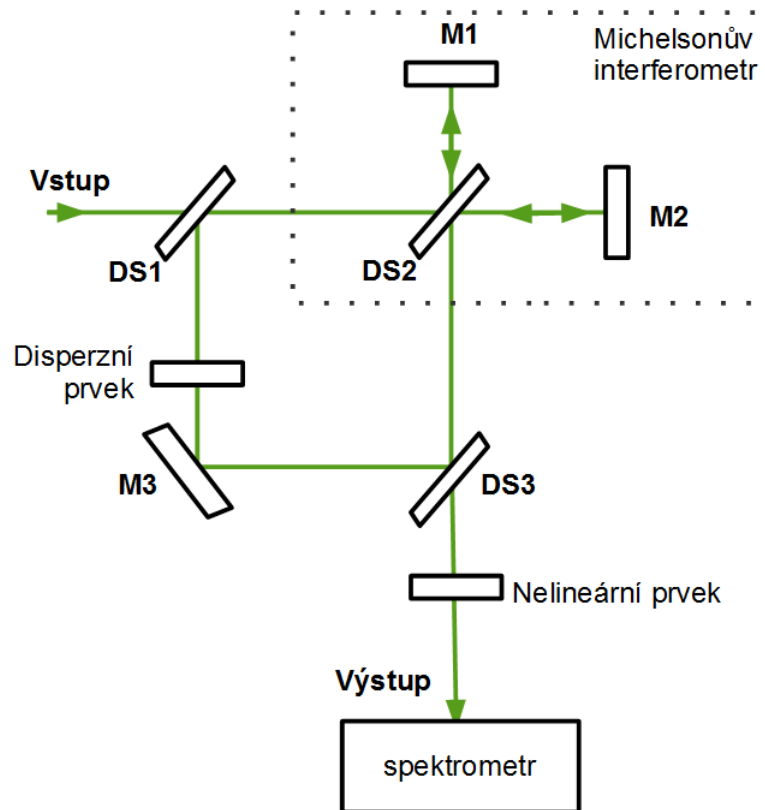
kde τ je vzájemné časové zpoždění obou pulsů. Provede se Fourierova transformace do frekvenční domény ($\bar{E}_{sig}(\omega, \tau)$) a vypočte se, jaký by pro takový puls měl být průběh $I(\omega, \tau)$ dle rovnice (6.3). Na základě rozdílů vypočteného a naměřeného spektrogramu je provedena úprava funkce $\bar{E}_{sig}(\omega, \tau)$, která po inverzní Fourierově transformaci upraví odhad průběhu $E(t)$. Celý cyklus se opakuje, dokud algoritmus nedokverguje k výsledku. Výstupem výpočtu je délka testovaného pulsu, jeho spektrum a spektrální fáze. [18, 20]



Obr. 6.4: Schéma iterativního výpočetního algoritmu měřicí metody FROG

SPIDER je zkratka pro *Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction*, což lze volně přeložit jako *spektrálně fázová interferometrie pro přímou rekonstrukci elektrického pole*. Veškeré informace o pulsu lze získat z měření jednoho jediného vstupního pulsu. Schéma metody SPIDER je zobrazeno na Obr. 6.5. Na vstupu do SPIDERu na prvním děliči svazku jsou vytvořeny dvě kopie vstupního pulsu. Jedna kopie prochází Michelsonovým interferometrem, kde se puls opět dělí na dva testovací s pevně daným vzájemným časovým zpožděním τ . Puls, který Michelsonovým interferometrem neprochází, je roztažen v čase disperzním prvkem. V čase roztažený puls a oba testovací pulsy následně pomocí děliče svazku procházejí nelineárním prvkem, kde se generuje jejich součtová frekvence. Vzhledem k interakci se silně čerpovaným pulsem jsou výsledkem dva spektrálně posunuté kopie téhož pulsu, které pak spektrálně interferují. Intenzita $I(\omega)$ je detekována spektrometrem. [48, 49]

Roztažení pulsu disperzním prvkem musí být tak významné, aby došlo k časovému oddělení jednotlivých vlnových délek, a zároveň vzájemné zpoždění testovacích pulsů vycházejících z Michelsonova interferometru musí být synchronizováno tak, aby oba testovací pulsy interferovaly s odpovídajícím roztaženým pulsem. Pak každá vlnová délka roztaženého pulsu interferuje s jiným časovým intervalem testovacích pulsů. [48, 50, 51]



Obr. 6.5: Schéma metody SPIDER: DS1, DS2, DS3 – děliče svazku, M1, M2, M3 – zrcadla

Signál $I(\omega)$ detekovaný spektrometrem pro frekvenci ω zkoumaného pulsu je možné popsat rovnicí

$$\begin{aligned}
 I(\omega) = & |E(\omega)|^2 + |E(\omega + \Omega)|^2 + \\
 & + 2|E(\omega)E(\omega + \Omega)| \cos[\Phi_\omega(\omega + \Omega) - \\
 & - \Phi_\omega(\omega) + \omega\tau], \quad (6.5)
 \end{aligned}$$

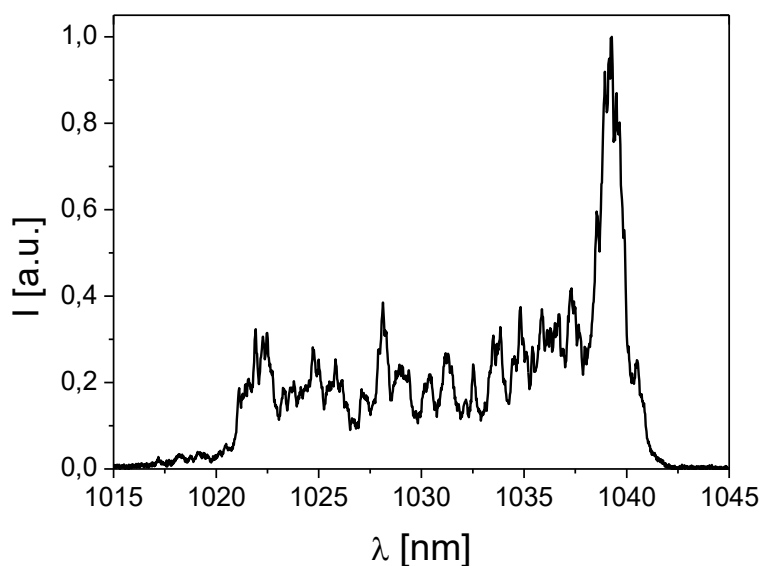
kde $E(\omega)$ je intenzita měřeného elektrického pole, Ω je frekvenční posun mezi interferujícími pulsy, $E(\omega + \Omega)$ je amplituda měřeného elektrického pole na frekvenci $(\omega + \Omega)$, $\Phi_\omega(\omega + \Omega)$ je spektrální fáze odpovídající frekvenci $(\omega + \Omega)$, $\Phi_\omega(\omega)$ je hledaná spektrální fáze odpovídající frekvenci ω , $\omega\tau$ je fázový posun

vzhledem k vzájemnému časovému zpoždění τ testovacích pulsů [48, 52]. Naměřený spektrogram se zpracuje pomocí (neiterativní) Fourierovy transformace a získá se tak informace nejen o délce pulsu, ale i o jeho spektrální fázi [48, 50, 51].

7 Analýza laserového pulsu systému Perla C

Jedním z úkolů této práce je analýza pulsu vycházejícího ze laserového systému Perla C. Vzhledem k vytíženosti systému nebylo možné měření uskutečnit. Měření tedy bylo provedeno na zástupném systému. Byl analyzován puls vystupující z vláknového oscilátoru ANDi Yb:sklo s opakovací frekvencí 60 MHz. Spektrum oscilátoru bylo detekováno spektrometrem Narran BR8 (s rozlišením 0,03 nm), výkon byl analyzován měřičem výkonu Ophir Vega, časový průběh byl detekován přístrojem Ape pulseCheck FROG s časovým rozlišením 0,05 fs měřeném rozsahu 50 ps.

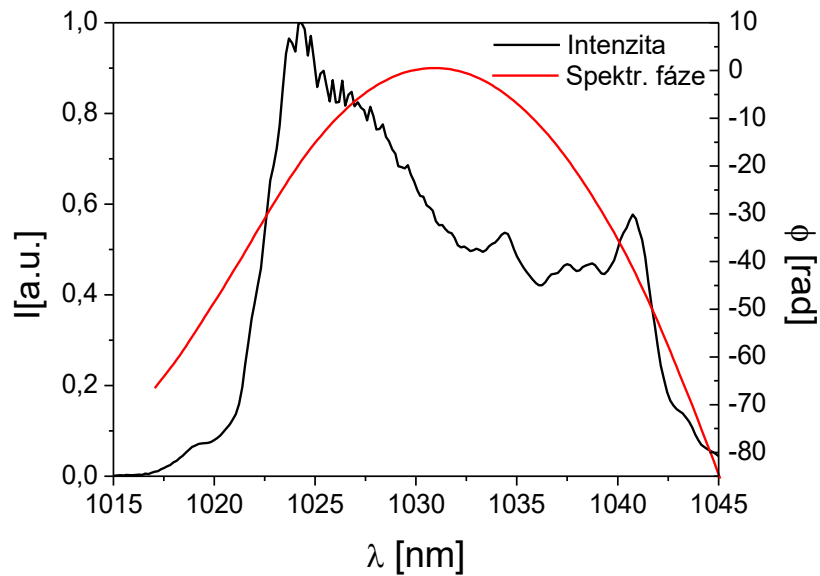
Spektrum laserového oscilátoru je zobrazeno na Obr. 7.1, střední vlnová délka je 1030 nm a šířka spektra na polovině maxima zhruba 20 nm. Výstupní výkon byl 24,46 mW.



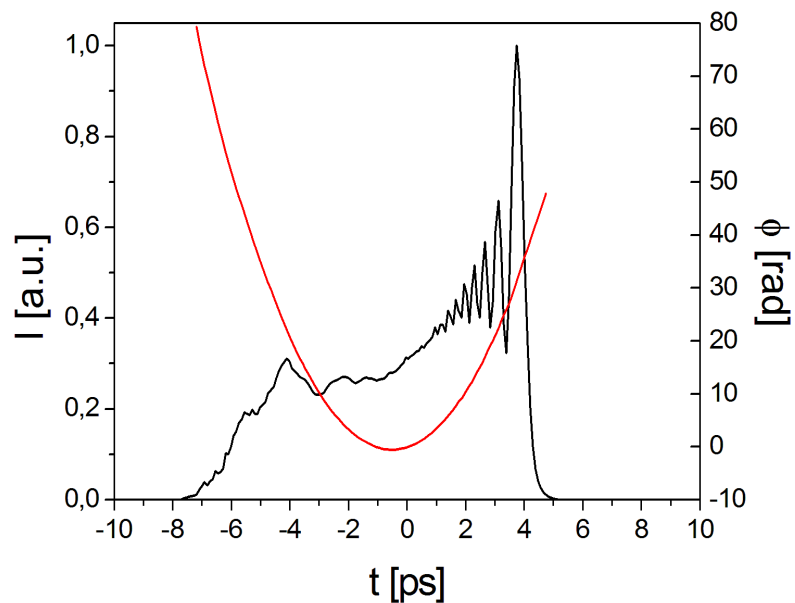
Obr. 7.1: Spektrum generované vláknovým oscilátorem ANDi Yb:sklo

Měření pomocí FROGu vyžaduje uživatelem nastavení mnoha parametrů, jako jsou především střední vlnová délka, měřené časové okno, měřený interval vlnových délek a počet kroků na daném intervalu vlnových délek. Výsledky velmi závisely na měřeném intervalu vlnových délek a počtu kroků na daném intervalu. Metodou FROG vypočtené spektrum a spektrální fáze a časový průběh pulsu

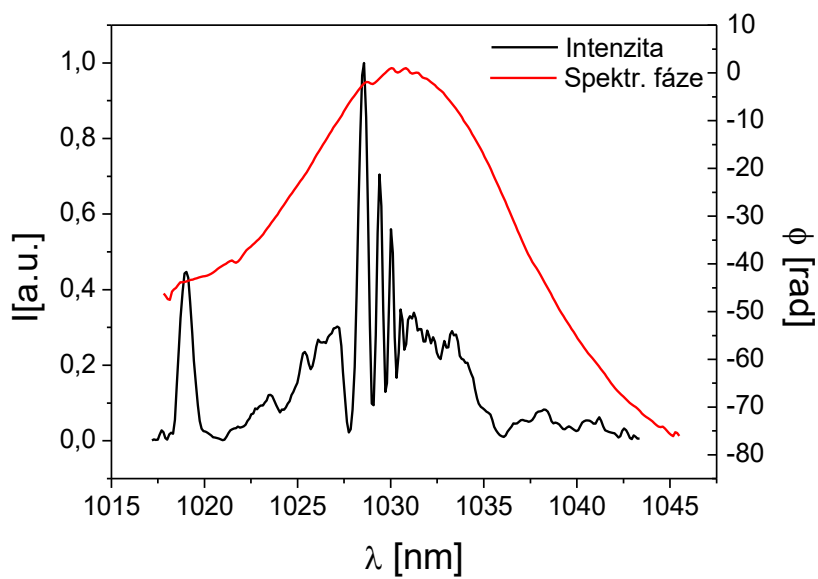
s rozlišením 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření jsou vykresleny na Obr. 7.2 a Obr. 7.3, s rozlišením 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření jsou vykresleny na Obr. 7.4 a Obr. 7.5. Relativní spektrální fáze má kvadratický průběh, na intervalu vlnových délek 1025-1035 nm pohybovala dle Obr. 7.2 od 0 rad do zhruba -14 rad, dle Obr. 7.4 od 0 rad do zhruba -22 rad. Délka pulsu (FWHM) byla dle Obr. 7.3 2 ps, dle Obr. 7.5 přibližně 9 ps.



