

Robusztus mérési és becslési eljárások

Habilitáció tézisei

Simon Gyula

Pannon Egyetem

2016

Bevezetés és célkitűzés

A mérési és becslési eljárások számos alkalmazási területen megjelennek. A gyermek becsli az pocsolya szélességét, mielőtt megpróbálja azt átugorni; a héja becsli a galamb távolságát; a sportorvos méri az olimpikon testzsír-indexét; az autó navigációs rendszere méri a jármű jelenlegi helyzetét. Ezen eljárások esetenként önállóan, célként jelennek meg (pl. testzsír-index mérése), de sok esetben a felhasználó elől teljesen rejtve, az eszközökbe beágyazva, szolgáltatásként vannak jelen (pl. a navigációs rendszer által használt GPS szolgáltatás). Ilyen eljárások széleskörű alkalmazhatóságának feltétele, hogy a mérési/becslési eljárás robusztus legyen az alkalmazási környezetben bekövetkező zavarokra, az egyes eszközök meghibásodására, vagy akár a felhasználó által elkövetett esetleges hibákra.

Tudományos kutatásaim során mindig különösen vonzódtam a gyakorlatban is alkalmazható eredményekhez, ezért az idők során általam kidolgozott mérési és becslési eljárások java része valamilyen szempontból valóban robusztus lett. Jelen tézisek ezeket az eredményeket foglalják össze, három nagyobb csoportra osztva.

Az első téziscsoport modellparaméterek becslését végző új eljárásokat mutat be. Az eredmények tartalmazznak módszert gerjesztőjelek tervezésére, amelyek immunisak az alkalmazói hibákkal szemben; hatékony spektrumbecslőt, amely még igen nagyméretű feladatok esetén is működőképes marad; valamint egy automatikus modellszelekciós eljárást, ami a hagyományosan bonyolult paraméterbecslési eljárásból kiküszöböli a felhasználói beavatkozást, így elérhetővé teszi azt laikus felhasználók számára is.

A második téziscsoport új robusztus pozícióbecslő eljárásokat mutat be. Az eljárások közös jellemzője és a robusztusság forrása, hogy azok a mérések konszenzusán alapulnak. Az alapló módszer automatikusan képes kiválasztani adott hibahatárral konzisztens méréseket és ebből akkor is pontos becslőt szolgáltat, ha sok hibás mérés van jelen. Az alapló módszer két kiterjesztését is bemutatom: az első a becslőt egy járulékos lépés segítségével pontosítja, így statisztikailag az adott körülmények között elméletileg elérhető legnagyobb pontosságot adja. A másik kiterjesztés az alkalmazási környezetet tágítja: míg az alapló módszer jól definiálható trigger-események kibocsátását követeli meg a lokalizálandó objektumtól (pl. fegyver dörrenése), a kiterjesztett módszer ezeket az eseményeket automatikusan generálja folyamatos jelekből (pl. beszédhangból).

A harmadik téziscsoport olyan beágyazott köztesréteg-szolgáltatásokat és tervezési eszközöket mutat be, amelyek nem jelennek meg a felhasználó számára, de fontosak elosztott mérőrendszerek működése szempontjából. Az eredmények tartalmazznak elosztott hálózatok energiahatékony üzemeltetését segítő, és ezzel egy időben garantált lefedést biztosító szolgáltatást; strukturálisan stabil időszinkronizációs protokollt gyűrű topológiájú hálózatokra, valamint egy szimulációs eszközt vezeték nélküli elosztott rendszerek tervezésére és tesztelésére.

1. Robusztus modellparaméter-becslő eljárások

1.1. Eljárás robusztus szélessávú multiszinuszos gerjesztőjelek tervezésére

Multiszinuszos gerjesztőjelek felhasználása rendszeridentifikáció céljára igen gyakori, ezek tervezésére számos jól bevált módszert alkalmaznak. A tervezés során a jelek teljesítményét a vizsgált frekvenciatartományra tipikusan egyenletesen szokás elosztani, szabad paraméter azonban a komponensek fázisa. A fázisok segítségével a gerjesztőjelek egy másodlagos, ámde a gyakorlatban igen fontos tulajdonsága, a csúcstényező minimalizálható. Erre a célra akár a Schroeder multiszinuszos jel, vagy ennek tovább optimalizált változatait használják. Sajnos ezen gerjesztőjelek nemkívánatos tulajdonsága, hogy nem szakszerű felhasználás esetén egyes frekvenciatartományok a vártnál lényegesen kisebb teljesítménnyel gerjesztődhetnek (a vizsgálatok szerint a veszteség akár 30db is lehet). Ilyen szakszerűtlen felhasználás igen gyakori, például a jó szándékú felhasználó a tervezett gerjesztőjelet két részre osztja identifikáció és verifikáció céljára, vagy akár a hosszú mérési folyamatot félbeszakítja. A javasolt módszer robusztus a gerjesztőjel ilyenén csonkolásos felhasználásával szemben.

