České vysoké učení technické v Praze

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky

Obor: Fyzikální inženýrství

Zaměření: Fyzika a technika termojaderné fúze

Zpracování dat pro mikrovlnnou reflektometrii na tokamacích CASTOR a COMPASS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Vojtěch Lejsek

Vedoucí práce: RNDr. Jaromír Zajac

Rok: 2010

Zde vložit originál, resp. kopii zadání (jeden oboustranný list).

Zpracování dat pro mikrovlnnou reflektometrii na tokamacích CASTOR a COMPASS

Reflektometrie na tokamaku Castor, který byl dříve v provozu v ÚFP AV ČR, umožňovala bezkontaktní měření fluktuací uvnitř horkého plazmatu. Naměřená data jsou uložena v databázi. Dosavadní způsob zpracování dat vyžaduje dobrou znalost programů IDL nebo Matlab a znalost struktury databáze. Praktickým cílem bakalářské práce je vytvoření graficky orientovaného programu, který by snadno umožnil náhled a základní zpracování naměřených dat. Sloužil by k analýze výsledků jak z tokamaku CASTOR, tak v budoucnu z tokamaku COMPASS. Program by měl umět načtení dat z databází CASTOR a COMPASS ale i z obecných datových souborů. Základní analýza spočívá v odstranění nežádoucích složek signálu (filtrace) a dále spektrální a korelační analýzou. V teoretické části by se bakalářská práce měla zabývat obecněji mikrovlnnou diagnostikou plazmatu, popisem reflektometrie na uvedených tokamacích a statistickou analýzou fluktuací.

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce RNDr. Jaromíru Zajacovi za trpělivé a důkladné vysvětlení problémů, na které jsem při psaní práce narazil a za poskytnutí velice cenných informací, bez nichž by tato práce pravděpodobně vůbec nemohla vzniknout.

Vojtěch Lejsek

Abstrakt

Název: Zpracování dat pro mikrovlnnou reflektometrii na tokamacích CASTOR a COMPASS

Autor: Vojtěch Lejsek

Obor: Fyzikální inženýrství

Zaměření: Fyzika a technika termojaderné fúze

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Jaromír Zajac, Ústav fyziky plazmatu AV ČR

Abstrakt: Tato práce se zabývá proveditelností využití termojaderné fúze jako zdroje energie, možnými fúzními zařízeními a diagnostikami plazmatu s důrazem na využití mikrovln. Dále se věnuje popisu reflektometrie na tokamacích CASTOR a COMPASS umístěných v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky. V souvislosti s reflektometrií se práce zabývá statistickou analýzou fluktuací. Součástí bakalářské práce je program nazvaný „ReflectometryGUI“, který tvoří graficky orientované prostředí pro získání dat z databází výstřelů obou tokamaků, odstranění nežádoucích složek signálu a spektrální a korelační analýzu naměřených dat.

Klíčová slova: mikrovlny, reflektometrie, plazmová frekvence, spektrum signálu, korelace

Abstract

Title: Data processing for microwave reflectometry on tokamaks CASTOR and COMPASS

Author: Vojtěch Lejsek

Specialization: Physical Engineering

Supervisor: RNDr. Jaromír Zajac, Institute of Plasma Physics AS CR

Abstract: This thesis covers feasibility of thermonuclear fusion as an energy source, possible fusion devices and plasma diagnostics, especially those microwave-related. In addition, it deals with the description of reflectometry systems installed on tokamaks CASTOR and COMPASS located at the Institute of Plasma Physics of the Academy of Sciences of the Czech Republic. In the context of reflectometry, this thesis also considers statistic analysis of plasma fluctuations. The bachelor thesis contains program called „ReflectometryGUI” which generates graphical user interface for obtaining data from databasis of shots on both tokamaks, removing unwanted signal components and spectral and correlation analysis of acquired data.

Key words: microwaves, reflectometry, plasma frequency, signal spectrum, correlation

Obsah

Úvod....6
1 Fúze jako zdroj energie....8
1.1 Fúzní reakce....8
1.2 Přístupy k řešení fúzních elektráren....9
1.2.1 Inerciální udržení....10
1.2.2 Magnetické udržení....10
1.3 Ohřev plazmatu....12
1.3.1 Ohmický ohřev....12
1.3.2 Neutrální svazky....12
1.3.3 Elektromagnetické vlny....13
1.3.4 Samoohřev produkty reakcí....14
2 Diagnostika a její využití....15
2.1 Diagnostika plazmatu....15
2.1.1 Magnetické diagnostiky....15
2.1.2 Mikrovlnné diagnostiky....16
2.2 Reflektometrické systémy užité na tokamacích CASTOR a COMPASS....20
2.2.1 CASTOR....20
2.2.2 COMPASS....21
3 Možnosti analýzy naměřených dat....24
3.1 Autocorrelation....24
3.2 Crosscorrelation....25
3.3 Crosscorrelogram....25
3.4 Fourier Amplitude Spectrum....25
3.5 Spectrogram....26
3.6 Cross-Phase Spectrum....26
3.7 Coherence....26
4 Využití programu ReflectometryGUI....27
4.1 Výběr zdroje dat....27
4.2 Načtení dat....28
4.2.1 Datový soubor....28
4.2.2 CASTOR....28
4.2.3 COMPASS....28
4.3 Časový ořez a filtrace dat....29
4.4 Spektrální a korelační analýza....29
4.5 Nároky na software a připojení....31
Závěr....32
Použitá literatura....33

Úvod

Cílem této práce je shrnout základní fyzikální principy a možnosti jaderné fúze, zabývat se možnostmi diagnostiky plazmatu s důrazem na reflektometrii a jejím konkrétním využitím na tokamacích instalovaných v ČR, konkrétně v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky. A v neposlední řadě má sloužit i jako manuál k programu ReflectometryGUI, jehož tvorba byla praktickou částí bakalářské práce.

Vzhledem k tenčícím se zásobám fosilních paliv a ne vždy využitelným a výhodným alternativním energetickým zdrojům je nutné hledat jinou cestu, která přinese zdroj levné energie ze snadno získatelných surovin využitelný kdekoli na světě.

Kvůli zvyšující se spotřebě energie všech obyvatel Země, bude nutné nový zdroj energie využívat již v průběhu 21. století. Z různých možností se v současnosti nejreálněji jeví právě termonukleární fúze deuteria a tritia v tokamaku.

První kapitola práce dává přehled reakcí, k nimž dojde při jaderné fúzi včetně výhod a nevýhod jednotlivých variant. Dále nabízí základní přehled termonukleárních zařízení a informace o ohřevu plazmatu na nutnou teplotu zhruba 100 milionů stupňů, což je nejviditelnější část současného a - věřme, že - dočasného problému s využitelností fúze jako takřka nevyčerpatelného zdroje energie.

V další části je uveden stručný souhrn využívaných magnetických i mikrovlnných diagnostik. Ty mikrovlnné jsou podrobněji rozebrané, je vysvětleno jaké vlny se pro kterou diagnostiku využívají a proč. Rovněž se v této části věnuji reflektometrickému systému, který byl užíván na tokamaku CASTOR před jeho přesunem na půdu FJFI ČVUT, a také plánovanému a v současnosti vytvářenému systému, pomocí něhož budou probíhat reflektometrická měření na tokamaku COMPASS, který byl v ÚFP AV ČR instalován v roce 2008.

Ve třetí kapitole naleznete spíše matematický pohled na zpracování dat z reflektometrického systému. Konkrétně jsem vybral spektrální a korelační analýzy dostupné v programu ReflectometryGUI.

Právě tomuto programu se věnuje poslední část této práce. ReflectometryGUI je grafické prostředí, které uživateli bez znalosti jakéhokoli programovacího jazyka a hlavně struktury uložených dat umožní porovnat a zpracovat vybranou dvojici signálů naměřených na jednom

z tokamaků. I přes intuitivní ovládání může tato část sloužit jako návod k použití programu. Pro zkušenější uživatele Matlabu jsou v této části uvedeny přínosné informace týkající se použitých funkcí a s nimi spojených metod numerického zpracování dat. Nechybí ani informace o přednastavených parametrech pro spektrální a korelační analýzu a doporučení pro jejich vhodnou volbu.

1 Fúze jako zdroj energie

Využití termonukleární fúze pro výrobu elektrické energie je nejen výzvou, ale pravděpodobně i nutností do budoucnosti. Základní suroviny, tedy deuterium a lithium, dokážeme snadno získat a i technologické zvládnutí fúze se jeví jako reálné přinejmenším v průběhu 21. století. Do budoucna se plánuje využití reakcí jiných atomů, které ale vyžadují vyšší teplotu.

Nezanedbatelnou roli rovněž hraje jen malý problém s odpadem a dosloužilými součástmi reaktoru – v rámci reakce sice vznikne radioaktivní tritium, ale to má poločas rozpadu pouze 12,32 let [10], což je relativně málo oproti produktům štěpných reakcí – přesněji řečeno izotopům na něž se tyto produkty rozpadají.

I samotná reakce je velmi bezpečná, protože v jeden okamžik je přítomno jen malé množství paliva, takže i v případě totálního selhání veškerých kontrolních systémů by reakce do několika vteřin uhasla sama. Rovněž jde o velmi ekologický způsob výroby elektrické energie, během reakce nejsou vypouštěny skleníkové plyny, množství paliva je velmi nízké, tedy nevznikne ekologická zátěž při jeho dopravě do elektrárny, a ve srovnání se štěpnými jadernými elektrárnami není potřeba výrazné chlazení vodou, které často ovlivňuje klima v okolí elektrárny, především počet slunečných hodin a často související stavbu přehradních nádrží [11].

