

PROJEKT ZÁRÓ BESZÁMOLÓ

Kutatás adatai:

OTKA azonosító: K84045

Vezető kutató: Kolumbán Géza

Pályázat címe: Erőforrás korlátozott WLAN és BioMed alkalmazások új kommunikációs elveken alapuló, átkonfigurálható fizikai rétegeinek és protokolljainak kutatása

Kutatóhely: Információs Technológiai és Bionikai Kar, Pázmány Péter Katolikus Egyetem

Időszak: 2011. február 01. – 2014. január 31.

Futamidő: 3 év

A Záró beszámoló tartalma:

1. A kutatási tervben meghatározott kutatási célkitűzések;
2. A K84045 OTKA projektben elért eredmények a kutatási célok szerinti bontásban;
3. Az OTKA projektben elért kutatási eredmények alkalmazása;
4. Az OTKA projektben elért eredmények nemzetközi visszhangja;
5. Az OTKA támogatás feltüntetésével megjelent publikációk és megtartott nemzetközi előadások listája.

1. A kutatási tervben meghatározott kutatási célkitűzések

Az adatátviteli igények robbanásszerű növekedése, valamint az adatátvitelben használt hardver (HW) eszközök megépítésében használt technológia gyökeres megváltozása napjainkban paradigmaváltáshoz vezetett a vezeték nélküli adatátvitel és mérés technika terén. A paradigmaváltást kikényszerítő legfontosabb okok:

1. A beltéri és biomed alkalmazásokban a sajátos terjedési viszonyok (többutas terjedés, interferencia, szövetek csillapító hatása, stb) miatt a hagyományos adatátviteli módszerek nem alkalmazhatók. További probléma, hogy a frekvenciasávok telítettsége csak a kognitív rádiózás módszereinek alkalmazásával hidalható át. Ezek a követelmények egyrészt új modulációs eljárások alkalmazását igénylik, másrészt kikényszerítik a szoftveresen átkonfigurálható implementációs módszerek alkalmazását.
2. A vezeték nélküli adatátviteli eszközöket ma már különféle informatikai rendszerekbe beágyazottan kell implementálni, azaz azokat integrálni kell az informatikában alkalmazott rétegzett struktúrákba és modellekbe, valamint információ feldolgozási protokollokba.
3. Az adatátviteli rendszerek fizikai (PHY) rétegeinek hagyományos implementációja során az egyes jelfeldolgozási feladatokat HW eszközökkel, azaz áramkörökkel valósítottuk meg. Az 1. pont szerinti dinamikus átkonfigurálhatóság követelménye csak akkor teljesíthető, ha valamennyi jelfeldolgozási feladat szoftveresen kerül implementálásra.
4. Az OTKA projekt által vizsgált vezeték nélküli eszközöknek igen olcsóknak és a mobil alkalmazásból eredendően telepes vagy akkumulátoros üzeműnek kell lenniük. Ez azt jelenti, hogy ezeket a HW eszközöket kis fogyasztású és erőforrás korlátozott környezetben kell implementálni.

Az OTKA kutatási program kutatási céljai 2010-ben még a fenti paradigmaváltás kikristályosodása előtt fogalmazódtak meg (lásd az angol nyelvű részletes kutatási programleírást):

1. *Átkonfigurálható fizikai rétegek kidolgozása,* beleértve a (i) vivőgenerálást és az (ii) új modulációs eljárások valamint a hozzájuk tartozó detekciós algoritmusok kidolgozását;
2. *Alkalmazás orientált kommunikációs protokollok kutatása,* beleértve a hálózati szintű optimalizálást;
3. *Vezeték nélküli hálózati eszköz modellek (WND modellek) felállítása,* amely modellek egyaránt alkalmasak a hálózati eszközök (i) fizikai réteg szintű és (ii) hálózati réteg szintű optimalizálásra. Az optimalizálás során az eszközök átkonfigurálhatóságát használjuk ki, azaz azt, hogy az adatátvitel valamennyi paramétere a modulációs rendszertől az adatátviteli sebességen át a kisugárzott jel spektrumáig, dinamikusan megváltoztatható.

A kutatási projekt első évében több, az OTKA kutatási programmal megegyező, illetve igen szoros kölcsönhatásban álló területen kedvező fordulat állt be mind nemzetközi, mind hazai vonatkozásban:

- A technológiai fejlődés következtében rohamléptekben megy végbe a híradás- és mérés-technika terén az a paradigmaváltás, amely során az eddigi HW alapú jelfeldolgozó eszközöket egyre több területen leváltják a SW alapú implementációk. Mind IC, mind eszköz szinten megjelentek azok az univerzális HW eszközök, amelyek egyaránt alkalmasak bármilyen híradástechnikai és mérés-technikai feladat elvégzésére úgy, hogy az implementálás ugyanazon a HW platformon, és teljes egészében szoftver szinten megy végbe. Ez a paradigmaváltás teljes változást okoz az informatikai-villamosmérnöki szakma teljes vertikumában, az egyetemi oktatástól kezdve, az új szolgáltatások és nagyrendszerek üzemeltetésén át, az új berendezések tervezéséig.
- A fenti paradigmaváltásban hazánk igen fontos szerepet játszik, mivel a Magyar Kormány stratégiai partnere, a National Instruments (nemzetközi szinten piacvezető, a cég termékeinek több mint 90%-át Debrecenben állítja elő ahol a cég logikai központja is található) világviszonylatban is piacvezető a paradigmaváltáshoz vezető új technológia elterjesztésében, az ahhoz szükséges HW és SW eszközök forgalmazásában.