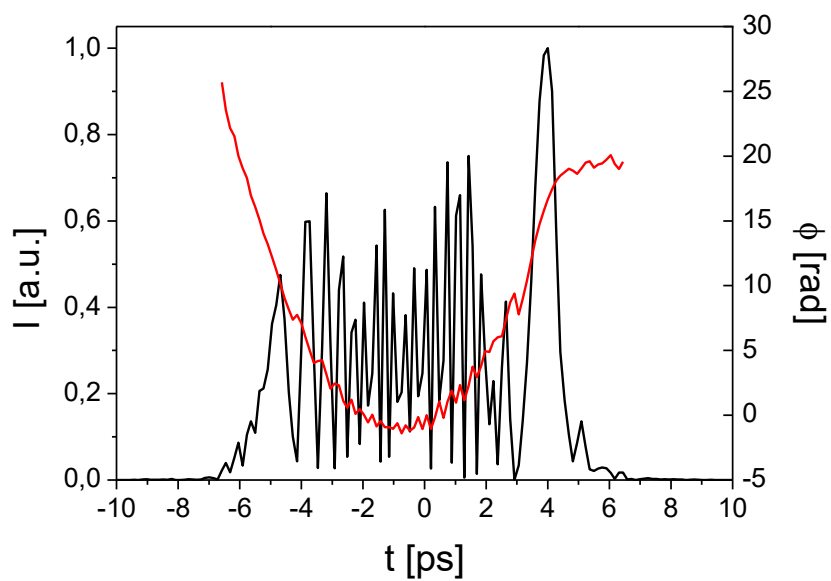
Obr. 7.2: Spektrum a spektrální fáze pulsu oscilátoru ANDi Yb:sklo vypočtené metodou FROG (rozlišení 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření)



Obr. 7.3: Časový průběh intenzity a fáze pulsu oscilátoru ANDi Yb:sklo vypočtené metodou FROG (rozlišení 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření)



Obr. 7.4: Spektrum a spektrální fáze pulsu oscilátoru ANDi Yb:sklo vypočtené metodou FROG (rozlišení 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření)



Obr. 7.5: Časový průběh intenzity a fáze pulsu oscilátoru ANDi Yb:sklo vypočtené metodou FROG (rozlišení 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření)

8 Návrhy řídicích systémů a algoritmů

Vývoji softwaru předchází specifikace systému a jeho verifikace pro zajištění provozuschopnosti a ošetření reakcí na veškeré stavy (situace), které mohou vzniknout. Cílem specifikace je jasně a srozumitelně udat požadavky na softwarový systém. Verifikací je možné ukázat, zda bude softwarový systém reagovat dle požadavků a očekávání. Jde v podstatě o dotazování na systém a ověřování správné odezvy tak, jak udává specifikace. [53]

V následujících podkapitolách jsou uvedeny návrhy softwaru k jednotlivým bodům diplomové práce. U návrhu softwaru pro zajištění bezpečnosti a návrhu programu pro minimalizaci délky pulsu je nejprve popsána specifikace, následně je provedena verifikace a návrh řídicího systému v podobě vývojového diagramu. Návrh řízení tvarování pulsů je pouze krátce komentován, neboť jde o modifikaci návrhu programu pro minimalizaci délky pulsu.

8.1 Návrh bezpečnostního systému pro laser Perla C

V běžné praxi se laserový systém charakterizuje parametry jako vlnová délka, opakovací frekvence, šířka spektra, délka pulsu, šířka svazku či divergence [5, 36]. Bezpečný provoz laseru je obecně ovlivňován vibracemi prostředí, teplotou prostředí a také vlastním výkonem laseru [5, 54, 55, 56].

K tomu se pojí potřeba sledovat, zda je laserový svazek zarovnan v optické ose [54]. Případné ořezávání svazku na optických nebo optomechanických součástech laserového systému může způsobit poškození zmíněných komponent. Návrh monitorovacího systému pro laser Perla C by měl obsahovat kameru či obdobný senzor pro sledování polohy záření. Senzor sledující polohu svazky by měl být umístěn na výstupu z laserového systému. V předchozím odstavci byl zmíněn vliv teploty a vibrací na bezpečnost laseru. Případné odchylky laserového svazku od optické osy vyvolané vibracemi prostředí lze detekovat kamerou. Snížení teploty pracovního prostředí může způsobit smrštění optických i optomechanických dílů, její zvýšení se může promítnout do roztáhnutí zmíněných součástí. Může tedy dojít

nejen k vychýlení laserového svazku od optické osy. Odchýlení svazku sice může být detekováno kamerou, avšak změna teploty může také způsobit změny ohniskových vzdáleností optických komponent [55, 56]. Je tedy vhodné sledovat kromě polohy svazku na kameře i vývoj teploty v systému Perla C.

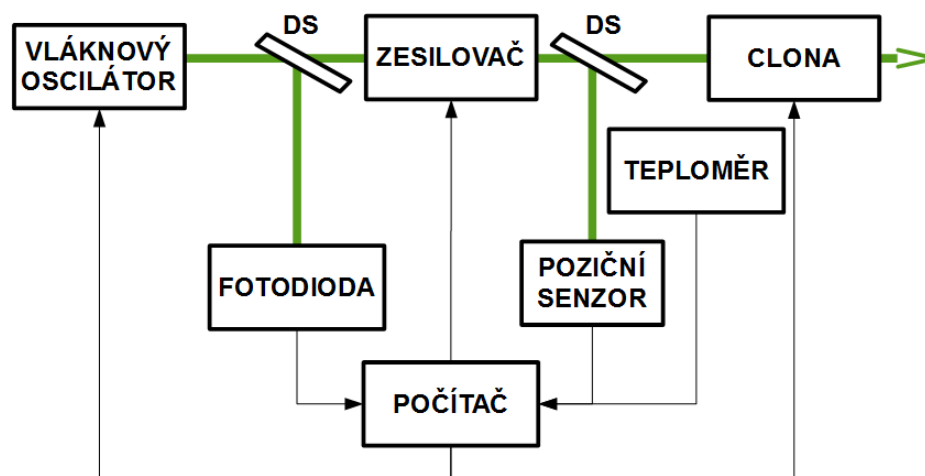
Součástí laserového systému Perla C je tenkodiskový regenerativní zesilovač, jak je uvedeno v kapitole 3). Z principu funkce regenerativního zesilovače vyplývá, že v případě závady oscilátoru (zdroje zesilovaného laserového záření) a vynechání generovaného pulsu bude první následující puls zesílen mnohem více vzhledem k vyšší energii uložené v zesilovači způsobené jejím nevyčerpáním chybějícím pulsem [5, 57]. Z toho vyplývá, že měření výkonu například fotodiodou je také nezbytnou součástí zabezpečení provozu laserového systému.

Software zajišťující bezpečný provoz lze specifikovat jako systém monitorující teplotu prostředí, pozici laserového svazku na výstupu z laseru na pozičním senzoru a výkon na fotodiodě umístěné před vstupem do zesilovače. Měl by zajišťovat uvedení laseru do bezpečného stavu v případě vyhodnocení nebezpečí. Za bezpečný stav laserového systému se považuje uzavření clonky na výstupu z laseru, vypnutí zesilovače a vypnutí oscilátoru. Nebezpečí je v tomto případě výkon na fotodiodě nižší než prahový, posun svazku na senzoru o větší než prahovou vzdálenost a změna teploty mimo vymezený interval teplot. Prahové hodnoty výkonu a odchylky svazku a interval pracovních teplot zadá do programu při jeho spuštění operátor laseru. Specifikace je shrnuta v tabulce Tab. 8.1. Zjednodušený návrh umístění detektoru ve vztahu k částem laseru Perla C je uveden na Obr. 8.1.

Tab. 8.1: Shrnutí specifikace monitorovacího softwaru

Požadavek	Popis
1	Zadání intervalu pracovních teplot t_{\min} a t_{\max} , zadání maximálního povoleného posunu svazku d_s na pozičním senzoru a zadání prahové hodnoty výkonu P_{th} operátorem při spuštění programu.
2	Neustálé monitorování teploty t , polohy svazku s a výkonu P .
3	Pokud je $t > t_{\max}$ nebo $t < t_{\min}$, uzavřít clonku, vypnout zesilovač a vypnout oscilátor.
4	Pokud $s > d_s$, uzavřít clonku, vypnout zesilovač a vypnout oscilátor.
5	Pokud $P < P_{th}$, uzavřít clonku, vypnout zesilovač a vypnout oscilátor.

Při vývoji softwaru, jak je uvedeno výše, je vhodné dotazy ověřit, tedy verifikovat, zda zadaná specifikace zahrnuje všechny možné případy situací a stavů, které mohou nastat. Verifikace v podobě dotazů na monitorovací systém je uvedena v Tab. 8.2.

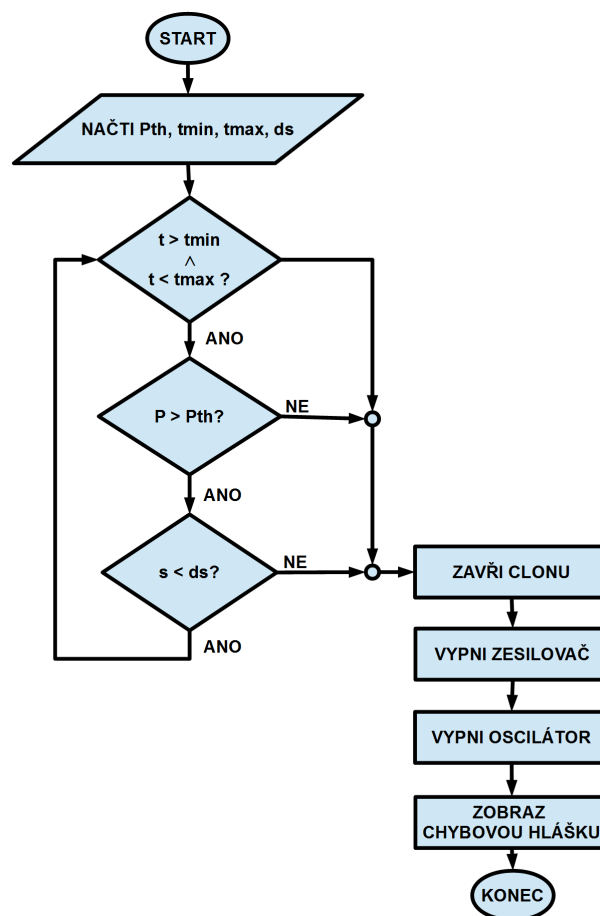


Obr. 8.1: Schématický návrh rozložení detektorů v laseru Perla C: DS je dělič svazku

Tab. 8.2: Verifikace monitorovacího softwaru

Dotaz	Výsledek dotazu	Doplnění specifikace
Platí, že vždy při vyhodnocení nebezpečí je laser uveden do bezpečného stavu?	Ano.	
Platí, že systém stále monitoruje požadované parametry?	Neplatí po vyhodnocení nebezpečí.	Upozornit operátora na vypnutí laseru

Návrh monitorovacího systému parametrů kritických pro bezpečný provoz laseru je zobrazen na vývojovém diagramu na Obr. 8.2. Na počátku programu operátor laseru zadá interval pracovních teplot t_{min} až t_{max} , maximální povolený posunu svazku ds na pozičním senzoru a prahovou hodnotu výkonu P_{th} po spuštění programu. Poté program již bez zásahu operátora měří dané parametry a porovnává hodnoty naměřené se zadanými. Jakmile dojde k naměření hodnoty libovolného parametru mimo zadané limity, program zavře clonku na výstupu z laseru a postupně vypíná jednotlivé části laserového systému. Program po uvedení laseru do bezpečného stavu upozorní operátora, k jaké došlo chybě a že laser je vypnutý.



Obr. 8.2: Vývojový diagram návrhu monitorovacího systému;
 P_{th} - prahový výkon, t_{min} - minimální provozní teplota, t_{max} - maximální
 provozní teplota, ds - maximální možná odchylka svazku, t - měření
 teplota, P - měřený výkon, s - měřená odchylka svazku

8.2 Návrh programu pro minimalizaci délky pulsu

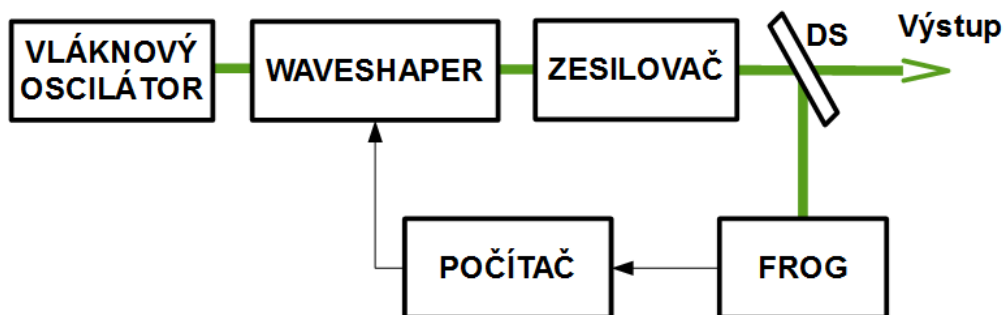
Puls vycházející z laserového systému Perla C bude analyzován metodou FROG, navrhovaný algoritmus má zajistit zpětnou vazbu pro laditelný amplitudový a fázový spektrální filtr (Waveshaper) umístěný před regenerativním zesilovačem. Cílem je dosažení nejkratší možné délky laserového pulsu.

Na základě [9] lze předpokládat, že požadované délky pulsu se nedosáhne ihned po první aplikaci amplitudového a fázového spektrálního filtru na Waveshaperu, navrhovaný program musí umožňovat úpravu filtru na základně nově naměřené analýzy pulsu. Teoreticky nejkratší možná délka pulsu odpovídá transformačně limitovanému pulsu, který je charakterizován konstantní spektrální fází [19]. Kompenzování nekonstantní fáze pomocí fázového spektrálního filtru a bez modulace spektra by mělo být dostačující k přiblížení se k transformačně limitované délce pulsu [10, 58]. Bez modulace spektra se navíc zachovává celková energie v pulsu [8].

Uživatel může nejen aplikovat fázový filtr pro minimalizaci délky pulsu, ale také nechat Waveshaper bez filtru (průchod pulsů bez modulace) a nebo naopak zajistit blokaci svazku (maximální možný útlum zeslabení v celé šíři spektra). Jelikož navrhovaný software je plánován pro centrum HiLASE se zahraničních pracovníků, uživatelské rozhraní musí být v angličtině. Specifikace systému je shrnuta v Tab. 8.3. Návrh umístění přístroje FROG a Waveshaperu v laserovém systému Perla C je schématicky uveden na Obr. 8.3.

