

Integrált érzékelés és jelfeldolgozás a fókuszsíokban

MTA doktori értekezés tézisei

Földesy Péter

Magyar Tudományos Akadémia
Energiatudományi Kutatóközpont
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet

Budapest, 2017

1. Bevezetés, célkitűzések

A doktori értekezésem tárgya az elektromágneses sugárzás érzékelése és az integrált fókuszsíkbeli jelfeldolgozás vizsgálata, valamint az ehhez szükséges rendszerek megtervezése és felépítése. Ezen architektúrák elsődleges feladata az érzékelés (képalkotás) és a nyers képfolyam valós idejű előfeldolgozása (un. *early vision processing*) a későbbi, komplexebb eszközöket igénylő képértelmezés számára [F1]. A napjainkban elterjedt térfigyelő rendszerek képfolyamait célszerűen a felvétel helyén érdemes feldolgozni és értelmezni, információtartalmát lépésről lépésre kinyerni. Ennek első lépése az érzékelt képsorok javítása, az alkalmazás szempontjából érdemleges részek kiemelése és megjelölése, ezzel tehermentesítve mind a hálózatot, mind a további lépések feldolgozását. Értekezésem átfogó témája ilyen architektúrák vizsgálata, tervezése és használata a látható fényre érzékeny érzékelőtömböktől a szub-terahertzes (THz) sugárzásra érzékeny rendszerekig. Célkitűzésemként az elméleti alapok gyarapítását és a gyakorlati életben is felhasználható, nagyérzékenységgű és -sebességű, nagy integráltságú képalkotó rendszerek létrehozását tűztem ki.

Első témakörként a celluláris-neurális hálózatok, univerzális gépek [F2] digitális, integrált áramkörti megvalósítását tárgyalom különböző aspektusokból. Megvizsgáltam a kutatás időszakában hozzáférhető analóg áramkörti kialakításait [F3]. Felismerve az analóg megoldások korlátait a celluláris-neurális hálózatokhoz hasonló elrendezést hoztam létre digitális elemekkel és integráltam különböző hullámhossz tartományban működő érzékelőkkel. Ezután általánosítottam az érzékelők és feldolgozó processzorok kapcsolódását, arányát és összekötöttségét mind az érzékelt hullámhossz, mind az alkalmazás függvényében.

Értekezésem második részében milliméter alatti hullámhossz tartományú (300 GHz – 3 THz) érzékelők elméletével és megvalósításával kapcsolatos kutatási eredményeimet mutatom be. Ebben a hullámhossz tartományban működő elektronikai eszközök kialakítása körülményes, tekintettel a nagy működési frekvenciára. Azonban ilyen eszközök számos alkalmazási lehetőséget rejtenek magukban: a sugárzás nem ionizáló tulajdonsága miatt anyagtudományi, orvos diagnosztikai, biztonságtechnikai területeken széles körben alkalmazható [F4], valamint nagy vezetékmentes adatátvitelt tesz lehetővé. Míg a látható fényre érzékeny tömbök esetén a számítási architektúrára fektettem a hangsúlyt, a THz-es sugárzás tárgyalásában az érzékelés elméletére és standard szilícium alapú mikrotechnológiájú megvalósításra.

2. Az új eredmények összefoglalása

***I. Téziscsoport* Fókuszsíkbán integrált érzékelő- és processzortömbök architektúrái**

Munkám során azt vizsgáltam, hogy az alkalmazási igények milyen kompromisszumot engednek meg, milyen számítási teljesítmény érhető el, milyen megoldás szolgálja leginkább a skálázhatóságot, teljesítmény és felület kihasználásának hatékonyságát. Disszertációmban bemutatom a kutatási időszak *state-of-the-art* analóg és digitális megoldásait, továbbá ennek fényében a kidolgozott metodikát és erre építve a megalkotott kevert-jelű (*mixed-signal*) architektúrát. Az architektúra több változata más és más alkalmazási környezetben, fizikailag, integrált áramkörök formájában is elkészült. Ezek jellemzőit összehasonlítom végül mind az analóg, mind a DSP és FPGA alapú alternatívákkal, bemutatva hatékonyságukat és számítási teljesítményüket.

Megvizsgáltam, hogy a fókuszsíkbeli processzortömb és az érzékelőtömb implementációs technológiája, hullámhossz függése miként befolyásolja az architektúrákat, valamint hogy miként lehet felületfoglalásban és teljesítményfelvételben a rendelkezésre álló megoldásoknál előnyösebb alternatívát adni. A planáris integráció analóg és digitális megvalósításának kompromisszumait látható, közeli infravörös hullámhossztartományban működő fókuszsíkbeli processzortömbök tervezésén keresztül, valamint 3D integráltságú, hibrid technológiájú architektúrák tervezésében tanulmányoztam.