A szoftver definiált elektronika (SDE) terén elért eredményeink felkeltették az NI figyelmét, és az NI támogatásával a Pázmány Egyetem Információs Technológiai és Bionikai Karán az OTKA projekt keretében felállításra került a “Szoftver definiált elektronika és virtuális műszerezés” (SDE-VI) labor.

- A szoftver definiált elektronika terén elért eredményeink nemzetközi szinten is kiemelkedő visszhangot váltottak ki. Az IEEE CAS Society-től 2011 végén felkérést kaptunk egy tutoriál megírására [5], továbbá az IEEE CAS a 2013-14 időszakra Kolumbán Gézát, jelen OTKA projekt vezető kutatóját, beválasztotta az IEEE CAS Distinguished Lecturer-jei közé. Az IEEE CAS Society-ben évente mindössze 10 személy kerül be a Distinguished Lecture-ök közé. Az IEEE CAS DLP előadók feladata a legújabb, a jövő kutatási trendjeit és implementációs technológiáit meghatározó elméletek és technológiák terjesztése az ún. DLP előadások keretében.

A fentiekben vázolt fejlemények és nemzetközi trendek visszaigazolták az OTKA projekt célkitűzéseit, az azóta kikristályosodott nemzetközi tudományos trendek hangsúlyozottan aláhúzták az OTKA projekt fontosságát. Az események hatására az OTKA kutatási program kutatási céljait a projekt során kibővítettük és néhány ponton aktualizáltuk:

1. *Átkonfigurálható fizikai rétegek kidolgozása,* az SDE koncepcióhoz illeszkedő, új modulációs eljárások valamint a hozzájuk tartozó és adott implementációs környezetre optimalizált detekciós algoritmusok kidolgozása
2. *Alkalmazás orientált kommunikációs protokollok kutatása,* a PHY réteg szintjére kidolgozott, és az UWB összeköttetések hatékonyságát javító kommunikációs protokollok kidolgozása;
3. *Az SDE koncepcióhoz illeszkedő alapsávi WND modellek felállítása, és azok szisztematikus származtatására szolgáló eljárások kidolgozása,* olyan tervezési eljárások kidolgozása, ahol az egyes alkalmazásokat teljes egészében szoftverben és az alapsávban implementáljuk, és az alapsávi valamint fizikai jelek közti kapcsolatot az univerzális HW eszközök valósítják meg. A szoftveres implementáció szinte korlátlan lehetőséget ad a rendszerek átkonfigurálhatóságára, szükség estén több funkció egyidejű megvalósítására (pl. a vett jel egyaránt felhasználható csatorna identifikálásra és a továbbított információ egyidejű demodulálására), a prototípusok fejlesztésére és az új megoldások kutatására;
4. *WLAN alkalmazásokra optimalizált, GP-GPU platformon implementált detekciós algoritmusok kutatása,* olyan, GP-GPU platformon implementálható algoritmus kidolgozása, amely alkalmas a beltéri többutas terjedéssel jellemzett rádiócsatornákon át továbbított rádió hullámok hatékony detektálására.

A kutatási célok fenti átfogalmazásában az is szerepet játszott, hogy az OTKA projekt két kutatója, Oláh András, PhD, senior kutató, és Tisza Dávid, PhD hallgató, kutatásban való szerepvállalása csökkent. A kutatási terv szerint ezen kutatók feladata volt az OSI BR modell szerint értelmezett fizikai és adatátviteli rétegek feletti rétegekben, illetve a hálózati rétegben fellépő problémák kutatása, a felsőbb rétegeken végett optimalizálási technológiák kidolgozása.

A kibővített OTKA kutatási terv alap koncepciója: az univerzális platformokon megvalósított, átkonfigurálható, WLAN és BAN *szoftver definiált* rendszerek elmélete. Ebbe a koncepcióba szervesen illeszkedik a számítástechnikai eszközök grafikus processzorán (GPU), mint univerzális HW platformon, szoftveresen implementált detekciós algoritmusok kutatása. Ezért kutatásainkat kiterjesztettük a GPU platformon implementált detekciós algoritmusokra is.

2. A K84045 OTKA projektben elért eredmények a kutatási célok szerinti bontásban

2.1 Átkonfigurálható fizikai rétegek kidolgozása

Kutatási célkitűzés: az SDE koncepcióhoz illeszkedő, új modulációs eljárások, valamint a hozzájuk tartozó és adott implementációs környezetre optimalizált detekciós algoritmusok kidolgozása;

Elért eredmények:

- Kidolgoztuk a CS-DCSK és GCS-DCSK modulációs eljárásokat;
- Analitikus összefüggést adtunk az újonnan kidolgozott modulációs eljárások hibaarányának meghatározására;
- A Fourier koncepció alapján általános eljárást adtunk a hullámforma kommunikáción alapuló modulációs eljárások adott tervezési célokra vonatkozó, optimális detekciós algoritmusainak zárt formában való, analitikus levezetésére

A WLAN és BioMed alkalmazásokra kidolgozott adatátviteli eszközöknek a hagyományos hírközléstől alapvetően eltérő, speciális követelményeket kell kielégíteniük:

- többutas terjedés a rádió csatornában;
- az engedélyhez nem kötött rádió csatornák használata, ahol az interferencia szint jelentős mértékű;
- emberi szövetek nagymértékű csillapítása;
- nagy tömegben használt, olcsó eszközök, amiből következik, hogy az implementációkat egy erőforrás korlátozott környezetben kell megvalósítani;
- a mobilitásból eredően az alacsony fogyasztás alapvető követelmény.

