

Zisk a zpracování hyperspektrálních dat

Jiří Čech

1. ročník, prezenční studium
Školitel: Zdeněk Plíva

Technická univerzita v Liberci,
Studentská 1402/2, 461 17 Liberec, ČR
jiri.cech@tul.cz

Abstrakt—Moje práce je součástí projektu vývoje hyperspektrálního detekčního systému (HDES), který si klade za cíl bezkontaktní detekci řady škodlivých plynů. HDES je složen ze speciálního objektivu a infračervené kamery vybavené výkonnou řídicí jednotkou. Zaměřuji se na kompletaci a validaci dat potřebných k natrénování neuronové sítě a její implementaci do systému HDES. Aby šlo ze získaných dat rozpoznávat jednotlivé plyny je zapotřebí co nejvíce citlivý systém a proměřené charakteristiky všech jeho částí pro následnou korekci získaných dat.

Klíčová slova—Mikrobolometr, hyperspektrální zpracování, infračervené zobrazování, FPGA zpracování

I. ÚVOD

Hyperspektrální kamery jsou hojně používané pro dálková měření, spektroskopii, armádní účely či různá teplotní měření. Využívají čipy s integrovaným mikrobolometrickým polem (FPA), které je schopné zachycovat určitou část spektra elektromagnetického záření a speciální optiku schopnou snímat scénu v různých úzkých částech z celého měřeného rozsahu. Nejpoužívanější oblastí elektromagnetického spektra je infračervené pásmo (IR, záření o vlnové délce od 0,7 μ m do 1000 μ m). FPA existují ve výrobních variantách CCD i CMOS a díky použití různých kombinací materiálů jsou schopné snímat části elektromagnetického spektra od blízkého IR (NIR) až po vzdálené IR (FIR).

Hyperspektrální kamera zaznamenává sadu obrázků, které se složí do tzv. hyperspektrální kostky. Tu reprezentují dvě dimenze obrazu a třetí dimenzí je intenzita bodu obrazu v různých vlnových délkách. Používají se dva způsoby záznamu dat, buď měníme před kamerou úzkopásmový filtr, nebo snímáme pouze řádek scény a na FPA snímáme jeho rozklad do několika vlnových délek, takto po řádcích nasnímáme celou scénu. Pokud je hyperspektrální informace sbírána jen z několika bodů spektra označujeme ji jako multispektrální. Ty jsou využívány zejména v průmyslu, kde je potřeba detekovat jen jednu látku, k čemuž stačí jen vhodně zvolených pár bodů spektra. Hyperspektrální kamery snímají spektrum v desítkách, až stovkách bodů a dokáží tak rozlišit velké množství materiálů. Doba pořízení jedné hyperspektrální kostky je závislá na velikosti a rychlosti senzoru, způsobu záznamu a počtu zaznamenávaných vlnových délek, pohybuje se v řádu stovek milisekund až jednotek sekund.

Největší aktuální pokroky ve zpracování hyperspektrálních dat jsou zaměřeny na témata jako je zisk a komprese dat ze senzoru [8] (prostorové aplikace), nestejnoměrné korekce [5],[6],[7] (ve všech aplikacích) a analýza hyperspektrální kostky [4],[8] (analýza spektra). Všechna zmíněná témata mají vysoké výpočetní nároky při použití výpočtu na CPU. Řešením je používání výpočtů na výkonné grafické kartě (GPGPU) nebo na programovatelném hradlovém poli [3],[6] (FPGA). Využití FPGA má oproti ostatním výhodou ve vyšší robustnosti výpočtu, nižší spotřebě a možnosti přeprogramování.

Dnešní FPGA jsou programovatelná zařízení složená z mnoha samostatných propojitelných a programovatelných bloků, pomocí kterých se realizují uživatelské návrhy (IP). Některá IP jsou v moderních FPGA přímo zaimplementované s malou nebo žádnou možností přenastavení. Jedná se o paměťové řadiče, rozhraní PCIe, Gbit Ethernet, nebo další komplexní podsystémy [9]. Největší výhodou FPGA využívající SRAM (statická RAM), je načítání konfigurace bloků a propojovacích struktur z externí paměti během spuštění systému, kterou je možné kdykoliv přepsat. Tato funkce je vhodná pro samoopravovací algoritmy (ve vesmírných aplikacích) nebo pro změnu části či celého systému během jeho běhu, pomocí techniky dynamické (částečné) rekonfigurace.