Tab. 8.3: Shrnutí specifikace minimalizačního softwaru

Požadavek	Popis
1	Možnost úplného zeslabení celého spektra
2	Možnost provozu Waveshaperu bez filtru
3	Minimalizace délky pulsu v iteracích
4	Uživatelské rozhraní v angličtině
5	Odesílání filtrů přímo do Waveshaperu
6	Nahrávání souborů z měření FROG
7	Neustálý provoz

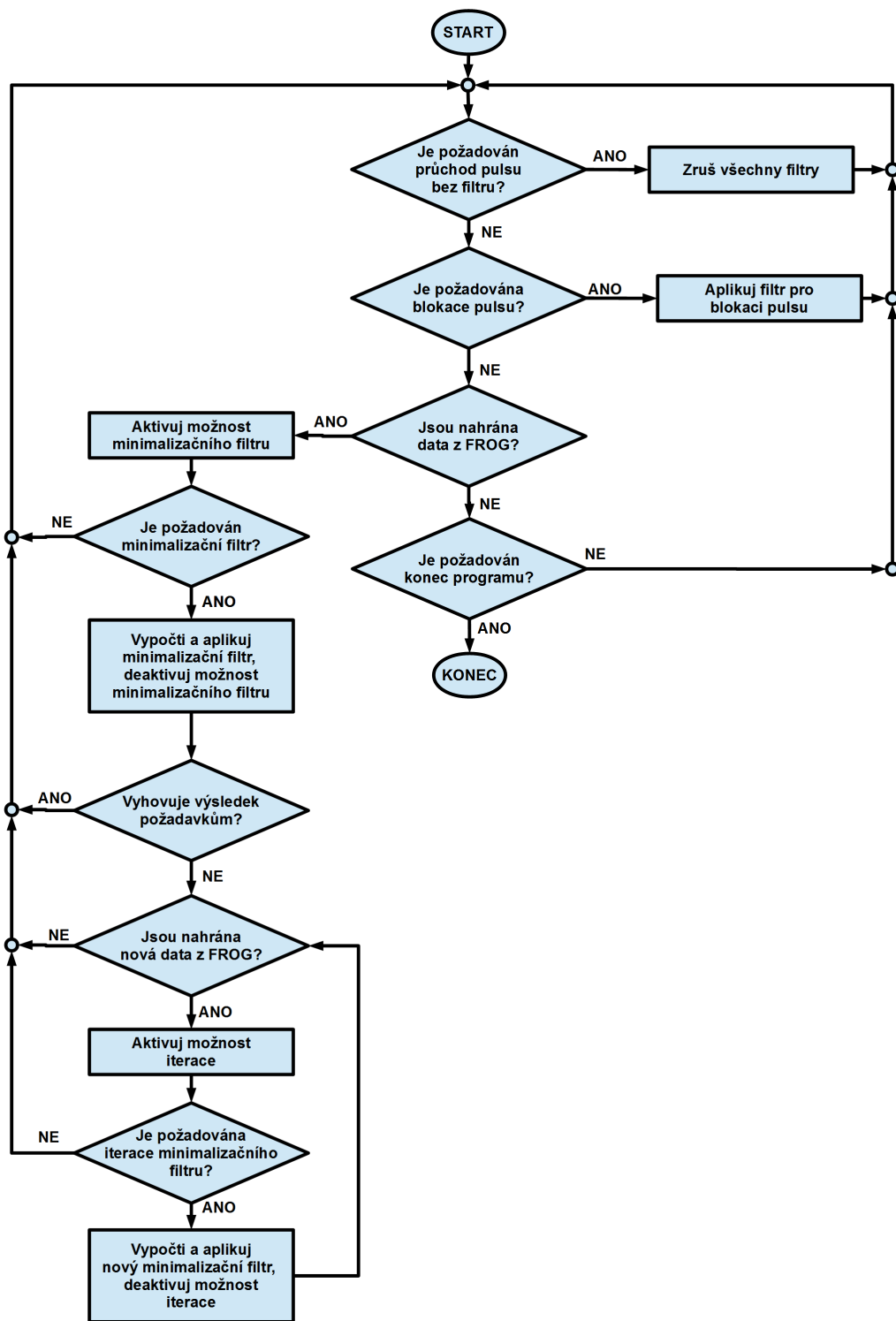


Obr. 8.3: Schématický návrh rozložení detektoru FROG a Waveshaperu v laseru
Perla C: DS je dělič svazku

Verifikace programu v podobě dotazů na software pro minimalizaci délky pulsu je uvedena v Tab. 8.4. Návrh programu pro minimalizaci délky pulsu je ve formě vývojového diagramu zobrazen na Obr. 8.4. Po spuštění program čeká, jaký filtr uživatel vybere nebo zda nahraje data z analýzy pulsu. Po nahrání dat se objeví v uživatelském rozhraní možnost aplikace filtru pro minimalizaci délky pulsu v podobě tlačítka. Pokud uživatel aplikuje minimalizační filtr, tlačítko opět zmizí. Jakmile dojde k nahrání dat z analýzy pulsu po aplikaci filtru (tedy nahrání aktualizovaných dat), objeví se možnost tlačítka pro iteraci, které umožní úpravu filtru a jeho následnou aplikaci. Dokud nedojde k nahrání dalších aktualizovaných dat, bude možnost iterace zablokována.

Tab. 8.4: Verifikace monitorovacího softwaru

Dotaz	Výsledek dotazu	Doplnění specifikace
Platí, že uživatel může kdykoliv zeslabit celé spektrum?	Ano.	
Platí, že uživatel může kdykoliv zrušit všechny filtry?	Ano.	
Platí, že uživatel může kdykoliv aplikovat filtr pro minimalizaci délky pulsu?	Ne, pokud nejsou nahrána naměřené data.	Neumožnit aplikaci filtru, pokud nejsou nahrána data z FROG.



Obr. 8.4: Vývojový diagram návrhu programu pro minimalizaci délky pulsu

8.3 Návrh algoritmu pro tvarování pulsu do předem definovaných tvarů

V případě minimalizačního algoritmu bude puls laserového systému Perla C analyzován metodou FROG a k úpravě relativní spektrální fáze bude využit laditelný amplitudový a fázový spektrální filtr (Waveshaper). Jelikož dle [2, 4, 21, 22] je možné dosáhnout libovolného tvaru v čase modulací spektra a relativní spektrální fáze, není potřeba žádným způsobem detektor, v tomto případě FROG modifikovat. Metoda FROG je plně dostačující.

Program pro tvarování pulsu v časové doméně do předdefinovaného tvaru by měl umožnit uživateli vybrat tvar ze seznamu (například obdélníkový, Gaussovský, Lorentzovský) a dále zadat požadovanou časovou délku. Pro zadaný časový průběh pulsu musí být vypočtena Fourierova transformace, vypočítané požadované spektrum a relativní spektrální fáze by byly porovnány s průběhem spektra a relativní spektrální fáze z FROG, z čehož by byl vypočítán požadovaný útlum v závislosti na frekvenci a potřebná modulace relativní spektrální fáze. Vypočítaný filtr by byl následně aplikovaný Waveshaperem.

9 Realizace a testování

Pro řízení laseru Perla C a optimalizaci délky pulsu bylo vybráno programovací prostředí LabVIEW z důvodu vzájemné kompatibility se stávajícími systémy v Centru HiLASE. Vývojové a programovací prostředí LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) je založeno na blokovém diagramu a umožňuje programovat vizualizací a grafickou interpretací - proto se někdy nazývá „G-jazyk“. LabVIEW otvírá možnosti rychlému navrhování a vývoje nových aplikací a je vhodný rychlým změnám konfigurací systémů během vývoje [59]. Popsání základních pojmů a funkcí v prostředí LabVIEW není předmětem této práce.

V této kapitole jsou uvedeny nejzásadnější části programování softwaru, popis architektury a uživatelského rozhraní. Testování je provedeno pro minimalizaci délky laserového pulsu, jak ukládá zadání. Kod naprogramovaný autorem této práce je ve formě spustitelného .exe souboru je součástí přílohy na CD. V poslední část kapitoly je komentována možnost obohacení algoritmu o výpočty nutné k zajištění možnosti úpravy časového průběhu pulsu do předdefinovaných tvarů.

9.1 Realizace programu pro minimalizaci délky pulsu

K modulaci laserového záření bude využit prostorový modulátor světla Waveshaper Finisar 1000A, jehož frekvenční rozlišení je 1 GHz (0,035 nm) a puls bude detekován přístrojem Ape pulseCheck FROG. Jak je uvedeno na vývojovém diagramu na Obr. 8.4, do programu jsou nejprve nahrána data z přístroje FROG, ta jsou zpracována a v případě požadavku uživatele je konkrétní filtr (požadavek na útlum amplitudy či modulaci spektrální fáze) odeslán do Waveshaperu a aplikován. V tomto programu budou využívány 3 filtry – blokáce pulsu (úplný útlum amplitudy v celém spektrálním rozsahu), průchod pulsu bez jakékoliv modulace a minimalizační filtr. Níže uvedený text popisuje převod dat z přístroje FROG do formátu kompatibilního s Waveshaperem a konkrétní provedení jednotlivých filtrů.

9.1.1 Formáty dat

Waveshaper Finisar vyžaduje nahrání souboru ve formátu Waveshaper Preset (*.wsp). Jde o standardní formát tabulátorem oddělených hodnot, přípona souboru je podstatná pro rozpoznání přístrojem. Příklad obsahu požadovaného souboru je uveden na Obr. 9.1. V prvním sloupci je uvedena frekvence v jednotkách THz, ve druhém zeslabení v jednotkách dB, ve třetím pak požadovaný fázový posun v radiánech, poslední sloupec odkazuje na port Waveshaperu. Port bude mít v tomto případě vždy hodnotu jedna – více portů je využito v případně nahrávání více filtrů najednou. Výrobce doporučuje, aby všechny hodnoty v tabulce, která bude nahrána do Waveshaperu, byly zaokrouhleny s přesností na 3 desetinná místa. Útlum $A(f)$ v závislosti na frekvenci f je definováno vztahem

$$A(f) = -20 \log_{10}(F(f)), \quad (9.1)$$

kde $F(f)$ je poměr mezi požadovanou amplitudou intenzity a naměřenou amplitudou intenzity. [60]

291.231	2.000	3.140	1
291.232	2.100	3.150	1
291.233	2.200	3.160	1
...
...
...
295.650	6.200	3.160	1
295.651	7.200	3.150	1
295.652	8.200	3.140	1

Obr. 9.1: Ukázka dat k nahrání do Waveshaperu - v prvním sloupci je frekvence [THz], ve druhém zeslabení [dB], ve třetím požadovaný fázový posun [rad], poslední sloupec odkazuje na port Waveshaperu [60]

FROG, který umožňuje měření intenzity a fázového posunu v závislosti na vlnové délce nebo frekvenci, generuje tabulku v textovém souboru (tabulátorem oddělené hodnoty) s naměřenými daty. Prvních několik řádků exportovaných naměřených dat je uvedeno na Obr. 9.2, data jsou ukládána včetně popisků jednotlivých sloupců, jak je zobrazeno na Obr. 9.2.

V prvním sloupci je časový krok (*time*) zadaný uživatelem v jednotkách fs. Ve druhém sloupci je frekvence (*frequency*) uvedena v jednotkách THz a ve třetím

vlnová délka (*wavelength*) v nm. Následující dva sloupce zahrnují intenzitu [a.u.] a relativní fázi [rad] v závislosti na časovém kroku (položky *time_intensity* a *time_phase*), další dva v závislosti na frekvenci (*frequency_intensity* a *frequency_phase*) a poslední dva v závislosti na vlnové délce (*wavelength_intensity* a *wavelength_phase*).

time	frequency	wavelength	time_intensity	time_phase	frequency_intensity	frequency_phase	wavelength_intensity	wavelength_phase
-1.473301E+2	2.901110E+2	1.037669E+3	6.070009E-2	-6.916346E-1	4.977492E-1	2.039955E-1	2.709770E-1	6.896240E-1
-1.205428E+2	2.902580E+2	1.037146E+3	1.404842E-1	-2.940958E-1	6.046598E-1	8.299937E-2	3.471794E-1	8.236487E-1
-9.375553E+1	2.904050E+2	1.036623E+3	2.932033E-1	-1.056928E-1	7.242765E-1	1.683789E-2	4.137456E-1	9.039679E-1
-6.696824E+1	2.905519E+2	1.036100E+3	5.047311E-1	-1.984864E-2	8.340239E-1	-9.293296E-3	4.497995E-1	9.275531E-1
-4.018094E+1	2.906989E+2	1.035578E+3	7.298651E-1	1.313591E-2	9.196402E-1	-1.183199E-2	4.480378E-1	8.904591E-1
-1.339365E+1	2.908459E+2	1.035055E+3	9.098740E-1	1.597283E-2	9.752910E-1	-5.052295E-3	4.227462E-1	7.875406E-1
...
...
...

Obr. 9.2: Ukázka několika řádků dat exportovaných z přístroje FROG

Časový a frekvenční krok v datech generovaných přístrojem FROG je zcela závislý na volbách uživatele během měření [61]. To znamená, že pro generaci dat potřebných pro Waveshaper je tedy nutné najít způsob, jak přenést informace o relativní spektrální fázi a amplitudě v závislosti na frekvenci z FROG do Waveshaperu tak, aby tento převod byl univerzální a na frekvenčním rozlišení FROG nijak nezávisel.

9.1.2 Převod dat pro optimalizaci délky pulsu tvarováním fáze

Základním parametrem pro tvarování pulsu je závislost fáze na frekvenci. Chceme-li docílit optimalizace délky pulsu, pak by všechny fázové komponenty měly být sfázované [24]. Pro jednoduchost výpočtů definujme konstantní funkci fáze $\varphi(f)$ v závislosti na frekvenci f pro optimální délku pulsu výrazem

$$\varphi(f) = 0, \quad (9.2)$$

neboli relativní fáze je rovna nule pro všechny frekvence.

Naměříme-li relativní fázi $\theta(f)$ pro danou frekvenci f metodou FROG, pak Waveshaper by měl fázi kompenzovat dle filtru

$$\varphi(f) = -\theta(f), \quad (9.3)$$

kde $\varphi(f)$ je fázový posun Waveshaperem generovaný. Relativní fáze vstupujícího pulsu v závislosti na frekvenci je tak kompenzována fázovým zpožděním stejné velikosti

avšak s opačným znaménkem, čímž dojde ke kompenzaci tak, že složky budou navzájem sfázované. Nicméně jak již bylo zmíněno výše, frekvenční krok při měření přístrojem FROG je plně závislý na volbách uživatele, tedy vzorkovací interval frekvencí, pro které byla naměřena fáze metodou FROG, nemusí nutně odpovídat vzorkování frekvencí požadovaného pro nastavení Waveshaperu.