A korábbi T20522 és T38083 OTKA projektek keretében kidolgoztuk az inherensen szélessávú kaotikus vivőkön alapuló differenciális káoszbillentyűzésű (DCSK) és frekvencia modulált differenciális káoszbillentyűzésű (FM-DCSK) modulációs módszereket. Ezek az eljárások az átvitt referenciájú (TR) modulációk családjába tartoznak, ahol minden bitet két analóg hullámformába kódolunk, és a kisugárzott bitet a vevő oldalon a két, azaz a referencia és az információt hordozó hullámforma korrelációjából nyerjük ki. A referencia és az információt hordozó hullámformák átviteléhez két független csatornára van szükség. A DCSK/FM-DCSK rendszerek időosztás alapján működnek, azaz a két hullámforma egymás után kerül kisugárzásra. A többutas csatornában szükséges szélessávú jelek az alkalmazott kaotikus vivők biztosítják. Publikálásuk óta a DCSK/FM-DCSK rendszerek a kaotikus vivőkön alapuló adatátviteli rendszerek nemzetközileg elfogadott, igen gyakran hivatkozott, versenytárs nélküli, sztenderd modulációs eljárásává váltak.

A DCSK/FM-DCSK rendszerek hátránya az időosztású üzemmód, amely egyrészt implementálási nehézségeket okoz, másrészt csökkenti az elérhető adatátviteli sebességet. Ezt a problémát oldja meg a jelen kutatás keretében kidolgozott kódbillentyűzésű DCSK modulációs eljárás (Code-Shift DCSK, CS-DCSK) [3], ahol a referencia és az információt hordozó hullámformák ugyanabban az időrésben kerülnek kisugárzásra, és a két csatorna függetlenségét ortogonális Walsh kódokkal biztosítjuk. A CS-DCSK modulációs rendszer előnyei: (i) nincs szükség az időosztásból eredő késleltetés implementálására, (ii) kétszeresére nő az adatátviteli sebesség és (iii) mindkét hullámforma ugyanazon csatornán keresztül kerül továbbításra. A TR detektor előnye, hogy ez a fajta csatornatorzítás a detekció során kiejtődik.

A kutatások keretében kidolgoztuk az általánosított kódbillentyűzésű DCSK modulációs eljárást (GCS-DCSK) [9], ahol a Walsh kódok segítségével egy időrésben a referencia hullámforma mellett egynél több információt hordozó hullámformát sugárzunk ki. Az így kapott többszintű modulációs eljárás megőrzi a DCSK/CS-DCSK modulációk előnyeit, ugyanakkor többszintűsége révén növeli az elérhető adatátviteli sebesség értékét.

Végezetül a gauss-i közelítés alkalmazásával analitikus összefüggéseket származtattunk a CS-DCSK és GCS-DCSK modulációs rendszerek hibaarányára. Az analitikus összefüggéseket számítógépes szimulációkkal igazoltuk.

A korábbiakban a nem szinuszos, azaz a tetszőleges hullámformákra alapozott kommunikáció nagy hátránya volt, hogy ezekre a modulációkra nézve nem léteztek olyan matematikai módszerek, amelyek alapján szisztematikus módon le lehetett volna vezetni az adott alkalmazási környezetre optimalizált detekciós algoritmusokat. Mindenek előtt egy egységes matematikai modellt kellett felállítani a tetszőleges jeleken alapuló, hullámforma kommunikáció számára.

Ezt a matematikai modellt, a Fourier analízatoros koncepciót, a korábbi, T38083 azonosítójú OTKA projektben dolgoztuk ki. Jelen projekt keretében ebből az egységes matematikai modelltől kiindulva szisztematikus módszereket adtunk a különböző alkalmazási/tervezési követelmények mellett optimális megoldást adó detekciós algoritmusok származtatására [11]. Az eljárás lényege: az adóban használt jelkészlet elemeit a modulációs rendszer tervezése során a modulációs eljárás tervezője határozza meg. A jelkészlet ismertségét *a priori* információnak nevezzük, és ezt használjuk ki detekciós algoritmus megtervezésénél. A detekciós algoritmus származtatásánál sokszor az *a priori* információt nem teljes mértékben aknázzuk ki, mivel a minél több *a priori* információ kihasználása egyre komplexebb detektor konfigurációt ill. algoritmust eredményez. A felállított új eljárásban először az alkalmazástól függően kiválasztjuk a felhasználni kívánt *a priori* információ mennyiségét, majd az OTKA projektben kidolgozott szisztematikus eljárás lépéseit követve az optimális detekciós algoritmus meghatározható.

Az "Átkonfigurálható fizikai rétegek kidolgozása" c. témakörhöz tartozó eredményeket két nemzetközi folyóiratban [3], [9], és egy CRC Press által kiadott könyvfejezetben [11] tettük közzé.

2.2 Alkalmazás orientált kommunikációs protokollok kutatása

Kutatási célkitűzés: a PHY réteg szintjére kidolgozott, és az UWB összeköttetések hatékonyságát javító kommunikációs protokollok kidolgozása;

Elért eredmények:

- Az inherensen szélessávú UWB FM-DCSK kommunikációs protokoll kidolgozásával lehetővé tettük a korábban gauss-i UWB impulzusokon alapuló rádiós összeköttetések igen kis, néhány méteres hatótávolságának egy nagyságrenddel történő növelését.
- Az impulzus kompresszió UWB rendszerekre történő alkalmazásával jelentősen megnöveltük az UWB összeköttetésekkel elérhető hatótávolságot. Erre alapozva kidolgoztuk az UWB Chirp IR TR kommunikációs protokollt. A javasolt impulzus kompressziós eljárás előnye, hogy a kompresszió mértékétől függő feldolgozási nyereséget biztosít úgy, hogy közben megőriztük a gauss-i rendszerek csatorna diszperzió elnyomását

Az ultra-szélessávú (UWB) vezeték nélküli adatátviteli rendszer által kisugározható csúcs- és átlagteljesítmény-szinteket az FCC előírások szigorúan korlátozzák. Az FCC előírások kielégítése végett az UWB rendszerek vivőként általában gauss-i impulzusokat használnak, amelyek jelzési ideje igen rövid, mindössze néhány nanoszekundum. A kisugárzott impulzusok ultra-szélessávúságát a rövid jelzési idő biztosítja. Sajnos a betartandó FCC előírások és a CMOS implementáció együtt az UWB impulzusok által hordozott bitenergiát igen alacsony értékben korlátozzák.