Skupina nechlazených FPA schopných detekovat dlouhovlnné infračervené záření (LWIR 8-15 μ m) [7],[10] byla využívána výhradně v armádních aplikacích. Nyní se díky pokrokům ve výrobních procesech a snížení jejich ceny výrazně rozrůstá i do běžné komerce. Dostupná jsou rozlišení od QVGA (320 \times 240) do SVGA (1024 \times 768) a rychlosti se pohybují od několika snímků za sekundu až po desítky snímků za sekundu (výkonnější FPA jsou určena pouze pro armádu a to jen ve vybraných zemích). Využití mají v komerčních oblastech jako je kontrola a detekce problémů elektrických, mechanických a tepelných systémů, zjišťování vlivu elektrické zátěže, odhalování nesprávné instalace systémů, nebo průmyslová spektroskopie.

II. MOTIVACE

Moje práce je součástí probíhajícího projektu vývoje hyperspektrální kamery firmou APPLIC ve spolupráci s Technickou Univerzitou v Liberci a Centra speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC. Cílem projektu je

vytvořit levné spektroskopické ruční zařízení pro použití v bezpečnostních aplikacích (HDES) a ořezanou verzi systému pro průmyslové termometrické využití (IRCA). Hyperspektrální kamera využívá procesní platformu Zynq [9], která ovládá a zaznamenává data z mikrobolometrického LWIR senzoru ULIS PICO640E [10] také umožňuje různé další operace, které jsou důležité pro zpracování získaných dat. Surové naměřené hyperspektrální kostky je potřeba upravit korekcemi charakteristik kamery a optiky. Jedná se o korekce vadných pixelů, nelinearit, teplotní citlivosti a disperze obrazu. Upravená data se budou vyhodnocovat na FPGA v systému HDES. To bude probíhat na principu neuronových sítí [4] z důvodů očekávaných kvalitnějších a rychlejších výsledků a jednodušší implementaci.

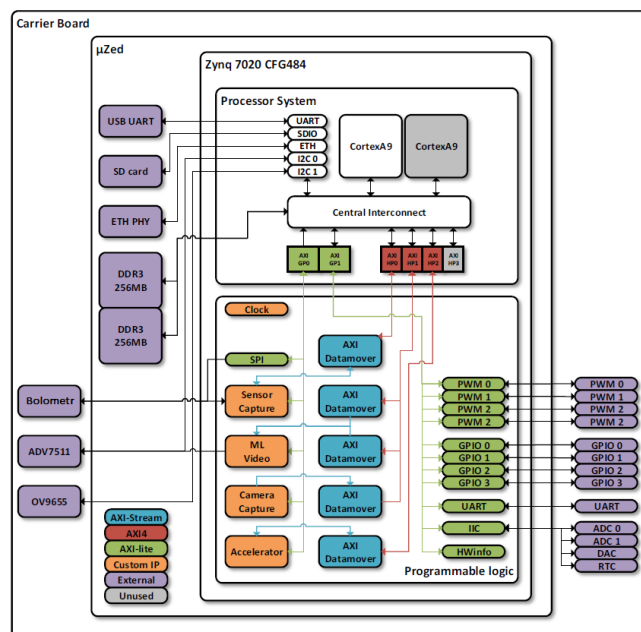
Motivací pro mou práci je nejenom dokončení projektu HDES, ale následné prozkoumání hyperspektrálních dat pořízených systémem HDES, které se liší od běžně dostupných dat pořízených satelity nebo letadly. Pomocí dostupných metod předzpracování a vyhodnocení [11] vytvořit z naměřených dat učící a testovací vzorky potřebné pro tvorbu neuronové sítě. Použít některé pokročilé metody učení neuronových sítí k jejímu natrénování („Deep learning“, „Extreme learning machine“ [14]). Vytvořit vhodné předzpracování dat pro zvýšení přesnosti vyhodnocení. Na konec implementovat výsledný systém vyhodnocování do systému HDES a vytvořit vhodný systém interpretace výsledků. Za účelem zvýšení výkonu dokončit implementaci řízení celého systému pomocí operačního systému Linux. Vytvořit zobrazovací a nastavovací rozhraní pro snadnou obsluhu a možné laboratorní využití.