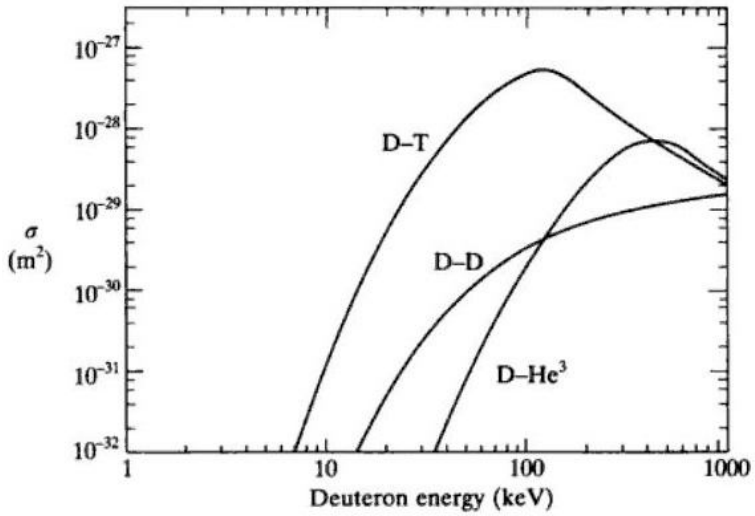
1.1 Fúzní reakce

V budoucím fúzním reaktoru je očekáváno využití několika druhů reakcí. Vzhledem k fyzikálním podmínkám pro dosažitelný účinný průřez reakce při co nejnižší teplotě se v počátcích uvažuje pouze s reakcí (1.1).

$$D + T \rightarrow {}^{4}He + n + 17{,}59\,MeV \qquad (1.1)$$

Ve vzdálenější budoucnosti lze předpokládat využití některých z následujících reakcí (1.2-1.4) [19]. Jejich nevýhodou je průběh závislosti účinného průřezu na kinetické energii částic (viz Obr. 1.1), která odsouvá tyto reakce zatím do pozadí, takže v první generaci fúzních reaktorů se nejspíš bude používat D-T reakce.

$$D + D \rightarrow T + p + 4{,}03\,MeV \qquad (1.2)$$
$$\rightarrow {}^{3}He + n + 3{,}27\,MeV \qquad (1.3)$$
$$D + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + p + 18{,}3\,MeV \qquad (1.4)$$



Obr. 1.1: Účinný průřez reakcí (1.1-1.4) v závislosti na energii částic. Obě D-D reakce mají podobný účinný průřez, v grafu je vynesen jejich součet. [19]

Využití reakcí (1.2-1.3) je otázkou pro budoucnost, výhoda je ve snazším získání paliva, ale v průběhu reakce stejně dojde na radioaktivní tritium i velmi rychlé neutrony, což jsou jedny z podstatných problémů D-T reakcí. V případě reakce (1.4) jsou sice výhodou pouze nabité produkty, nevýhoda je nedostupnost ^{3}He na Zemi a parazitní D-D reakce. Proto se jako dlouhodobě ideální jeví reakce (1.5), jež produkuje pouze nabité částice, které neunikají z plazmatu a zároveň jsou velmi výhodné při výrobě elektrické energie. Navíc jsou suroviny dostupné na Zemi a reakce má maximum účinného průřezu při „pouze“ několika stech keV.

$$p + {}^{11}B \rightarrow 3\,{}^{4}He + 8{,}7\ MeV \qquad (1.5)$$

1.2 Přístupy k řešení fúzních elektráren

Základním cílem je splnění tzv. Lawsonova kritéria (1.6) [9], neboli v případě D-T fúze trojného součinu termodynamické teploty T, elektronové hustoty n_e a času udržení τ. Na opačné straně nerovnice vystupuje Boltzmannova konstanta k_b, energie nabitých produktů reakce E, a $<\sigma v>$ je střední hodnota součinu účinného průřezu reakce a vzájemné rychlosti částic. Splnění Lawsonova kritéria je nutnou podmínkou pro pozitivní energetickou bilanci termonukleární fúze. Po spočítání pravé strany nerovnice vyjde pro reakci (1.1) už konkrétní hodnota (1.7).

$$n_e T \tau \geqslant \frac{12\,k_b}{E} \frac{T^2}{\langle \sigma v \rangle} \qquad (1.6)$$

$$n_e T \tau \geqslant 10^{21}\, keV\ s/m^3 \qquad (1.7)$$

Z Lawsonova kritéria plynou dvě základní cesty, které mohou vést k výsledku. Teplota je totiž daná taková, při níž je maximální účinný průřez, zbývá tedy zvyšování hustoty (inerciální udržení) nebo doby udržení (magnetické udržení).

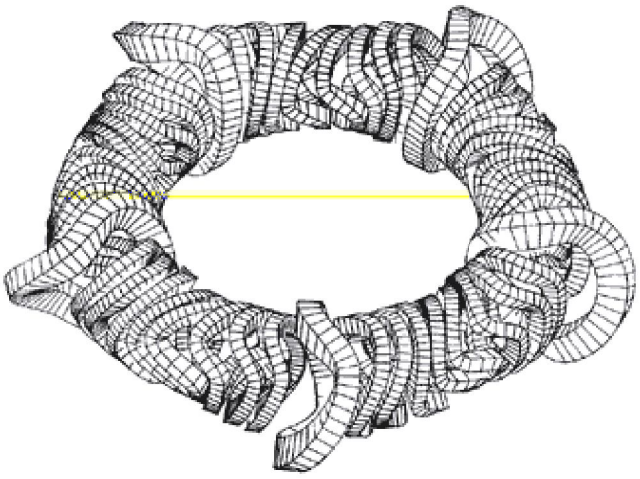
1.2.1 Inerciální udržení

V případě inerciálního udržení je snaha pomocí výkonných laserů mířících ze všech stran na palivový terčík stlačit palivo na dostatečně malý objem, aby došlo k zažehnutí fúzní reakce a výbuchu terčíku ve formě vodíkové mikrobomby. Díky vysokému tlaku je ve středu terčíku dosažena teplota nutná pro průběh reakce.

Základním požadavkem je velmi hustý terčík, uvažuje se cca 1 kg/cm^3. Ani to však nestačí a je nutné terčík dále stlačit. Postup je stručně takový, že se terčík zahřeje výkonnými lasery, odpařená vrchní vrstva způsobí ablaci a dále stlačí střed, kde dojde k zapálení fúzního paliva a výbuchu mikrobomby.

1.2.2 Magnetické udržení

V současnosti výrazně slibnější variantou je princip, který dosahuje dlouhé doby udržení reakce při nízké hustotě. Nejviditelnějším problémem je jak udržet teplotu okolo sta milionů stupňů. Řešením je uzavření nabitého plazmatu ve vakuové komoře za pomoci magnetických siločar. Technických řešení se nabízí několik, nejperspektivnější jsou stelarátor a hlavně tokamak.



Obr. 1.2: Znázornění složitého uspořádání cívek na stelarátoru Wendelstein 7-AS v německém Garchingu. [22] © Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V.

Stelarátor

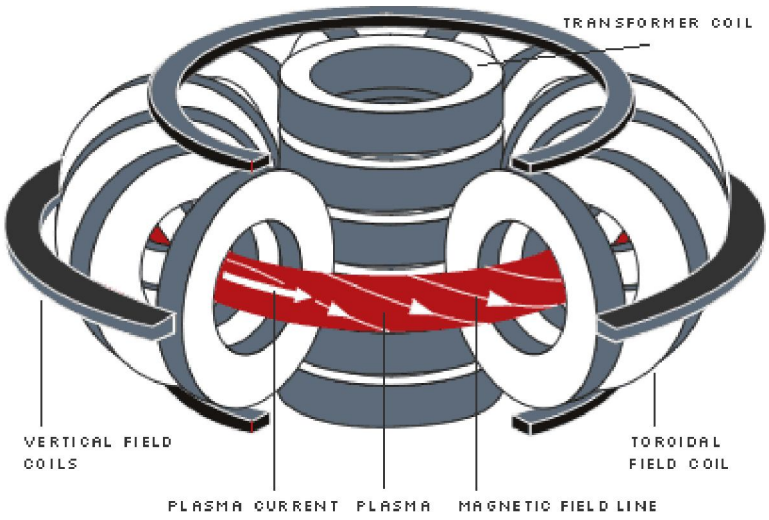
Stelarátor je toroidální zařízení užívané pro udržení plazmatu pouze pomocí magnetického pole vnějších cívek, nevyužívá proudů tekoucích plazmatem. Jak je vidět na Obr. 1.2, cívky kolem komory mají složitou geometrii a různé polohy, což je velmi náročné na výpočet a přesnost výroby. Výsledkem je, že každá částice v plazmatu stráví stejný čas na vnitřní i vnější straně plazmatu, což prodlužuje dobu udržení, a stelarátor byl už od počátku navržen jako kontinuální zařízení.

Tokamak a jeho varianty

Vnějším tvarem je tokamak podobný stelarátoru, základní rozdíl ale je v jeho symetričnosti. Toroidální magnetické pole udržuje plazma uvnitř komory reaktoru, který tím je chráněn před vysokými teplotami. Poloidální magnetické pole působí proti tlaku, který způsobuje expanzi plazmatu. Právě zde je výrazný rozdíl mezi tokamaky a stelarátory, poloidální pole tokamaku je vytvářeno mimo jiné i elektrickým proudem, který teče plazmatem a rovněž plazma ohřívá ohmickým ohřevem až do teplot okolo 1 keV. Celkové magnetické pole je dáno součtem pole poloidálního a toroidálního.

Jak je patrné z Obr. 1.3, siločáry vedou spirálovitě kolem toru, což zajišťuje, že je každá částice stejnou dobu na vnitřní straně, kde je silnější pole, jako na vnější straně, kde je pole slabší.

Variantou tokamaků jsou sférické tokamaky. U běžných tokamaků bývá tzv. aspekt, tj. poměr vzdálenosti mezi osou toru a středem komory a poloměru komory zhruba 3 a více. U sférických tokamaků, kde je kompaktní středová část a komora je protažena do výšky kolem osy toru, bývá výše zmíněný poměr menší než 1,5 [28]. Výhody sférických tokamaků jsou v jejich kompaktnosti, a tedy i nižší pořizovací ceně, nevýhodou je složitější řešení cívek toroidálního pole z důvodu nedostatku místa ve středu tokamaku.



Obr. 1.3: Znázornění magnetických cívek tokamaku. [23] © Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V.

1.3 Ohřev plazmatu

Podstatnou součástí výzkumu souvisejícího s tokamaky je řešení ohřevu plazmatu a zkoumání chování plazmatu, které vede k disrupcím a únikům tepla. Jak již vyplývá z Obr. 1.1, pro nejvýhodnější účinný průřez reakce u D-T fúze je nutné dosáhnout teploty řádově 10 keV. Toho se dosahuje pomocí několika na sobě nezávislých systémů.

1.3.1 Ohmický ohřev

Základním ohřevem pro teploty do cca 1 keV je ohřev proudem, který prochází plazmatem. Ten tak nejenže spoluvytváří poloidální magnetické pole, ale hlavně kvůli nenulovému odporu plazma ohřívá. Bohužel vodivost plazmatu se s teplotou zvyšuje v podstatě do nekonečna, takže další ohřev nad 1 keV je neekonomický a v podstatě technicky nemožný. Proto je nutné plazma ohřát i dalšími způsoby.