Prvním možným způsobem řešení nekompatibility ve frekvenčním kroku je proložení lineární funkcí. Máme-li pro dvě sousední hodnoty frekvencí f_n a f_{n+1} hodnoty fáze $\theta(f_n)$ a $\theta(f_{n+1})$ naměřené metodou FROG, lze pak hodnoty fáze proložit lineární funkcí definovanou na intervalu frekvencí $\langle f_n, f_{n+1} \rangle$ ve tvaru

$$\theta(f) = \frac{\theta(f_n) - \theta(f_{n+1})}{f_n - f_{n+1}} \cdot f - \frac{f_n \theta(f_{n+1}) - f_{n+1} \theta(f_n)}{f_n - f_{n+1}}, \quad (9.4)$$

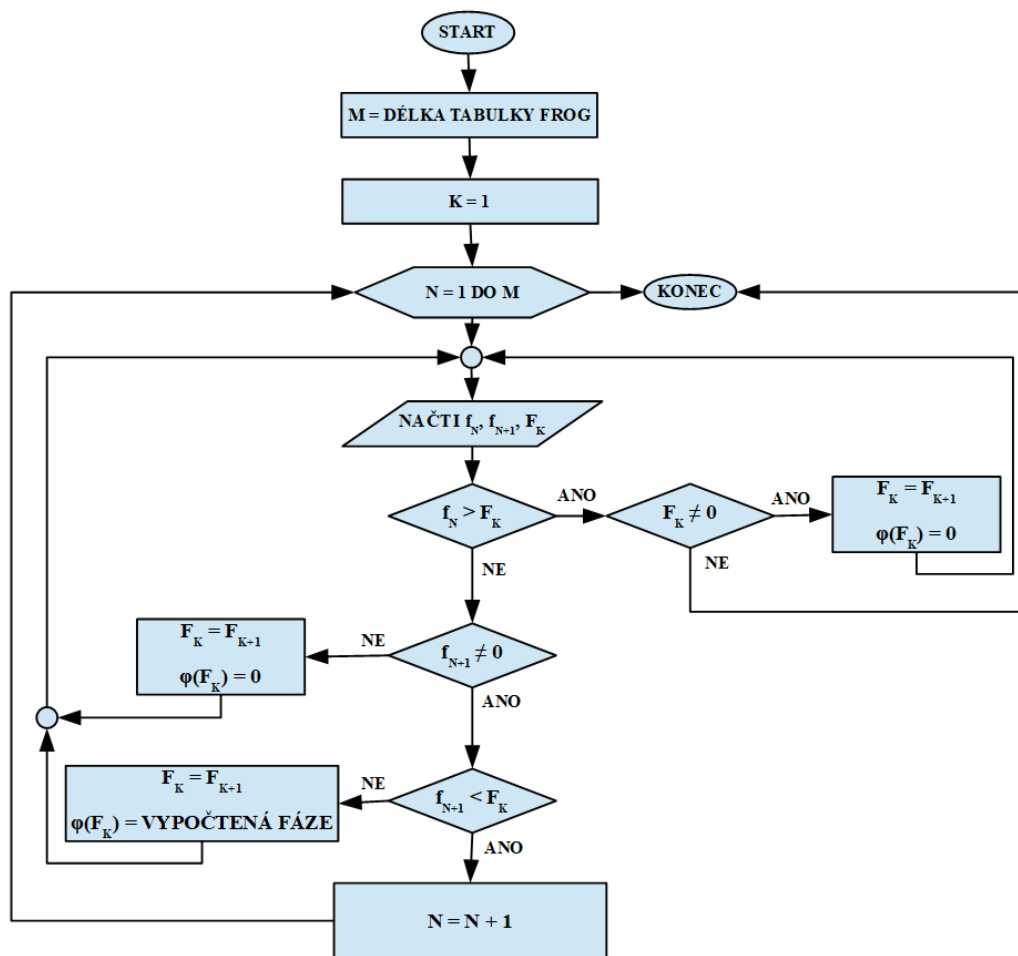
kde $\theta(f)$ je relativní fáze příslušné frekvence f . Tento výpočet lze využít pro aproximaci fázového posunu, tedy aproximaci fázového filtru vhodného k nahrání do Waveshaperu pro všechny frekvence na intervalu $\langle f_n, f_{n+1} \rangle$ s uvážením vztahu (9.3) získáme finální vzorec

$$\varphi(f) = \frac{f_n \theta(f_{n+1}) - f_{n+1} \theta(f_n)}{f_n - f_{n+1}} - \frac{\theta(f_n) - \theta(f_{n+1})}{f_n - f_{n+1}} \cdot f, \quad (9.5)$$

chceme-li získat optimální délku pulsu výhradně tvarováním fáze s nulovým útlumem amplitudy.

Stačí najít v tabulce pro Waveshaper všechny frekvence z intervalu $\langle f_n, f_{n+1} \rangle$ a pro ně dle vztahu (9.5) vypočítat požadovaný fázový posun a tento postup zopakovat pro všechny frekvence z dat exportovaných z FROG a celý frekvenční interval z tabulky pro Waveshaper. Vývojový diagram algoritmu pro převod tabulky dat měřených metodou FROG o délce M (libovolný předem neznámý počet řádků) na tabulku dat pro Waveshaper se známým rozsahem frekvencí je uveden na Obr. 9.3, kde M je počet řádků dat z měření FROG, f_N je N-tá frekvence z dat FROG, f_{N+1} je (N+1). frekvence z dat FROG, F_K je K-tá frekvence a F_{K+1} je (K+1). frekvence z tabulky Waveshaperu. Náleží-li frekvence F_K intervalu $\langle f_n, f_{n+1} \rangle$, pak požadované fázové zpoždění generované Waveshaperem se vypočte dle (9.5) pro frekvenci F_K a uloží hodnotu do N-tého řádku sloupce s fází v datech odesílaných do Waveshaperu. Pak algoritmus přejde na F_{K+1} a opakuje cyklus. Jestliže je F_k napravo od intervalu $\langle f_n, f_{n+1} \rangle$, pak je nutné postoupit k porovnávání F_N a intervalu $\langle f_{n+1}, f_{n+2} \rangle$.

Situace, kdy je F_N nalevo od intervalu $\langle f_n, f_{n+1} \rangle$ nastane pouze na počátku procesu, pokud je fáze metodou FROG měřená i pro frekvence nižší než je startovní frekvence Waveshaperu (zde konkrétně 281,231 THz). Pak je nutné přejít na frekvenci F_{K+1} a opakovat cyklus. Dojde-li algoritmus na konec dat generovaných z FROG dříve než na konec tabulky Waveshaperu, tedy je nesplněna podmínka $f_{n+1} \neq 0$ (na pozici f_{n+1} již neexistuje hodnota, avšak LabVIEW to vyhodnocuje jako $f_{n+1} = 0$), pak pro všechny frekvence F_{K+1} až do konce tabulky Waveshaperu je za velikosti fázového posunu uložena hodnota 0. Je-li dosažen konec tabulky Waveshaperu dříve, je nesplněna podmínka $F_n \neq 0$ (na pozici F_n již neexistuje hodnota, ale LabVIEW to vyhodnocuje jako $f_{n+1} = 0$), pak dochází k ukončení této části algoritmu.



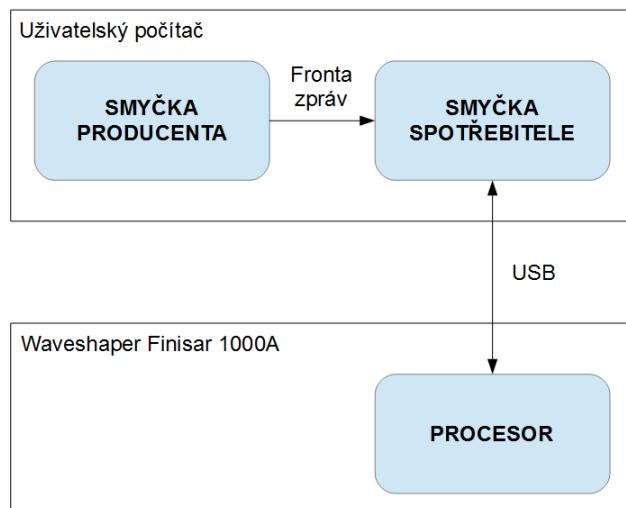
Obr. 9.3: Vývojový diagram algoritmu pro převod tabulky z FROG pro Waveshaper: M je počet řádků dat z měření FROG, f_N je N -tá frekvence z dat FROG, f_{N+1} je $(N+1)$. frekvence z dat FROG, F_K je K -tá frekvence a F_{K+1} je $(K+1)$. frekvence z tabulky Waveshaperu

9.1.3 Implementace programu pro minimalizaci délky pulsu

Program pro minimalizaci délky pulsu je vytvořen dle obecných pravidel a zvyků programování v LabVIEW uvedených v [62, 63, 64]. Program je založen na principu *Queued message handler*, tedy principu producenta a spotřebitele sestávajícího se z dvou paralelních while smyček [64]. Smyčka producenta detekuje každou událost způsobenou uživatelem v uživatelském rozhraní, k vykonané aktivitě přidělený příkaz se uloží do fronty zpráv (*queued messages*). Smyčka spotřebitele v každé iteraci zkontroluje frontu, pokud je ve frontě uložena zpráva, vyjme ji a vykoná adekvátní

příkazy. Funkcionalita vytvořeného programu byla naznačena v kapitole 8.2 na vývojovém diagramu na Obr. 8.4.

Program je umístěn na počítači uživatele či operátora laseru. K počítači je pomocí USB kabelu připojen Waveshaper Finisar 1000A, čímž je zajištěna vzájemná komunikace, jak je schématicky vyznačeno na komunikačním diagramu na Obr. 9.4. Spustitelná verze vyvinutého programu je součástí CD přílohy na konci této práce.



Obr. 9.4: Komunikační diagram realizovaného programu pro minimalizaci délky pulsu

9.1.4 Uživatelské rozhraní

Vzhled uživatelského rozhraní je vidět v Příloze A. Grafika neobsahuje žádné barvy z důvodu filtrování barev ochrannými brýle používanými v laserových laboratořích. Důležitý je kontrast, nikoliv barevnost.

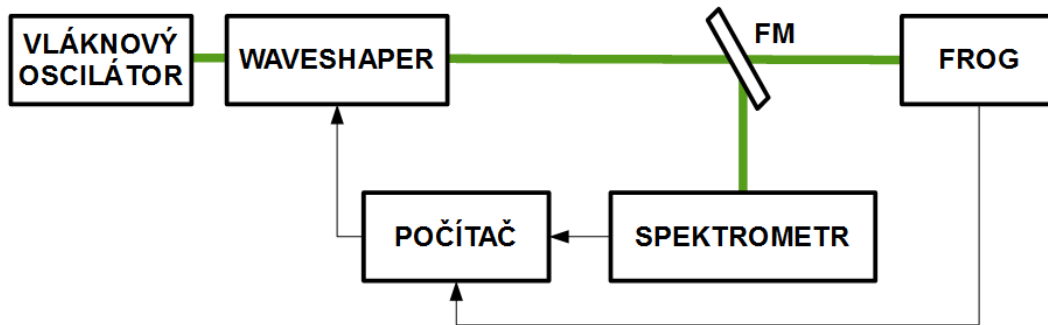
V levém sloupci jsou umístěna tlačítka a na vrchu je informační okénko o aktuálně aplikovaném filtru ve Waveshaperu – Block All (blokační filtr), Transmit All (filtr bez modulace), Flat Phase (minimalizační filtr). Tlačítko LOAD FROG FILE otevře prohlížeč souborů, aby byla nahrána data z FROGu. Tlačítko TRANSMIT ALL aplikuje filtr bez modulace, tlačítko BLOCK ALL aplikuje blokační filtr. Tlačítko FLAT PHASE se zobrazuje pouze za podmínky, že jsou nahrána data z FROGu,

a v případě jeho stisknutí se aplikuje minimalizační filtr. Tlačítko ITERATE se zobrazuje pouze v případě, že jsou nahrána data z FROGu pro již jednou modulovaný puls. Zmáčknutím tlačítka ITERATE dojde k aplikaci upraveného minimalizačního filtru na základě nově nahraných dat z FROGu.. Tlačítko STOP FILTER okamžitě aplikuje blokační filtr nezávisle na tom, jaký filtr byl do Waveshaperu naposledy nahraný. Tlačítko EXIT PROGRAM řádně ukončí veškerou komunikaci s Waveshaperem a ukončí program.

9.2 Testování programu pro minimalizaci délky pulsu

K testování funkčnosti navrhovaného programu pro minimalizaci laserového pulsu byl použit vláknový oscilátor ANDi Yb:sklo s opakovací frekvencí 60 MHz jako zdroj laserového záření se střední vlnovou délkou 1030 nm a šířkou spektra na polovině výšky maxima zhruba 20 nm, spektrum laserového oscilátoru je zobrazeno na Obr. 7.1. Výstupní výkon byl 24,46 mW. K modulaci laserového záření byl využit prostorový modulátor světla Waveshaper Finisar 1000A, jehož frekvenční rozlišení je 1 GHz (0,035 nm). Měření spektra bylo realizováno spektrometrem Narran BR8 (s rozlišením 0,03 nm) umístěným za modulátorem světla, jak je naznačeno na schématu testovací sestavy na Obr. 9.5. Modulovaný puls byl detekován přístrojem Ape pulseCheck FROG s časovým rozlišením na 0,05 fs měřeném rozsahu 50 ps schopným fungovat také v režimu autokorelátoru.

Nejprve byla ověřena funkcionálnita blokačního filtru a filtru bez modulace. Poté byl testován minimalizační filtr na spektru modulovaném (externím) spektrálním filtrem a na plném rozsahu spektra oscilátoru.



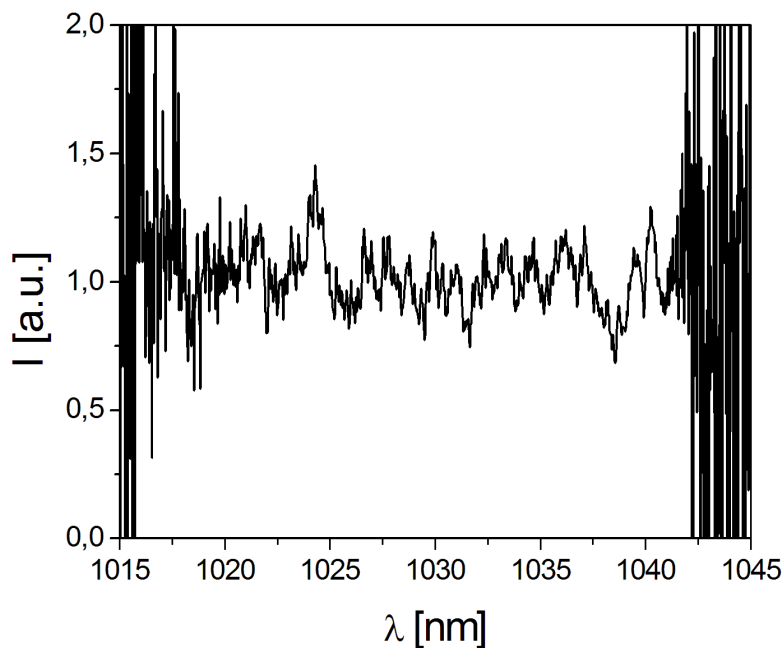
Obr. 9.5: Schéma testovací optické soustavy: FM - sklopné zrcátko

9.2.1 Blokační filtr

Do Waveshaperu byl zaslán blokační filtr. Tento filtr má utlumit všechny vlnové délky, tedy nedovolit pulsu, aby skrze Waveshaper prošel. Testovací soustava odpovídala schématu na Obr. 9.5, spektrum detekované spektrometrem před aplikací filtru odpovídalo spektru na Obr. 7.1. Jelikož tento filtr nevyžaduje modulaci fáze, stačí zjistit, že všechny vlnové délky byly utlumeny, což bylo ověřeno.

9.2.2 Filtr bez modulace

Do Waveshaperu byl zaslán filtr bez modulace. Testovací soustava odpovídala schématu na Obr. 9.5, spektrum detekované spektrometrem před aplikací filtru odpovídalo spektru na Obr. 7.1. Jelikož tento filtr nevyžaduje modulaci fáze, stačí ověření, že žádná vlnová délka nebyla utlumena. Poměr mezi vlastním spektrem vláknového oscilátoru a spektrem detekovaným po aplikaci filtru bez modulace je zobrazeno na Obr. 9.6.