Statisztikai alapú becslőt adtam a véletlen fázisú gerjesztőjel csonkolásából eredő veszteség számszerűsítésére. Megmutattam, hogy a csonkolásból adódó veszteség a véletlen fázisú multiszinuszos gerjesztőjelek felhasználása esetén alacsony (tipikus paraméterek esetén 1-3 dB), míg ezen értékek a hagyományos a Schroeder-alapú tervezés esetén igen magasak is lehetnek (akár 30-40 dB). Megmutattam, hogy az irodalomban ismert és széles körben használt csúcstényező-optimalizáló algoritmusok nem befolyásolják lényegesen az inicializáló jel fázisának statisztikai tulajdonságait, így a következő tervező algoritmust javasoltam robusztus multiszinuszos gerjesztőjelek tervezésére: a tervezés véletlen fázisú multiszinuszos gerjesztőjelből indul (ellentétben az irodalomban gyakorta javasolt Schroeder multiszinusszal), majd erre a jelre alkalmazunk csúcstényező minimalizálást. A tesztek tanúsága szerint a tervezett jelek csúcstényezője hasonló (esetenként jobb is), mint a hagyományos tervező módszerek által szolgáltatott jeleké, míg a csonkolásból eredő potenciális veszteség lényegesen alacsonyabb. A javasolt algoritmus konvergenciatulajdonságait két ismert csúcstényező-optimalizáló algoritmus esetén is megvizsgáltam: a módszer még igen magas számú frekvenciakomponenst tartalmazó gerjesztőjel esetén is elfogadható sebességgel konvergál (pl. 1000 frekvenciakomponens esetén a futási idő kb. 2 perc).

Kapcsolódó publikációk: [S1], [S2].

1.2. Hatékony számítási eljárás periodikus jelek spektrumának meghatározásához

Hatékony számítási eljárást javasoltam periodikus jelek spektrumának meghatározásához. Az iteratív eljárás két lépésből áll: az első lépésben az alapharmonikus frekvenciájának közelítő ismeretében a lineáris legkisebb négyzetek (least squares - LS) probléma megoldásával előállítjuk a spektrum becslőjét, majd ennek ismeretében a második lépésben újabb frekvenciabecslőt készítünk egy nemlineáris LS (NLS) megoldás segítségével. A két lépést a konvergenciafeltétel bekövetkezéséig ismételve (amíg a hiba nem változik lényegesen) az LS értelemben (lokálisan) optimális frekvenciabecslő előállítható. Az LS probléma megoldásához a javasolt eljárás rezonátor-alapú rekurzív számítási eljárást használ, míg a második lépésben kvadratikus illesztéssel határozza meg az új frekvenciabecslőt. A javasolt módszer előnye, hogy lényegesen kevesebb erőforrást igényel, mint a hagyományos (mátrix alapú) megoldási módok. A hagyományos módszer memóriaigénye és számítási igénye rendre $O(MN^2)$ és $O(MN)$, míg a javasolt módszer esetén ezen értékek rendre $O(MN)$ és $O(N)$, ahol M a harmonikus komponensek száma és N a minták száma. Mivel valós feladatok esetén mind a memóriafelhasználás, mind a számítási igény

nagyságrendekkel kisebb a hagyományos módszerekénél, a javasolt eljárás olyan nagyméretű feladatok megoldására is alkalmas, amelyeket a hagyományos megoldási módszerrel nem lehetett kezelni. Hosszú adatrekordok esetén a variancia kiszámítása a hagyományos blokkos eljárással történhet, de az új módszer előnye, hogy nem igényli az adatok szegmentálását, újraszinkronizálását és újrabecslését. Rövid adatrekordok esetén a hagyományos blokkos módszerrel a variancia nem becsülhető, a javasolt eljárás azonban ilyenkor is elfogadható minőségű variancia-becslőt ad a rekurzív becslő mintánkénti eredményeinek felhasználásával.

Kapcsolódó publikációk: [S3], [S4], [S5].

1.3. Automatikus modellszelekciós eljárás lineáris idő-invariáns rendszerek identifikációjához

A rendszeridentifikációs eljárások gyakorlati felhasználói gyakorta nem rendelkeznek mély ismeretekkel a rendszeridentifikáció témakörében. Ilyen felhasználóktól nem várható el a bonyolult és sok paraméterrel rendelkező eljárások megfelelő használata, számukra sokkal inkább egy teljesen automatikus eljárás lenne kívánatos. Míg kutatások az identifikációs eljárások számos elemét önállóan vizsgálták, ilyen egységes és könnyen kezelhető módszer nem állt rendelkezésre.

