

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-17-0631**
Koexistencia fotonických senzorických systémov a sietí v rámci internetu vecí

Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Milan Dado, PhD.**
Príjemca **Žilinská univerzita v Žiline - Fakulta elektrotechniky a
informačných technológií**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Katedra multimédií a informačno-komunikačných technológií, FEIT UNIZA
Inštitút Aurela Stodolu, FEIT UNIZA

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

University of Malaga, Španielsko
University of Strathclyde, Spojené kráľovstvo
NRC Canada, Kanada
Université Paris-Saclay, Francúzsko
University Grenoble Alpes, Francúzsko
Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, Česká republika

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

- neboli udelené

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

- [1] FRNIAK, Michal, Miroslav MARKOVIC, Patrik KAMENCAY, Jozef DUBOVAN, Miroslav BENCO a Milan DADO. Vehicle Classification Based on FBG Sensor Arrays Using Neural Networks. Sensors [online]. 2020, 20(16), 4472. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s20164472
- [2] SEYEDZADEH, Saleh, Andrew AGAPIOU, Majid MOGHADDASI, Milan DADO a Ivan GLESK. WON-OCDMA System Based on MW-ZCC Codes for Applications in Optical Wireless Sensor Networks. Sensors [online]. 2021, 21(2), 539. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21020539
- [3] DUBOVAN, Jozef, Jan LITVIK, Daniel BENEDIKOVIC, Jarmila MULLEROVA, Ivan GLESK, Andrej VESELOVSKY a Milan DADO. Impact of Wind Gust on High-Speed Characteristics of Polarization Mode Dispersion in Optical Power Ground Wire Cables. Sensors [online]. 2020, 20(24), 7110 [vid. 2021-01-18]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s20247110
- [4] MÜLLEROVÁ, Jarmila, Pavel ŠUTTA, Pavel CALTA, Marie NETRVALOVÁ a Rostislav MEDLÍN. Modifications of effective optical properties of a-Si:H/a-SiNx:H multilayers by means of multilayer design and sublayer thickness. OSA Continuum [online]. 2020, 3(6), 1385 [vid. 2021-01-18]. ISSN 2578-7519. Dostupné z: doi:10.1364/OSAC.389612

- [5] MÜLLEROVÁ, Jarmila, Pavol ŠUTTA a Michaela HOLÁ. Optical Absorption in Si:H Thin Films: Revisiting the Role of the Refractive Index and the Absorption Coefficient. *Coatings* [online]. 2021, 11(9), 1081. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings11091081
- [6] DRUSA, Marian, Ladislav KAIS, Jozef DUBOVAN, Miroslav MARKOVIC, Frantisek BAHLEDA a Martin MECAR. Measurement of Axial Strain of Geogrid by Optical Sensors. *Sensors* [online]. 2021, 21(19), 6404. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21196404
- [7] DURCEK, Viktor, Michal KUBA a Milan DADO. Investigation of random-structure regular LDPC codes construction based on progressive edge-growth and algorithms for removal of short cycles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* [online]. 2021, 4(9(112)), 46–53. ISSN 1729-4061. Dostupné z: doi:10.15587/1729-4061.2021.225852
- [8] VAŇKO, Matúš, Jarmila MÜLLEROVÁ a Milan DADO. Numerical Analysis of Parameter Optimization in Slow Light Phase - Shifted Fiber Bragg Gratings. *Materials Transactions*. 2022 – akceptované
- [9] BENEDIKOVIC, Daniel, Xavier Le ROUX, Carlos ALONSO-RAMOS, Cécilia DUPRÉ, Bertrand SZELAG, Pavel CHEBEN, David FOWLER, Sylvain GUERBER, Milan DADO, Éric CASSAN, Delphine MARRIS-MORINI, Frédéric BOEUF a Laurent VIVIEN. Low-Loss On-Chip Surface Grating Couplers Engineered Using. In: 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics. 2021, s. 4–5.
- [10] BENEDIKOVIC, Daniel, Leopold VIROT, Guy AUBIN, Jean-Michel HARTMANN, Farah AMAR, Xavier LE ROUX, Carlos ALONSO-RAMOS, Milan DADO, Eric CASSAN, Delphine MARRIS-MORINI, Jean-Marc FEDELI, Frederic BOEUF, Bertrand SZELAG a Laurent VIVIEN. Heterostructured silicon-germanium-silicon p-i-n avalanche photodetectors for chip-integrated optoelectronics -INVITED. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2021, 255, 01002. ISSN 2100-014X. Dostupné z: doi:10.1051/epjconf/202125501002
- [11] CIBIRA, Gabriel. Telecommunication Services and IoT FBG Sensing Shared in PON Optical Fiber Line. In: 2021 Communication and Information Technologies (KIT) [online]. B.m.: IEEE, 2021, s. 1–5. ISBN 978-1-6654-2880-4. Dostupné z: doi:10.1109/KIT52904.2021.9583745
- [12] WANGÜEMERT-PÉREZ, J Gonzalo, José Manuel LUQUE-GONZÁLEZ, Carlos PÉREZ-ARMENTA, Robert HALIR, H JENS, Milan DADO, Jan LITVIK, Pavel CHEBEN, Iñigo MOLINA-FERNÁNDEZ a Alejandro ORTEGA-MOÑUX. Bricked patterning: a new concept to enhance the capabilities of subwavelegth grating waveguides. In: IEEE Group IV Photonics Conference. 2021, s. 3–4.