Az összeköttetés hatótávolságát a kisugárzott bitenergia mértéke szabja meg. Az alacsony hatótávolságról több EU által finanszírozott kutatás is beszámolt: IST Programme (FP6) 2005; IST Programme (FP7) 2008-2011. Megoldást kell találni a bitenergia megnövelésére, azaz (i) növelhetjük az impulzus teljesítményét, (ii) valamint a jelzési időt. Sajnos a korábban publikált, impulzusokon alapuló UWB IR rendszerekben ezek a paraméterek nem növelhetők, így e rendszerek hatótávolsága néhány méterben korlátozott.

Az OTKA projektben kidolgozott UWB FM-DCSK rendszerben bitenergia a jelzési idő növelésével megemelhető, mivel a javasolt megoldásban a kisugárzott modulált jel ultra-szélessávúságát a kaotikus vivőhullámok biztosítják. A módszer alkalmazásával az UWB IR rendszerekkel elérhető néhány méteres hatótávolságot egy nagyságrenddel, azaz több tíz méterre sikerült növelni.

Ugyanakkor a hatótávolság jelentős megnövelése mellett az UWB FM-DCSK kommunikációs protokollt alkalmazó rendszerben használt jelzési idő növelés a WLAN és BioMED alkalmazásokban adott többutas és diszperzív terjedéssel jellemzett csatornában a vett jelek átlapolódása miatt jelentős hibaarány-romlás figyelhető meg.

Az OTKA kutatás során megmutattuk hogy az egymásnak ellentmondó két követelmény egyidejűleg kielégíthető az impulzus kompresszió alkalmazásával, amely lehetővé teszi az adó oldalon az összeköttetés hatótávolsága által igényelt, relatíve hosszú jelzési idők használatát, majd azoknak a vevőben detekció előtt végbemenő komprimálását. Így egyrészt a kisugárzott jelek kielégítik az FCC előírásokat, kellően nagy bitenergiát hordoznak, másrészt a vevőben a detektorra már a csatorna diszperzió hatását elimináló igen rövid jelzési idejű hullámformák kerülnek. Az általunk kidolgozott UWB Chirp IR TR rendszerben a bitenergia értékét több mint 15dB-el meg tudtuk növelni azáltal, hogy a jelzési időt az irodalomból ismert UWB IR rendszerekben alkalmazott 0,75ns-ről 100ns-ra tudtuk növelni. Az impulzus kompresszió révén az OTKA projekt keretében kidolgozott UWB Chirp IR TR rendszer mintegy 8dB-es feldolgozási nyereséggel rendelkezik.

Az UWB Chirp IR TR rendszer legfőbb előnye, hogy kombinálja, és együttesen kiaknázza az irodalomból ismert UWB IR és UWB FM-DCSK rendszerek előnyeit. Egyrészt az adóoldalon a jelentősen megnövelt jelzési idő nagyságrendileg megnöveli az összeköttetés hatótávolságát, másrészt a vevőoldalon a komprimálás után kapott rövid jelzési idejű hullámformák biztosítják a rádió csatorna diszperziójának elnyomását.

Az *“Alkalmazás orientált kommunikációs protokollok kutatása”* c. témakörhöz tartozó eredményeket a [1]-[2], [4], [6], [8] publikációk tartalmazzák.

2.3 Az SDE koncepcióhoz illeszkedő alapsávi WND modellek felállítása és azok szisztematikus származtatására szolgáló eljárások kidolgozása

Kutatási célkitűzés: olyan tervezési eljárások kidolgozása, ahol az egyes alkalmazásokat teljes egészében szoftverben és az alapsávban implementáljuk, és az alapsávi valamint fizikai jelek közti kapcsolatot az univerzális HW eszközökkel valósítjuk meg

Elért eredmények:

- A mérnöki gyakorlatnak megfelelő, szisztematikus tervezési eljárások adása a WLAN és BioMed WND eszközök alapsávi modelljeinek származtatására,
- Az alapsávi számítógépes szimulátorok SDE mérőrendszerbe való integrálásával olyan szoftver definiált kutatói platformokat dolgoztunk ki, amelyek alkalmasak a valóságos rendszerekben mérhető fizikai jelek generálására és feldolgozására. A módszer alkalmazása WLAN és BioMed WND eszközök valóságos csatornaviszonyokban fellépő hibaarányának mérésére.

Az RF, mikrohullámú és optikai jelek közvetlen digitális feldolgozását két probléma gátolja meg: (i) a Nyquist mintavételi tételből adódó, realizálhatatlanul magas mintavételi frekvencia és (ii) az ezen alkalmazásokban megkövetelt jel-zaj viszonyból adódó, A/D átalakítóra megkövetelt igen nagy felbontás. További probléma a nagy sebességű és felbontású A/D átalakítók jelentős teljesítményfelvétele, ami a mobil alkalmazásokban nem engedhető meg.

Szerencsére az RF/mikrohullámú/optikai alkalmazásokban használt jelek sáváteresztő típusúak, és ezek a jelek a komplex burkolók módszerével áttranszformálhatók az ún. alapsávba, ahol a szükséges mintavételi frekvenciát az eredeti sáváteresztő típusú jel sáv szélessége határozza meg. Az ekvivalens alapsávi jelfeldolgozás lényege, hogy a valóságos RF/mikrohullámú/optikai analóg jelfeldolgozást az ekvivalens

alapsávi modellek alapján, az elméletileg elérhető legkisebb mintavételi frekvenciát igénylő, komplex burkolókon digitális eszközökkel végzett alapsávi jelfeldolgozással helyettesítjük.