Kidolgoztam egy teljesen automatikus frekvenciatartománybeli modellszelekciós eljárást, amely a felhasználótól mindössze a mérési eredményeket várja bemenetként és kimenetként a vizsgált rendszer identifikált és validált modelljét képes szolgáltatni, a gyakorlatlan felhasználó számára értelmezhető szöveges értékeléssel együtt. A módszer a következő lépésekből áll:

- a. Mérési eredmények előfeldolgozása. Itt a mért bemenő és kimenő jel spektrumának kiszámítása DFT segítségével történik, majd ezekből a minta középértékek, minta varianciák és minta kereszt-kovarianciák számítása történik meg az irodalomból jól ismert módszerekkel [1].
- b. Durva fokszámbecslés. A lépés során egy gyors nemparametrikus algoritmus [2] segítségével egy hozzávetőleges statisztikai fokszámbecslést végzünk. A módszer gyorsasága abban rejlik, hogy a rendszer hibáját a paraméterek tényleges kiszámítása nélkül becsli. Ezt a módszert a továbbiakban gyors tesztnek nevezzük. A lépés eredményeképpen egy kezdeti, valószínűleg kissé konzervatív fokszámbecslő áll rendelkezésünkre.
- c. Paraméterbecslés és modell-validáció. Mivel a (b) lépésben alkalmazott gyors algoritmus sztochasztikus, lehetséges, hogy a kezdeti fokszámbecslő a várakozások ellenére mégis túl alacsony. Ebben a lépésben ténylegesen kiszámoljuk a becsült fokszámmal tartozó paramétereket és korrelációs tesztet hajtunk végre a maradó hibán [3]. A továbbiakban ezt a módszert lassú tesztnek nevezzük. Amennyiben a becslő a lassú teszten megbukik, a fokszámmat növeljük és a lépést addig ismételjük, amíg megfelelő minőségű becslőt nem kapunk. A lépés eredményeképpen egy validált, ám a kelleténél valószínűleg magasabb fokszámú becslőt kapunk.
- d. Fokszám redukció I. Ebben a lépésben a bemeneti modell fokszámát iteratíván csökkentjük mindaddig, amíg a redukált modell még mindig kielégítő pontosságú. A fokszámcsökkentést pólusok, zérusok, vagy pólus-zéró párok eliminálásával végezzük, ahol a potenciális gyökök kijelölése Rolain szignifikancia-tesztje segítségével történik [2]. Minden potenciális gyök eliminálása után ellenőrizzük a maradó modell minőségét: sikeres teszt esetén a csökkentett fokszámú modellel folytatjuk az iterációt, sikertelen teszt esetén pedig másik gyökkel próbálkozunk. A sebesség növelése érdekében a modell minőségét először a gyors teszt segítségével végezzük; amennyiben ez a módszer már nem vezet eredményre, a lassú tesztet

alkalmazzuk a modell hibájának meghatározására. Minden sikeres lassú teszt után ismét visszatérünk a gyors teszthez. A két módszer váltogatásával gyors konvergencia és pontos becslő érhető el. A lépés eredményeképpen előáll egy olyan minimális fokszerű parametrikus modell, amely mind a hibafüggvény tesztet, mind a korrelációs tesztet sikeresen teljesíti.

- e. Fokszám redukció II. Mivel a gyakorlati esetek egy részében előnyösebb az alacsony fokszerű modell alkalmazása a pontosság némi csökkentése árán, ez a lépés tovább csökkenti a modell fokszerűségét. A módszer hasonlóan működik, mint a (d) lépés, de itt nem alkalmazunk korrelációs tesztet, helyette a (d) lépésben meghatározott validált modellből származtatott hibahatárt alkalmazzuk a hibafüggvény teszt során.
- f. Validáció. Ebben a lépésben a (d) és (e) lépésben származtatott modellek validálása és értékelése történik meg. Az elméleti és mért hiba aránya, valamint a korrelációs teszt eredménye alapján a rendszer szöveges értékelést készít, mely alapján a gyakorlatlan felhasználó is képes eldönteni, hogy a származtatott modellek közül melyik modell alkalmas céljai elérésére.

Kapcsolódó publikációk: [S6], [S7].

Az eredmények hasznosítása

A javasolt módszerek és eljárások kifejlesztése valós gyakorlati igények mentén történt: a modellparaméterek becslése számos alkalmazási területen felmerülő probléma, ahol a felhasználók az alkalmazási terület szakemberei, de a rendszeridentifikáció témakörében nem rendelkeznek mély ismeretekkel. A javasolt módszerek ezen felhasználók számára adnak reális lehetőséget szakszerű és pontos modellalkotás végrehajtására.

A kidolgozott módszerek a gyakorlati alkalmazására és további fejlesztésére a Kollár István által kifejlesztett Frekvenciatartománybeli Identifikációs (FDIDENT) Toolbox-ban került sor. Itt kialakításra került egy felhasználóbarát, grafikus felhasználói környezet, amely integrálja és intuitív módon segíti a megfelelő módszerek kiválasztását, felhasználását ([S8], [S9], [S10], [S11], [S12]). A Toolbox jelenleg is kereskedelmi forgalomban kapható, illetve non-profit célra ingyenesen felhasználható [4].