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky za celé obdobie riešenia projektu vzhľadom na stanované ciele môžu byť rozdelené do troch skupín podľa charakteru etáp, v rámci ktorých boli tieto výsledky získané:

1. Začlenenie signálov fotonických senzorických systémov do plne fotonických vysokorychlostných linkových traktov v koexistencii s rastrami multiplexov podľa medzinárodných štandardov.
 - Boli stanovené možnosti integrácie signálov zo senzorov do v súčasnosti využívanej frekvenčnej mriežky optických komunikačných sietí, najmä sietí PON WDM, vrátane možností využitia paralelných prenosových kanálov pre efektívnejší prenos informačného alebo senzorického signálu.
 - Bolo navrhnuté RWA prepínanie vo vyšších vrstvách komunikačných systémov so zámerom aplikovať zásady tzv. „zelených technológií“.
 - Bol navrhnutý plne optický chemický senzor KCN pre senzorické siete.
 - V rámci numerického modelovania boli ukázané možnosti zníženia vplyvu degradačných mechanizmov v optickom vlákne, ktoré sú primárne využívané pre prenos informácií z optických a fotonických senzorov, konkrétne využitie digitálneho spracovania signálu (DSP) vo forme normalizovaného algoritmu najmenších štvorcov (NLMS) pre kompenzáciu chromatickej disperzie pri prenose modulovaného optického signálu optickým vláknom.
 - Uskutočnili sme experimentálnu charakterizáciu efektov šírenia založených na PMD v optických vláknach ovplyvnených nárazmi vetra a zmenou teploty s cieľom poukázať na možnosti využitia štandardného optického vlákna ako senzora. Výskum sa uskutočnil na komerčne využívanom optickom vláknovom spoji, ktorý vedie cez optické káble umiestnené v zemniacom lane. Skúmané optické spojenie dlhé 111 km pozostávalo z inštalovaných optických vlákien a bolo merané s dostupnými 88 kanálmi v C pásme. Sledovanie zmeny

prostredia spôsobené podmienkami vetra počas niekoľkých po sebe nasledujúcich dní s časovým rámcom 60 sekúnd a zisťovanie vplyvu PMD na výkon spojenia. Namerané maximálne hodnoty diferenciálneho skupinového oneskorenia (DGD) boli 4 až 10 ps pri rýchlosti vetra od 5 do 20 m/s. Okrem toho sa experimentálne namerané údaje použili v numerickom modeli na posúdenie kvality optického spojenia.

