

Prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
| děkan FMIMS

Posudek disertační práce

Název: **Efektivní řešení synchronizace v rámci softwarově definovaného rádia na FPGA**

Autor: Ing. Pavel FIALA

Školitel: doc. Ing. Jiří MASOPUST, CSc.

Studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektronika

Zhodnocení významu disertační práce

Téma synchronizace v rámci programově definovaného rádia je koncept, o kterém se v odborné komunitě hodně diskutuje, zkoumá a publikuje; z příspěvků v této oblasti (IEEE Journal of Solid-State Circuits, symposia PIMRC, konference ATC aj.) je zřejmé, že žádný z dosavadních výsledků není hotovým řešením této problematiky v požadované šíři. Číslicové zpracování části úlohy má před sebou slibnou budoucnost zejména z pohledu snadné rekonfigurace, nebo průběžné optimalizace parametrů či algoritmizovatelného návrhu jednotlivých bloků. Z toho plyne i konstatování, že disertační práce řeší aktuální problematiku a v této oblasti i přináší zajímavé a původní řešení.

Postup řešení, použité metody, splnění cílů:

Cílem práce je zejména návrh a analýza jednotlivých bloků navržených pro číslicové zpracování signálu se záměrem hardwarového řešení na programovatelném integrovaném obvodu FPGA. Prvním cílem je vytvoření jednotlivých synchronizačních modelů s ohledem na cílovou implementaci do FPGA obvodu s využitím všech výhod které tato platforma nabízí. Druhým cílem je porovnání modelů z několika pohledů – od možnosti vložení do demodulačního řetězce po složitost implementace do reálného řetězce. Samotná formulace jednotlivých cílů není optimální, nicméně uvedené cíle zahrnují celou řešenou problematiku a v této šíři je možno konstatovat, že cílů bylo dosaženo. Postup řešení je adekvátní, logický, použité metody rozboru např. diskrétního fázového závěsu, synchronizačních metod, či optimalizace odpovídají řešenému problému a i ve výsledcích simulací je možné vidět, že bylo vybráno vhodné a implementovatelné řešení.



Přínos práce, výsledky:

Disertační práce řeší komplexním způsobem úlohu synchronizace s nosnou vlnou signálu a tato problematika se, podle porovnatelných publikací, řeší buď analogově, nebo číslicově, ovšem pomocí externího taktování, případně pomocí integrovaného taktování. Žádná z uvedených publikovaných metod neřeší tento problém číslicového zpracování s dostatečnou variabilitou a flexibilitou. V tomto ohledu přináší autor návrh nového řešení, popisuje jednotlivé fáze řešení, hodnotí navržené struktury. Práce obsahuje i příslušné simulace a syntézy vybraných modelů. Autor práce vytvořil metodiku, která může být použita pro návrh nových filtrů ve velmi krátkém čase, automatizovaně. Navržené modely lze tedy snadno konfigurovat podle parametrů konkrétního přijímače a takto zefektivnit celý proces implementace.

Obsahové a formální zhodnocení práce:

Předložená disertační práce je poměrně rozsáhlá, včetně obsahů má 153 stran, ovšem je strukturována logicky do jednotlivých kapitol, ve kterých jsou popisována dílčí řešení včetně diskuse výsledků a výběru implementovatelného řešení. Autor věnoval velkou péči jak textu, tak jednotlivým rovnicím, či ilustracím. Překlepy a drobné formulační chyby se vyskytují zřídka a nijak nesnižují celkovou úroveň práce, například:

- Totožné označení řešených témat ve výčtu cílů práce „a“
- Nejednotné provedení citací v seznamu publikací
- Netradiční umístění vysvětlivek zkratk, seznamů ilustrací a tabulek

Přes nepochybnou snahu autora působí schémata na stranách 133 až 138 nečitelně a ani v textu nejsou komentována jinak než odkazem a tedy není zcela jasné, proč jsou vlastně uvedeny v hlavní části práce. Stejně tak u obrázků 3.5, 3.6 či 4.24 jsou vizuální rozdíly minimální a proto je otázkou, zda použitá forma je optimální. Některé diagramy nejsou graficky jednotné (obr. 8.8 vs. Obr. 6.3) a u některých tabulek (např. XVIII) jsou sice uvedeny výsledky syntézy, ovšem bez bližšího zhodnocení.