A témában megfogalmazott tézispontjaim a következők:

- I.1 Kidolgoztam és megterveztem egy integrált áramköri technológián alapuló kevert jelű fókuszsíkbeli processzortömb architektúrát, amely számítási teljesítményében összemérhető a DSP és FPGA alapú megoldásokkal, felület és fogyasztás tekintetében pedig egy nagyságrenddel meghaladja a DSP, FPGA és analóg megoldások hasonló jellemzőit [1]-[5].
- I.2 Új vizuális szenzorarchitektúrát hoztam létre, amely lokálisan adaptív képérzékelést tesz lehetővé. Az expozíció során többszöri kiolvasással rendelkező szenzortömb integrálási ideje pixelenként változtatható, lehetővé téve az expozíció közbeni és képről képre történő adaptív érzékenyítést is [6].

II. Téziscsoport Szub-Terahertz tartományú tervezérelt tranzisztor detektorok modellezése és alkalmazhatóságának kiterjesztése

Érzékelők integrálását az infravörös és láthatón túli alacsonyabb hullámhosszú (0.4-2 mm, illetve 200-750 GHz vagy átfogóan szub-THz-es) spektrális tartományban is megvizsgáltam. Ezért nem a képfeldolgozás kap hangsúlyt ebben a témakörben, hanem maguk a „képek” létrehozása. Munkám során a megvalósíthatóságot tekintettem elsődlegesnek. Ezért olyan érzékelő típust választottam, mely kompatibilis a szilícium alapú CMOS integrált áramkörök technológiájával. A nagy elektron mobilitású vegyületfélvezetőkkel (pl. GaAs) vagy a grafénnel ellentétben hatékony integrált megoldást a tömeggyártásban a szilícium alapú áramkörök kínálnak [F6]. Aktívan kutatott terület a tervezérelt tranzisztorok csatornájában kialakuló 2D elektronplazma használata nagyfrekvenciás, THz tartományú mixerként és érzékelőként [F5]. Az ismert jelenségben kulcsszerepet játszó 2D elektronplazmát, mint vékony folyadékréteget vagy elosztott RLC hálózatot [F7] modellezhetjük. Ennek segítségével érthetjük meg az egyenirányítás jelenségét (Dyakonov-Shur instabilitás). Ezen a módon a tervezérelt tranzisztorok hagyományos működési határfrekvenciájuk felett használhatók, mint teljesítményérzékelők.

Mindkét említett megközelítés csak korlátozottan alkalmas azonban a DC áram hatásának magyarázatára, illetve becslésére. A gyakorlatban előforduló sok helyzetet a modell elméletileg nem képes leírni és számos egymásnak ellentmondó állításhoz vezet. Célul tűztem ki, hogy kísérletileg is igazolt modelleket állítsak fel a hiányosságok minél nagyobb mértékű megszüntetésére, és az új modellekre építve jobb, hatékonyabb fókuszsíkbeli processzorokat hozzak létre. A megfogalmazott tézispontjaim első csoportja a témában a következők:

- II.1 Megalkottam a 2D elektron plazma alapú tervezérelt tranzisztorok THz-es sugárzásra adott válaszána modelljét a teljes tranzisztor működési tartományra, amely tetszőleges statikus elektromos előfeszítés mellett alkalmazható [9].
- II.2 Bebizonyítottam, hogy a tervezérelt tranzisztorok THz-es sugárzásra adott válasza egy, a mikroelektronikai szakirodalomban közismert, könnyen mérhető és tervezhető mérőszámmal, a transzkonduktancia és a csatorna áram hányadosával arányos (g_m/I_D) [9].
- II.3 Bebizonyítottam, hogy a korábban publikált és elfogadott modellek és áram érzékenységet érintő hatásmechanizmusok mérésekkel igazolhatatlanok és hibásak. Megadtam egy olyan érzékenységi modellt, amely különböző eszköztípusokon (szilícium és GaAs HEMT tranzisztorokon), komplex áramköri környezetben is nagy pontossággal adja vissza a mérési eredményeket [9].