•Kvantifikovali sme možnosti využitia modulačných formátov vyšších rádov, založených na kľúčovaní s diferenciálnym fázovým posunom a diferenciálnom kvadratúrnym kľúčovaní s cieľom zvýšenia výkonnosti v súčasnosti používaných gigabitových pasívnych optických sietí a pasívnych optických sietí novej generácie. Simulácie ukazujú zlepšenie odhadu bitovej chybovosti o 2 rády.

2. Začlenenie senzorických systémov založených na prvkoch vláknovej a integrovanej optiky ako súčasti plne fotonických komunikačných sietí.

V zmysle uvedeného cieľa sa za celé obdobie riešenia projektu realizovali tieto výskumné činnosti:

• Analýza a spracovanie signálov z optických senzorov uložených vo vozovke doplnených o kamerové záznamy, pomocou ktorých sa vykonáva klasifikácia jednotlivých typov vozidiel. Bol rozpracovaný koncept klasifikácie vozidiel založených na neurónových sieťach v inteligentných dopravných systémoch. Tento koncept efektívne využíva dáta získané z optických senzorov uložených vo vozovke (horizontálne a vertikálne orientovaných) na pôde Žilinskej univerzity v Žiline a vhodne ich prepája s kamerovým záznamom, pričom samotné spracovanie a vyhodnocovanie dát sa vykonáva pomocou neurónovej siete. Boli skúmané a aplikované možnosti využitia neurónových sietí pre automatickú analýzu veľkého množstva dát, získavané z optickej senzorickej siete FBG (Fiber Bragg Grating) senzorov. Štandardné konvolučné neurónové siete AlexNet, GoogLeNet, a ResNet-50 sú sľubnými kandidátmi pre tento účel použitia, keďže vykazovali presnosť klasifikácie v rozsahu od 62 až 78 %. Ďalej bola vytvorená novo navrhnutá neurónová sieť na klasifikáciu vozidiel z množiny údajov sady snímačov. Zo získaných experimentálnych výsledkov je zrejmé, že nami navrhovaná neurónová sieť bola schopná oddeliť nákladné vozidlá od ostatných vozidiel s presnosťou 94,9% a klasifikovať vozidlá do troch rôznych tried s presnosťou 70,8%. Na základe experimentálnych výsledkov sa odporúča rozšíriť pole senzorov. Ďalšie rozpracovanie tejto problematiky viedlo k skúmaniu vhodnosti pokročilých konvolučných neurónových sietí, ktoré vykazovali presnosť klasifikácie v rozsahu 90 až 97%, čo je oproti predošlým neurónovým sieťam viac ako 20% nárast.

• Bol navrhnutý algoritmus umožňujúci počítačový návrh LDPC kódov s náhodnou štruktúrou, ktorého úlohou je generovať Tanner graf s čo najmenším počtom krátkych cyklov. Hlavným prínosom tohto výskumu je unikátny prístup k procesu odstraňovania krátkych cyklov, ktorý vymazáva hrany z matice kontroly parity kódu bez zníženia minimálnej Hammingovej vzdialenosti kódu. Navrhnuté algoritmy na odstraňovanie krátkych cyklov sa môžu použiť na zlepšenie chybovosti LDPC kódov generovaných PEG „Progressive Edge-Growth“. (alebo akýchkoľvek iných).

• Významnú časť tvorí návrh možnosti dynamického alokovania voľných optických kanálov v rastroch multiplexov pre telekomunikačné služby v rámci PON sietí v koexistencii so senzorickou sieťou internetu vecí. Bol analyzovaný podiel statickej obsadenosti vlnového pásma FBG senzormi pozdĺž dostupného prenosového C-pásma, vrátane obsadenosti predpokladaného úzkopásmového skenovacieho lasera počas periódy merania. Vstupná analýza statických a dynamických vlastností FBG senzorov je získaná meraniami senzorickej siete v klimatickej komore, pričom senzorická sieť bola vytvorená z interrogátora, softvéru, optického vlákna G.652.D, štandardných optických senzorov merania teploty. Výsledkom je návrh zásadných princípov vedúcich ku koexistencii plne fotonických komunikačných sietí, využívajúcich spoločné zdieľanie senzorových meraní a telekomunikačných služieb (pripravovaná norma IEEE P802.3cs pre Ethernet Super-PON).