Otázky pro obhajobu práce:

1. Z textu disertační práce není zcela zřejmé, zda výsledné řešení je plně implementováno do FPGA obvodu, nebo zda PC je používáno pouze pro vytvoření konfiguračního streamu FPGA obvodu a pro zobrazení některých výsledků – prosím o upřesnění.
2. Na straně 142 autor konstatuje, že bylo dosaženo struktury srovnatelné s komerčními IP bloky – tyto IP moduly jsou jen velmi stručně komentovány (např. na str. 75) a proto prosím o komentář k tomuto tvrzení.
3. V hodnocení funkčnosti výsledného řešení postrádám informaci o tom, jaký je frekvenční rozsah ve kterém je možné nosnou vlnu "zamknout", případně jaká jsou frekvenční omezení tohoto řešení.
4. V práci nebylo provedeno porovnání základních výhod/nevýhod analogového a číslicového řešení, od spotřeby po rekonfigurovatelnost – je možné stručně komentovat základní parametry?



Publikace studenta:

Publikace pana Fialy jsou poměrně rozsáhlé, byť některé výsledky zasahují i do oblastí mimo obor posuzované disertační práce; jedná se o výstupy v podobě článků v recenzovaných sbornících, impaktovaném časopise či uplatněné funkční vzory. Databázové údaje podle Scopus vykazují 6 publikací a 3 citace (2 mimo oblast disertační práce), podle WoS je evidováno 5 publikací s jednou citací. Publikáční činnost autora je na odpovídající úrovni a je dokladem schopnosti samostatně vědecky pracovat a výsledky své práce prezentovat před odbornou veřejností.

Souhrnné doporučení:

Výše uvedené výtky považuji spíše za podněty k odborné diskusi při vlastní obhajobě doktorské práce. Disertační práce pana Ing. Pavla Fialy přináší původní řešení, které bylo odpovídajícím způsobem publikováno a konzultováno před odbornou veřejností. K předloženým závěrům a dosaženým výsledkům nemám připomínky, a přestože je možné v tomto tématu dále pokračovat, předložená disertační práce představuje ucelené dílo a splňuje požadavky na ni kladené, autor v ní prokázal schopnost vědecky pracovat a výsledky své práce prezentovat.

Doporučuji práci Ing. Pavla Fialy k obhajobě pro získání akademického titulu Ph.D. v oboru Elektronika.

V Liberci dne 9. 1. 2017


prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
Technická univerzita v Liberci



Doc. Ing. Vlastimil Vavříčka, CSc.
Katedra informatiky a výpočetní techniky
Fakulta aplikovaných věd
Technická 8, 306 14 Plzeň

OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor práce: Ing. Pavel Fiala

Název práce: **Efektivní řešení synchronizace v rámci softwarově definovaného rádia na FPGA**

Předložená disertační práce se zabývá problematikou synchronizačních mechanismů SDR přijímačů s cílem přesunout určitou část realizace těchto algoritmů z oblasti ryze softwarového zpracování do oblasti řešení pomocí programovatelné logiky, konkrétně obvodů FPGA.

Disertace se skládá z úvodu, dalších osmi kapitol a závěru. Nakonec je uveden seznam použité literatury, seznam obrázků, seznam tabulek, seznam použitých zkratk, seznam publikací autora a jeho profesní životopis. Práce je poměrně rozsáhlá, je napsána na 161 stránkách a je dobře strukturovaná.

Na začátku jsou popsány některé typy fázových závěsů včetně matematického vyhodnocení. K popisu chování se používají klasické přenosové funkce. Vedle toho autor popisuje vztahy pro odhad fázové chyby a optimální vzorkování signálu. Ve třetí kapitole popisuje metody vhodné pro implementaci FIR filtrů v obvodech FPGA. Obšírněji je popsán paralelní model digitálního filtru, pracujícího v režimu pipeline. V následující části je pak popsána syntéza modifikované varianty filtru na hradlovém poli kytu Terasic DE0 s obvodem Altera Cyclone IV. Autor ověřil simulačně několik implementačních verzí a provedl srovnání výsledků.