Protože se jedná o bezbarvé plyny, je potřeba navrhnout jak ověřit a následně i otestovat, zda metody tvorby učících vzorků dávají správné výsledky. Z možných řešení předzpracování dat prozkoumat opravu optických vad systému, výběr dat nezkreslených korekcemi, kompenzaci vlivu koncentrace dané látky na její rozpoznávání. Vyhodnocením zaznamenané hyperkostky bude procentuální obsazení látek a jejich odhadované koncentrace.

III. POPIS SYSTÉMU HDES

Řídící jednotkou pro systém HDES (Obr. 1) je Zynq 7020, což je programovatelné zařízení složené ze dvou samostatných částí: procesního systému (PS) a programovatelné logiky (PL). PS je vícejádrový SoC (systém na čipu) obsahující dva 32bit procesory ARM Cortex A9, vestavěné řadiče (IIC, SPI, 1Gbit Ethernet, USB, atd.), systémové paměti DDR3 a IP vytvořená v PL, které vychází z rodiny Artix-7 (nízkonákladové produkty 7 série Xilinx FPGA s nízkou spotřebou).

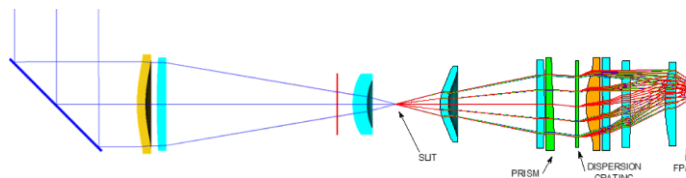
Pro ovládání FPA je použit speciální integrovaný monolitický AD/DA převodník. Ten umožňuje jeho ovládání přes SPI rozhraní a poskytuje z něj obraz přes digitální video port (DVP). Převodník jej obsluhuje analogově, vyžaduje přesné a bezšumové napájení a jeho výstupem je sériové čtení 14bit hodnot jednotlivých pixelů. Systém dále obsahuje několik uživatelských IP a další rozhraní jako je HDMI/VGA výstup, VGA kameru (viditelné spektrum) a několik PWM



Obr. 1. Blokové schéma systému HDES [13]

výstupů pro ovládání objektivu a clonky. Systémové zprávy jsou posílány po USB-UART rozhraní, ovládání a data jsou posílány přes 1Gbit Ethernet protokolem TCP/IP do uživatelského počítače. Kamera umožňuje ukládání dat na vnitřní SD kartu, ve které je uložen i její hlavní program.

Hyperspektrální objektiv kamery (Obr. 2) je navržen jako



Obr. 2. Zjednodušené schéma objektivu HDES [13]

úzká štěrbinu s mřížkou, tím dosahuje vysoké propustnosti zařízení. Scéna se snímá po sloupcích, přičemž v každém snímku každého sloupce je zaznamenána jeho spektrální charakteristika rozprostřená na více než 280 pixelů, to umožňuje dosáhnout maximálního spektrálního rozlišení $1,6 \text{ cm}^{-1}$. Skutečné rozlišení je silně závislé na tloušťce štěrbinu a odstupu signálu od šumu (SNR) kamery. Optika je vybavena otočným zrcadlem, pomocí kterého může nasnímat celou scénu (tzv. „push broom“ metodou). Systém dosahuje velikosti zorného pole (FOV) v horizontálním směru 40° a ve vertikálním 10° . Dopadající záření v různých spektrech na FPA se konvertuje na digitální data následovně:

- Elektromagnetické záření dopadající na senzor mění odpor jednotlivých mikrobolometrů.
- Mění se proud mikrobolometrickou buňkou je převáděn na napětí a zesilován transimpedančním operačním zesilovačem.
- Přechodové napětí z matice mikrobolometrů je vzorkováno a kvantováno vstupem AD převodníku.

- Data z DVP (všechny hodnoty obrazu za sebou) jsou ukládána do DDR paměti. Během tohoto kroku je možné provést korekci nasnímaných dat.
- Poté se data odešlou do počítače, kde je možné je složit do hyperspektrální kostky a dále zpracovávat.

Pro systém HDES existují dvě verze řídicího firmware. Ten aktuálně používaný využívá knihoven dodávaných výrobcem k dané verzi desky (BSP) od Xilinx a rozšířené o knihovny pro TCP/IP komunikaci a konverzi obrázků. Ovladače pro uživatelská IP jádra jsou vyvíjeny samostatně. Druhý firmware je experimentální a je na bázi operačního systému Linux vytvořeného nástrojem „PetaLinux tool“. Je vyvíjen za účelem dosažení vyššího výkonu a lepší podpory nových rozšíření systému, ale zatím podporuje jen základní funkce kamery.