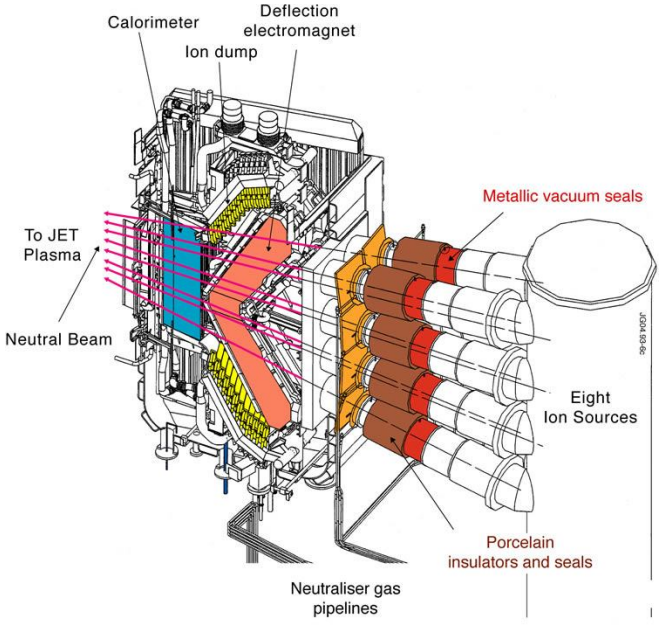
Kromě toho je tento způsob ohřevu využitelný jen v počátku, protože tokamak jako transformátor nemůže mít stálý proud ve svém sekundárním vinutí, kterým plazma je. Později je proud v plazmatu nutné vyvolat jinak.

1.3.2 Neutrální svazky

V plazmatu rozlišujeme dvě teploty – elektronovou a iontovou. Vzhledem k tomu, že teplota se projevuje zvýšením (kinetické) energie částice, je zjevné, že se může výrazně lišit pro lehké elektrony a těžké ionty. Důležité je především dostatečně urychlit ionty, které přenáší většinu

energie. Ty nejsnáze zahřejeme vstříknutím rychlých neutrálních částic deuteria nebo tritia, které předají svoji energii při srážkách s ionty. Vhodnou zvolenou rychlostí částic lze i ovlivnit místo, kde se částice zpomalí dost na to, aby zůstaly v plazmatu. Zároveň silně záleží i na směru vstřikování, který bývá tečně k proudu plazmatu, aby svazek procházel plazmatem co nejdéle.

Na menších tokamacích neutrální svazky znatelně roztáčejí plazma, což prodlužuje dobu udržení. Na větších tokamacích nebude tento jev tak výrazný, proto na tokamaku COMPASS, kde bude snaha modelovat podmínky blízké ITERu, budou využity pro ohřev dva vstřícné svazky [15].



Obr. 1.4: Systém na vstřikování neutrálních svazků použitý na tokamaku JET v anglickém Culhamu. [21] © EFDA-JET

1.3.3 Elektromagnetické vlny

Plazma lze hřát rovněž elektromagnetickými vlnami na vhodně zvolené frekvenci. Využívají se tři základní rezonanční frekvence [13].

Elektronová cyklotronová resonanční frekvence odpovídá rychlosti rotace elektronů okolo siločar magnetického pole, což jsou řádově desítky až stovky GHz. Ohřívá pouze elektrony, které svou energii předávají dále pomocí srážek. Při iontové cyklotronové rezonanční frekvenci vznikají velmi rychlé ionty, které při srážkách předají většinu energie elektronům, jde řádově o desítky MHz. Poslední důležitou frekvencí je dolní hybridní frekvence, která

bývá v jednotkách GHz. Pomocí ní dochází k urychlování částice v pohybu torem, protože částice jsou tlačeny vyšším elektrickým potenciálem. V jiné části vlny dochází naopak ke zpomalování vlivem stejného jevu, ale díky rozdělení rychlostí je zpomalovaných částic vždy méně než zrychlovaných.

1.3.4 Samoohřev produkty reakcí

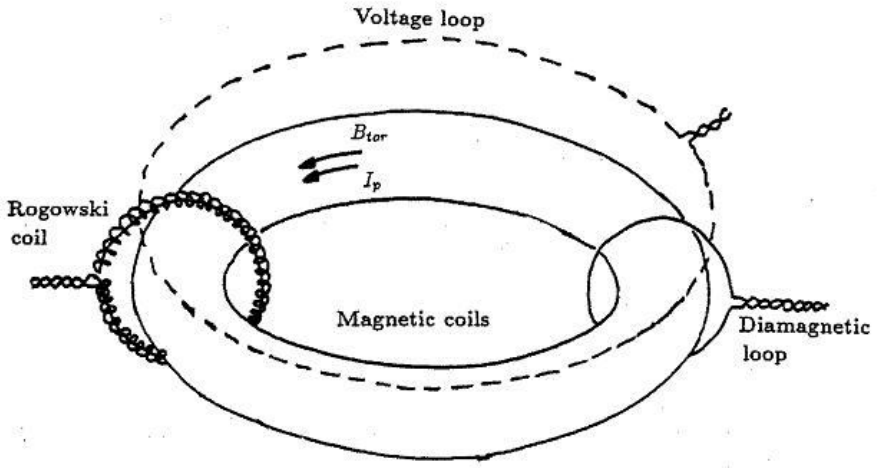
Po sloučení deuteria a tritia vznikne neutron s energií 14,1 MeV a alfa částice s energií 3,5 MeV. Alfa částice je nabitá, tedy se bude dále pohybovat podél magnetických siločar v tokamaku a srážkami s ostatními částicemi předá svou energii a tedy plazma zahřeje. Pro samoohřev je nutná dostatečná produkce alfa částic, ke které dojde až při provozní teplotě reaktoru, tedy cca 10 keV. Pro dosažení této teploty je proto stejně třeba využít kombinaci předchozích variant.

Neutrony, které přenášejí výraznější část energie, se na samoohřevu budou podílet mnohem méně, protože nejsou vázány magnetickým polem a tedy jich naprostá většina z plazmatu unikne.

2 Diagnostika a její využití

2.1 Diagnostika plazmatu

Pro výzkumné účely je nutné mít možnost zjišťovat průběh plazmatu. Podobné diagnostiky budou potřeba i v budoucím reaktoru pro kontrolu a ovládání plazmatu v reálném čase. Naprostá většina diagnostik zjišťuje podmínky v plazmatu bezkontaktně, pevné sondy mohou být použity jen při okraji plazmatu, kde je plazma studenější, a i tak vysoké teploty vydrží jen krátkodobě, navíc materiál samotný znečišťuje plazma. Každé měření je ověřováno jiným měřením na základě jiných fyzikálních principů, aby se zajistilo, že nebude docházet k nějaké nepředpokládané systematické chybě.



Obr. 2.1: Umístění třech nejzákladnějších magnetických diagnostik popsaných v kapitole 2.1.1 na komoře tokamaku. [24]

2.1.1 Magnetické diagnostiky

Základní magnetické diagnostiky jsou řešeny navinutím závitu cívky kolem tokamaku z různých stran. Měření pak provedeme změřením napětí V mezi konci cívky, z čehož získáme časovou změnu magnetického toku plochou S cívky s N závity [24]. Vztahem (2.1), kde magnetické pole B známe z daného experimentu, můžeme určit měřenou veličinu.

$$V = -\int_{\Phi} \frac{\partial B}{\partial t} d\Phi = -N S \dot{B} \qquad (2.1)$$

Využívaných je především několik základních typů, které jsou naznačené na Obr. 2.1. Rogowského cívka je toroidální cívka bez jádra obtočená kolem komory tokamaku v

poloidálním směru. Obecně Rogowského cívka měří změny proudu ve vodiči, kolem něhož je obtočena, v případě tokamaku tedy měří změnu proudu v plazmatu.

Diamagnetická smyčka je jeden závit cívky obtočený poloidálně kolem komory toru. Průměrná změna toku smyčkou odpovídá průměrnému tlaku plazmatu a tedy i průměrné energetické hustotě, z níž lze spočítat celkovou energii plazmatu.

Napětí na závit se měří jedním závitem cívky omotaným kolem středu transformátoru souběžně s toroidální komorou tokamaku. Ta měří celkový tok vytvořený transformátorem. Ze zjištěného napětí a proudu tekoucího plazmatem, lze určit odpor plazmatu. Ten je ovšem závislý na teplotě, tedy lze určit i elektronovou teplotu plazmatu.

2.1.2 Mikrovlnné diagnostiky

Základním rozdělením různých typů diagnostik je rozlišení na pasivní a aktivní. V prvním případě měříme spektrum elektromagnetického vlnění vyzařovaného plazmatem (radiometrie), v druhém případě vyšleme do plazmatu signál a následně měříme změnu fáze nebo amplitudy signálu, který plazmatem prošel (interferometrie), nebo se od něj odrazil (reflektometrie). Interferometrie a reflektometrie se od sebe liší především použitou frekvencí.

Šíření elektromagnetických vln v plazmatu

Rozlišujeme několik základních stavů, výsledné šíření je jednoduché určit pouze v těchto ideálních případech, kdy vlna se šíří kolmo nebo rovnoběžně s magnetickým polem tokamaku a elektrické pole vlny je rovnoběžné nebo kolmé na magnetické pole tokamaku. V závislosti na tom rozlišujeme vlnu řádnou (označuje se „O“ z anglického termínu „Ordinary“), která se šíří bez ohledu na magnetické pole, a mimořádnou (označení „X“ dle „eXtraordinary“), kterou magnetické pole ovlivňuje.

i) $k \perp B_0$, $\vec{E} \| \vec{B}_0$

V tomto případě B_0 jde o řádnou vlnu. Pro ní platí disperzní vztah (2.2), který určuje fázovou rychlost vlny v_f, tedy rychlost s jakou se mění pozice bodu s konkrétní fází. Z obecného vztahu pro relativní index lomu prostředí N (2.3) pak plyne vyjádření N (2.4). Vyjádření relativní permitivity ε_r pomocí vztahu (2.5) je pak jen důsledkem předchozího [26].

$$\omega^2 - \omega_p^2 = k^2 c^2 \qquad (2.2)$$

$$N = \frac{ck}{\omega} = \frac{c}{v_f} \qquad (2.3)$$

$$N = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2} \qquad (2.4)$$

$$\varepsilon_r = N^2 = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \qquad (2.5)$$

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že se vlna bude plazmatem šířit pouze pro $\omega > \omega_p$, kde ω_p označuje plazmovou frekvenci. Se zvyšující se frekvencí ω se zvyšuje relativní index lomu N a blíží se jedné. Možnosti šíření řádné vlny jsou znázorněny na Obr. 2.2.

ii) $k \perp B_0, \quad \vec{E} \perp \vec{B}_0$

Mimořádná vlna může mít levotočivou nebo pravotočivou polarizaci. Důležitý je vztah pro relativní permitivitu plazmatu ε_r (2.6) [3, 5], z něhož chování vlny plyne, ω_h je tzv. horní hybridní frekvence, ω_c značí elektronovou cyklotronovou frekvenci. Grafické znázornění, při jakých frekvencích se šíří mimořádná vlna, je na Obr. 2.3.