2. Robusztus pozícióbecslő eljárások

2.1. Konszenzus alapú robusztus szenzorfüzió futási idő-különbségek alapján történő helymeghatározáshoz

Helymeghatározó eljárások gyakorta alapulnak különféle (pl. akusztikus vagy rádiófrekvenciás) jelek futási idejének (Time of Arrival, TOA), vagy futási idő-különbségének (Time Difference of Arrival, TDOA) mérésén. A TDOA alapú helymeghatározási probléma a következő: Adott egy ismeretlen $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$ helyzetű jelforrás, ami egy ismeretlen (véletlen) t_0 időpillanatban jelet bocsát ki. (Ha t_0 ismert, akkor a jóval egyszerűbb TOA problémával állunk szemben.) A jel a közegben állandó v sebességgel terjed. Adott továbbá N darab érzékelő az ismert $p_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ pozíciókon, amely érzékelők a kibocsátott jelet detektálják és az érzékelés t_i , $i = 1, 2, \dots, N$ időpontját megméri. Az érzékelők órái szinkronizáltak. Az p_i érzékelőpozíciók és a t_i érzékelési idők felhasználásával meghatározandó a jeladó p_0 pozíciója.

A probléma geometriailag jól kezelhető: mivel minden érzékelő-párhoz rendelhető egy - az érzékelési idők különbségétől függő - hiperboloid felület, amelyen a jeladónak el kell helyezkednie, a megoldást ezen hiperboloidok metszete adja. A probléma tehát nem degenerált érzékelő-elhelyezés esetén n dimenziós térben való lokalizáció esetén $N > n$ érzékelővel megoldható. A rendszerek robusztusságának növeléséhez azonban ennél (akár lényegesen) több érzékelőt is használhatunk. Ilyen esetekben alapvető kérdés a túlhatározott egyenletrendszer megoldásának módja. A leginkább elterjedt megoldás a legkisebb négyzetek (Least Squares, LS) elvén alapul, amikor is egy négyzetes $e(p)$ hibafüggvényt alkalmazva keressük azt a p_0 pozíciót, ahol $e(p)$ minimális. Az LS megoldás előnyös ott, ahol a méréseket kis mérési zaj terheli, azonban nagy hibájú mérések jelenléte (pl. visszhang miatti téves detekció) a becslőt jelentősen torzíthatja.

Új elvű, a mérési hibákra nézve nagy mértékben toleráns, a mért értékek konszenzusán alapuló fúziós eljárást javasoltam TDOA alapú helymeghatározó rendszerek megvalósítására. A módszer automatikusan azonosítja és figyelmen kívül hagyja a megengedettnél nagyobb hibájú méréseket. A javasolt módszer szerint a becslő azon p pozícióban található, ahol a legtöbb mérés, adott hibahatáron belül, támogatja azt a közös hipotézist, hogy a forrás a p pozícióban van. TDOA esetre a konszenzusos becslő származtatása a következő:

- A forrás véletlen t_0 időpillanatban jelet bocsát ki, amelyet a szenzorok érzékelnek és a t_i érzékelési időket rögzítik ($i = 1, 2, \dots, N$).
- Tegyük fel, hogy az ismeretlen pozíciójú forrás a tér $p = (x, y, z)$ pozíciójában van. Ebben az esetben minden szenzorra (p, p_i, t_i és v ismeretében) kiszámítható az a $\hat{t}_i$ időpillanat, amikor a szenzor mérése szerint a feltételezett p pozícióból a jelnek el kellett indulnia.
- Definiáljunk egy $\tau \geq 2(\frac{\Delta}{v} + T)$ hibasávot, ahol Δ a szenzorok maximális pozícióhibája, míg T az időmérés maximális hibája (amely egyrészt a szenzorok közötti időszinkronizációs hibából, másrészt a detekció és az időmérés pontatlanságából adódik).
- Keressük meg azt az (egyik) t időpillanatot, amelyre a $[t - \frac{\tau}{2}, t + \frac{\tau}{2}]$ intervallumba a $\hat{t}_i$, $i = 1, 2, \dots, N$ értékek közül a legtöbb esik. Legyen ezen intervallumba eső $\hat{t}_i$ értékek száma a p pozícióhoz tartozó, $C_\tau(x, y, z)$ konzisztencia-érték.
- A becslő a $C_\tau(x, y, z)$ konzisztencia-függvény maximumánál van. Általában C_τ maximumát nem egy pontban, hanem egy Ψ területen veszi fel, amelynek mérete függ τ értékétől. Praktikusan a

pozícióbecslőt Ψ középpontjába helyezzük, míg Ψ területe, illetve elhelyezkedése jól használható a lehetséges becslési hiba jellemzésére.