IV. ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH DAT

V důsledku odchylek při výrobním procesu má každý mikrobolometr ve FPA rozdílnou charakteristiku tepelné citlivosti a tepelného odporu [7]. Pixel je klasifikován jako vadný, pokud se jeho citlivost liší o více než 20% oproti průměrné citlivosti celého FPA. Systém HDES provádí korekci vadných pixelů tak, že místo vadného pixelu používá data pixelu předním. Tato korekce je při sériovém čtení velmi snadno implementovatelná a dobře funguje, i pokud je více vadných pixelů vedle sebe. Jiná použitelná metoda vypočítává hodnotu vadného pixelu na základě jeho okolí, ale její implementace zatím nebyla realizována.

Existuje několik přístupů ke korekci rozdílů mezi mikrobolometry a jejich nelinearity (NUC). Jednobodová NUC vyrovná posunutí pro celé FPA do jednoho pracovního bodu. Důsledkem teplotních změn FPA [1],[7] dochází k posunutí pracovního bodu, na který byla korekce počítána a tudíž i k jejímu znehodnocení. To vede k nutnosti opakování provedení korekce, které je v průběhu měření nevhodné. Dvoubodová NUC [1],[5],[6] využívá měření s černým tělesem o dvou známých teplotách, ze kterého se vypočítá posun a zesílení každého mikrobolometru. Jedná se o nejpoužívanější korekční metodu a je vhodná pro menší teplotní rozsahy (do 100 °C). Pro větší dynamické rozsahy dochází u dvoubodové korekce k velkým odchylkám.

Řešením je použití vícebodové NUC [3] vytvořené z několika lineárních korekcí napříč celým rozsahem. Zde je problémem, definování kolik lineárních korekcí je dostatečných, nepřesnosti na okrajích mezi nimi a paměťová náročnost při jejich velkém množství. Výkonná FPGA dávají možnost použití polynomiální NUC vyšších řádů, která dosahuje nízkých chyb napříč celým rozsahem. Měří se stejně jako vícebodová NUC tzn. proměřit celý rozsah senzoru v jemném kroku. Naměřená data se pro každý mikrobolometr aproximují polynomem n -tého řádu, minimalizuje se relativní odchylka od naměřených dat. Koeficienty polynomu jsou poté uloženy v paměti a nahrávají se postupně do korekčního modulu v FPGA při čtení daného pixelu. FPGA použité v systému HDES zvládne v reálném čase polynomiální NUC až pátého řádu. Naměřená data uložená v hyperkostce potřebují korekci chyb zanesených objektivem, jedná se

hlavně o nerovnoměrné zesílení ve směru od optického centra rozdílnou pro každý úhel natočení zrcadla.

Výsledkem analýzy hyperspektrálních dat je rozhodnutí kde je jaký materiál. Obecně se při vyhodnocování uvažuje, že jeden pixel reprezentuje pouze jeden materiál. Informace o materiálu jsou obsaženy v jeho spektrální charakteristice, díky tomu, že každý materiál pohlcuje, vyzařuje nebo odráží záření v různých vlnových délkách. Nejvyšších hodnot dosahuje tzv. černé těleso, které pohltí veškeré dopadající záření a vyzaří maximální množství energie v závislosti na teplotě podle Planckova vyzařujícího zákona. Ten definuje průběh intenzity záření černého tělesa o dané teplotě napříč celým spektrem. Pro porovnání s ostatními materiály se definuje tzv. Emisivita jako poměr intenzity záření reálného tělesa a absolutně černého tělesa. Tato bezrozměrná veličina je závislá na vlnové délce a není nikdy vyšší než 1.

Hyperspektrální data jsou často velmi objemná, proto se řeší jejich de/komprese, popřípadě odstranění nepotřebných spektrálních pásem. Existují databáze naměřených spektrálních charakteristik jednotlivých materiálů, ale reálná data jsou zatížena vlivem pozadí, šumem a odrazy okolí. Proto se místo přímého porovnávání s laboratorními vzorky nejprve vyhledají reprezentativní průběhy [2], které jsou nejvíce rozdílné od ostatních a představují tak nejlépe některý z obsažených materiálů. Nejpoužívanější metoda uvažuje lineární závislost mezi ostatními porovnávanými a reprezentativními průběhy. Metodou nejmenších čtverců se vypočítá podobnost průběhu s každým reprezentativním průběhem. Vyhodnocovaný průběh pak patří do skupiny s reprezentativním průběhem, u kterého má nejnižší spočtenou hodnotu.