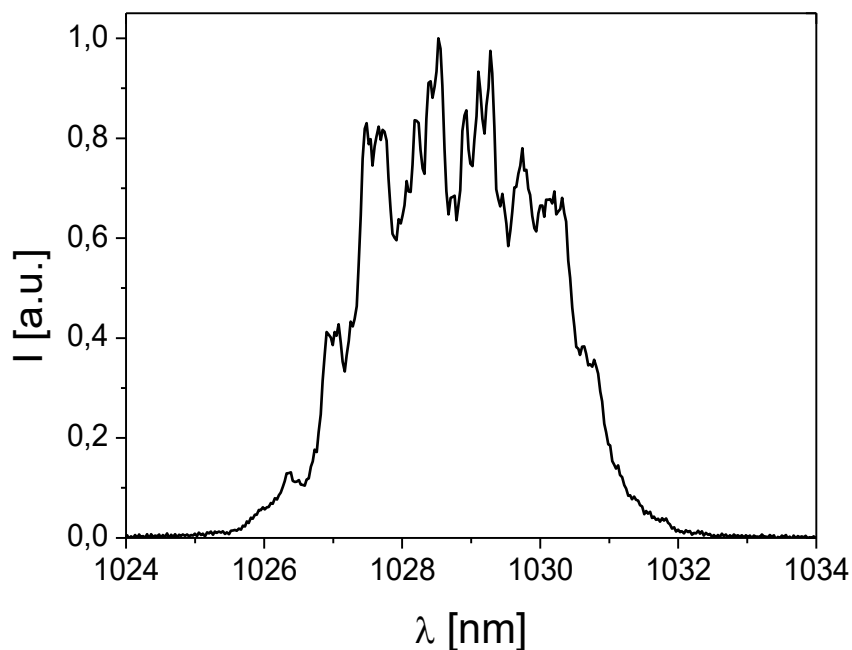


Obr. 9.6: Poměr mezi spektrem detekovaným před aplikací a spektrem detekovaným po aplikaci filtru bez modulace

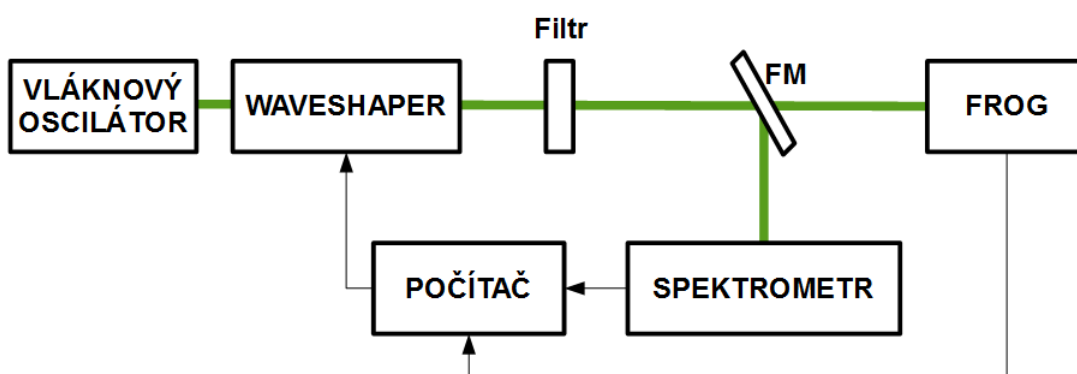
9.2.3 Minimalizační filtr

Navržený a naprogramovaný algoritmus pro minimalizaci délky pulsu byl otestován nejprve na spektru modulovaném pásmovým Gaussovským optickým filtrem se středem na vlnové délce 1029 nm, takto modulované spektrum s šířkou 3 nm (FWHM) je vykresleno na Obr. 9.7. Průběh spektra a jeho šířka jsou velmi podobné spektru pulsu systému Perla C uvedeném na Obr. 4.2. Schéma měření je zobrazeno na Obr. 9.8.

Před aplikací minimalizačního filtru byl FROGem analyzován puls. Naměřené, respektive metodou FROG vypočtené spektrum a spektrální fáze a časový průběh pulsu s modulací spektra Gaussovským filtrem jsou uvedena na Obr. 9.9 a Obr. 9.10. Spektrální fáze se na pološířce spektra pohybovala od 0 rad do -1,31 rad, délka pulsu (FWHM) byla 1,08 ps.

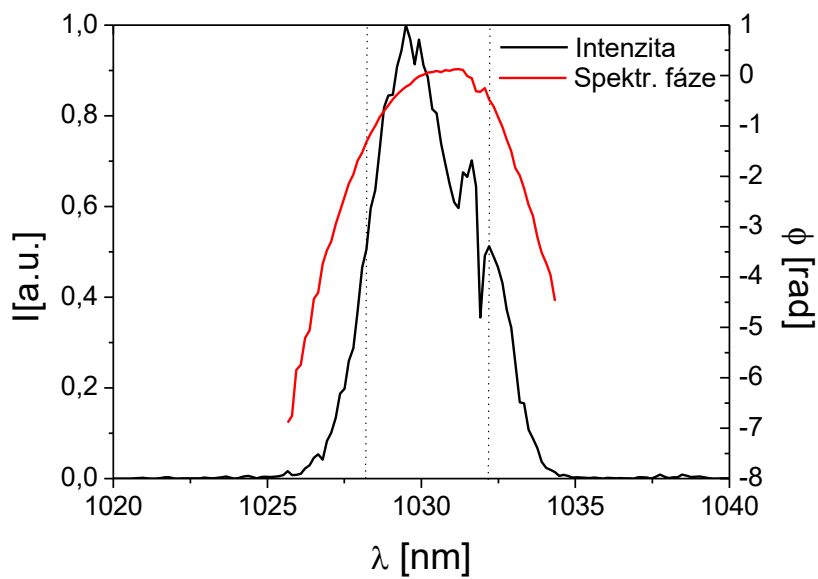


Obr. 9.7: Spektrum modulované pásmovým Gaussovským optickým filtrem

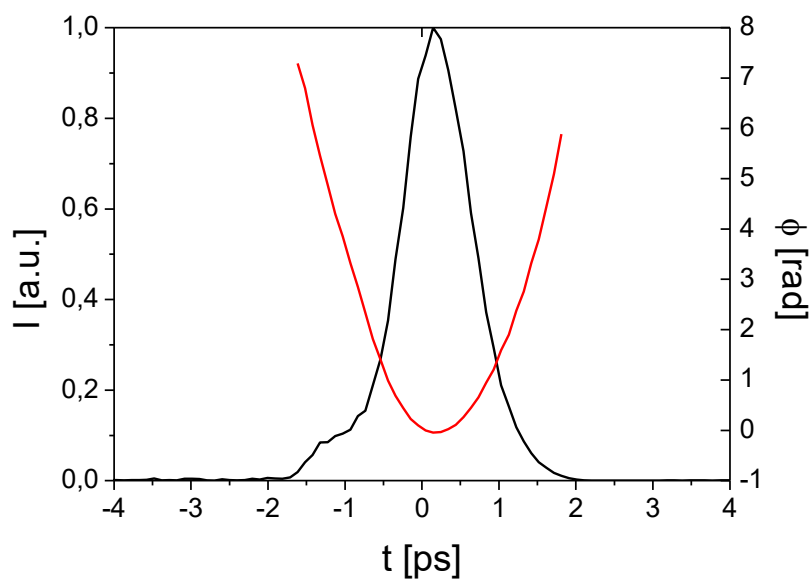


Obr. 9.8: Schéma testovací optické soustavy se spektrálním filtrem: FM - sklopné zrcátko

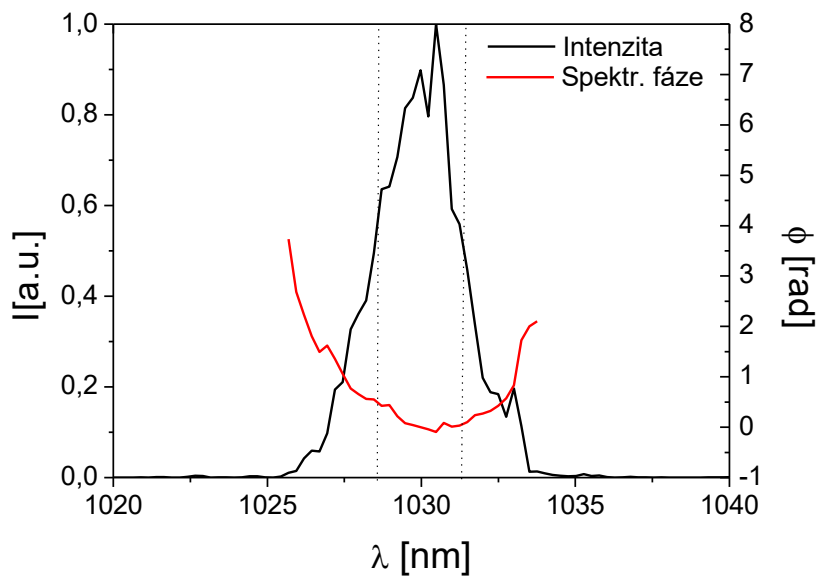
Metodou FROG vypočtené spektrum a spektrální fáze a časový průběh pulsu s modulací spektra Gaussovským filtrem po aplikaci minimalizačního filtru jsou zobrazena na Obr. 9.11 a Obr. 9.12. Relativní spektrální fáze se po aplikaci filtru na pološířce spektra pohybovala od 0 rad do 0,43 rad, délka pulsu (FWHM) byla 668,2 fs. Po aplikaci minimalizačního filtru bylo zároveň pomocí spektrometru otestováno, že minimalizační filtr moduluje pouze relativní spektrální fázi, nikoliv amplitudu. Spektrometrem bylo ověřeno, že minimalizační filtr nemá vliv na útlum spektra.



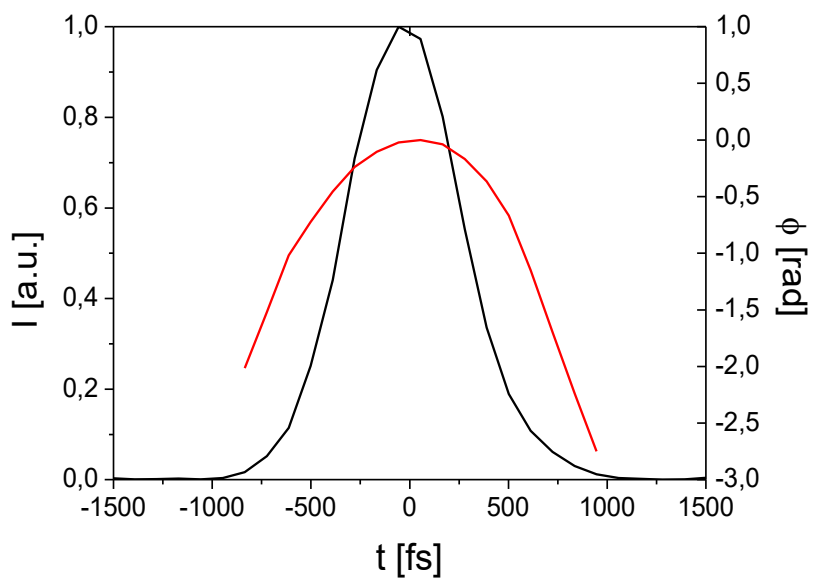
Obr. 9.9: Spektrum a spektrální fáze pulsu modulovaného Gaussovským filtrem vypočtená metodou FROG před aplikací minimalizačního filtru



Obr. 9.10: Časový průběh intenzity a fáze pulsu modulovaného Gaussovským filtrem vypočtený metodou FROG před aplikací minimalizačního filtru



Obr. 9.11: Spektrum a spektrální fáze pulsu modulovaného Gaussovským filtrem vypočtená metodou FROG po první aplikaci minimalizačního filtru

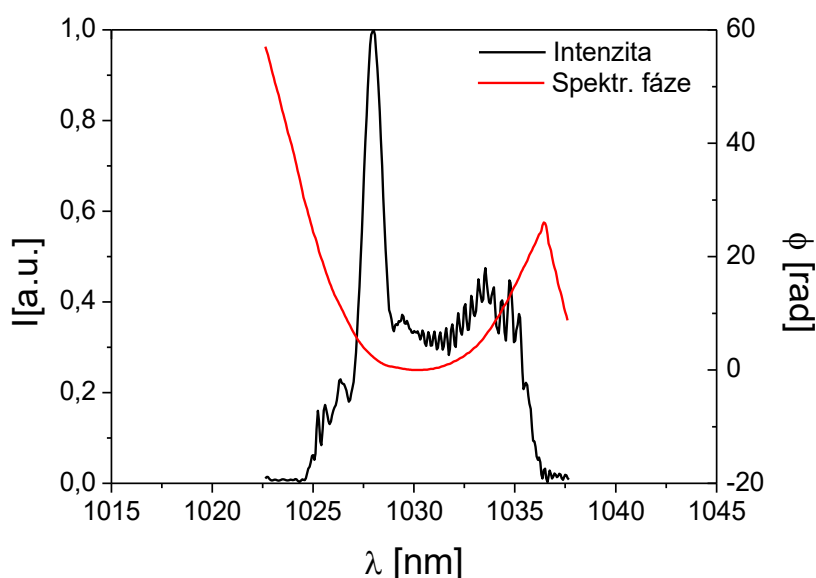


Obr. 9.12: Časový průběh intenzity a fáze pulsu modulovaného Gaussovským filtrem vypočtený metodou FROG po první aplikaci minimalizačního filtru

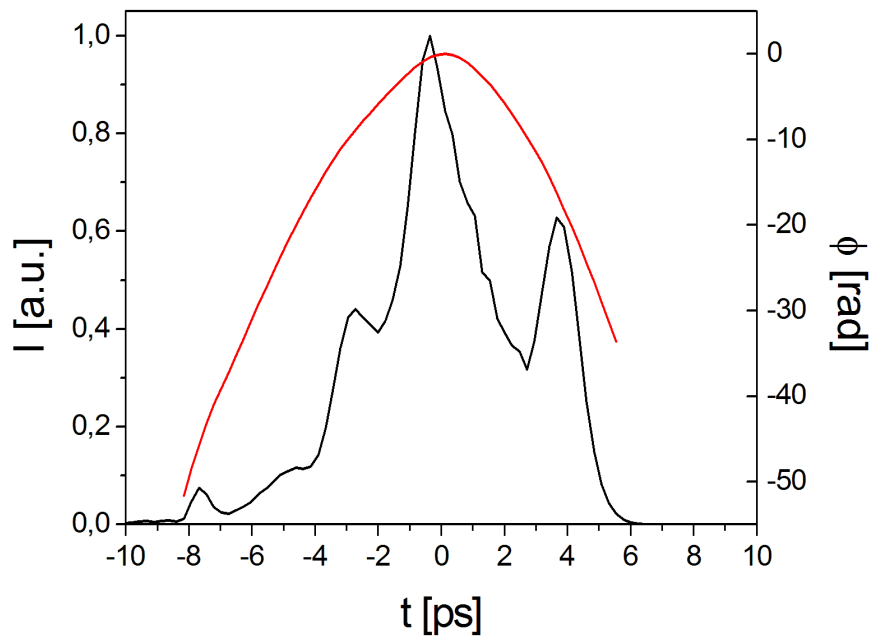
Dále byla testována funkčnost minimalizačního filtru na plném nedomulovaném spektru uvedeném na grafu na Obr. 7.1. Testovací soustava odpovídala schématu na Obr. 9.5. Měření pomocí FROGu bylo velmi závislé na měřeném intervalu vlnových délek a počtu kroků na daném intervalu, jak již bylo zmíněno v kapitole 7. Metodou

FROG vypočtené spektrum a spektrální fáze a časový průběh pulsu před aplikací minimalizačního filtru s rozlišením 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření jsou uvedeny na Obr. 7.2 a Obr. 7.3, s rozlišením 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření jsou vykresleny na Obr. 7.4 a Obr. 7.5.