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{\omega^2 - \omega_h^2} \qquad (2.6)$$

$$\omega_L = \frac{-\omega_c + \sqrt{\omega_c^2 + 4\omega_p^2}}{2} \qquad (2.7)$$

$$\omega_R = \frac{\omega_c + \sqrt{\omega_c^2 + 4\omega_p^2}}{2} \qquad (2.8)$$

Vztahy (2.7) a (2.8) ukazují frekvence, při níž je ε_r nulová. Mimořádná vlna se šíří tedy pouze ve frekvenčním intervalu (ω_L, ω_h) a pro frekvence vyšší než ω_R. Při frekvencích ω_L a ω_R dojde k úplnému odrazu vlny. Pokud se frekvence blíží k ω_h, jde permitivita do nekonečna, nastává naopak rezonance, což vede to k úplné absorpci vlny.

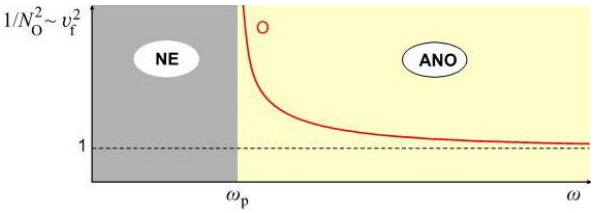
iii) $k \parallel B_0$

I v tomto případě vznikne v závislosti na frekvenci vlna levotočivá nebo pravotočivá. Pro L vlnu je relativní permitivita ε_r vyjádřená ve vztahu (2.9), pro R vlnu platí vztah (2.10) [3].

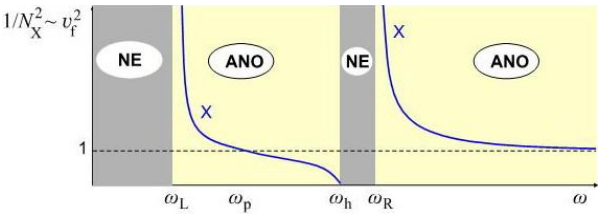
$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \frac{1}{1 + \frac{\omega_c}{\omega}} \qquad (2.9)$$

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \frac{1}{1 - \frac{\omega_c}{\omega}} \qquad (2.10)$$

Roli mezní frekvence zde plní ω_c. Mimořádná vlna se tedy šíří pro frekvence nižší než ω_c a pak pro frekvence vyšší než ω_R (stejné jako v případě ii)).



Obr. 2.2: Znázornění šíření řádné vlny v závislosti na frekvenci. Je patrné, že se šíří pouze pro frekvence vyšší než ω_p.. [8]



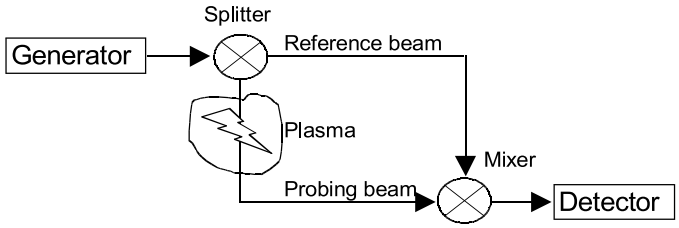
Obr. 2.3: Znázornění šíření mimořádné vlny s vektorem elektrického pole kolmým na magnetické pole. [8]

Radiometrie

Jelikož se nabité částice v plazmatu pohybují podél siločar po složité trajektorii, která by se dala vyjádřit jako šroubovice stočená do toru, působí na ně zrychlení (přinejmenším dostředivé v rámci každého z rotačních pohybů) a proto vyzařují elektromagnetické záření. V případě cyklotronního vyzařování z konkrétního místa tokamaku jde o čárové spektrum, které je polarizováno v závislosti na orientaci směrového vektoru vůči magnetickému poli. Ve skutečnosti jde o spektrum spojité, protože se měří zároveň částice v různém magnetickém poli a tedy s různou cyklotronní frekvencí. Prakticky se měří vyzařování v mikrovlnném spektru, což odpovídá elektronové cyklotronové frekvenci. Z té lze určit elektronovou teplotu plazmatu.

Interferometrie

Při průchodu plazmatem vlna může změnit některé své charakteristiky – amplitudu, fázi, polarizaci. Tyto změny mohou záviset na frekvenci. Porovnáním vlny, která prošla plazmatem, s referenčním paprskem můžeme tyto rozdíly zjistit; ke změně fáze dochází dle indexu lomu plazmatu, který přímo souvisí s elektronovou hustotou. Pro interferometrii jsou nezbytné vlny s frekvencí vyšší než je plazmová frekvence ω_p, tedy v řádu stovek GHz až desítek THz [24] dle velikosti tokamaku a dosahovaných hustot.



Obr. 2.4: Zjednodušené schéma interferometru. Signál z generátoru je rozdělen na dva díly, z nichž jeden projde plazmatem, druhý slouží jako referenční. Obě části jsou následně sloučeny a v detektoru je změřen vzájemný fázový posun. [20]

Reflektometrie

Podobně jako v případě interferometrie měříme změny charakteristik vlny. Rozdíl je, že vhodně zvolená frekvence se odrazí od tzv. cut-off vrstvy a neprojde plazmatem. Vlna šířící se plazmatem s gradientem elektronové hustoty v určitém místě přijde do místa, kde je frekvence vlny ω stejná jako plazmová frekvence ω_p a kde dojde k totálnímu odrazu řádné vlny [24]. Pro reflektometrii se využívají vlny na úrovni plazmové frekvence, tedy zhruba desítky GHz.

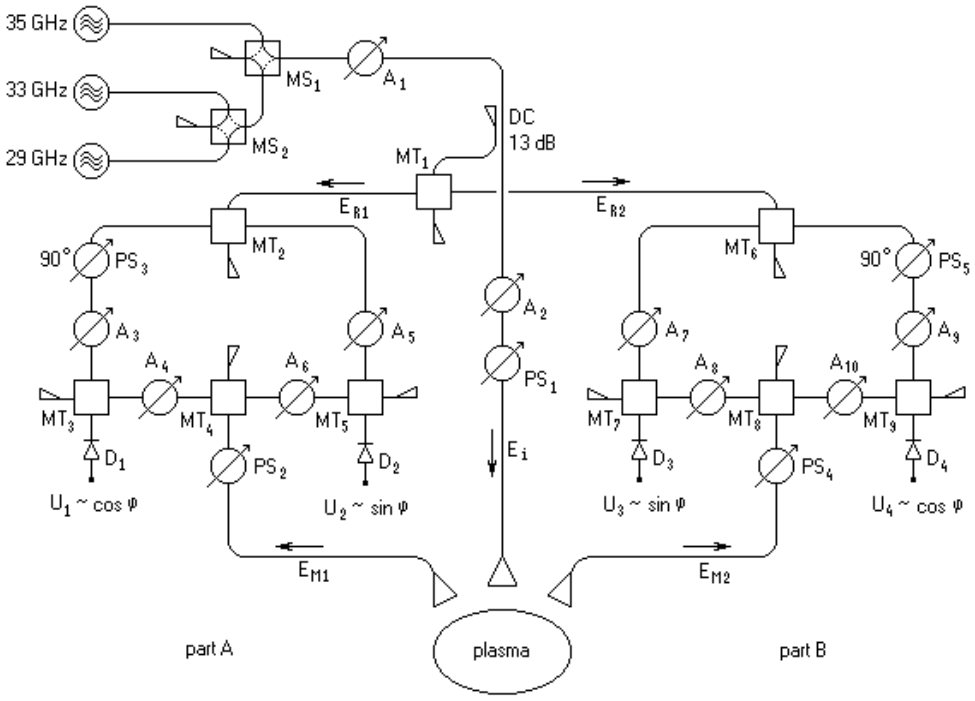
I zde ale záleží na velikosti tokamaku, přesněji řečeno dosahovaných hustot. Na v současnosti stavěném mezinárodním tokamaku ITER v jihofrancouzském Cadarache se dle [16] uvažuje s reflektometrickým systémem až pro 300 GHz vlny. Důvodem je potřeba změřit hustotu i v nejhustších částech plazmatu. I proto bude ITER vybaven čtyřmi nezávislými reflektometrickými systémy. Hlavní bude umístěn standardně na vnější straně komory, další bude více shora [16], aby snáze dosáhl až do centra tokamaku. V plazmatu totiž dochází k velkému rozptylu vlny a k zachycení odraženého signálu po několika metrech průchodu plazmatem by byla nutná velká přijímací anténa [7].

Vzdálenost cut-off vrstvy od antény reflektometrického systému můžeme zjistit jak pomocí řádné, tak i mimořádné vlny. Při praktickém použití je více výhod u mimořádné vlny, jenž na rozdíl od řádné vlny nevyžaduje konečný a nenulový gradient elektronové hustoty v místě cut-off vrstvy. Výhoda řádné vlny naopak spočívá v tom, že polohu cut-off vrstvy lze vyjádřit analyticky, závislost změny fáze se změnou polohy vrstvy, kde $\omega_p=\omega$, je však velmi slabá, což vede jen k méně přesnému určení pozice, a tedy je nutné velmi široké frekvenční spektrum pro podrobné proměření hustoty a fluktuací v daném místě.

2.2 Reflektometrické systémy užité na tokamacích CASTOR a COMPASS

2.2.1 CASTOR

Dle práce P. Plíška [12] byl na tokamaku CASTOR použit reflektometrický systém z osmimilimetrových vlnovodů pracujících na třech neměnitelných frekvencích 35 GHz, 33 GHz a 29 GHz. Výběr je prováděn mikrovlnnými přepínači (Microwave Switch, MS), další součásti systému jsou utlumovací články – atenuátory (Attenuator, A), fázovače (Phase Shifter, PS), T-rozbočovače (Magic T-junctions, MT) sloužící jako dělící a směšovací členy signálu, směrová odbočnice (Directional Coupler, DC) a měřící diody (Measuring Diodes, D). Umístění členů systému je znázorněno na Obr. 2.5.