Dostupné reprezentativní průběhy se uvažují jako lineární nezávislé, tudíž při vyhodnocování jednoho materiálu jsou výsledky zatíženy pouze šumem. Pokud jich vyhodnocujeme více, jsou problémy na okrajích a přechodech materiálů, protože dochází k jejich prolínání. Výsledky pak mají více podobných nízkých hodnot v závislosti na poměru prolínaných materiálů. Je tedy potřeba stanovit rozpoznávací mez pro každou látku, nebo uvažovat závislosti nelineární.

Hyperspektrální kostka obvykle obsahuje jen malé množství pixelů reprezentující jen jednu látku. Většinou je pixel složen z jednoho či více materiálů souhrnně označovaných jako pozadí. To se dá rozložit na lineární kombinaci hledaného materiálu a pozadí s tím, že vždy budeme mít všude nějaký šum. Pozadí můžeme definovat buďto statistickou distribucí, nebo strukturálně [12].

V. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Byl sestaven první prototyp systému HDES, obsahující první funkční verzi objektivu od TOPTEC a infrakameru IRCA1 od firmy APPLIC, která disponuje mnoha rozšířeními, které zatím nejsou využity. K systému jsem vytvořil ovládací program, přes který lze ladit jednotlivé jeho funkce. Program umožňuje mnoho typů záznamu a zobrazení dat, které jsou pak dále využívány a zkoumány. Vyvíjený firmware systému od TUL, má odladěné všechny důležité funkce a v návaznosti na mé testování, byly některé funkce přidány nebo modifikovány.

Ze systému HDES byla úspěšně zaznamenána první data, která odhalila velmi nízkou energetickou citlivost celého systému. Pracuje se tedy nyní na jejím zvýšení, aby bylo možné naměřit lepší data potřebná pro vytvoření kvalitního identifikátoru daného souboru látek. Ze strany TOPTECu se jedná o vytvoření nového objektivu s koncentrovanějšími paprsky na úkor spektrálního rozlišení. Ze strany APPLICu probíhají pokusy na snížení šumu záznamového systému v IRCA1.

Zatím pracuji s jedním vzorkem úspěšně zaznamenané hyperspektrální kostky. Testuji na něm vyhodnocovací skript v MATLABu, jehož cílem je extrakce tréninkových dat pro učení neuronových sítí. Je založen na výpočetních metodách obsažených v dostupném balíku HyperspectralToolbox [11]. Provádí normalizaci dat, extrakci vzorových dat na základě rozdílů spektrální charakteristiky (ATGP) a následně identifikaci materiálu pomocí metody nejmenších čtverců (UCLS). Data zatím neprochází žádnou korekcí, protože vlivem vysokého šumu nepřináší žádné velké zlepšení.

Vyhodnocená data slouží pro experimentální tvorbu neuronových sítí. Jejich tvorbu provádím pomocí nástroje TORCH využívající jazyka LUA, snadno editovatelného ve studiu ZeroBrane. Vytvořil jsem skripty umožňující načtení vyhodnocených dat, učení a testování neuronové sítě nastavených velikostí. Zatím bylo dosaženo nejlepší shody vyhodnocených dat pouhých 60%. Neimplementoval jsem ještě některé metody pro zlepšení dosažených výsledků, např. pomocí zahrnutí okolních bodů, které zdatelně zvyšují úspěšnost vyhodnocení. Dalším důvodem nízké shody je zmíněný vysoký šum, díky čemuž jsou rozdíly mezi jednotlivými výstupními skupinami minimální.

VI. CÍLE

Cílem mé práce je vytvoření učící databáze pro tvorbu vyhodnocovacích algoritmů pomocí systému HDES. Natrénovat neuronovou síť s dostatečnými vlastnostmi pro použití a realizovat jí pomocí dostupného FPGA. Díky otevřenému přístupu k celému systému HDES lze zkoumat všechny jeho části odděleně, či je vylepšit za účelem zvýšení citlivosti systému.