• Ďalej bol rozpracovaný koncept koexistencie senzorickej siete a pasívnej optickej siete prostredníctvom využitia algoritmu dynamického pridelenia šírky pásma (DBA). Algoritmus DBA je založený na štatistickom monitorovaní Braggových mriežok, aby bolo možné začleniť signál zo senzorov do už existujúcej a prevádzkovej pasívnej optickej siete v C-pásme. Kľúčovými parametrami algoritmu je meranie spektrálnych charakteristík Braggových mriežok a ich dynamický prejav v spektrálnej oblasti, spolu s monitorovaním spektrálnej charakteristiky užitočných kanálov. Z experimentálnych výsledkov vyplýva, že je možné efektívne začleniť signál zo senzorov do už existujúcej pasívnej optickej siete pričom

je umožnená vzájomná prevádzka ako aj užitočných dátových signálov, tak aj signálov z použitých senzorov.

- Bol realizovaný návrh nového typu kódu s premenlivou váhou, ktorý sa nazýva kód s nulovou krížovou koreláciou (Multiweight Zero Cross-Correlation - MW-ZCC), na jeho použitie v bezdrôtových optických sieťach založených na optickom viacnásobnom prístupe s delením kódu (WON-OCDMA). Kód poskytuje lepšiu kvalitu služby (QoS) a lepšiu podporu súčasného prenosu údajov z videodohľadu, komunikácie a senzorov tým, že znižuje vplyv rušenia viacnásobného prístupu (MAI). Tento výskum ukázal, že pri minimálnej prípustnej bitovej chybovosti 10⁻³, 10⁻⁹ a 10⁻¹² a pri podpore trojnásobných služieb (snímanie, dátové komunikácie a video dohľad) by navrhovaný WONOCDMA s použitím kódov MW-ZCC mohol podporovať až 32 simultánnych služieb na prenosové vzdialenosti do 32 km v prítomnosti miernej atmosférickej turbulencie.

3. Návrh nových fotonických štruktúr pre efektívne využitie spektra v plne fotonických sieťach.

V zmysle uvedeného cieľa sa za celé obdobie riešenia projektu realizovali tieto výskumné činnosti:

- Návrh nových fotonických prvkov na báze kremíka na izolátore (SOI), ktoré slúžia nie len priamo na detekciu snímanej veličiny, ale aj na spracovanie, prípadne úpravu senzorického signálu.

- Optimalizácia vybraných aktívnych a pasívnych prvkov fotonického komunikačného reťazca. V rámci medzinárodnej spolupráce (National Research Council Canada, University of Málaga, atď.) na báze Braggových filtrovacích štruktúr, ktoré sú vytvárané prostredníctvom optimalizácie efektívneho indexu lomu, tzv. metamateriálu. Tieto štruktúry tvoria základný stavebný prvok fotonických integrovaných obvodov, ktoré je možno využiť v širokej škále senzorických aplikácií. Vyústením tejto spolupráce bola predovšetkým optimalizácia fotonickej štruktúry na báze Braggovej mriežkovej štruktúry v širokom (slab) vlnovode. Tento návrh zahŕňal techniku optimalizácie (tzv. inžinierstva) efektívneho indexu lomu v optickom vlnovode. Výsledkom tohto prístupu je, že daná fotonická štruktúra môže pracovať ako filter alebo ako polopriepustné zrkadlo, ktoré je možné využiť pre vytvorenie Fabry-Perotovho rezonátora integrovaného na SOI čipe.