Egyes professzionális műszerekben, pl. vektor szignálgenerátorok és vektor jelanalizátorok, már régóta alkalmazzák a komplex burkolók módszerét. A módszer széleskörű elterjedését ezidáig két probléma akadályozta meg:

- elfogadható áron nem álltak rendelkezésre olyan univerzális HW eszközök és integrált áramkörök, amelyekkel a valóságos fizikai RF/mikrohullámú/optikai jelek és azok alapsávi ekvivalens, azaz a komplex amplitúdói közti kétirányú transzformációk elvégezhetők lettek volna;
- nem álltak rendelkezésre olyan szisztematikus módszerek, amelyek segítségével egy, a gyakorlatban már bevált nagyfrekvenciás analóg megoldást transzformálni lehetett volna az alapsávba. A publikált módszerek a feladatokat, mint a jelfeldolgozás körébe tartozó matematikai problémát kezelték. Ez a megközelítés egyrészt nem tette lehetővé a már verifikált és optimalizált analóg RF megoldások felhasználását, másrészt messze áll a mérnöki gyakorlattól.

Napjainkban megjelentek azok az univerzális HW eszközök és IC-k első példányai, amelyek elvégzik a valóságos fizikai jelek és azok digitális formában adott komplex burkolói közti transzformációkat. Az implementációk ezeken a digitalizált alapsávi jeleken alapulnak, és teljes egészében SW-ben valósulnak meg. Egy új alkalmazás implementációja, vagy egy már kidolgozott alkalmazás megváltoztatása mindössze a SW alkalmas megváltoztatását jelenti. Így egyazon univerzális HW eszközzel bármely alkalmazás implementálható.

Az OTKA projekt keretében kidolgozott SDE koncepció ezeken az univerzális HW eszközökön alapul, és szisztematikus eljárást ad a valóságos RF sáváteresztő típusú jeleken alapuló jelfeldolgozási eljárások alapsávba való transzformálására. A módszer garantálja az elméletileg elérhető legkisebb mintavételi frekvencia használatát. Az SDE koncepció a beágyazott rendszerek struktúrájához illeszkedik, azaz alkalmazkodik a számítógépes rendszerek rétegzett modelljéhez. Az SDE koncepciót két univerzális HW eszközhöz adaptáltuk, a mérés technikában megkövetelt pontosságot biztosító NI-PXI [10], és a szerényebb pontosságot biztosító USRP (Universal Software Radio Peripheral) [7] eszközökre. Végezetül eljárást adtunk az alapsávi jeleken alapuló szimulátorok SDE koncepcióba való integrálására [12].

Az SDE koncepció kidolgozása igen nagy nemzetközi visszhangot váltott ki. Az IEEE CAS Society felkérésére az SDE koncepcióról egy számos példával illusztrált tutoriál írtunk [5], továbbá jelen OTKA kutatás vezető kutatóját az IEEE CAS Society Distinguished Lecturernek választotta meg az SDE témakörben.

Az *“Az SDE koncepcióhoz illeszkedő alapsávi WND modellek felállítása és azok szisztematikus származtatására szolgáló eljárások kidolgozása”* c. témakörhöz tartozó eredményeket egy nemzetközi folyóiratban [5], és három konferencia közleményben [7], [10], [12] publikáltuk.

2.4 WLAN alkalmazásokra optimalizált, GP-GPU platformon implementált detekciós algoritmusok kidolgozása

Kutatási célkitűzés: olyan, GP-GPU platformon implementálható algoritmus kidolgozása, amely alkalmas a beltéri többutas terjedéssel jellemzett rádiócsatornákon át továbbított rádió hullámok hatékony detektálására

Elért eredmények:

- Megmutattuk, hogy az egyre több mobil eszközben megtalálható GP-GPU platformok megfelelően felépített, párhuzamos struktúrájú algoritmusokkal alkalmassá tehetők összetett detekciós feladatok megoldására;
- A GP-GPU platformon implementálható, ML detekción alapuló, PSD algoritmus kidolgozása, annak tesztelése.

A WLAN alkalmazásokban fellépő többutas terjedésből eredő hibaarány-romlás több módon is elkerülhető, a spektrumkiterjesztés (SS) vagy az OFDM moduláció alkalmazásával, vagy a MIMO rendszerekre alapozott detekciós algoritmusok implementálásával. A korábbi években a WLAN alkalmazásokban a MIMO

rendszerek nem jöhettek szóba, mivel a MIMO detektorok olyan nagy komplexitásúak, hogy azok nem valósíthatók meg erőforrás korlátozott környezetben.

Napjainkban egyre több mobil eszközben jelenik meg az általános célú grafikus processzor (GP-GPU), amely párhuzamos architektúrájából eredően felhasználható igen komplex, párhuzamos struktúrájú algoritmusok implementálására. A kutatás célja olyan detekciós algoritmus kidolgozása volt, amely egyidejűleg ki tudja használni a MIMO rendszerekből, és a GP-GPU processzorok párhuzamos architektúrájából származó előnyöket.

Az irodalomból ismert leghatékonyabb detekciós algoritmusnak, a Maximum Likelihood becslésen alapuló ML algoritmusnak, ezidáig csak szekvenciális algoritmusokon alapuló implementációit publikálták. A szekvenciális, illetve nagyszámú szekvenciális megoldást tartalmazó algoritmusokat nem lehet hatékony módon implementálni a GP-GPU platformon. A publikált megoldások jelentős részében csökkentett komplexitású, azaz közelítő ML algoritmusokat implementálnak. A csökkentett komplexitás ára a hibaarány romlása.