Systém HDES by měl být přenosný systém pro použití v terénních podmínkách schopný identifikovat řadu škodlivých plynů. Systém musí být schopen velmi rychle data zaznamenat a poté je pomocí kvalitního identifikátoru co nejrychleji vyhodnotit, aby měly pozemní zásahové složky aktuální naměřené hodnoty k dispozici co nejdříve.

VII. ZÁVĚR

Systém HDES je založen na moderních technologiích a klade si náročné cíle, aby byl v praxi užitečný. Provádí se mnoho optických a elektrických testování všech jeho částí a pracuje se na řešení zjištěných nedostatků, nebo na jejich vylepšení.

Podílím se na dokončení systému, aby byl schopen měřit věrohodná data v dostatečné kvalitě pro experimenty s možnými identifikátory. Přípravuji a zkouším využití neuronových sítí pro vyhodnocování hyperspektrálních dat,

kteří zatím nedosahuje kvalitních výsledků. Příčinou je vysoký šum systému a očekávají se komplikace s reálným pozadím, které je na rozdíl od leteckých nebo satelitních snímků velmi různorodé. Po dokončení experimentů a natrénování použitelné neuronové sítě, implementují vyhodnocovací systém na FPGA. Dočasně je záznam a vyhodnocení řízené přes PC, ve finální verzi HDES se počítá s řízením pomocí firmware, ale v budoucnu pro zvýšení výkonu bude firmware nahrazen operačním systémem Linux.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena Studentskou Grantovou Soutěží 2016 Technické Univerzity v Liberci. Dále byla podpořena firmou APPLIC s.r.o., Centrem speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC a Ministerstvem vnitra České Republiky v rámci projektu číslo VG20132015110.

LITERATURA

- [1] Farhat,H., Bazin,E., Haese,S., El Zein, G., „An infrared thermal image acquisition system for intra-vehicle applications“, 11th International Conference on ITS Telecommunications, ITST 2011, pp. 426-430, 2011
- [2] Keshava, N. Mustard, J.F., „Spectral unmixing“, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 19, no. 1, pp. 44-57., 2002
- [3] S. Lopez, T. Vladimirova, C. Gonzalez, J. Resano, D. Mozos and A. Plaza, „The Promise of Reconfigurable Computing for Hyperspectral Imaging Onboard Systems: A Review and Trends,“ in Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 3, pp. 698-722, March 2013.
- [4] Melgani,F., Bruzzone,L., „Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines“, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol 42, pp. 1778-1790, 2004
- [5] Mudau,A.E. and Willers,C.J. and Griffith,D., Le Roux,F.P.J., „Non-uniformity correction and bad pixel replacement on LWIR and MWIR images“, Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference 2011, SIEPCPC 2011, 2011
- [6] Sosnowski,T., Bieszczad,G., Kastek,M., Madura,H., „Processing of the image from infrared focal plane array using FPGA-based system“, Proceedings of the 17th International Conference - Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES 2010, pp. 581-586, 2010
- [7] Tissot,J.L., Trouilleau,C., Fieque,B., Crastes,A., Legras,O., „Uncooled microbolometer detector: Recent developments at ULIS“, Opto-electronics Review, vol. 14., pp. 25-32, 2006
- [8] G. Yu, T. Vladimirova, and M. N. Sweeting, „Image compression systems on board satellites“, Acta Astronautica, vol. 64, no. 9–10, pp. 988–1005, May 2009.
- [9] Xilinx Inc., „Zynq-7000 All Programmable SoC“, online <<http://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/zynq-7000.html>>, 2016
- [10] ULIS-IR, „Pico640E technical datasheet“, online <<http://www.ulis-ir.com>>, 2016
- [11] Isaacgerg, „MATLAB Hyperspectral Toolbox“, online <<https://github.com/isaacgerg/matlabHyperspectralToolbox>>, April 2015
- [12] Manolakis, Dimitris et al., „Hyperspectral Image Processing for Automatic Target Detection Applications.“, 2003
- [13] Hampl V., „Hyperspektrální kamera“, interní dokumentace, Applic s.r.o, online <<http://www.applic.cz>>, 2015
- [14] Huang, G. „An insight into extreme learning machines: Random neurons, random features and kernels. Cognitive Computation“, 6(3), 376-390. doi:10.1007/s12559-014-9255-2, 2014