- Návrh a realizácia experimentov s pomalým svetlom za účelom dosiahnutia oneskorenia prechádzajúceho optického signálu, využiteľných v oneskorovacích častiach prepínacích zariadení a pre významné zvýšenie citlivosti a rozlíšenia vláknových senzorov. Bol použitý model vytvorený v programovom prostredí MATLAB. Model na simuláciu prenosových charakteristík vláknových Braggových mriežok (FBG) je založený na teórii viazaných módov a metóde prenosových matíc. Podrobnejší výskum možnosti zmeny fyzických parametrov Vláknových Braggových mriežok, akými sú dĺžka mriežky, hĺbka modulácie mriežky a fázový posun na celkové skupinové oneskorenie prenášaného optického svetla. Simulované štruktúry ponúkajú výrazné zvýšenie oneskorenia avšak za cenu veľmi vysokej spektrálnej selektivity, ktorá môže pre konkrétne aplikácie predstavovať prekážku a brániť ďalšej implementácii. Na základe získaných poznatkov bola navrhnutá štruktúra vyrobená v dvoch testovacích vzorkách, vyrobených vo firme Sylex, FiSens GmbH. Meranie bolo realizované na univerzite Strathclyde v Glasgowe.

- V oblasti návrhu nových fotonických štruktúr pre efektívne využitie spektra v plne fotonických senzorických sieťach boli skúmané optické vlastnosti tenkých vrstiev a multivrstiev na báze kremíka pripravené v rôznych depozičných podmienkach na izolátore. Ako úspešnú optickú platformu pre sensoriku sme predstavili amorfné multivrstvy SiN:H/Si:H. Tento koncept umožňuje inžiniering a optimalizáciu optických vlastností štruktúry, hlavne jej spektrálnu absorpčnú odozvu, optickú šírku pásma a index lomu. Pre senzorické aplikácie tenkých monovrstiev amorfného a mikrokryštalického kremíka, ktoré sú založené na absorpcii svetla, sme porovnávali rôzne absorpčné metriky, založené samostatne na absorpčnom koeficiente a indexe lomu (absorpcia pri jednom priechode, dĺžka optickej dráhy, klasický limit zachytávania svetla) alebo priama absorpcia vypočítaná podľa Yablonovitcha na základe ich vzájomnej súčinnosti. Naznačili sme, ako rozdiely v absorpčných schopnostiach súvisia s mikroštruktúrou tenkej kremíkovej vrstvy. Ukázali sme, že vhodne dizajnované komplexné kremíkové štruktúry sú schopné ovládať optický signál podľa požiadaviek subsystémov komplexnej fotonickej siete, t.j. senzorov a prepínacích štruktúr.

- Spracovanie výsledkov analýzy energeticky účinných optických sietí so zameraním na

prepínacie technológie. Pri prepínacích technológiách sme sa zamerali aj na tenké vrstvy (VO₂, Si₃N₄, TiO₂), na ktorých môžu byť postavené optické prepínače v optických sieťach s prepínaním zhlukov (OBS). Bola vykonaná simulačná analýza hodnotenia výkonnosti termooptických prepínačov v rámci modelu OBS siete a simulačná štúdia skúmania vplyvu drsnosti a hrúbky vrstvy na optické vlastnosti (spektrálna odrazivosť, priepustnosť) vybraných materiálov (SiO₂, Ta₂O₅, Al₂O₃) pre termooptické prepínače.