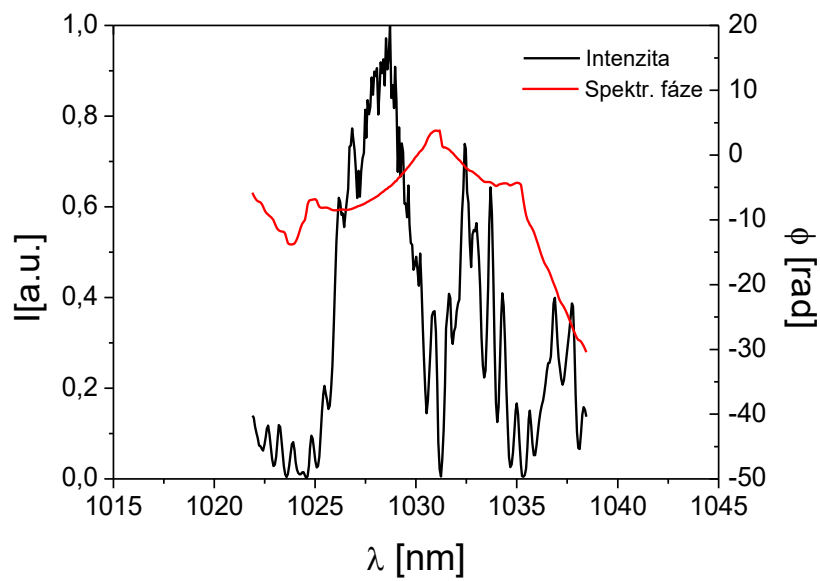
Metodou FROG vypočtené spektrum, spektrální fáze a časový průběh pulsu po aplikaci minimalizačního filtru s rozlišením 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření jsou zobrazeny na Obr. 9.13 a Obr. 9.14, s rozlišením 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření jsou vykresleny na Obr. 9.15 a Obr. 9.16. Spektrální fáze se na intervalu vlnových délek 1025-1035 nm pohybovala dle Obr. 9.13 od 0 rad do zhruba 15 rad, dle Obr. 9.15 od 0 rad do zhruba -8,5 rad. Délka pulsu (FWHM) byla dle Obr. 9.14 2,6 ps, dle Obr. 9.16 přibližně 3,22 ps. Po aplikaci minimalizačního filtru bylo zároveň pomocí spektrometru otestováno, že minimalizační filtr moduluje pouze spektrální fázi, nikoliv amplitudu. Spektrometrem bylo ověřeno, že minimalizační filtr nemá vliv na útlum spektra. Další iterace aplikace minimalizačního filtru již neměla vliv na spektrální fázi ani délku pulsu.



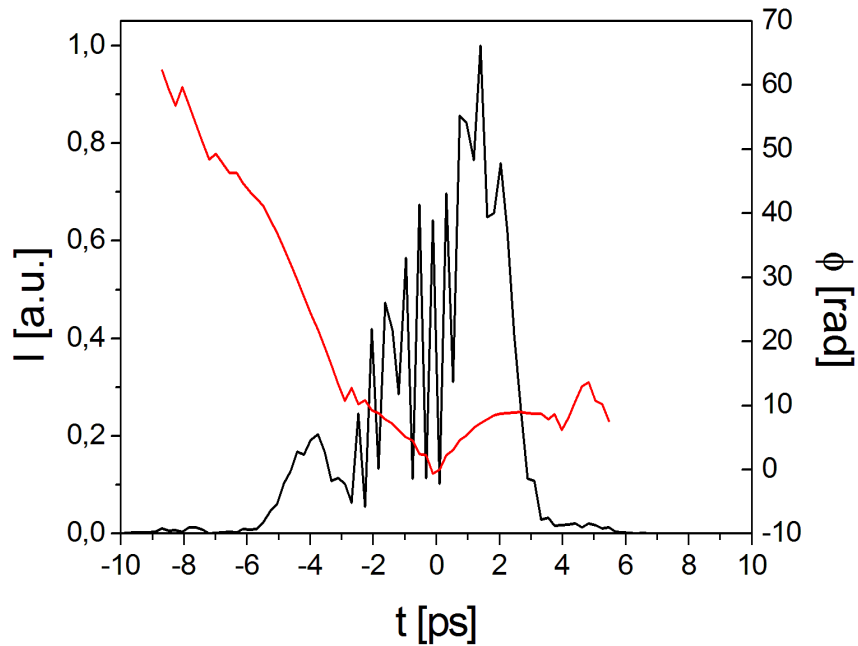
Obr. 9.13: Spektrum a spektrální fáze pulsu vypočtená metodou FROG po aplikaci minimalizačního filtru (rozlišení 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření)



Obr. 9.14: Časový průběh intenzity a fáze pulsu vypočtený metodou FROG po aplikaci minimalizačního filtru (rozlišení 150 kroků na intervalu 1010-1050 nm během měření)



Obr. 9.15: Spektrum a spektrální fáze pulsu vypočtená metodou FROG po aplikaci minimalizačního filtru (rozlišení 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření)

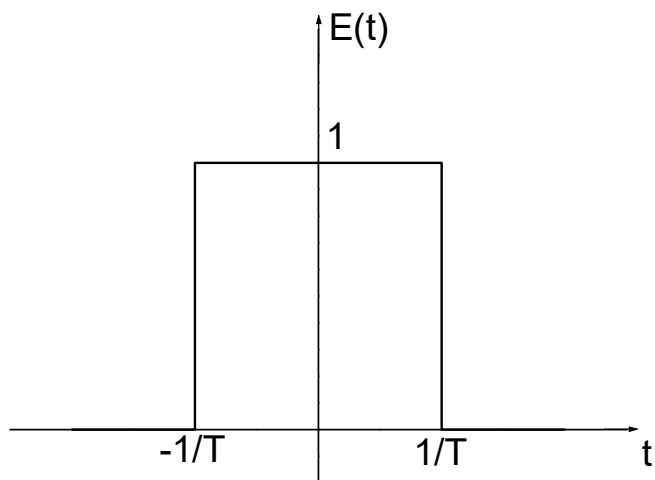


Obr. 9.16: Časový průběh intenzity a fáze pulsu vypočtený metodou FROG po aplikaci minimalizačního filtru (rozlišení 200 kroků na intervalu 1015-1045 nm během měření)

9.3 Modifikace algoritmu pro zahrnutí tvarování do předdefinovaných tvarů

Jak bylo zmíněno v kapitole 8.3, z požadovaného tvaru pulsu a jeho délky je nutné pomocí Fourierovy transformace vypočítat potřebné spektrum a relativní spektrální fázi a porovnat je s průběhem spektra a relativní spektrální fáze z FROG. Avšak je potřeba vzít v úvahu, že Fourierova transformace operuje s intenzitou pole a Waveshaper pracuje s intenzitou záření, přepočtem mezi intenzitou pole a intenzitou záření se ztrácí cenná informace [20, 60]. Příkladem buď obdélníkový puls o délce T na Obr. 9.17, jehož průběh v čase lze zapsat funkcí

$$E(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) . \quad (9.6)$$

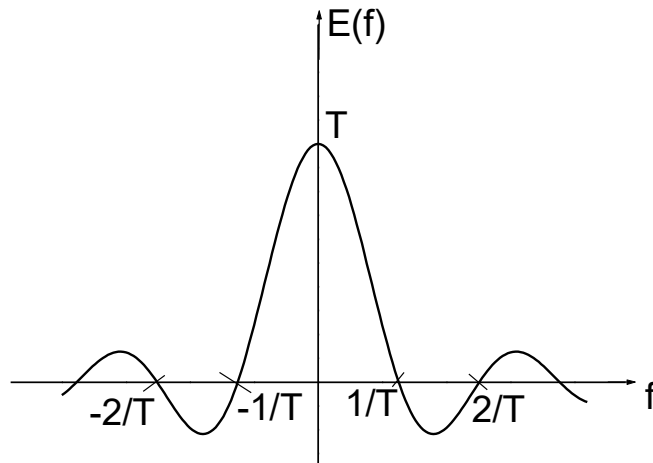


Obr. 9.17: Náčrt časového průběhu obdélníkového pulsu o délce T

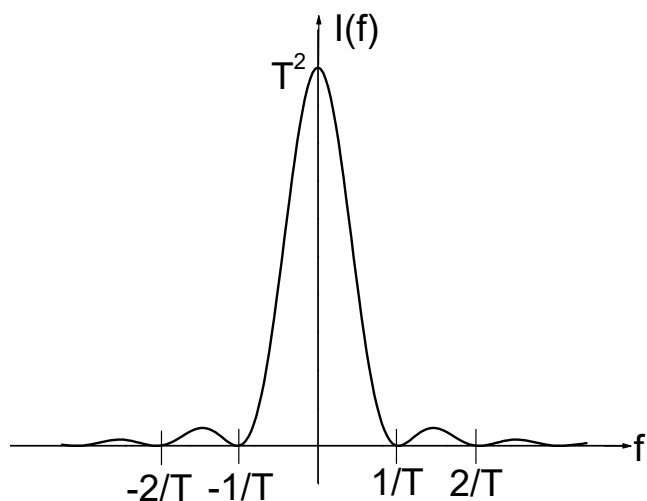
Fourierovu transformaci takového obdélníkového pulsu do frekvenční domény je možné vyjádřit vztahem

$$E(f) = T \operatorname{sinc}(\pi T f) . \quad (9.7)$$

Průběh funkce $E(f)$ je vykreslen na Obr. 9.18. Průběh intenzity $I(f)$ pole $E(f)$ je uvedeno na Obr. 9.19. Z Obr. 9.18 a Obr. 9.19 je zřejmé, že při výpočtu intenzity záření z intenzity pole se ztrácí informace o znaménku okamžité výchylky intenzity pole $E(f)$. [65, 66]

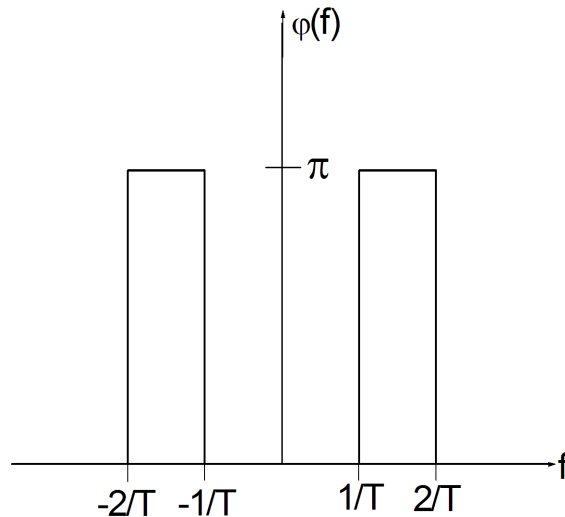


Obr. 9.18: Fourierova transformace obdélníkového pulsu o délce trvání T do frekvenční domény



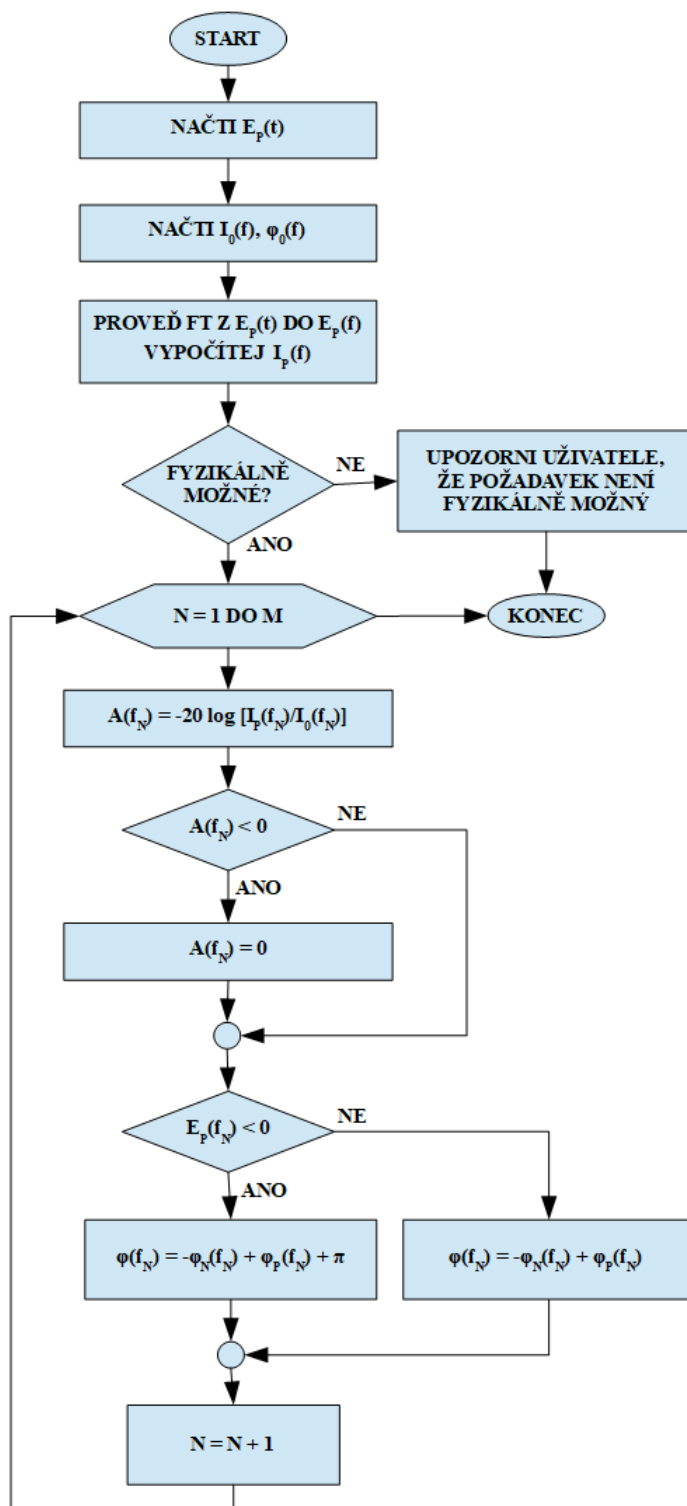
Obr. 9.19: Intenzita pole vykresleného na Obr. 9.18

Bez zohlednění ztráty informace o znaménku okamžité amplitudy by nebylo možné zajistit požadovaný tvar pulsu, to platí obecně pro všechny případné předdefinované tvary pulsů, nikoliv jen pro obdélníkový průběh. Avšak existuje způsob, jak ztracenou informaci přenést využitím modulace relativní spektrální fáze. Stačí namodulovat relativní spektrální fázi tak, aby na intervalu frekvencí, kde je okamžitá výchylka pole $E(f)$ záporná, byla posunuta o π rad [67]. Schématické zobrazení takovýmto způsobem modulované spektrální fáze je uvedeno na Obr. 9.20.