Čtvrtá, značně rozsáhlá kapitola, je věnována hlavnímu tématu celé disertace a tím je návrh struktur symbolové synchronizace s ohledem na implementaci v FPGA. Ve smyslu optimalizace metodou maximální věrohodnosti jsou navrženy synchronizační mechanismy, včetně komplexního matematického popisu. Autor provedl analýzu chování jak pro případ známé, tak pro případ neznámé posloupnosti symbolů. Některé charakteristiky detektorů byly simulačně ověřeny, menší část pak byla ověřena experimentálně. Kladně je třeba hodnotit skutečnost, pro většinu částí celého návrhu doktorand vždy ověřil a porovnal několik variant.

Pátá kapitola se věnuje návrhu struktur pro synchronizaci fáze nosné vlny. Návrh odpovídajících struktur je podložen poměrně „vydatným“ matematickým popisem. Vlastnosti použitých detektorů byly vyhodnoceny simulací pomocí Matlabu, jejíž výsledky lze nalézt v šesté kapitole. Obrazová dokumentace simulačních výsledků je zpracována velmi pečlivě a dává čtenáři dobrý přehled. Dalším krokem, který doktorand provedl, byla RTL simulace a syntéza přímo na hradlovém poli. K popisu modulu pro symbolovou synchronizaci byl využit jazyk VHDL, vlastní simulace pak v prostředí Modelsim. Autor takto ověřil několik typů detektorů zároveň s různými typy interpolátorů i další části celé synchronizační struktury. Výsledky simulací jsou přehledně uvedeny v tabulkách, nechybí ani grafická forma prezentace výsledků. Závěrem je uveden návrh a realizace experimentální platformy pro SDR.

V posledních dvou kapitolách autor shrnuje dosažené výsledky práce.

K práci mám následující připomínky, některé jsou pouze formální:

1. Na str. 14 se ve vztazích pro přenos vyskytuje označení parametru s , běžně používané v anglosaské literatuře, rovněž tak označení parametru p , které je běžně používáno u nás, a to bez vzájemného vztahu.
2. V některých schématech není dodrženo pravidlo o směru toku signálu, i když by to bylo snadno splnitelné. V některých případech to zhoršuje čitelnost schémat.
3. Práce obsahuje řadu menších jazykových nesrovnalostí, ale najdou se i hrubé gramatické chyby a opakování stejné věty v jednom krátkém odstavci.
4. Celá práce je „prošpikována“ spoustou matematických rovnic a vzorců, o nichž lze pochybovat, že všechny pocházejí z „dílny“ autora. Odkazy na zdroje jsem přímo v textu nenalezl. V závěru práce je sice uveden seznam použité literatury, ten je ale v tomto případě těžko použitelný. Doktorand by měl toto vysvětlit.

Téma práce považuji za aktuální a významné, protože zvyšování kvality a spolehlivosti přenosových systémů, podmiňuje rozvoj dalších odvětví a to nejen průmyslových.

Práci považuji za kvalitní hlavně z toho důvodu, že se autor pokusil celkem úspěšně jednotlivé synchronizační struktury a mechanismy nejen navrhnout, ale i popsat matematickým aparátem, úspěšně provedl simulace, některé implementované metody dokonce experimentálně ověřil.

Formální úprava práce je až na výše uvedené prohršky velmi dobrá, práce je přehledně uspořádána a má dobrou logickou stavbu.

Publikační činnost studenta uvedená v práci je poměrně rozsáhlá a zasahuje i do impaktovaných časopisů. Odpovídá požadavkům doktorského studia.

Významná je i doktorandova účast na několika projektech a podíl na uplatněných funkčních vzorcích.

Závěr:

Student by se měl v průběhu obhajoby uspokojivě vyjádřit k výše uvedeným připomínkám. Jinak disertační práce a v ní uvedené výsledky ukazují, že doktorand je schopen řešit složité výzkumné úkoly.

Na tomto základě v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. a s čl. 107 odst. 1 a 2 Studijního a zkušebního řádu ZČU konstatuji, že předložená disertační práce Ing. Pavla Fialy odpovídá obecně uznávaným požadavkům, a proto ji doporučuji k obhajobě za účelem udělení akademického titulu „doktor“.

Doc. Ing. Vlastimil Vavříčka, CSc.