Az OTKA projektben olyan, párhuzamos gömb detekción (PSD) alapuló algoritmust dolgoztunk ki, amely hatékonyan kiaknázza a párhuzamos architektúrák erőforrásait. A kidolgozott PSD algoritmus egy új hibrid fabejárési stratégián alapul, amely hatékonyan képes ötvözni a szélességi bejárást a mélységi bejárással úgy, hogy a fabejárások közti váltás nem okoz a program futását jelentősen megnövelő szekvenciális átmeneteket. Fontos sebességnövelő tényező, hogy a közbenső keresési szinteken bejárt csúcokat metrikájuk alapján rendezzük, és így biztosítjuk a keresési tér néhány iteráció utáni jelentős kontradikcióját. A kidolgozott algoritmus előnye, hogy minden összetevője párhuzamos elemekből áll, és egyes jól definiált paraméterek segítségével a párhuzamosság mértékét és a használt memória mennyiségét be lehet állítani. Az algoritmus ezen tulajdonságai lehetővé teszik azt, hogy az algoritmust hatékonyan lehessen implementálni számos párhuzamos architektúrán.

Az algoritmust egy általános célú GP-GPU architektúrán implementáltuk. Megmutattuk, hogy az általunk kidolgozott PSD algoritmus teljesítménye felülmúlja az irodalomból ismert ML detekciós algoritmusokat, és a vetekedik a szerényebb hibaarányt biztosító csökkentett komplexitású ML algoritmusok sebességével is.

Az *“WLAN alkalmazásokra optimalizált, GPU platformon implementált detekciós algoritmusok kutatása”* c. témakörben benyújtott folyóiratcikkünk [13] túljutott az első bírálati fázison, jelenleg folyik a bírálók által javasolt változtatások átvezetése.

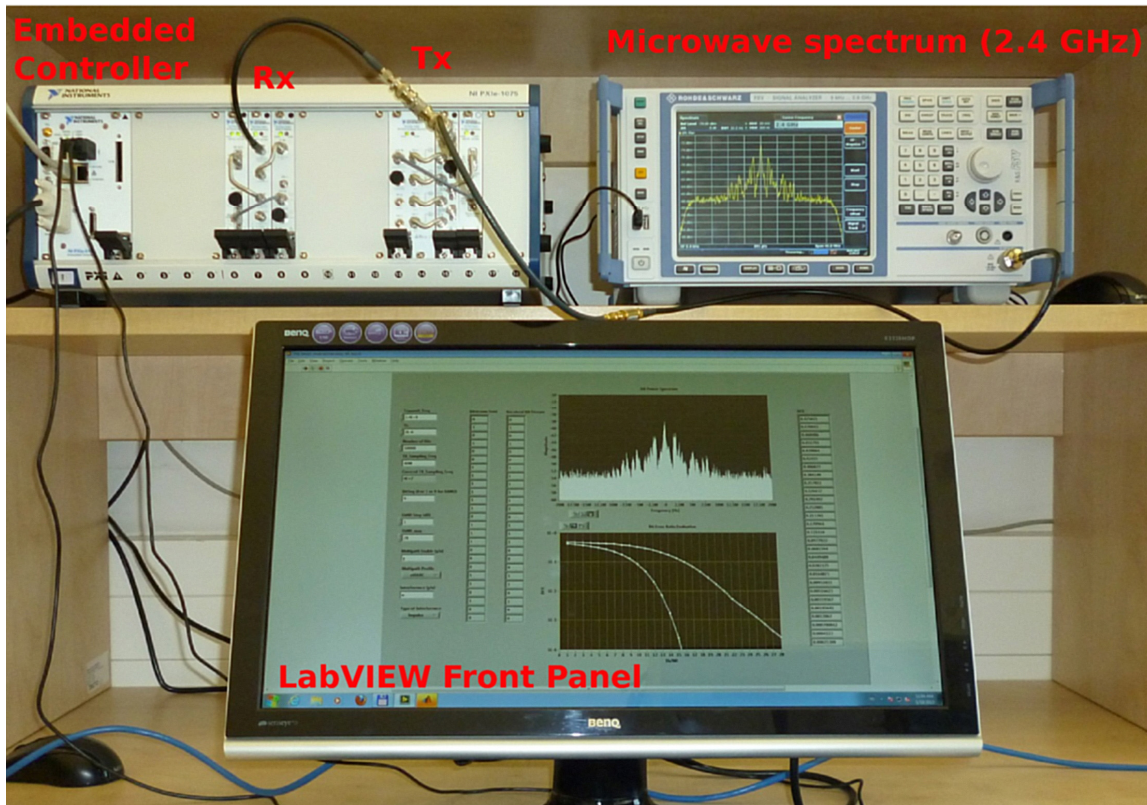
3. Az OTKA projektben elért kutatási eredmények alkalmazása

Az OTKA projekt keretében kidolgozott SDE koncepció a nemzetközi tudományos és egyetemi életben túlmenően felkeltette a témakörben érdekelt vállalatok figyelmét is. Az OTKA projekt keretében, valamint a National Instruments, Rohde & Schwarz és Agilent cégek támogatásával a Pázmány Egyetem Információs Technológiai és Bionikai Karán felállításra került a *“Szoftver definiált elektronika és virtuális műszerezés”* (SDE-VI) laboratórium, amelynek legfontosabb eszközei:

- egy NI-PXI univerzális HW eszközön alapuló, SDE kutató és fejlesztő platform;
- négy NI-Ettus USRP eszközön alapuló, SDE kutató és fejlesztő platform;
- Rohde & Schwarz mikrohullámú spektrum és jelanalizátor;
- Agilent RF digitális oszcilloszkóp.