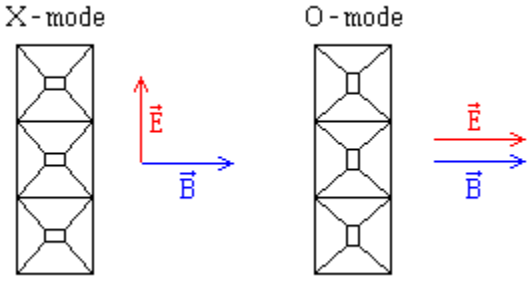
Obr. 2.5: Schéma zapojení reflektometrického systému na tokamaku CASTOR, který umožňoval měření cut-off vrstvy na třech pevných frekvencích 29, 33 a 35 GHz. Podrobný popis členů systému a jejich funkce je v kapitole 2.2.1. [12]

Mikrovlnný signál o zvolené frekvenci projde atenuátorem A_1, v DC se oddělí referenční signál o 5 % intenzitě, a po průchodu atenuátorem A_2 a posouvačem fáze PS_1 jde skrz vysílací anténu do plazmatu.

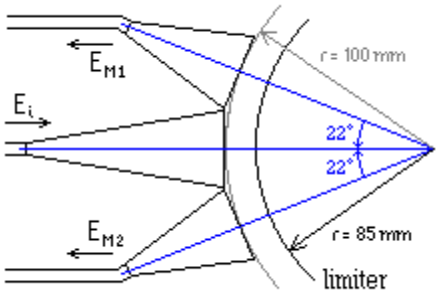
Odražený signál zachycují dvě přijímací antény umístěné poloidálně nad a pod anténou vysílací. Jak je dobře vidět z Obr. 2.5 , obě části zpracování signálu již jsou symetrické.

V každé části se odražený signál se smíchá s referenčním signálem, respektive s referenčním signálem, jehož fáze je posunutá o 90°. Diody D_1 – D_4 měří výsledný součet smíšených signálů.

Obr. 2.7 ukazuje polohu antén vůči řezu komorou tokamaku. Úhel mezi vysílací a oběma přijímacími anténami byl 22°. Obr. 2.6 ukazuje anténu se změněnou orientací vlnovodu pro měření s X vlnou. Pro její instalaci bylo nutné otevření komory tokamaku, výběr využití O nebo X vlny tedy nebyl triviální [12].



Obr. 2.6: Tvar vysílací (uprostřed) a přijímacích (nahoře, dole) antén pro případ využití řádné (vpravo) a mimořádné (vlevo) vlny. [12]

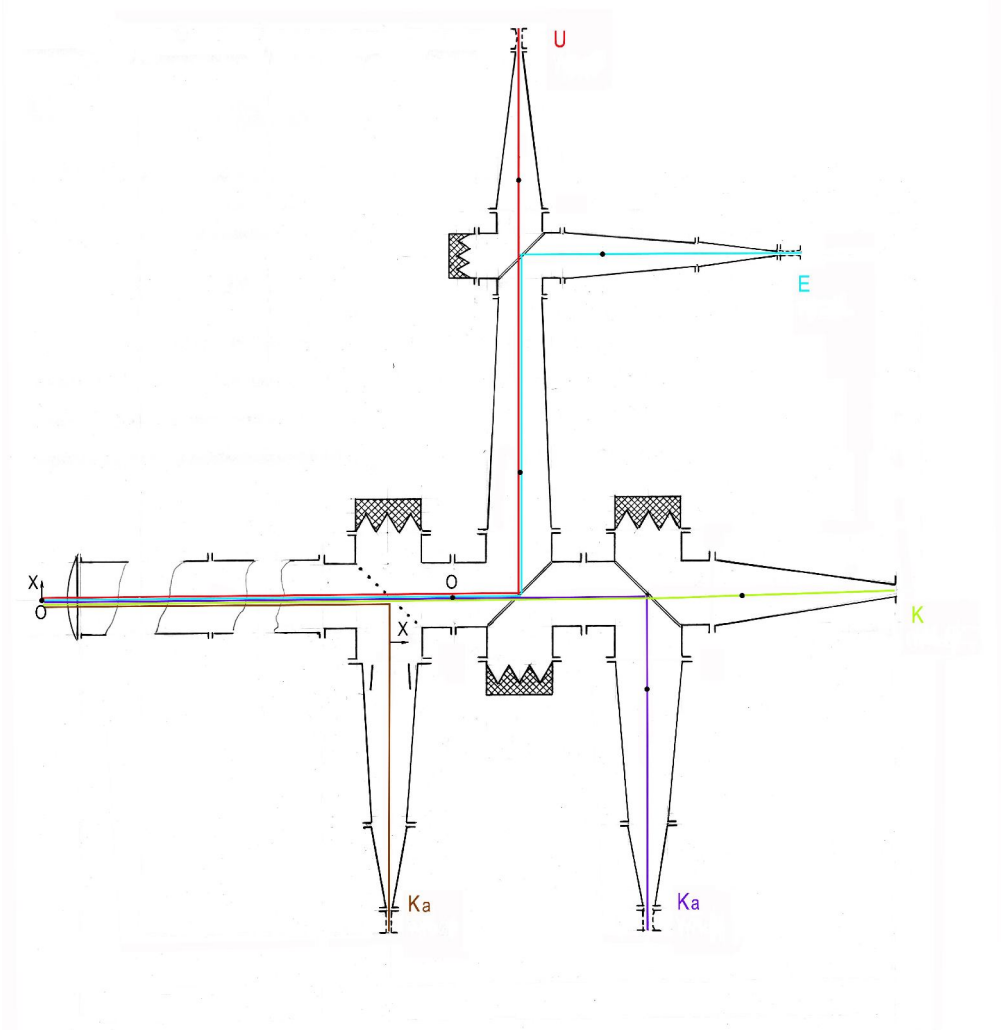


Obr. 2.7: Bokorys vysílací a přijímacích antén na poloidálním řezu tokamakem CASTOR [12]

2.2.2 COMPASS

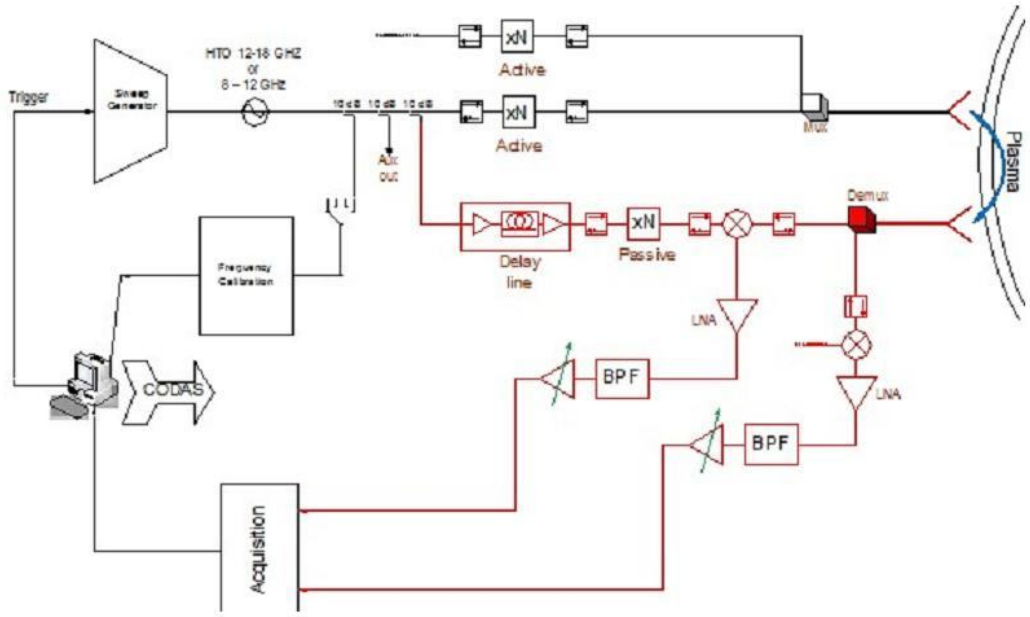
Pro tokamak COMPASS je reflektometrický systém vyvíjen ve spolupráci s Centrem pro jadernou fúzi univerzity v Lisabonu (Centro de Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Univesidade Técnica de Lisboa, CFN/IST). Frekvenční rozsah reflektometru byl zvolen na 18 - 90 GHz, rozdělených do 4 pásem: K (18 - 26,5 GHz), Ka (26,5 - 40 GHz), U (40 - 60 GHz) a E (60 - 90 GHz). V každém z těchto pásem bude reflektometr v režimu řádné vlny, v pásmu Ka bude navíc i reflektometr pro mimořádnou vlnu, která dle [14] změří parametry plazmatu v místech, kde by O vlna nemohla určit polohu cut-off vrstvy kvůli nízké hustotě plazmatu. Z důvodu, že port tokamaku je příliš malý pro umístění pěti nezávislých antén pro reflektometry, musely být tyto antény umístěny mimo tokamak, kde pomocí kvazi-optického směšovače dojde ke spojení signálů o různých frekvencích, které pak jsou vedeny jedním vlnovodem, který funguje jako kvazi-optická anténa a jehož rozměry jsou větší než je třeba pro nejnižší frekvence reflektometru. Před tokamakem tak bude umístěna jen jedna vysílací a jedna přijímací anténa. Výhoda je, že v takto velkém vlnovodu dochází jen k malému útlumu vln [4], nevýhoda je ve složitém mechanismu slučování a oddělování jednotlivých frekvenčních pásem.

Reflektometrický systém je i relativně prostorově náročný, protože elektronika zpracovávající data nesmí být ovlivněna magnetickým polem tokamaku, tedy nemůže být v bezprostředně vedle tokamaku, v praxi v případě COMPASSu budou všechna zařízení umístěna 2 metry od komory tokamaku.



Obr. 2.7: Dva kvazi-optické směšovače, jejichž schéma je na znázorněno na obrázku, budou použity pro reflektometr na tokamaku COMPASS. [14]

Schéma kvazi-optického směšovače je na Obr. 2.7 , stejný je použit i u vlnovodu s odraženou vlnou, který dále rozloží signál na jednotlivé frekvence a druhy vln. Před kvazi-optickým směšovačem je všech pět částí reflektometrického systému v podstatě totožných, liší se jen použitým frekvenčním generátorem. Zapojení např. pásma K pro O vlnu je naznačeno na Obr. 2.8. Signál je vygenerován v napětím řízeném oscilátoru (Voltage Controlled Oscillator, VCO) a přes kvazi-optický směšovač veden anténou do nádoby tokamaku. Ze signálu je oddělena 10 dB referenční část, která směřuje přes zpožďovač do mikrovlnného rozbočovače, kde se smísí s odraženým signálem z tokamaku. Výsledný signál je po zesílení vyhodnocen.