V Plzni 16. ledna 2017

Doc.Ing.Václav Žalud,CSc
Katedra radioelektroniky
Fakulta elektrotechnická
ČVUT v Praze

OPONENTNÍ POSUDEK

disertační práce p. Ing. Pavla Fialy

”Efektivní řešení synchronizace v rámci softwarově definovaného rádia na FPGA”

Zhodnocení významu disertační práce pro obor (elektronika)

Od počátku devadesátých let min. st. softwarově definované rádio (SDR) mění zásadním způsobem obraz radiokomunikačního inženýrství, a to cestou posilování flexibility rádiových systémů, kterou umožňuje využití programovatelného, softwarově rekonfigurovatelného hardwaru. Definování a programování hlavních radiokomunikačních funkcionalit v softwaru, jež kontroluje heterogenní hardwarovou platformu - tvořenou obvykle procesory GPP, digitálními signálovými procesory DSP a programovatelnými hradlovými poli FPGA, výrazně podporuje vývoj flexibilních a rekonfigurovatelných rádiových sítí. Z tohoto pohledu má předkládaná dizertační práce, týkající se některých aktuálních - avšak ještě nedořešených - dílčích aspektů uvedených obecných trendů, pro vývoj daného oboru jednoznačně velký význam. Fenomén softwarového rádia SDR se totiž dnes promítá nejen do celkové koncepce finálních radiokomunikačních zařízení, ale již před jejich výrobou významně urychluje také vývoj jejich prototypů a etapu experimentálního testování.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění daného cíle

U prvních variant softwarově definovaných přijímačů z devadesátých let min. st. za

vstupními analogovými díly se nacházely ještě analogové mf zesilovače a demodulátory. Teprve poté se uskutečňoval analogově číslicový převod signálu v konvertorech ADC, po němž konečně následovalo další zpracování signálu již v softwarově řízených digitálních obvodech. V dalších letech - především díky technologickému pokroku v oblasti převodníků ADC/DAC a hradlových polí FPGA - vývoj probíhal tak, že se převod ADC přesouval postupně z podetekční části přijímače směrem k anténě, čímž se zeštíhlovala vstupní analogová část přijímače a těžiště zpracování signálu se naopak dostávalo do koncové SDR části. Toto digitální zpracování je však zejména u moderních širokopásmových radiokomunikačních systémů velice náročné, a proto se často implementuje v pomocném samostatném, nebo vestavěném počítači. Hlavním limitujícím faktorem implementace rozsáhlých digitálních rádiových systémů na osobním počítači je však nedostatečný výkon, související mj. s jejich omezenou možností paralelního zpracování dat.

Radikální řešení uvedených problémů přináší koncepce softwarově definovaného rádia, u něhož jsou některé funkcionality implementovány alespoň částečně na hradlových polích FPGA. Z nich je důležitá zejména symbolová synchronizace a synchronizace fáze nosné vlny. A právě rozbor s tím souvisejících nových synchronizačních algoritmů, návrh efektivních synchronizačních modelů a jejich následné ověření, je hlavní náplní posuzované práce.

Nesnadného a vysoce aktuálního vytčeného úkolu, obsahujícího řadu zatím nedořešených teoretických i prakticky orientovaných problémů, se diplomant zhostil úspěšně. Z hlediska metodického postupu je možné hodnotit práci kladně. V úvodních partiích písemné zprávy jsou kompilačním způsobem shrnuty základní dosud známé poznatky o digitálním zpracování signálu v softwarově definovaném přijímači. Pozornost je věnována zejména fázovému závěsu a jeho aplikacím v SDR, především v Costasově smyčce, probírají se také obvody fázové synchronizace přijímačů SDR. Poté se již autor v následujících třech kapitolách věnuje návrhu

struktur FIR filtrů a struktur symbolové synchronizace a také návrhu struktur synchronizace fáze nosné vlny, a to ve všech případech z hlediska jejich implementace na hradlových polích FPGA. V těchto třech kapitolách je obsaženo jádro celé disertační práce, obsahující nejdůležitější původní přínosy autora. Samostatná kapitola je dále věnována otázkám simulace navržených synchronizačních struktur, a to především simulace přenosového řetězce. Za cennou část práce lze potom považovat rovněž návrh a realizaci experimentální platformy softwarově definovaného rádia.

Uvedený postup, zvolený autorem, vedl k dosažení vytčených cílů práce, a proto ho je možné ho bez výhrad schválit.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Předkládaná disertační práce je rozdělena na dvě části. Prvá z nich má kompilační charakter a shrnuje již známé základní poznatky z oblasti digitálního zpracování signálu v softwarově definovaném přijímači, především poznatky týkající se fázového závěsu a jeho aplikací v synchronizačních obvodech softwarově definovaného rádia.