A fenti algoritmus feltételezi, hogy a vizsgált tér minden egyes pontjában $C_\tau(x, y, z)$ értékét ki tudjuk értékelni, ezért valós körülmények között nem alkalmazható. Valós felhasználásra kidolgoztam a fenti algoritmus iteratív, diszkrétizált változatát. A gyors kiértékelés során egy korlátozás és szétválasztás (Branch and Bound, B&B) típusú keresést végzünk fokozatosan csökkenő méretű térkockákban, amelyek mérete az eljárás során csökken. A keresés során az térkocka aktuális méretéhez adaptáljuk τ kiszámítása során használt Δ paramétert.

A javasolt eljárás olyan esetekben alkalmazható, amikor a jelforrás jól azonosítható, diszkrét jeleket bocsát ki. Ilyen lehet pl. lövések hangja (akusztikus forrás) vagy impulzus-jellegű rádiójelek (ultra-szélessávú rádió forrás). A módszer tesztelése során akusztikus forrásokat és mikrofonos érzékelőket használtunk.

A javasolt eljárás valós méretű tesztkörnyezetben (100x100x5m), nagy számú szenzor ($N > 50$) alkalmazásával is valós időben képes a fúziót elvégezni. Az eljárás nagy előnye a nagymértékű robusztusság: a mérések nagy része is lehet hibás (tesztek során a hibaaarány sokszor az 50%-ot is meghaladta), a fúzió mégis nagy pontosságú eredményt ad. A fenti környezetben az átlagos hiba mindössze 1.3m volt.

Kapcsolódó publikációk: [S13], [S14], [S15], [S16], [S17].

2.2. Megnövelt pontosságú pozícióbecslés a konszenzus alapú szenzorfúzió kiterjesztésével

A 2.1 pontban javasolt alapalgoritmus a keresést diszkrét térben végzi. Mivel a mérésben mindig jelen lévő zaj a konzisztenciafüggvénynél alkalmazott τ paraméter tetszőleges csökkentését nem teszi lehetővé, így a módszer felbontása és pontossága nem növelhető tetszőlegesen. A τ paraméter értéke ugyan hangolható lenne, amennyiben a rendszerben jelen lévő zajokról pontos modell állna rendelkezésre, de ez gyakorlati szempontból nem reális megoldás. Helyette a pontosság növelésére egy kiterjesztést javasoltam, ami csak a zajmodell hozzávetőleges ismeretét teszi szükségessé. A módszer az alap-algoritmust használja (1) egy kezdeti pozícióbecslő előállítására és (2) azon szenzorok azonosítására, amelyek a hibamodellen belül konzisztens módon támogatják ezt a becslőt. Ezután ezen szenzorok mérési eredményeinek felhasználásával, a kezdeti becslőből indulva egy gradiens-alapú algoritmussal pontosítjuk a becslőt.

A kiterjesztett pozícióbecslő működése a következő:

- A durva zaj- és hibamodell ismeretében a korábbiakhoz hasonlóan állítsuk be τ értékét és futtassuk le az eredeti algoritmust. Az algoritmus eredménye egy olyan $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ pozíció, ahol $C_\tau(x, y, z)$ felveszi a maximumát.
- Az $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ pozícióhoz tartozik az algoritmus által számított $\tilde{t}$ becsült emissziós időpillanat, valamint a $I = \left[\tilde{t} - \frac{\tau}{2}, \tilde{t} + \frac{\tau}{2} \right]$ intervallum. A Γ halmaz tartalmazza azon i szenzorindexeket, amelyekre $\{\hat{t}_i\} \in I$.
- Definiáljuk a következő kvadratikus hibafüggvényt: $E(x, y, z, t) = \sum_{i \in \Gamma} e_i^2(x, y, z, t)$, ahol $e_i(x, y, z, t) = d_i(x, y, z) - v(t_i - t)$.

- d. Határozzuk meg $E(x, y, z, t)$ minimumát gradiens kereséssel, ahol a kiindulópont $(\check{x}, \check{y}, \check{z}, \check{t})$. A minimumhely szolgáltatja a pozícióbecslőt.

A módszert akusztikus lövész-lokalizáció alkalmazásban teszteltük és pontosságát összehasonlítottuk az alap-algoritmusával. A tesztek tanúsága szerint a hiba értékét átlagosan 30%-al sikerült csökkenteni. A módszer pontosságát kísérletileg összevettem az elméleti pontossággal. A szimulációs tesztek szerint a javasolt megoldás hibája igen közel van ahhoz a Cramer-Rao korláthoz, amelyet a helyes eredményt adó Γ szenzorhalmazból származtatunk, míg a pontosság természetes elmarad attól az elméleti korláttól, amit az összes szenzor helyes működése esetén kaphatunk. Mivel a szenzorok helyes vagy helytelen működése és az általuk szolgáltatott adatok pontossága nem kontrollálható, így a módszer közel optimálisnak tekinthető: mindig az adott körülmények között elérhető lehetséges legjobb megoldáshoz közeli eredményt szolgáltat.