Obr. 9.20: Spektrální fáze odpovídající intenzitě na Obr. 9.19

Část algoritmu zajišťujícího modulaci pulsu do uživatelem vybraného tvaru z předdefinovaného výběru nejprve načte uživatelem zadaný průběh $E_p(t)$, jak je uvedeno na vývojovém diagramu na Obr. 9.21. Dále jsou načteny průběhy $E_p(f)$ (respektive $I_p(f)$) a relativní spektrální fáze $\varphi_o(f)$ měřené metodou FROG a je provedena Fourierova transformace uživatelem zadaného časového průběhu do spektrální domény, získá se tak požadované spektrum $E_p(f)$ a relativní spektrální fáze $\varphi_p(f)$. Před výpočtem filtru pro Waveshaper je nutné ověřit, zda požadovaný časové průběh je možné realizovat, zda je vlastní spektrum pulsu $I_p(f)$ postačující. Je-li tato podmínka splněna, útlum $A(f)$ je vypočítán dle vztahu (9.1). V případě, že vypočítaný útlum je záporný, je hodnota útlumu opravena na nulu (neboť Waveshaperem nelze zesilovat). Výsledný filtr spektrální fáze $\varphi(f)$ je závislý na požadované fázi $\varphi_p(f)$, naměřené relativní fázi $\varphi_o(f)$ a případnému posunu o π rad v případě, že pro danou frekvenci f je $E_p(f) < 0$.



Obr. 9.21: Vývojový diagram algoritmu pro tvarování pulsu do předdefinovaných tvarů

10 Diskuze

V této práci byl analyzován puls vláknového oscilátoru ANDi Yb:sklo, neboť práce se systémem Perla C nebyla možná vzhledem k vytížení tohoto systému. Střední vlnová délka generovaného spektra je 1030 nm a šířka (FWHM) zhruba 20 nm, průběh spektra je vykreslen na Obr. 7.1, průměrný výkon byl 24,46 mW. Měření metodou FROG poskytuje informace o spektru, relativní spektrální fázi i časovém průběhu, avšak získání těchto informací zahrnuje iterativní výpočet s využitím Fourierovy transformace a inverzní Fourierovy transformace. Bylo zjištěno, že výsledky měření metodou FROG jsou vysoce závislé na vstupních výpočetních parametrech zadávaných uživatelem, pokud spektrum vlnových délek není symetrické. V závislosti na měřeném intervalu vlnových délek a počtu kroků na daném intervalu vlnových délek se výsledky průběhu intenzity v čase, fáze v čase, spektra i spektrální fáze, jak je zřejmé z grafů na Obr. 7.2 až Obr. 7.5. Měření na intervalu 1010-1050 nm s rozlišením 150 kroků byla zjištěna délka pulsu 2 ps, měření na intervalu 1015-1045 nm s rozlišením 200 kroků byla zjištěna délka 9 ps.

Dále byla ověřena funkčnost autorem této práce navrženého algoritmu pro minimalizaci délky pulsu. Algoritmus byl nejprve vyzkoušen na spektru vykresleném na Obr. 9.7 o šířce 3 nm, které je velmi podobné spektru generovanému reálným systémem Perla C, viz Obr. 4.2. Spektrum testovacího pulsu nemá Gaussovský profil, není hladké a je lehce nesymetrické. Délka pulsu před použitím minimalizačního filtru byla dle FROGu 1,08 ps. Po aplikaci první iterace minimalizačního filtru se délka pulsu zkrátila na 668,2 fs. Další iterace již na délku pulsu neměla vliv. Transformačně limitovaný puls se shodnou šířkou spektra a Gaussovským průběhem by měl délku dle (4.4) a Tab. 4.1 zhruba 530,1 fs. Vzhledem k tomu, že spektrum testovacího pulsu nemělo Gaussovský profil, lze výsledek 668,2 fs považovat za úspěšné ověření funkčnosti navrženého minimalizačního algoritmu.

Algoritmus byl také testován na pulsech s velmi nesymetrickým spektrem vláknového oscilátoru ANDi Yb:sklo zobrazeného na Obr. 7.1. Stejně jako v případě analýzy nemodulovaného pulsu oscilátoru bylo měření délky pulsu (včetně spektra a relativní spektrální fáze) zatíženo velkou nepřesností plynoucí ze závislosti výpočtů

metody FROG na uživatelem nastavovaných parametrech, což je zřejmé z Obr. 9.13 až Obr. 9.16. Po první iteraci minimalizačního filtru byla měření na intervalu 1010-1050 nm s rozlišením 150 kroků byla zjištěna délka pulsu 2,6 ps, měření na intervalu 1015-1045 nm s rozlišením 200 kroků byla zjištěna délka 3,22 ps.

Závislost přesnosti iteračních výpočtů zahrnutých v měřicí metodě FROG na vstupních parametrech je ve shodě s literaturou. Přesnost výpočtů se odvíjí od přesnosti uživatelem zadané střední vlnové délky, měřeného časového okna, měřeného intervalu vlnových délek i počtu kroků na daném intervalu vlnových délek. Z literatury lze vyčíst, že nepřesnost zadání střední vlnové délky se do výsledné odchylky vypočítané šířky spektra odráží více než dvojnásobně [18]. Kromě závislosti výpočtů na vstupních parametrech je podstatná také symetrie či asymetrie v čase prvotního odhadu tvaru pulsu, který je zakotvený na počátku iterativního výpočtu a který je implementovaný v kodu naprogramovaném výrobcem přístroje a uživatel na tento odhad nemá žádný vliv, určuje, zda výpočet bude konvergovat k symetrickému nebo nesymetrickému výsledku [18]. Ve většině implementovaných verzích výpočtů pro metodu FROG mívá počáteční odhad Gaussovský profil, pokud tedy reálný časový průběh tuto charakteristiku nemá, bude těžko výsledek metody FROG totožný s reálným časovým průběhem [18].

Hypotéza kompenzování spektrální fáze pomocí fázového spektrálního filtru a bez modulace spektra, jestliže puls je analyzován metodou FROG, byla potvrzena pro spektrum, které nevykazuje podstatnější asymetrii. V případě asymetrického průběhu intenzity v závislosti na vlnové délce (nebo v závislosti na čase) by bylo vhodné spektrum modulovat a docílit spektra symetrického (například Gaussovského průběhu). Modulací spektra se tato práce zabývá pouze z pohledu teoretického, čímž je otevřena možnost pokračování v tomto tématu a navázání na tuto diplomovou práci.

11 Závěr

V této práci je navržen monitorovací systém tenkodiskového pikosekundového laseru Perla C. Laserový systém umístěný v Dolních Břežanech je popsán v kapitole 3. Provozními parametry zásadními pro jeho bezpečný provoz jsou: rozsah provozních teplot, výkon vstupující do regenerativního zesilovače a pozice svazku vůči optické ose. Návrh bezpečnostního systému zahrnuje sledování těchto třech důležitých parametrů, schéma možného umístění detektorů je zobrazeno na Obr. 8.1. Vývojový diagram navrhovaného programu je uveden na Obr. 8.2.

Dále byl navržen, naprogramován a testován algoritmus umožňující minimalizaci délky pulsu pomocí modulace spektrální fáze. Laser Perla C generuje ultrakrátké pulsy o délce 2 ps, takto krátké pulsy vyžadují speciální techniky měření jejich časových průběhů, jak je nastíněno v kapitole 6. K měření pulsů byl využit přístroj Ape pulseCheck FROG, modulování spektrální fáze bylo zajištěno programovatelným prostorovým modulátorem světla Waveshaper Finisar 1000A. Návrh algoritmu pro optimalizaci délky pulsu je nastíněn na Obr. 8.4. Kod naprogramovaný autorem této práce je ve formě spustitelného .exe souboru součástí přílohy na CD. Analýza pulsu a testování funkčnosti minimalizačního filtru byly provedeny na vláknovém laserovém oscilátoru ANDi Yb:sklo s opakovací frekvencí 60 MHz generujícím záření o šířce 20 nm na centrální vlnové délce 1030 nm, spektrum laserového oscilátoru je uvedeno na Obr. 7.1. Laserový systém Perla C nebylo možné využít z důvodu dlouhodobé obsazenosti, avšak do budoucna je plánováno testování a aplikace vyvinutého algoritmu na reálném systému Perla C. Algoritmus byl nejprve otestován na pulsech, které měly optickým filtrem upravené spektrum, viz Obr. 9.7, které více odpovídalo průběhu spektra systému Perla C. Z původní délky pulsu 1,08 ps byl již po první iteraci puls zkrácen v čase na 668,2 fs. Další iteraci již neměla žádný vliv na délku pulsu. V případě Gaussovského průběhu spektra se stejnou šířkou by transformačně omezený puls měl délku zhruba 530,1 fs. Výsledek lze považovat za úspěšné ověření funkčnosti navrženého minimalizačního algoritmu. Analýza pulsu generovaného laserovým oscilátorem bez úpravy spektra spektrálním filtrem a testování minimalizačního

algoritmu na tomto pulsu bylo velmi omezeno nepřesností metody FROG způsobené velmi asymetrickým průběhem spektra (potažmo i intenzity v čase), viz Obr. 7.1. Výsledky měření charakteristik pulsu metodou FROG bez aplikace minimalizačního filtru i po aplikaci minimalizačního filtru byly silně závislé na tom, na jakém intervalu vlnových délek a s jakým krokem bylo měření provedeno, což je zřejmé z Obr. 7.2 až Obr. 7.5 a Obr. 9.13 až Obr. 9.16 a je v souladu s dostupnou literaturou [18]. Měřením na intervalu 1010-1050 nm s rozlišením 150 kroků byla zjištěna délka pulsu 2 ps bez aplikace minimalizačního filtru, měřením na intervalu 1015-1045 nm s rozlišením 200 kroků byla zjištěna délka 9 ps. Po první iteraci minimalizačního filtru byla měřením na intervalu 1010-1050 nm s rozlišením 150 kroků byla zjištěna délka pulsu 2,6 ps, měřením na intervalu 1015-1045 nm s rozlišením 200 kroků byla zjištěna délka 3,22 ps.

Z takových výsledků je zřejmé, že lze čistě modulování spektrální fáze dosáhnout téměř transformačně limitovaného pulsu, avšak pouze s podmínkou, že jeho spektrum bude spíše symetrické. V případě asymetrického průběhu intenzity by bylo vhodné spektrum modulovat, pak ale hypotéza o pouhé modulaci spektrální fáze neplatí.

Poslední část práce se zabývala navržením algoritmu umožňujícího tvarování pulsu v čase do předdefinovaných tvarů. Vývojový diagram navrhovaného výpočtu spektrálního a fázového filtru je uveden na Obr. 9.21.

V této práci byly splněny všechny cíle vymezené zadáním práce. Kompenzování nesfázovaných komponent spektrální fáze pomocí fázového spektrálního filtru s využitím dat získaných metodou FROG tak, aby bylo dosaženo nejkrajšího možného pulsu, je možné pouze v případě, je-li spektrum vlnových délek (a potažmo i časový průběh) spíše symetrické. V opačném případě není měřicí metoda FROG spolehlivou metodou, jak získat zpětnou vazbu pro programovatelný prostorový modulátor světla a bylo by vhodné modulaci spektra vlnových délek odstranit asymetrii i za cenu částečné ztráty energie v pulsech. Neboť se modulací spektra tato práce zabývá pouze z teoretického pohledu, je možné na tuto diplomovou práci navázat realizací rozšíření již hotového funkčního naprogramovaného algoritmu pro minimalizaci délky pulsu o modulaci spektra do požadovaných tvarů. Jelikož tvarování pulsů v čase se využívá například při pulsní laserové depozici, v nelineární mikroskopii či ve vláknové optice,

přispívá tato práce poznatky o modulování laserových pulsů v čase i do oboru biomedicíny. V dostupné literatuře není doposud zmínka o tvarování pulsů generovaných tenkodiskovým laserovým systémem, tato diplomová práce je tedy první, která takové téma otvírá.

Seznam použité literatury

- [1]: GARRELIE, Florence, et al. Control of femtosecond pulsed laser ablation and deposition by temporal pulse shaping. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 42-51.
- [2]: NAKAZAWA, Masataka; YOSHIDA, Masato; HIROOKA, Toshihiko. The nyquist laser. *Optica*. 2014, 1.1: 15-22.
- [3]: DIELS, Jean-Claude; RUDOLPH, Wolfgang. Ultrashort laser pulse phenomena. *Elsevier*, 2006, 443 - 454.
- [4]: WEINER, Andrew M. Ultrafast optical pulse shaping: A tutorial review. *Optics Communications*, 2011, 284.15: 3669-3692.
- [5]: KOECHNER, W. *Solid-State Laser Engineering*. Springer Verlag, ed. 6., New York, USA, 2006.
- [6]: ZAYTSEV, Alexey, et al. Spectrally shaped chirped pulse amplification of an all-normal dispersion Yb-doped fibre laser. *Laser Physics Letters*, 2018, 15.8: 085107.
- [7]: FÜLÖP, József A., et al. Shaping of picosecond pulses for pumping optical parametric amplification. *Applied Physics B*, 2007, 87.1: 79-84.
- [8]: GUILLERMIN, Matthieu, et al. Optical emission and nanoparticle generation in Al plasmas using ultrashort laser pulses temporally optimized by real-time spectroscopic feedback. *Physical Review B*, 82.3: 035430.
- [9]: ZHANG, Betty Meng, et al. Demonstration of arbitrary temporal shaping of picosecond pulses in a radially polarized Yb-fiber MOPA with > 10 W average power. *Optics express*, 2017, 25.13: 15402-15413.
- [10]: TAKASAGO, Kazuya, et al. Generation of amplified square shaped picosecond pulses with phase-only filters for an efficient electron generation in an RF-GUN. In: *LEOS 2000. 2000 IEEE Annual Meeting Conference Proceedings. 13th Annual Meeting. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 2000 Annual Meeting (Cat. No. 00CH37080)*. IEEE, 2000. p. 300-301.