A koherens sugárzásokkal történő képalkotás egyik nehézsége interferencia kialakulása az érzékelők felületén. A kézenfekvő megoldás a komplex amplitúdó meghatározása (intenzitás és fázis). Erre két tipikus megoldás terjedt el: időben vagy térben multiplexelt mérések sorozata. Az optikai technológiákban mindkét megoldás jelen van, a THz tartományú képalkotásban a lassú és mechanikailag korlátot időbeli multiplexelés a meghatározó. A kapcsolódó tézispont:

- II.4 Megalkottam egy olyan elrendezést, mely lineáris és cirkulárisan polarizált antennák kombinációjával felbontás csökkenés nélkül képes egy lépésű (egy időponthoz tartozó méréssel) THz tartományú sugárzás komplex amplitúdójának mérésére. Elrendezéstől függően az eljárás alkalmas 2, 3 vagy 4 egyidejű, fázisban eltérő (0° , 90° , 180° , 270°) mérés elvégzésére javuló rekonstrukciós pontossággal [12][13].

Beláttam, hogy a tervezérelt tranzisztorokban a nyelő (*drain*) elektróda oldalon kialakuló kiűrtett csatornaszakasz miatt fellépő szaturáció megszünteti az érzékenységet felelős elektróda-plazmon csatolást. Ennek eredményeként az érzékelőként használt tranzisztor mérhető külső válasza kizárólag a forrás (*source*) és kapu (*gate*) oldalon megjelenő csatolt sugárzástól függ. Az antennák kiválasztása egyazon érzékelő esetén tehát elektronikusan kapcsolhatóvá válik. A kapcsolódó tézispont:

- II.5 Megmutattam, hogy nagyfrekvenciás teljesítményérzékelő alkalmazásban a szimmetrikus felépítésű tervezérelt tranzisztor két elektródája (forrás és nyelő) egymástól független érzékelőként használható, amennyiben a tranzisztor előfeszítése biztosítja a csatorna ellentétes elektróda oldali szaturációját [11].

Az integrált áramköri rezonáns antenna struktúrák mérete jóval kisebb a szabadtéri hullámhossznál. Erre építve megvizsgáltam a jel-zaj viszony javítási lehetőségét érzékelő tömbök esetére, melyet a következő tézispontban foglalom össze:

- II.6 Megmutattam, hogy adott optikai leképezésnél miként lehet az érzékelőtömb jel-zaj viszonyát több detektor soros integrálásával maximalizálni [14][15].

3. Az eredmények hasznosítása

A kutatásaim során kiemelten fontosnak tartottam az eredmények hasznosíthatóságát. A fókuszszíkbeli processzortömbök architektúrájának eredményei számos kutatócsoport munkáját segítette. Kidolgozott megvalósításunkat az *International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS) nemzetközi szervezet a feltörekvő jövőbeli architektúrák között emelte ki [F8].

Az ipari alkalmazás elősegítése érdekében éveken át aktív munkatársam voltam a kutatási eredményeket alkalmazó MTA-SzTAKI spin-off cégeként indult Analogic-Computers Kft.

majd a képfeldolgozással és videó értelmezéssel foglalkozó Eutectus Inc. cégnek [F9]. A THz tartományú érzékeléssel kapcsolatos eredményeim, kidolgozott modellek alkalmazhatóak az érzékenység tervezési időszakbeli becslésére, érzékenyebb és integráltabb szenzorok létrehozására. A Neteera Technologies Ltd. *start-up* cég az első tömeggyártásra alkalmas szub-THz-es érzékelő áramköreit készíti eredményeimre és modelljeimre építve [F10].

A mikrotechnológiai tervezésben szerzett gyakorlati tapasztalatokat oktatás formájában is továbbadom: integrált áramköri kurzusokat tartok a Pázmány Péter Katolikus Egyetemen. Volt diákjaim akadémiai keretek között kutatóként munkatársaim lettek vagy sikeresen helyezkedtek el a mikrotechnológiai iparban (AMS, Microchip). Kutatásaimat vezető kutatóként és résztvevőként hazai (TERASTART, OTKA-NKTH-CNK) és nemzetközi pályázatokban tudtuk hasznosítani (Particle Matter Sensors for Indoor Air Quality, EUREKA-EURIPIDES, EU; Multidisciplinary University Research Initiative, Office of Naval Research, MURI ONR, USA; és a Eutectus Inc. vezette VISCUBE 07-09, ONR projekt).