Kapcsolódó publikáció: [S18]

2.3. Általánosított konszenzus alapú szenzorfúzió futási idő-különbségek alapján történő helymeghatározáshoz

A 2.1 pontban javasolt eljárás olyan esetekben alkalmazható, amikor a jelforrás diszkrét jeleket bocsát ki. Számos alkalmazásban a forrás nem ilyen jellegű (pl. emberi beszéd esetén sem), amikor is nehéz olyan eseményt definiálni, amely bizonyosan és kellő gyakorisággal előfordul és nagy biztonsággal detektálható minden érzékelőnél.

A hagyományos beszélő-lokalizációs módszerek (beamforming, korrelációs technikák) a szenzor és a feldolgozó eszköz között szélessávú kommunikációt igényelnek (tipikusan a mikrofonokkal érzékelt digitalizált jel kerül további feldolgozásra). Ez azon alkalmazásoknál nem előnyös, ahol sok szenzor és korlátos sáv szélesség (pl. Zigbee rádiós hálózati kapcsolat) áll rendelkezésre. Ilyen alkalmazási környezetben alkalmazható az általánosított konszenzus-alapú szenzorfúzió.

Kiterjesztettem és általánosítottam a konszenzus alapú szenzorfúziót futási idő-különbségek alapján történő helymeghatározáshoz. Az új megoldásban egy előre definiált $\Pi_k, k = 1, 2, \dots, K$ eseménykészletet alkalmazunk, amely eseményeket minden szenzor figyel, detektál és az érzékelés idejét méri. A szenzorok így egy $\langle i, k, t \rangle$ eseményleíróhoz hoznak létre, ahol i a szenzor azonosítója, k az esemény azonosítója, t pedig az érzékelés ideje. A TDOA esetre alkalmazott általánosított konszenzusos becslő származtatása a következő:

- A forrás folyamatosan jelet bocsát ki. A szenzorok az előre definiált eseményeket figyelik az érzékelt jelben és ezek érzékelési idejét rögzítik a W idejű mérési ciklus alatt. A szenzorok az érzékelt eseményeket ciklus végén $\langle i, k, t_n \rangle$ hármas formájában továbbítják a fúziós feldolgozóba. Ezután új mérési ciklus indul.
- Tegyük fel, hogy az ismeretlen pozíciójú forrás a tér $p = (x, y, z)$ pozíciójában van. Ebben az esetben minden szenzorra $(p, p_i, t_n$ és v ismeretében) kiszámítható az a $\hat{t}_n$ időpillanat, amikor a szenzor mérése szerint a feltételezett p pozícióban a megfigyelt Π_k esemény bekövetkezett.
- Definiáljuk a korábbiakhoz hasonlóan a $\tau \geq 2(\frac{\Delta}{v} + T)$ hibasávot, ahol Δ a szenzorok maximális pozícióhibája, míg T az időmérés maximális hibája. Definiáljuk továbbá a Λ *minimális konszenzus indexet*.

- d. Legyen az időpillanatok $Y = \{t_i\}$ ritka halmaza olyan, hogy minden $t_1, t_2 \in Y: |t_1, t_2| > \tau$. A Y időpont-halmaz egyértelműen definiál egy $Y_\tau = \{\lambda_i\}$ diszjunkt intervallum-halmazt, ahol $\lambda_i = [t_i - \tau, t_i + \tau]$. Legyen a λ_i intervallumban található Π_k eseményhez tartozó $\hat{t}_n$ becslők száma n_i . Legyen továbbá $\tilde{n}_i = n_i$, ha $n_i \geq \Lambda$ és $\tilde{n}_i = 0$, ha $n_i < \Lambda$. Legyen $C_{k,\tau}(x, y, z) = \max_Y \sum_i \tilde{n}_i$.

Megjegyzés: A fentiekben Y azon időpillanatok becslését tartalmazó halmaz, amelyekben a forrás Π_k eseményt generált, $C_{k,\tau}(x, y, z)$ pedig azon konszenzusos érzékelések száma, amelyek ezen eseményeket támogatják, amennyiben a forrás az (x, y, z) pozícióban van. A számítás során csak olyan eseményeket veszünk számításba, amelyeket legalább Λ darab konzisztens mérés támogat.

- e. Legyen a konzisztencia-függvény értéke a következő: $C_\tau(x, y, z) = \sum_k C_{k,\tau}(x, y, z)$. A pozícióbecslőt – hasonlóan az eredeti konszenzusos becslőhöz – a $C_\tau(x, y, z)$ konzisztencia-függvény maximumából származtatjuk.