Druhá, klíčová část práce již přináší původní přínosy autora, zaměřené na návrh efektivních synchronizačních struktur pro pokročilou koncepci softwarového rádia, využívajícího ke své implementaci hradlová pole FPGA. Autor se zabývá algoritmy pro symbolovou synchronizaci a synchronizaci fáze nosné vlny a zpracovává návrh efektivní synchronizačních modelů a jejich následné ověření, jím navrženou experimentální platformou. Tímto způsobem eliminuje velkou slabinu současných systémů pro číslicové zpracování signálů v SD přijímačích, probíhající až v koncovém konvenčním počítači, který má totiž pro danou aplikaci obvykle nedostatečný výkon (omezené možnosti paralelního zpracování dat).

Funkci a vlastnosti teoreticky navržených modelů autor ověřuje cestou simulace navržených synchronizačních struktur, především celého přenosového řetězce. Za cennou část práce lze potom považovat návrh a realizaci experimentální platformy softwarově definovaného rádia. Tato platforma má hybridní charakter, neboť využívá pro zpracování číslicového signálu počítač PC ve spojení s logickými zdroji FPGA.

Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Po vnější stránce je písemná zpráva k předkládané disertaci vypracována pečlivě. Její formální úprava, včetně provedení obrázků a grafů, je na výborné úrovni. Určitým formálním nedostatkem je malý počet odkazů ve vlastním textu zprávy, na odborné prameny uvedené v seznamu použité literatury; tyto prameny potom není dost dobře možné při studiu předložené práce a zejména při posuzování její původnosti - využít.

Citelným formálním nedostatkem zprávy je její obsah (str. 6 – 7), který totiž končí stranou 144 (10. Závěr), ačkoliv za touto stranou následuje ještě 16 stran důležitého textu. Seznam literatury obsahuje pouze 27 pramenů, což na disertační práci není právě mnoho. Za závažnější slabinu však považuji skutečnost, že nejnovější z nich je z roku 2012 (s výjimkou dvou internetových pramenů), ačkoliv v následujících čtyřech letech vývoj softwarového rádia rozhodně nestagnoval (viz např. pramen: Software Defined Radio – 20 Years Later, Part I/Part II. IEEE Communications Magazine • September 2015/January 2016, v němž je několik článků zachycujících vývoj SDR právě v uplynulých čtyřech letech).

Jazyková úroveň práce je slušná. Za zbytečné však považuji občasné užívání cizích slov resp. termínů, v případech kdy k nim existují české ekvivalenty (například „front end“ místo „vstupní díl“, nebo „loop filter“ místo „filtr smyčky“ apod). Tyto nedostatky však nijak zásadně neovlivňují formální a jazykovou hodnotu celé práce.

Vyjádření k publikacím studenta

Seznam publikací, jichž je autor předkládané disertace většinou autorem, nebo spoluautorem, obsahuje několik desítek položek a svědčí nepochybně o jeho schopnostech zvládat i náročné vědecko-výzkumné úkoly. Většinu z nich tvoří články v recenzovaných sbornících ke konferencím, a to nejen domácím, ale i zahraničním. V impaktovaných časopisech má disertant jen jedinou publikaci, takže by bylo vhodné, aby v této oblasti v budoucnu svou publikační činnost zvýšil. Naproti tomu disertant vyvíjí poměrně značné aktivity v oblasti realizace a praktického uplatnění různých funkčních vzorků z domény softwarového rádia, což svědčí o jeho nesporných schopnostech a předpokladech pro náročnou hardwarovou práci. Kladně je nutné ocenit i jeho spolupráci v řešení různých projektů agentur GAČR, FRVŠ aj.

Jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě

Svojí disertační prací p. Ing. Pavel Fiala prokázal, že má solidní teoretické znalosti, které dovede úspěšně aplikovat v praxi. Nové poznatky v práci obsažené dokládají, že ovládá vědecké metody a má schopnosti k samostatné vědecké práci. Vzhledem k tomu doporučuji postoupit tuto práci k obhajobě v oboru „Elektronika“ na fakultě Elektrotechnické ZČU v Plzni. V případě kladného výsledku obhajoby je možné udělit doktorandovi akademický titul "doktor - Ph.D." v souladu se zákonem o vysokých školách č. 111/1998 Sb.

Praha, 2. ledna 2017


Doc. Ing. Václav Žalud, CSc.

oponent disertační práce