4. A tézispontokhoz kötődő saját tudományos közlemények

- [1] P. Földesy, Á. Zarándy, Cs. Rekeczky, T. Roska, "Digital implementation of cellular sensor-computers", International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 13, no. 4, pp. 409-428., 2006.
- [2] P. Földesy, Á. Zarándy, Cs. Rekeczky, T. Roska, "High performance processor array for image processing", IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2007, pp. 1177-1180, 2007.
- [3] R. Carmona-Galán, Á. Zarándy, Cs. Rekeczky, P. Földesy, A. Rodríguez-Pérez, C. Domínguez-Matas, "A hierarchical vision processing architecture oriented to 3D integration of smart camera chips", Journal of Systems Architecture, vol. 10, no. 59, pp. 908-919, 2013.
- [4] P. Földesy, R. Carmona-Galan, Cs. Rekeczky, Á. Zarandy, A. Rodríguez-Vázquez, T. Roska, "Digital processor array implementation aspects of a 3D multi-layer vision architecture", Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
- [5] P. Földesy, R. Carmona-Galan, Á. Zarándy, Cs. Rekeczky, A. Rodríguez-Vázquez, T. Roska, "3D multi-layer vision architecture for surveillance and reconnaissance applications", IEEE European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD 2009, pp. 185-188, 2009.

- [6] Á. Zarándy, P. Földesy, T. Roska, „Per-pixel integration time controlled image sensor”, In Proceedings of the 2005 IEEE European Conference on Circuit Theory and Design, 2005. vol. 3, pp. III-149, 2005.
- [7] G. Károlyi, D. Gergelyi, P. Földesy, "Sub-Thz Sensor Array with Embedded Signal Processing in 90nm CMOS Technology”, IEEE Sensors Journal, vol. 14, no. 8, pp. 2432-2441, 2013.
- [8] G. Károlyi, D. Gergelyi, P. Földesy, "Sub-Thz Sensor Array with Embedded Signal Processing in 90nm CMOS Technology”, IEEE Sensors Journal, vol. 14, no. 8, pp. 2432-2441, 2013.
- [9] P. Földesy, “Terahertz responsivity of field-effect transistors under arbitrary biasing conditions”, Journal of Applied Physics, vol. 114, no. 11, 114501, 2013.
- [10] P. Földesy, "Characterization of silicon field effect transistor sub-THz detectors for imaging systems”, IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS2012, 2012.
- [11] P. Földesy, "Current steering detection scheme of three terminal antenna-coupled terahertz field effect transistor detectors", Optics Letters, vol. 38, no. 15, pp. 2804-2806, 2013.
- [12] P. Földesy, “Terahertz single-shot quadrature phase-shifting interferometry”, Optics Letters, vol. 37, no. 19, pp. 4044-4046, 2012.
- [13] P. Földesy, “Eszköz és eljárás interferencia-mintázat érzékelésére”, Magyar szabadalom, P1200693/5, 2012.
- [14] P. Földesy, G. Gergelyi, Z. Kárász, Cs. Füzy, “Serially connected MOS terahertz sensor array”, 38th IEEE International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 10.1109/IRMMW-THz.2013.6665576, 2013.
- [15] D. Gergelyi, P. Földesy, Á. Zarándy, "Scalable, Low-Noise Architecture for Integrated Terahertz Imagers", Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, vol. 36, no. 6, pp. 520-536, 2015.

5. A tézisfüzetben hivatkozott egyéb publikációk

- [F1] K. I. Schultz, et al. “Digital-pixel focal plane array technology”, Lincoln Laboratory Journal, vol. 20, no. 2, 2014.
- [F2] L. O. Chua, T. Roska, “Cellular Neural Networks and Visual Computing: Foundations and Applications”, Cambridge University Press, 2002.

- [F3] G. Linan, R. Dominguez-Castro, S. Espejo, A. Rodriguez-Vazquez, "ACE16K: An advanced focal-plane analog programmable array processor", IEEE 27th European Solid-State Circuits Conference, ESSCIRC 2001, pp. 201-204. 2001.
- [F4] Tonouchi Masayoshi, "Cutting-edge terahertz technology", Nature photonics, Vol. 1, pp. 97-105, 2007.
- [F5] M. Dyakonov and M. Shur, "Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: New mechanism of plasma wave generation by dc current", Physical Review Letters, vol. 71, no. 15, pp. 2465-2468, 1993.
- [F6] A. Rogalski, F. Sizov, "Terahertz detectors and focal plane arrays." Opto-electronics review, vol. 19, no. 3, pp. 346-404, 2011.
- [F7] W. Knap, V. Kachorovskii et al., "Nonresonant detection of terahertz radiation in field effect transistors", Journal of Applied Physics, vol. 91, no. 11, pp. 9346-9353, 2002.
- [F8] http://www.semiconductors.org/clientuploads/Research_Technology/ITRS/2007/ERD.pdf
- [F9] Eutecus Inc., mely része a Sensity Systems és Verizon cégeknek, <https://eutecus.com>
- [F10] Neteera Inc., <http://www.neteera.com>