Egy hazai cég, a Mobitel Híradástechnikai Bt. felvette a kapcsolatot kutatócsoportunkkal, és jelenleg is folyik a szakmai konzultáció a cég által a mobiltelefon szolgáltatók számára gyártott GSM és UMTS erősítőkben alkalmazott HW-es eszközökön alapuló és ezért nem átkonfigurálható megoldások dinamikusan átkonfigurálható ekvivalens megoldás által történő kiváltásáról. Ezt az igényt az indukálta, hogy a mobil szolgáltatóknál gyakran előfordul, hogy a már telepített eszközöket pl. a frekvenciakiosztás-változás miatt át kell konfigurálni. Ezidáig az átkonfigurálás a frekvenciakiosztás-változás esetén a HW szűrők áthangolását jelentette. Azt kell megvizsgáljunk, hogy a GSM és UMTS erősítők esetén van-e lehetőség az átkonfigurálhatóságot biztosító SDE koncepció szerinti implementációra.

Az USRP eszközökön alapuló SDE platformokat az oktatásban, míg a NI-PXI professzionális pontosságú és kivitelű eszközön alapuló SDE platformot a tudományos kutatásban és PhD képzésben használjuk. Az SDE-VI labor felszereltsége nemzetközi viszonylatban is kiemelkedő színvonalú. Illusztrációként az 1. ábrán bemutatjuk az OTKA projekt keretében kidolgozott, NI-PXI HW eszközön alapuló SDE platformot. Az ábrán egy szoftverben implementált FM-DCSK összeköttetés különböző WLAN csatornaviszonyra érvényes hibaarányának automatikus mérése látható. A fejlesztő platform egyes blokkjainak magyarázatát részben az ábrán, részben a képaláírásban adjuk meg.



1. ábra. A PPKE-ITK kar SDE-VI laborjában felállított, NI-PXI alapú, SDE kutató és fejlesztő platform fényképe. A szoftver futtatását végző ún. “Embedded Controller”, az RF és alapsávi tartományok közti transzformációt elvégző “Rx”, és az inverz transzformációt megvalósító “Tx” univerzális HW eszközök egy PXI keretben találhatóak. A PC monitoron látható “LabVIEW Front Panel” az “Embedded Controller”-en futó szoftver grafikus kezelői felületét jeleníti meg. A valóságos fizikai jelek SMA csatlakozókon jelennek meg. A Rohde & Schwarz mikrohullámú spektrumanalizátor a SW-ben generált RF jelek ellenőrzésére szolgál.

Az OTKA kutatás keretében elért új tudományos eredmények bekerültek két, folyamatosan oktatott tantárgyba, amely tantárgyak laborgyakorlatait az SDE-VI laborban tartjuk meg:

1. Advanced Telecommunications Systems
angol nyelven oktatott tantárgy;
tárgyfelelős oktató: Kolombán Géza
http://users.itk.ppke.hu/~kolomban/advanced_com/index.html
Az OTKA projekt oktatott témakörei:
 - Az SDE koncepció elmélete és gyakorlata
 - Az SDE koncepció alapján megvalósított fizikai rétegek
2. Mérő automata rendszerek
tárgyfelelős oktató: Kolombán Géza
http://users.itk.ppke.hu/~kolomban/software_defined/index.html
Az OTKA projekt tantárgyban oktatott témakörei:
 - A virtuális műszerezés elmélete és gyakorlata, az SDE koncepció

- A virtuális műszerezésre alapozott automata kalibrációs rendszerek és mérőautomaták

Az "Advanced Telecommunication Systems" c. tantárgyra nemzetközi szinten is felfigyeltek, és az rendszeresen oktatásra kerül Hong Kongban is:

1. The Hong Kong Polytechnic University
Department of Electronic and Information Engineering
Subject lecturer: Géza Kolombán
<http://www.eie.polyu.edu.hk/~enkgeza/eie579/index.html>

4. Az OTKA projektben elért eredmények nemzetközi visszhangja

Az IEEE CAS Society beindította a Distinguished Lecturer Program-ot (DLP) amelynek célja a legújabb kutatási trendek és technológiák elterjedésének meggyorsítására. A DLP program keretében a Distinguished Lecturer-ök előadásokat tartanak a legújabb trendekről és technológiákról. Az IEEE CAS DLP program presztízst jól mutatja, hogy az IEEE CAS Society évente mindössze 10 személyt választ be a Distinguished Lecture-ök közé egy, a teljes világra kiterjedő jelölés és verseny alapján. Az IEEE CAS DLP előadókat két éves időszakra választják meg, és ebben az időszakban az IEEE finanszírozza a DLP előadók utazását.

Az OTKA projektben a szoftver definiált elektronika terén elért eredményeink alapján az IEEE CAS Society a 2013-14 időszakra Kolombán Gézát, jelen OTKA projekt vezető kutatóját, beválasztotta az IEEE CAS Distinguished Lecturer-ök közé. Ezidáig meghívásos alapon az alábbi DLP előadások kerültek megtartásra:

1. G. Kolombán, "Software Defined Electronics (SDE): A New Research Field for the IEEE CAS Society,"
Guangdong University of Technology, April 09, 2013, Guangzhou, P.R. China.
2. G. Kolombán, "Software Defined Electronics: A Revolutionary Paradigm for RF Radio and Measurement Systems,"
A day-long short course organized by IEEE UK&RI Solid State Circuits Chapter, Tyndall National Institute, May 09, 2013, Cork, Ireland.
3. G. Kolombán, "Software Defined Electronics (SDE): A Revolutionary Design Paradigm for Automated Calibration and Test Systems,"
Beijing Jiaotong University, May 12, 2013, Beijing, P.R. China.
4. G. Kolombán, "Software Defined Electronics: A New Approach for Design and Implementation of Future Communications Systems," Short course at EAMTA, Facultad Regional Buenos Aires - Universidad Tecnológica Nacional, August 12 and 14, 2013, Buenos Aires, Argentina.
5. G. Kolombán, "Implementation of SDE-Based Universal RF Testbed and Derivation of Baseband Equivalents," CAMTA Day, Facultad Regional Buenos Aires - Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, August 15, 2013 Buenos Aires, Argentina.
6. G. Kolombán, "Software Defined Electronics (SDE): A New Research Field for CAS Society," Tokushima University, December 04, 2013, Tokushima, Japan.
7. G. Kolombán, "Software Defined Electronics (SDE): A New Research Field for CAS Society," Meiji University, December 11, 2013, Tokyo, Japan.
8. G. Kolombán, "New Approach for Design and Implementation of Future Communications Systems," Tokyo University of Science, December 13, 2013, Tokyo, Japan.

5. Az OTKA támogatás feltüntetésével megjelent publikációk listája

Sorrend	Publikáció adatai	Év	Dokumentum típusa	Impakt faktor	OTKA támogatás feltüntetve
1.	Tamás Krébesz, Csaba Máté Józsa, Géza Kolombán: <i>New Carrier Generation Techniques and Their Influence on Bit Energy in UWB Radio</i> ,	2011	konferencia	-	igen

	In Proc. 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD 2011)				
2.	Tamás Krébesz, Géza Kolumbán, Csaba Máté Józsa: <i>Exploiting pulse compression to generate an IEEE 802.15.4a-compliant UWB IR pulse with increased energy per bit</i> , In Proc. 2011 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB)	2011	konferencia	-	igen
3.	W. K. Xu, L. Wang, Géza Kolumbán: <i>A Novel Differential Chaos Shift Keying Modulation Scheme</i> , International Journal of Bifurcation and Chaos	2011	folyóiratcikk	0.750	igen
4.	Tamás Krébesz, Géza Kolumbán, Csaba Máté Józsa: <i>Ultra-Wideband Impulse Radio Based on Pulse Compression Technique</i> , In Proc. 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD 2011)	2011	konferencia	-	igen
5.	Géza Kolumbán, Tamás Krébesz, Francis C M Lau: <i>Theory and Application of Software Defined Electronics: Design Concepts for the Next Generation of Telecommunications and Measurement Systems</i> , IEEE CIRCUITS AND SYSTEMS MAGAZINE (ISSN: 1531-636X) 12:(2) pp. 8-34.	2012	folyóiratcikk	1.439	igen
6.	Géza Kolumbán, Tamás Krébesz, Francis C M Lau, Chi K. Tse: <i>Performance Comparison of UWB Chirp IR TR and UWB FM-DCSK TR Systems Implemented with Autocorrelation Receiver</i> , In Proc. 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	2012	konferencia	-	igen
7.	Géza Kolumbán, Tamás Krébesz, Chi K. Tse, Francis C M Lau: <i>Implementation of FM-DCSK modulation scheme on USRP platform based on complex envelope</i> , In Proc. 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	2012	konferencia	-	igen
8.	Géza Kolumbán, Tamás Krébesz, Chi K. Tse, Francis C M Lau: <i>Improving the coverage of ultra wideband impulse radio by pulse compression</i> , In Proc. 2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems	2012	konferencia	-	igen

9.	Weikai Xu, Lin Wang, Géza Kolumbán: <i>A New Data Rate Adaption Communications Scheme for Code-Shifted Differential Chaos Shift Keying Modulation</i> , International Journal of Bifurcations and Chaos, No.7, Vol.22	2012	folyóiratcikk	0.920	igen
10.	Tamás Krébesz, Géza Kolumbán, Francis C M Lau, Chi K Tse: <i>Application of universal software defined PXI platform for the performance evaluation of FM-DCSK communications system</i> , Proceedings of the European Conference on the Circuit Theory and Design 2013	2013	konferencia	-	igen
11.	Géza Kolumbán, Tamás Krébesz, Chi K. Tse, and Francis C.M. Lau: <i>Basics of Communications Using Chaos</i> , Chaotic Signals in Digital Communications -Electrical Engineering & Applied Signal Processing Series, October 25, 2013 by CRC Press	2013	könyvfejezet	-	igen
12.	Géza Kolumbán, Tamás Krébesz, Chi K Tse, Francis C M Lau: <i>Turn your baseband Matlab simulator into a fully functional, 2.4-GHz, operating FM-DCSK transceiver using SDE platform</i> , In: Proceedings of the European Conference on the Circuit Theory and Design 2013	2013	konferencia	-	igen
13.	Csaba Máté Józsa, Géza Kolumbán, Antonio M Vidal, Francisco J Martínez-Zaldívar, Alberto González: <i>Parallel Sphere Detector algorithm providing optimal MIMO detection on massively parallel architectures</i> , Elsevier, DSP -megjelenés alatt	2014	folyóiratcikk	nem ismert	igen

Meghívott előadások listája

Az OTKA kutatás témájában, a publikációkhoz kapcsolódó előadásokon túlmenően, az alábbi előadások hangzottak el:

Tamás Krébesz, *Application of pulse compression technique to generate IEEE 802.15.4a-compliant UWB IR pulse with increased energy per bit*, 6th IEEE UWB Forum on Sensing and Communications 2011, Graz, Austria, 05.05.2011.

Csaba Józsa, *Exploiting multi-core architecture capabilities in UWB communications*, 6th IEEE UWB Forum on Sensing and Communications 2011, Graz, Austria, 05.05.2011.