Megjegyzés: az általánosított módszer a következő módosításokkal megy át az eredeti becslőbe: $k = 1, \Lambda = 1, C_{k,\tau}(x, y, z) = \max_Y \max_i \tilde{n}_i$.

A konzisztencia-függvény kiértékelését – hasonlóan az eredeti konszenzusos becslőhöz – iteratív B&B kereséssel végezzük. A Y halmaz kiválasztását, illetve $C_{k,\tau}$ kiszámítását optimalizálás helyett közelítő heurisztikus módszerrel végezzük.

A módszert beszédjelek segítségével teszteltük. A kísérletet beltérben hajtottuk végre, ahol 5 mikrofont alkalmaztunk 6m x 10m-es területen elhelyezve, a detekció pedig 0.2m pontosságú volt. A kísérlet során a beágyazott szenzorokon egy szűrőbank futott, az események pedig az egyes sávokban érzékelt gyors energianövekedésnek feleltek meg. Az érzékelt események következtében keletkezett adatforgalom 2 nagyságrenddel volt kisebb, mint amennyi a nyers adat továbbításához lett volna szükséges. Jól mutatja az események definiálásának nehézségét, hogy a kísérlet során detektált események kevesebb, mint 5 százaléka volt $\Lambda = 3$ mellett konzisztens. Ennek ellenére a módszer helyes becslőt ad, ami jelzi a konszenzusos becslési módszer robusztusságát.

Kapcsolódó publikáció: [S19].

Az eredmények hasznosítása

A konszenzus-alapú fúziós technika alkalmazása nagyon sikeres volt akusztikus orvlövész lokalizációs alkalmazásokban. A módszer nagy pontosságú eredményt adott még olyan helyszíneken is, ahol a visszhangok igen jelentősen megnehezítik a becslést. A rendszer kifejlesztése előtti lövész-lokalizációs rendszerek nagyvárosi környezetben nagyon megbízhatatlanul működtek, tudomásom szerint az általunk kifejlesztett rendszer volt az első ilyen környezetben alkalmazható szenzorhálózat-alapú mérőrendszer.

A javasolt konszenzus-alapú becslő több irányban is továbbfejlesztésre került újabb megoldásokban:

- A konszenzus-alapú becslő adaptív kiterjesztése lehetővé teszi a szenzorok megbízhatóságának figyelembe vételét [S20].
- Egy sztochasztikus-alapú gyorsítással a kiértékelés sebességét mintegy 3 nagyságrenddel sikerült megnövelnünk [S21].
- A konzisztencia-függvényt továbbfejlesztették TDOA adatok mellett érkezési irányszögek kezelésével és sikeresen alkalmazták védősisakon viselhető rendszerekben is [5].

3. Robusztus köztesréteg-szolgáltatások elosztott mérőrendszerekhez

3.1. Garantált szolgáltatási tulajdonságú k -lefedési algoritmus elosztott mérőrendszerek üzemeltetéséhez

A pontossági vagy hibatűrési igények kielégítése érdekében elosztott mérőrendszerek, szenzorhálózatok alkalmazása esetén gyakori feladat annak biztosítása, hogy a megfigyelt terület minden pontját legalább k szenzor fedje le. A feladat megoldhatóságának szükséges strukturális feltétele, hogy az érzékelők telepítése ennek megfelelően történjen: a szenzorokat a megfigyelt térben elegendő sűrűséggel kell elhelyezni. Ha a szenzorok a szükségesnél sűrűbben helyezkednek el, akkor további optimalizálásra nyílik lehetőség: a k -lefedettség megtartásával egyes szenzorok alacsony fogyasztású alvó állapotba helyezhetők, így ezzel energia takarítható meg. Amennyiben a működő és alvó szenzorok szerepét alkalmas módon ütemezzük, az egész hálózat élettartama megnövelhető.

A k -lefedési probléma formalizálható a $G(R \cup S, E)$ páros gráf segítségével, ahol az S csúcsok az érzékelőket, az R csúcsok pedig a megfigyelt régiókat reprezentálják. A G gráfban akkor és csak akkor fut el egy $r \in R$ régió és $s \in S$ szenzor között, ha s (teljesen) lefedi r -t. Az egyszerű k -lefedési probléma a következő: keressük G olyan $G'(R \cup S', E')$ részgráfját, amelyre igaz, hogy minden $r \in R$ csúcs fokszáma G' részgráfban legalább k . A minimális k -lefedési problémában olyan nem-redundáns G' részgráfot keresünk, amely minimális $|S'|$ számú szenzorral oldja meg a k -lefedési problémát. Már a statikus minimális k -lefedési probléma is NP-teljes, de a kitűzött feladat még bonyolultabb: alkalmas k -lefedési halmazok egymást követő sorozatával igyekszünk a hálózat energiafogyasztását minimalizálni és így annak élettartamát maximalizálni.