• Boli skúmané vlastnosti sériovej a paralelnej rezistivity a komplexnej impedancie. V určitých aplikáciách sa vrstvený kremík vplyvom teploty okolitého prostredia a vplyvom dopadu výkonu optického žiarenia zahrieva, preto boli skúmané vlastnosti v širokom rozsahu pracovných teplôt, od -130°C až do +180°C. Modely a simulácie vychádzajú z predpokladu apriórnej znalosti dopovania vrstiev zvoleného kremíkového materiálu/prvku a jeho energetického pásu. To vplyva na činiteľ ideálnosti vrstveného kremíka a následne na jeho napäťové a prúdové vlastnosti. Výsledkom je získanie požadovaného pomeru detegovaných úrovní LOG1/LOG0 (diagram oka) v koexistujúcich fotonických multikanálových integrovaných sieťach.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Riešenie projektu APWV 17-0631 KONSENS prinieslo výsledky v návrhu vybraných prvkov integrovanej optiky na báze subvlnových štruktúr, tenkých vrstiev a multivrstiev na báze kremíka pripravených v rôznych depozičných podmienkach na izolátore, optického chemického senzora KCN a senzorov na báze vláknových Braggových mriežok. Využitie vláknových Braggových mriežok bolo navrhnuté a realizované aj pre generovanie pomalého svetla.

Skúmané a navrhnuté boli možnosti začlenenia optických senzorov pre efektívne využitie spektra v plne optických sieťach a konkrétna štúdia ich začlenenia do WDM multiplexov budúcich pasívnych optických sietí s rastrami multiplexov podľa v súčasnosti známych medzinárodných štandardov.

Pre aplikáciu optických senzorov boli navrhnuté konkrétne riešenia sensorických sietí a možnosti začlenenia sensorických systémov a sietí založených na prvkoch vláknovej optiky ako súčasti plne fotonických komunikačných sietí s aplikáciou v doprave. Pre signály zo sensorickej siete na báze FBG a interrogátorov bol nasadený systém umelej inteligencie na báze neurónových sietí AlexNet, GoogLeNet, a ResNet-50.

Na báze medzinárodnej spolupráce prebiehal návrh integrovaných štruktúr subvlnovej fotoniky pre sensoriku, ďalej návrh, výroba, meranie a optimalizácia vláknových Braggových mriežok pre generovanie pomalého svetla a sensoriku, tenkých vrstiev a multivrstiev na báze kremíka a nových typov kremíkovo-germániovo-kremíkových p-i-n fotodetektorov, ktoré umožňujú vysokorýchlostnú detekciu na monolitickej platforme.

Ako úspešnú optickú platformu pre sensoriku sme predstavili amorfné multivrstvy SiN:H/Si:H. Tento koncept umožňuje inžiniering a optimalizáciu optických vlastností štruktúry, hlavne jej spektrálnu absorpčnú odozvu, optickú šírku pásma a index lomu. Pre budúce husté kanálové multiplexy boli skúmané možnosti využitia kanálového kódovania na báze LDPC kódov.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

The solution of the APWV 17-0631 CONSENS project yielded results in the design of selected integrated optics elements based on subwavelength structures, silicon-based thin films and multilayers prepared in different deposition conditions on an insulator, a KCN optical chemical sensor and sensors based on fibre Bragg gratings. The use of fiber-based Bragg gratings has also been proposed and implemented for slow light generation.

The possibilities of incorporating fiber optic sensors for efficient spectrum utilization in all-optical networks were investigated and proposed, and a specific study of their incorporation into WDM multiplexes of future passive optical networks with multiplexing grids according to currently known international standards was carried out.

For the application of optical sensors, specific solutions for sensor networks and the possibilities of incorporating sensor systems and networks based on fibre optics elements as part of all-photonic communication networks with applications in transport have been proposed. An artificial intelligence system based on AlexNet, GoogLeNet, and ResNet-50

neural networks was deployed for the signals from the FBG-based sensor network and interrogators.

Based on international collaborations, the design of integrated subwavelength photonics structures for sensing was carried out, followed by the design, fabrication, measurement, and optimization of fiber Bragg gratings for slow-light generation and sensing, silicon-based thin films and multilayers, and new types of silicon-germanium-silicon p-i-n photodetectors that enable high-speed detection on a monolithic platform.

Introduced were amorphous SiN:H/Si:H multilayers as a successful optical platform for sensing. This concept allows engineering and optimization of the optical properties of the structure, especially its spectral absorption response, optical bandwidth and refractive index. For future dense channel multiplexers, the possibilities of using channel coding on the basis of LDPC codes have been investigated.