Obr. 2.8: Plánované zapojení pásma K pro řádnou vlnu reflektometru na tokamaku COMPASS. Ostatní pásma budou téměř stejná, lišit se budou jen použitým VCO. [14]

3 Možnosti analýzy naměřených dat

Z každého výstřelu na tokamaku CASTOR byly stovky tisíc naměřených hodnot – jednotky až desítky kanálů snímali s frekvencí 1 MHz pro každý výstřel časový úsek cca 35 milisekund. Z výstřelů na tokamaku COMPASS je ještě několikanásobně více dat vzhledem k dvojnásobné frekvenci sběru dat, delším výstřelům i většímu množství zapojených diagnostik. V prvé řadě je nutné odstranit naměřené hodnoty v čase před začátkem a po konci výstřelu a část, kdy je plazma nestabilní (úvodní a závěrečná část výstřelu).

V druhém kroku je vhodné použít frekvenční filtr, který ořízne frekvence mimo oblast zájmu daného experimentu. Toto se řeší za pomocí Low Pass Filteru (LPF), resp. High Pass Filteru (HPF), který ořízne horní, resp. dolní část spektra. Fourierovou transformací je signál převeden do frekvenční oblasti, poté oříznut dle zadání následně zpětnou Fourierovou transformací převeden do časové oblasti.

Takto zpracovaný signál již můžeme použít ke spektrální a korelační analýze. V té se využívá několik zpracování.

3.1 Autocorrelation

Korelace je koeficient vyjadřující lineární závislost jedné veličiny na jiné. Pro zcela lineárně závislé veličiny tedy je korelační koeficient roven jedné. Matematický výpočet korelačního koeficientu ρ veličin X a Y je ve vzorci (3.1) [6]. EX vyjadřuje střední hodnotu veličiny X, $Var\,X$ je rozptyl měřené veličiny X.

$$\rho(X,Y)=\frac{E[(X-EX)(Y-EY)]}{\sqrt{Var\,X\;\;Var\,Y}} \qquad (3.1)$$

Čitatel zlomku na pravé straně vzorce (3.1) se nazývá kovariance (3.3), vydělením odmocninou ze součinu rozptylů se z kovariančního koeficientu stane korelační, který je normalizovaný na interval $<0,1>$. Autokorelace je, jak je již z názvu patrné, korelace řady naměřených dat samy se sebou. Je zjevné z definice, že výsledkem bude $\rho(X,X)=1$. Nějaký význam má až autokorelogram, jehož princip z autokorelací vychází. Řada je zkopírována i do druhé proměnné, kterou následně posune po krocích až o její délku a spočítá korelační koeficient pro každý daný posuv. Pro výpočet koeficientu, můžeme chtít omezit posunutí na nějaké zadané maximum, častěji anglicky „lag“, pro které je koeficient vypočítáván.

Výsledkem je graf s hodnotami vyjadřující lineární závislost dat v jedné řadě v závislosti na délce posunutí v milisekundách. Pokud se k jedné přiblíží údaj i při jiném posunutí než nulovém, lze říci, že se v datech vyskytuje nějaká perioda, po které se opakují.

3.2 Crosscorrelation

I vzájemné korelace jsou aplikací vzorce (3.1), tentokrát ale na dvě různé časové řady. Opět jednu z nich posouváme až o její délku, respektive o délku okna. Výsledkem je kroskorelogram, tedy graf závislosti korelačního koeficientu $\rho(X,Y)$ na časovém posunutí. Opět platí, že pokud se hodnoty v čase t blíží jedné, lze vypozorovat, že například řada Y v čase t_0+t je (téměř) lineárně závislá na řadě X v čase t. Stejně jako v případě autokorelací je možné zadat maximální „lag“, pro nějž se korelační koeficient vypočítává.

3.3 Crosscorrelogram

Kroskorelace ukazuje lineární závislost jedné veličiny na druhé v závislosti na délce posunutí řady. Pokud potřebujeme zjistit, jak se korelace mění v čase, využijeme 3D graf, kde třetí dimenzi, tedy korelaci, vhodně vyjádří barevná škála. Opět jde o závislost na posunutí (lag), ale na ose y bude vynesen čas výstřelu.

Tento graf pomůže objevit případnou závislost korelace na nějakém vnějším vlivu, který začne působit až v určité fázi výstřelu. Výpočet samotný probíhá po jednotlivých časových oknech zvolené velikosti a na intervalu zvolené šířky v počtu samplů. Tento interval by ideálně mohl být délky poloviny celého signálu, výpočet by pak ale pro běžně dlouhé signály z reflektometrického systému tokamaku trval velmi dlouho.

3.4 Fourier Amplitude Spectrum

Z měřené časové řady získáme diskrétní Fourierovou transformací (v praxi se využívá algoritmus rychlé Fourierovy transformace J. Cooleyho a J. Tukeyho) frekvenční spektrum signálu. Intenzitu jednotlivých frekvencí pak snadno zobrazíme v grafu.

Jen pro doplnění je ve vzorci (3.2) [25] dle uvedena základní rovnice pro přepočet posloupnosti dat X_n v časové oblasti na posloupnost Y_m ve frekvenční oblasti.

$$Y_m = \sum_{n=0}^{N} X_n \mathrm{e}^{\frac{-2\pi i m n}{N}} \qquad n = 0, \ldots, N-1 \qquad (3.2)$$

3.5 Spectrogram

Pod pojmem spektrogram se může skrývat několik druhů grafických znázornění zastoupení jednotlivých frekvencí. Pokud zachytíme časový vývoj musí v podstatě jít o tří dimenzionální graf, případně dvou dimenzionální, pokud třetí směr, tj. zastoupení dané frekvence v konkrétním čase, vyneseme formou barevné škály [27].

Princip je jednoduchý – pomocí krátkodobé Fourierovy transformace se řada naměřených dat převede z časové oblasti do frekvenční po částech – časových oknech. Pro přesnější zobrazení v místech okrajů oken se využívá voleného překryvu (anglicky „overlap“) jednotlivých oken.

3.6 Cross-Phase Spectrum

Důležitou funkcí při porovnání časových řad X a Y je Cross Spectrum f_{XY} (3.4) [2, 17], které je definováno jako Fourierova transformace kovarianční funkce Cov_{XY} (3.3) [6]. V Matlabu výpočet těchto dvou kroků zajišťuje funkce Cross Spectral Density *csd*. Cross Spectrum je obecně komplexní funkce, z nějž můžeme Cross-Phase Spectrum Φ_{XY} časových řad X a Y vyjádřit pomocí vzorce (3.5), k je indexem pořadí naměřených dat dané veličiny.

$$Cov_{XY}(k) = E[(X(k) - EX)(Y(k) - EY)] \qquad (3.3)$$

$$f_{XY}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} Cov_{XY}(k)\, e^{-i\omega k}\right] \quad \omega \in (-\pi, \pi) \qquad (3.4)$$

$$\Phi_{XY}(\omega) = \arctan\left(\frac{Im\, f_{XY}(\omega)}{Re\, f_{XY}(\omega)}\right) \qquad (3.5)$$

Fáze je samozřejmě 2π-periodická. V grafu můžeme vynést Cross-Phase Spectrum v závislosti na frekvenci signálů.

3.7 Coherence

Koherence $C_{XY}(\omega)$ vyjadřuje souvislost fáze signálů X a Y v závislosti na frekvenci, její hodnota leží na intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Definiční vzorec (3.6) využívá vzorce (3.4) použitého na dvě stejné řady.

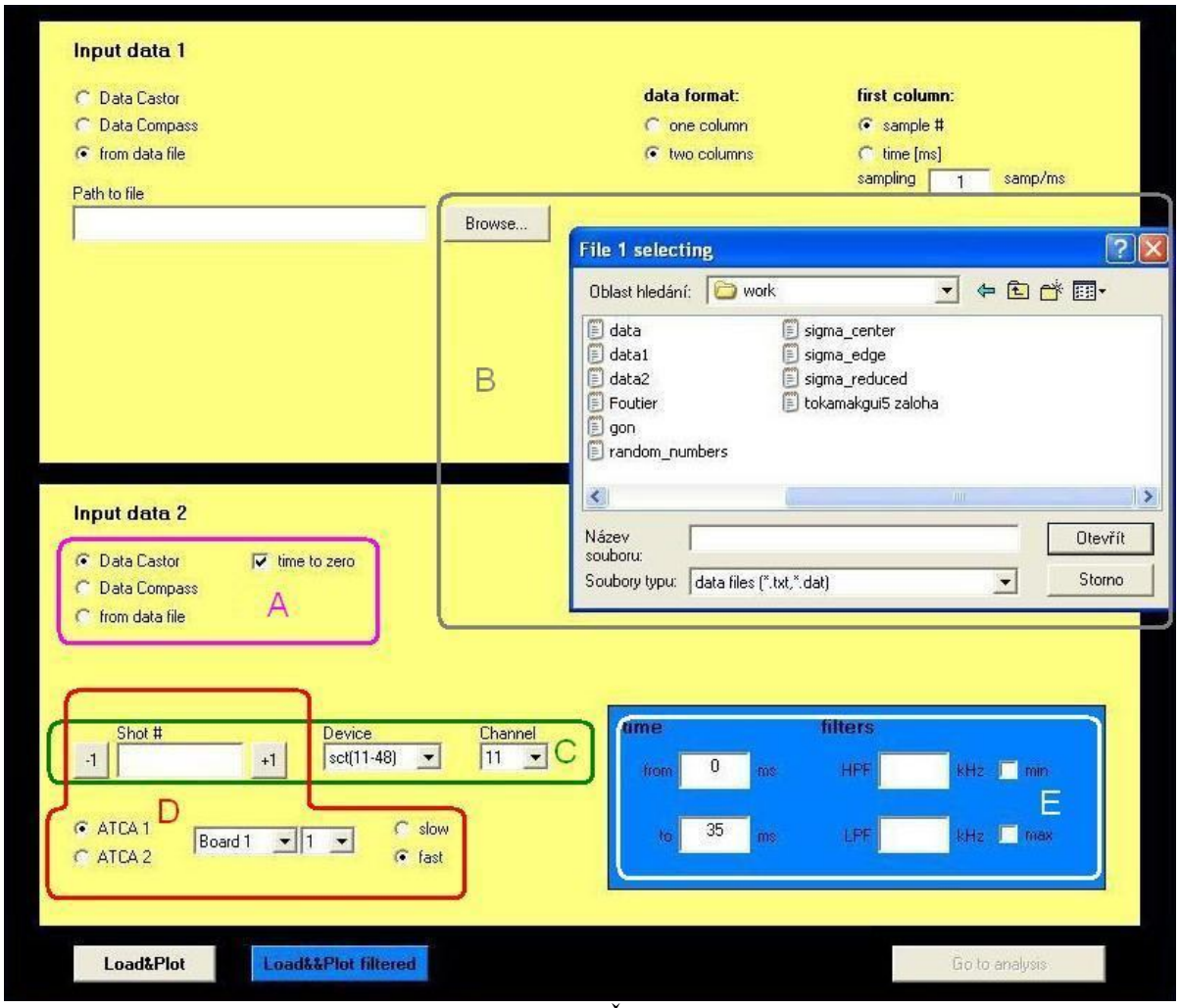
$$C_{XY}(\omega) = \frac{|f_{XY}(\omega)|^2}{f_{XX}(\omega)\, f_{YY}(\omega)} \qquad (3.6)$$

Při výpočtu koherence dává dle [1] nejpřesnější výsledky metoda odezvy s minimálním rozptylem (Minimum Variance Distortionless Response, MVDR), v Matlabu se standardně využívá funkce *mscohere* založená na Welchově metodě [1, 18].