- [11]: NOVÁK, Ondřej, et al. Status of the high average power diode-pumped solid state laser development at HiLASE. *Applied Sciences*, 2015, 5.4: 637-665.
- [12]: ENDO, Akira. *High-brightness solid-state lasers for compact short-wavelength sources*. In: High Energy and Short Pulse Lasers. Intech. 2016.
- [13]: DIVOKY, M., et al. Overview of the HiLASE project: high average power pulsed DPSSL systems for research and industry. *High Power Laser Science and Engineering*. 2014, 2.
- [14]: VYVLEČKA, Michal. *Vysokovýkonný zdroj pikosekundových optických pulzů ve střední infračervené oblasti*. Praha, 2017. Diplomová práce. Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, Katedra chemické fyziky a optiky. Vedoucí diplomové práce Ondřej Novák.
- [15]: STRICKLAND, D.; MOROU, G. Chirped pulse amplification. *Opt. Comm*, 1985, 56: 219.
- [16]: TOMIZAWA, H., et al. Development of a yearlong maintenance-free terawatt Ti:Sapphire laser system with a 3D UV-pulse shaping system for THG. *Quantum Electronics*, 2007, 37.8: 697.
- [17]: TOHYAMA, Masaki; TAKAHASHI, Ryo; KAMIYA, Takeshi. A scheme of picosecond pulse shaping using gain saturation characteristics of semiconductor laser amplifiers. *IEEE journal of quantum electronics*, 1991, 27.9: 2201-2210.
- [18]: DELONG, K. W., et al. Frequency-resolved optical gating with the use of second-harmonic generation. *JOSA B*, 1994, 11.11: 2206-2215.
- [19]: VYHLÍDKA, Štěpán. *Modulace časové disperze femtosekundových laserových pulzů*. Praha, 2013. Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, Katedra chemické fyziky a optiky. Vedoucí diplomové práce Petr Straka.
- [20]: TREBINO, Rick. *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses*. Springer Science & Business Media, 2000.
- [21]: AKAHANE, Y.; OGAWA, K.; YAMAKAWA, K. Development of high-energy, phase-controlled picosecond Yb:YLF CPA laser for adaptive pulse shaping on few-cycle OPCPA. In: *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*. Optical Society of America, 2013. p. ThA3_5.

- [22]: MITROFANOV, Aleksandr V., et al. Waveform shaping of stretched-pulse fiber laser output with a hollow photonic-crystal fiber. *Applied Physics Letters*, 2013, 102.17: 171113.
- [23]: BRADLEY, D. J., NEW, GEOFFREY HC. Ultrashort pulse measurements. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62.3: 313-345.
- [24]: CHRISTOV, I. P., et al. Attosecond time-scale intra-atomic phase matching of high harmonic generation. *Physical Review Letters*, 2001, 86.24: 5458.
- [25]: BARTY, C. P. J., et al. Generation of 18-fs, multiterawatt pulses by regenerative pulse shaping and chirped-pulse amplification. *Optics letters*, 1996, 21.9: 668-670.
- [26]: VERLUISE, Frederic, et al. Amplitude and phase control of ultrashort pulses by use of an acousto-optic programmable dispersive filter: pulse compression and shaping. *Optics letters*, 2000, 25.8: 575-577.
- [27]: NGUYEN, Dat; PIRACHA, Mohammad Umar; DELFYETT, Peter J. Transform-limited pulses for chirped-pulse amplification systems utilizing an active feedback pulse shaping technique enabling five time increase in peak power. *Optics letters*, 2012, 37.23: 4913-4915.
- [28]: SCHIMPF, Damian N.; LIMPET, Jens; TÜNNERMANN, Andreas. Controlling the influence of SPM in fiber-based chirped-pulse amplification systems by using an actively shaped parabolic spectrum. *Optics express*, 2007, 15.25: 16945-16953.
- [29]: MECSEKI, Katalin, et al. Flat-top picosecond pulses generated by chirped spectral modulation from a Nd: YLF regenerative amplifier for pumping few-cycle optical parametric amplifiers. *Applied optics*, 2014, 53.10: 2229-2235.
- [30]: LI, Ming, et al. Spectrum shaping of an all Nd: glass CPA 1–10 ps kilojoule petawatt-class laser system. *JOSA B*, 2010, 27.8: 1534-1542.
- [31]: DUGAN, M. A.; TULL, J. X.; WARREN, W. S. High-resolution acousto-optic shaping of unamplified and amplified femtosecond laser pulses. *JOSA B*, 1997, 14.9: 2348-2358.

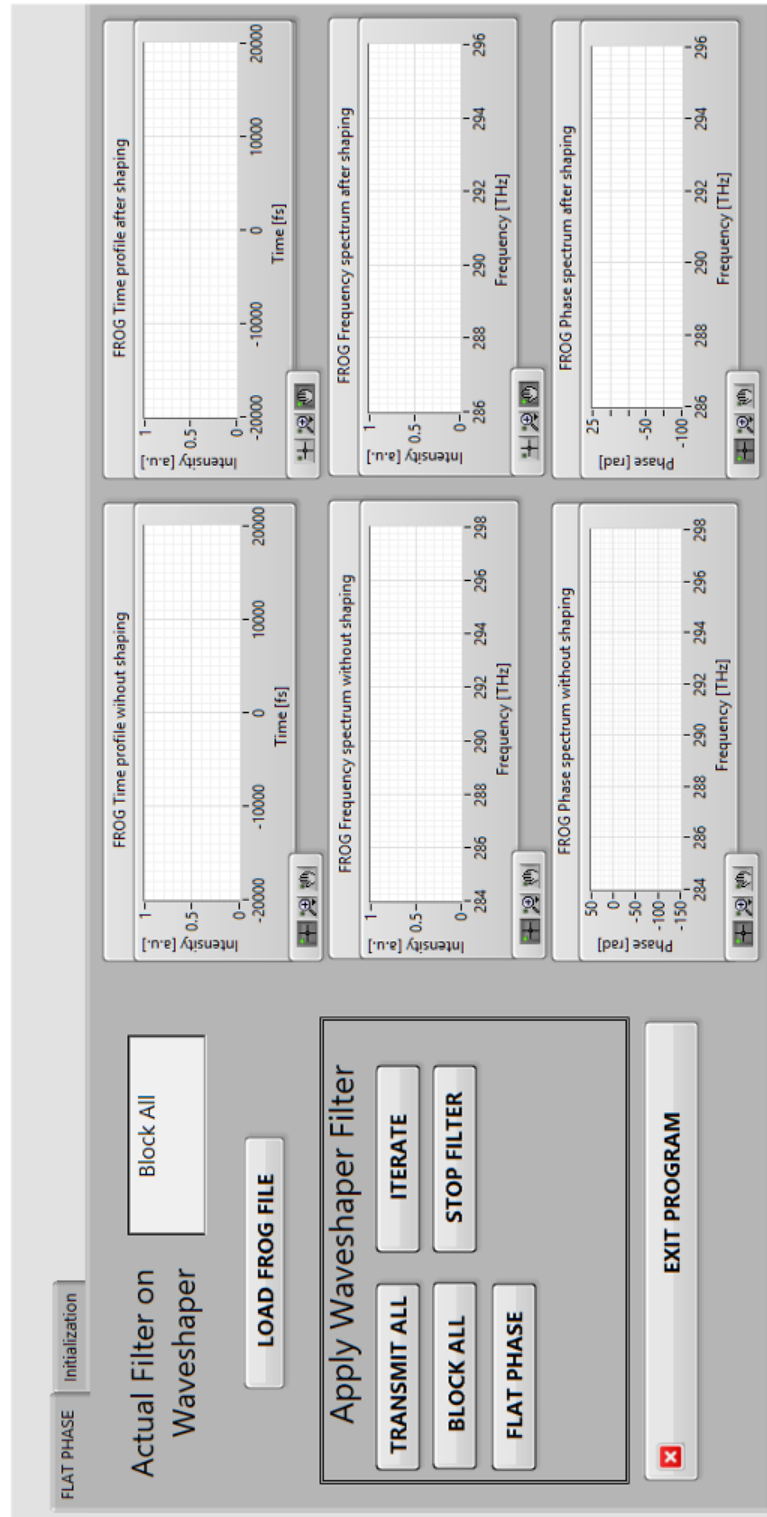
- [32]: LE GARREC, Bruno, et al. ELI-beamlines: extreme light infrastructure science and technology with ultra-intense lasers. In: *High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam Applications VII*. International Society for Optics and Photonics, 2014. p. 89620I.
- [33]: FULKERSON, E. Stephen, et al. Pulsed power system for the HAPLS Diode Pumped Laser System. In: *2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*. IEEE, 2015. p. 1-6.
- [34]: BAYRAMIAN, A., et al. High energy, high average power, DPSSL system for next generation petawatt laser systems. In: *2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. IEEE, 2016. p. 1-2.
- [35]: PHILIPPE, Michel; SOULIGNAC, Benoit. *Laser beam machine safety device and method of use*. U.S. Patent No 5,442,154, 1995.
- [36]: VRBOVÁ, Miroslava; GAVRILOV, Petr; JELÍNKOVÁ, Helena. *Úvod do laserové techniky*. České vysoké učení technické, 1994.
- [37]: RUS, B., et al. ELI-Beamlines laser systems: status and design options. In: *High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology; and Research Using Extreme Light: Entering New Frontiers with Petawatt-Class Lasers*. International Society for Optics and Photonics, 2013. p. 87801T.
- [38]: SINOFSKY, Edward L. *Safety shut-off device for laser surgical instruments employing blackbody emitters*. U.S. Patent No 6,932,809, 2005.
- [39]: Manual Diode Laser LDF 9000-200 VGF. Laserline GmbH. Muelheim-Kaerlich, Germany. 2013.
- [40]: Manual YLMO High Power. Menlo Systems GmbH, Munich, Germany. 2017
- [41]: GEIB, Nils C., et al. Common pulse retrieval algorithm: a fast and universal method to retrieve ultrashort pulses. *arXiv preprint arXiv:1810.04780*, 2018.
- [42]: LIU, Tzu-Ming, et al. Direct temporal intensity measurement of ultrashort optical pulses using third-harmonic-generation based triple correlation. In: *Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Postconference Technical Digest (IEEE Cat. No. 01CH37170)*. IEEE, 2001. p. 74-75.

- [43]: DENG, Yuqiang, et al. Measurement of Ultrashort Optical Pulses. In: *Modern Metrology Concerns*. IntechOpen, 2012.
- [44]: TAIRA, K., et al. Background-free intensity autocorrelator employing Si avalanche photodiode as two-photon absorber. *Electronics Letters*, 2002, 38.23: 1465-1466.
- [45]: BARRY, L. P., et al. Autocorrelation of ultrashort pulses at 1.5/ μm based on nonlinear response of silicon photodiodes. *Electronics Letters*, 1996, 32.20: 1922-1923.
- [46]: PEATROSS, J.; RUNDQUIST, A. Temporal decorrelation of short laser pulses. *JOSA B*, 1998, 15.1: 216-222.
- [47]: SALA, K.; KENNEY-WALLACE, G.; HALL, G. CW autocorrelation measurements of picosecond laser pulses. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16.9: 990-996.
- [48]: IACONIS, Chris; WALMSLEY, Ian A. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses. *Optics letters*, 1998, 23.10: 792-794.
- [49]: RADUNSKY, Aleksander S., et al. Simplified spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction by using a thick nonlinear crystal. *Optics letters*, 2006, 31.7: 1008-1010.
- [50]: SHUMAN, Timothy M., et al. Real-time measurement of ultrashort optical pulses using SPIDER. In: *Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Postconference Edition. CLEO'99. Conference on Lasers and Electro-Optics (IEEE Cat. No. 99CH37013)*. IEEE, 1999. p. 533.
- [51]: DORRER, Christophe, et al. Single-shot real-time characterization using spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction. In: *Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Postconference Edition. CLEO'99. Conference on Lasers and Electro-Optics (IEEE Cat. No. 99CH37013)*. IEEE, 1999. p. 533-534.

- [52]: GALLMANN, Lukas, et al. Characterization of sub-6-fs optical pulses with spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction. *Optics letters*, 1999, 24.18: 1314-1316.
- [53]: STRNADEL, Josef. Návrh časově kritických systémů I: specifikace a verifikace. *Automa*. 2010, str. 42-44. ISSN 1210-9592.
- [54]: BURKHART, S. C., et al. National ignition facility system alignment. *Applied Optics*, 2011, 50.8: 1136-1157.
- [55]: KANAI, Takuya, et al. Pointing stabilization of a high-repetition-rate high-power femtosecond laser for intense few-cycle pulse generation. *Applied Physics Letters*, 2008, 92.6: 061106.
- [56]: BOEGE, Steven J., et al. NIF pointing and centering systems and target alignment using a 351-nm laser source. In: *Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion: Second Annual International Conference*. International Society for Optics and Photonics, 1997. p. 248-259.
- [57]: YAMAZAKI, Shunpei, et al. *Apparatus and method for laser radiation*. U.S. Patent No 5,900,980, 1999.
- [58]: TANABE, Takasumi, et al. Compensation for a transfer function of a regenerative amplifier to generate accurately shaped ultrashort pulses in both the amplitude and phase. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 2004, 10.1: 221-228.
- [59]: VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9
- [60]: APPLICATION NOTE. Creating Simple Filter Shapes. *Finisar* [online]. ©2012 [cit. 2018-02-06]. Dostupné z:
https://www.finisar.com/sites/default/files/resources/an_waveshaper_creating_simple_filter_shapes_in_excel_labview_and_matlab.pdf
- [61]: User manual FROG Option for putseCheck USB. A•P•E Angewandte Physik & Elektronik GmbH, Berlin, Germany. 2015.

- [62]: Course Manual LabVIEW Core 1. National Instruments. Austin, Texas, USA. 2013.
- [63]: Course Manual LabVIEW Core 2. National Instruments. Austin, Texas, USA. 2013.
- [64]: Course Manual LabVIEW Core 3. National Instruments. Austin, Texas, USA. 2013.
- [65]: LUO, Huageng. Physics-based data analysis for wind turbine condition monitoring. *Clean Energy*, 2017, 1.1: 4-22.
- [66]: YAROSLAVSKY, L. P. Efficient algorithm for discrete sinc interpolation. *Applied optics*, 1997, 36.2: 460-463.
- [67]: ALTSHULER, J. Phase Spectrum of a Rectangular Pulse. *IEEE Transactions on Education*. 1970, 2: 122-123.

Příloha A: Uživatelské rozhraní programu pro minimalizaci délky pulsu



Příloha B: Obsah příloženého CD

Klíčová slova v českém jazyce a anglickém jazyce

Abstrakt česky

Abstrakt anglicky

Naskenované zadání diplomové práce

Diplomová práce

Zdrojový kód ve formě spustitelného .exe souboru

Manuál ke spuštění .exe souboru