4 Využití programu ReflectometryGUI

Program ReflectometryGUI (z anglického „Graphical User Interface“) slouží k uživatelsky jednoduchému získání naměřených dat z reflektometrie na tokamacích CASTOR a COMPASS. Dále umožňuje i zobrazení, filtraci a spektrální a korelační analýzu dat z dvou různých kanálů, případně výstřelů.

Části „Input data 1“ a „Input data 2“ jsou symetrické, jednotlivé volby programu pro načtení obojích dat jsou zobrazeny na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Snímek rozhraní pro načtení a filtraci dat. Části C a D se nezobrazují současně, výběr závisí na volbě v části A.

4.1 Výběr zdroje dat

Možnost výběru zdroje dat je v části A na Obr. 4.1. Základními možnostmi je zpracování dat z CASTORu a COMPASSu, ale lze nahrát i data uložená v souboru typu .txt nebo .dat. Data z

obou tokamaků jsou uložená v pevném formátu, tedy již není nutné dalších specifikací, jedinou výjimkou je v případě dat z tokamaku CASTOR možnost vynulovat čas k začátku výstřelu.

V případě zpracování dat uložených v souboru je nutné ještě specifikovat systém, v němž jsou data uložena. Program si poradí s variantou, kdy budou data ve dvou sloupcích, kde v prvním je čas, nebo variantou, kde v prvním sloupci je uvedeno pořadí dat, případně je k dispozici jen jeden sloupec s naměřenými daty. V těchto dvou případech je samozřejmě ještě nutné zadat frekvenci snímání dat, tedy sampling.

4.2 Načtení dat

4.2.1 Datový soubor

Jak je patrné v části B označené na Obr. 4.1, snadno se vybere cesta k danému souboru uloženému v rámci počítače.

4.2.2 CASTOR

V části C Obr. 4.1 si lze zvolit číslo výstřelu (1 - 32767), zařízení sběru dat (tct nebo sct) a číslo kanálu (11-18, 20-28, 30-38 a 40-48 pro sct i tct, 51-58, 61-68, 71-78 a 81-88 navíc jen pro tct). Kvůli kompaktnějšímu zobrazení je výběr tct rozdělen na dvě části podle žádaného kanálu. Data jsou dále načtena pomocí funkce *GetData*, kterou napsal M. Hron.

4.2.3 COMPASS

Část D Obr. 4.1 je velmi podobná části C, jen zohledňuje volby, jenž jsou potřeba pro funkci *CompassReadNew* (vytvořenou J. Horáčkem), která umožňuje získat uložená data z výstřelů tokamaku COMPASS, konkrétně od výstřelu 892, předtím byl systém uložení dat odlišný. Nemožnost získat tato data pomocí ReflectometryGUI však není velkým problémem, protože dřívější výstřely stejně neposkytovaly experimentálně hodnotná data.

Je třeba zvolit, jestli chceme data z ATCA 1 nebo ATCA 2, což jsou zásobníky obsahující až 12 měřících karet, tzv. boardů, na každém z nichž je 32 měřících kanálů. Zároveň je ještě třeba zvolit rychlost sběru dat pomalou nebo rychlou (slow, fast). „Slow“ sbírá data s frekvencí 2 kHz, „fast“ tisíckrát častěji, tedy 2 MHz, proto je pro zpracování dat z reflektometrie výrazně vhodnější.

4.3 Časový ořez a filtrace dat

V modré části E Obr. 4.1 jsou umožněny dva podstatné úkony pro zpracování dat. Jak je již zmíněno v kapitole 3, je v prvé řadě nutné vybrat relevantní část výstřelu, prostor „Time Cut“ umožní ořez výstřelu o jeho počáteční a koncovou část, kdy je plazma nestabilní.

Ve vedlejší části „Filters“ je možné zadat dolní a horní mezní frekvenci, pod, respektive nad níž budou data oříznuta. Možnost zaškrtnout „min“, respektive „max“ automatický doplní 0, resp. nekonečno. Pro ořez se využívá filtr, která data fourierovsky transformuje do frekvenční oblasti a po ořezu okrajových frekvencí zpětnou Fourierovou transformací převede zpět do časové oblasti.

Tlačítko „Load&Plot“ vytiskne nezpracovaná data v závislosti na čase. „Load&Plot filtered“ přidá i grafy časově oříznutých a frekvenčně vyfiltrovaných dat.

4.4 Spektrální a korelační analýza

Okno pro výběr analytických metod je na Obr. 4.2. Vlevo dole jsou pro přehled vypsána zdrojová data. Při načtení nových jiných dat je vždy nutné je načíst jedním z tlačítek „Load&Plot“ a následně tlačítkem „Go to analysis“ potvrdit pro spektrální korelační analýzu.

Autocorrelation

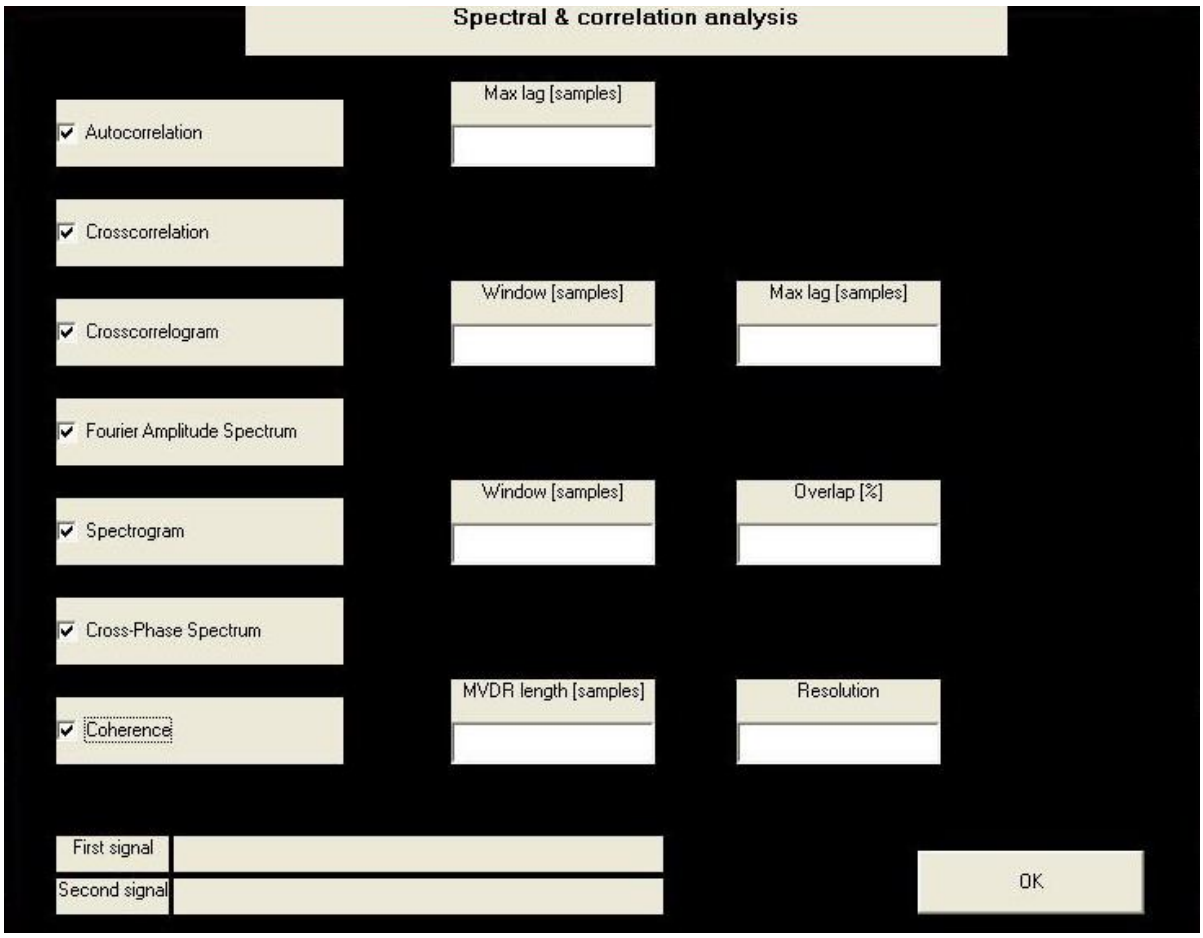
Při zaškrtnutí tohoto pole se zobrazí nabídka vložení okna v počtu naměřených hodnot (samplů). Pokud nebude pole vyplněno, bude signál posunut až o celou svojí délku. Počítáno stejně jako kroskorelace a kroskorelogram pomocí funkce *xcorr*.

Crosscorrelation

Podobně jako pro autokorelace se zobrazí prostor pro vložení okna. Pokud bude zároveň požadován výpočet autokorelace i kroskorelace, vykreslí se oba grafy do jednoho okna.

Crosscorrelogram

Pro kroskorelogram se zobrazí nabídka pro vložení šířky půlintervalu, pro nějž se korelační koeficient vypočítá (Max lag), a také délka časového okna. Časové okno je automaticky přednastaveno na desetinu délky signálu, „lag“ je nastaven na 100 samplů na obě strany. Doba vykreslení grafu se prodlužuje pro větší množství menších oken, ale především pro větší intervaly, kde výrazně stoupá množství výpočtů.



Obr. 4.2: Snímek rozhraní pro výběr možností zpracování načtených dat.

Fourier Amplitude Spectrum

Zobrazí amplitudové spektrum fourierovsky transformovaného signálu. Je použita diskrétní transformace funkcí fft. Do grafu vynese závislost amplitudy na frekvenci.

Spectrogram

I pro spektrogram je třeba vložit počet samplů na okno pro výpočet krátkodobé Fourierovy transformace. Zároveň je zde možnost nastavit v procentech překryv sousedních oken. Přednastavená jsou okna po 1000 samplech s nulovým překryvem. Využívá funkci *spectrogram*.

Cross-Phase Spectrum

Vypočte z výsledku funkce *csd* úhel, který reprezentuje Cross-Phase Spectrum. Zobrazí jako násobek π v intervalu $<-1,1>$ v závislosti na frekvenci.

Coherence

Spočítá koherenci pomocí funkce *coherence_MVDR*, která využívá metody odezvy s minimálním rozptylem. Program umožňuje zadat dva základní parametry pro danou metodu. Okno (window) podobně jako v předchozích zpracováních rozdělí signál na větší množství stejně dlouhých částí, rozlišení (resolution) je parametr, který určuje přesnost výpočtu koherence, jak je uvedeno v [1]. V případě nevyplnění polí se nastaví hodnoty pro okno 100 a rozlišení 200.

4.5 Nároky na software a připojení

Program ReflectometryGUI je vytvořen v programu Matlab, verze 6.5. Při využití starších nebo novějších verzí programu Matlab může dojít k problémům při běhu v souvislosti se změnou syntaxe některých funkcí, případně jiném pojmenování některých standardních funkcí.

Pro získání dat z tokamaku CASTOR je třeba mít jako disk F připojený server F umístěný na adrese *\\147.231.36.239\server_f*. Připojení k tomuto serveru přes FTP je možné pouze z okruhu IP adres ÚFP AV ČR.

Pro data z tokamaku COMPASS je nutné mít připojení na internet z okruhu IP adres ÚFP AV ČR a Javu, verzi 1.5 a novější. Podrobnější informace k nastavení programu Matlab, aby bylo možné se připojit k databázi s naměřenými daty z reflektometrického systému pomocí funkce *CompassReadNew*, jsou k nalezení na *http://cdaq.cfn.ist.utl.pt:8085/SDAS/Access/Matlab*.

Závěr

Vytvořené grafické prostředí umožní snadný přístup k datům naměřeným v průběhu mnoha let provozu reflektometrického systému na tokamaku CASTOR i k nově měřeným datům z tokamaku COMPASS. Rozdělení programu na dvě části (nahrání dat a jejich zpracování) nechává otevřenu možnost snadného rozšíření i na data získaná z jiného zdroje. Pokud by byl možný přístup k datům z tokamaku na jiném výzkumném pracovišti kdekoli na světě on-line, bylo by pak možné snadno porovnat například dva výstřely se stejným počátečním nastavením z různých tokamaků.

Zvláště data z CASTORu se tímto stávají dostupnější pro zpětnou analýzu naměřených dat. Velká část výstřelů, včetně těch, u nichž byl použit reflektometr, zůstala z důvodu časové náročnosti nevyhodnocená. Původní stav vyžadoval manuálně vložit v Matlabu do proměnných číslo výstřelu a označení kanálu, následně spustit program *GetData*, a poté dalšími funkcemi vytvořit požadovaný graf. Program ReflectometryGUI sice potřebuje stejné vstupní parametry, ale jejich vložení je mnohem intuitivnější a následný ořez, filtrace, analýza a zobrazení dat jsou výsledkem několika kliknutí.

Podstatné je i využití pro tokamak COMPASS. Opět platí, že bude výrazně snazší průběžné zpracování dat, rychlá přímá kontrola naměřených dat ihned po výstřelu může pomoci s nastavením parametrů dalšího výstřelu nebo odhalit například problém s funkčností diagnostiky.

V teoretické části práce jsem se systematicky dostal od obecného základu termonukleární fúze postupnými kroky až k použité reflektrometrii na tokamacích CASTOR a COMPASS a jednu kapitolu věnoval matematickému pozadí využitých funkcí při získání dat z databáze a při jejich spektrální a korelační analýze.

Použitá literatura

[1] BENESTY, Jacob; CHEN, Jingdong; HUANG, Yiteng (Arden). Estimation of the Coherence Function with the MVDR Approach. *2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* [online]. May 14-19, 2006, Vol. 3, [cit. 2010-06-03]. Dostupný z WWW: <http://tinyurl.com/3x2p7kj>. ISSN 1520-6149, doi:10.1109/ICASSP.2006.1660700.

[2] CHATFIELD, Christopher. *The Analysis of Time Series*. Sixth edition. USA : CRC Press, 2003. xii, 333 s. ISBN 1-58488-317-0.

[3] CHEN, Francis F. *Úvod do fyziky plazmatu*. Přel. K. Rohlena. Praha : Academia, 1984. 328 s.

[4] CONWAY, G. D., et al. A reflectometer for fluctuation and correlation studies on the Joint European Torus tokamak. *Review of Scientific Instruments*. 1999, Vol. 70, Is. 10. Dostupný také z WWW: <http://www.iop.org/Jet/fulltext/JETP99009.pdf>. ISSN 0034-6748, doi:10.1063/1.1150013.

[5] HEALD, M. A.; WHARTON, C. B. *Plasma Diagnostics with Microwaves*. USA : Wiley, 1965. xvii, 452 s. LCCN 64-23839.

[6] HOBZA, Tomáš. *Matematická statistika* [online]. rozpracovaná verze, 2007 [cit. 2010-06-28]. Dostupné z WWW: <http://tjn.fjfi.cvut.cz/~hobza/mast/mast.pdf>.

[7] KRAMER, G. J., et al. 2D reflectometer modelling for optimizing the ITER low-field side X-mode reflectometer system. *Nuclear Fusion : Special issue on reflectometry.* September 2006, Vol. 46, Num. 9, s. 846-852. doi:10.1088/0029-5515/46/9/S21.

[8] KULHÁNEK, Petr. *Teorie plazmatu : Studijní text pro FJFI ČVUT* [online]. Praha, 2009, 2010-05-30 [cit. 2010-06-28]. Dostupné z WWW: <http://www.aldebaran.cz/studium/fpla.pdf>.

[9] LAWSON, J. D. Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor. *Proceedings of the Physical Society.* 1957, Vol. 70, Is. 1, s. 6-10. doi:10.1088/0370-1301/70/1/303.

[10] LUCAS, L. L.; UNTERWEGER, M. P. Comprehensive Review and Critical Evaluation of the Half-Life of Tritium. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* [online]. July-August 2000, Vol. 105, Num. 4, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/jres/105/4/j54luc2.pdf>.

[11] NEUŽIL, Martin. Vliv jaderných elektráren na životní prostředí. *Zpravodaj EIA* [online]. 18.03.2005, 1999, 1, [cit. 2010-06-27]. Dostupný z WWW: <http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/d66dbc7cbf544e3ac1256fc8004a3515/$file/cast2.html>.

[12] PLÍŠEK, Pavel. *Reflectometric Measurements of Plasma Electron Density Fluctuations in the Core of Tokamak CASTOR.* 2000. 82 s. Diplomová práce. ČVUT, FJFI, Katedra fyzikální elektroniky.

[13] SCHEFFEL, Jan; BRUNSELL, Per. *Fusion Physics : introduction to the physics behind fusion energy.* 1st English edition. Stockholm, 2007. vi, 163 s.

[14] SILVA, A.; ZAJAC, J.; MANSO, M. *Design of reflectometry system for the Compass-D tokamak*. [Nepublikováno]. 25/02/2008.

[15] URBAN, J., et al. NBI system for reinstalled COMPASS-D tokamak. *Czechoslovak Journal of Physics*. October 2006, Vol. 56, Suppl. 2, s. B176-B181. ISSN 0011-4626, doi:10.1007/s10582-006-0195-2.

[16] VAYAKIS, G., et al. Status and prospects for mm-wave reflectometry in ITER. *Nuclear Fusion : Special issue on reflectometry.* September 2006, Volume 46, Number 9, s. 836-845. doi: 10.1088/0029-5515/46/9/S20.

[17] WARNER, Rebecca M. *Spectral analysis of time-series data*. New York : The Guilford Press, 1998. xiv, 227 s. ISBN 1-57230-338-7.

[18] WELCH, P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra : A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. June 1967, Vol. 15, Is. 2, s. 70-73. Dostupný také z WWW: <https://cs.utd.edu/~cpb021000/EE%204361/Great%20DSP%20Papers/Welchs%20Periodogram.pdf>. ISSN 0018-9278.

[19] WESSON, John. *Tokamaks*. Third edition 2004. New York : Oxford University Press, 1987. xiii, 749 s. ISBN 0198509227.

[20] ZAJAC, Jaromír. *Microwave diagnostics on CASTOR*. [Nepublikováno]. May 2003.

[21] *EFDA JET* [online]. 14.12.2009 [cit. 2010-05-01]. Neutral Beam Injection. Dostupné z WWW: <http://www.jet.efda.org/focus-on/plasma-heating-current-drive/neutral-beam-injection>.

[22] *IPP : Max-Planck-Institut für Plasmaphysik* [online]. 02.11.2009 [cit. 2010-05-01]. Wendelstein 7-AS (1988 - 2002). Dostupné z WWW: <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/forschung/w7as/index.html>.

[23] *IPP : Max-Planck-Institut für Plasmaphysik* [online]. 02.11.2009 [cit. 2010-05-01]. Magnetic confinement. Dostupné z WWW: <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/fusion21/magnet/index.html>.

[24] *IPP Summer University for Plasma Physics : September 26 - September 30, 2005* [online]. Edited by Hans Werner Műller and Matthias Hirsch. Greifswald, Germany : Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2005 [cit. 2010-06-01]. 249 s. Dostupné z WWW: <http://fttf.fjfi.cvut.cz/lectures/knihy/ipp_letni_skola.pdf>.

[25] *Matlab* [online]. The MathWorks, Inc., c1984-2010 [cit. 2010-06-28]. Discrete Fourier transform. Dostupné z WWW: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/ref/fft.html>.

[26] *Plasma Physics : an introductory course*. Edited by Richar Dendy. Reprinted 1996. Cambridge : Camridge University Press, 1993. xvii, 517 s. ISBN 0-521-43309-6.

[27] Spectrogram. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 8 July 2003, last modified on 27 June 2010 [cit. 2010-06-28]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Spectrogram>.

[28] *Spherical Tokamak advantages* [online]. 2002 [cit. 2010-05-20]. What is "aspect ratio"?. Dostupné z WWW: <http://fusion.org.uk/st/advantages.html#>.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

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).

V Praze dne 9. července 2010 .....

Vojtěch Lejsek