A megoldás során a következő életszerű feltételezésekkel élünk:

- A szenzorok érzékeli területe modellezhető egy körrel, amelyen belül az érzékelés garantált minőségű, ezen kívül pedig nem az érzékelés minősége nem garantálható.
- A szenzorok kommunikációs sugara az érzékelési sugárnak legalább duplája.
- Minden szenzor ismeri a saját koordinátáit és a Σ megfigyelendő területet. A szenzorok csak a Σ területen belüli lefedésre törekszenek.
- A szenzorok ismerik saját energiaállapotukat.

A szolgáltatás minőségének jellemzésére a következő mértékeket alkalmazzuk:

- k -lefedési arány: $\Theta_k = \frac{A_k}{A}$, ahol A_k a k -lefedett terület mérete, míg A a teljes megfigyelt Σ terület mérete.
- k -élettartam: $L_k(\lambda)$ a hálózat maximális élettartama úgy, hogy $\Theta_k > \lambda$, ahol $0 < \lambda \leq 1$ (praktikusan $\lambda = 1$ vagy egyhez közeli szám).

Elosztott algoritmust javasoltunk a dinamikus k -lefedési probléma megoldására. Az algoritmus egy *álmoszági tényezővel* jellemzi a szenzorok állapotát. Az álmoszági tényező egyrészt a szenzor energia-állapotát, másrészt a szenzor fontosságát tükrözi a k -lefedési probléma szempontjából: magas azon szenzorok álmoszági tényezője, amelyek energiatartaléka alacsony, és/vagy az általuk megfigyelt területeket kevés másik szenzor figyeli meg.

Az algoritmus vázlatos működése a következő:

- a. A hálózat periodikusan választást tart. Minden választás végén kialakul egy k -lefedő halmaz, amely T ideig üzemel. A lefedő halmazban nem szereplő szenzorokat T időre alvó állapotba helyezzük. T idő elteltével a hálózat újra választást tart.
- b. A választás során a még legalább T ideig működőképes szenzorok először közlik környezetükkel saját pozíciójukat majd az álmosági tényezővel arányos prioritási sorrendet állítanak fel. A szenzorok saját prioritásukat közlik környezetükkel.
- c. A kapott információk alapján minden szenzor felépíti a környezetét leíró lokális lefedési gráfot és figyeli, hogy az általa is potenciálisan lefedett területek aktuális lefedettsége a választás során hogy alakul.
- d. A választás során a prioritás sorrendjében a szenzorok önmagukat alvó vagy működő státuszúnak nyilvánítják, és ez utóbbit környezetükkel közlik. A szenzorok mohón járnak el: egy szenzor elalszik, amennyiben a lefedési probléma már más működő szenzorokkal megoldott, vagy más, nála alacsonyabb prioritású szenzorokkal együtt megoldható; különben a szenzor önmagát működőnek nyilvánítja.

Az algoritmus működését a következő életszerű hibamodell segítségével elemeztem:

- A rendszerben bármely küldött üzenet elveszhet vagy megsérülhet. A sérült üzenetek alkalmas hibavédő kódolással detektálhatók és elvesztésként kezelhetők.
- A megkapott üzenetek helyesek (ez alkalmas hibavédő kódolással biztosítható) és igazak (a bizánci hibák biztonságos csatornákkal kiküszöbölhetők).

A javasolt algoritmusról a következő állításokat formálisan bizonyítottam:

- Amennyiben a hálózat kialakítása strukturálisan lehetővé teszi a k -lefedést, a javasolt elosztott algoritmus garantáltan talál ilyen megoldást
- A hibamodell által leírt hibák jelenlétében a javasolt algoritmus garantáltan helyesen működik: amennyiben strukturálisan ez lehetséges, hibátűrő módon minden esetben biztosítja a k -lefedést.

Az algoritmus működését kontrollált szimulált környezetben vizsgáltam ($k = 3$ esetben). A működést összehasonlítottam az elosztott véletlen választást alkalmazó algoritmusával [6]. A tesztek tanúsága szerint a javasolt algoritmus közel azonos lefedés esetén közel kétszeres hálózati élettartamot tudott biztosítani, míg közel azonos élettartam mellett kb. 15%-al jobb lefedést biztosított. Megvizsgáltam a javasolt algoritmus működését az üzenetvesztési valószínűség függvényében: a várakozások szerint a szolgáltatás minősége nem változott a hibaarány növekedtével (azaz az algoritmus mindig biztosította a $\Theta_3 = 1$ lefedési arányt), de a hálózat élettartama nagyobb hibaarányok esetén közel lineárisan csökkent.

Kapcsolódó publikációk: [S22], [S23], [S24], [S25].

3.2. Strukturálisan stabil időszinkronizációs protokoll gyűrű topológiájú hálózatokhoz

Elosztott mérőrendszerek esetén gyakori igény a megfigyelések sorrendjének, a mérések közötti időknak ismerete, vagy éppen a mérések egyidejű elvégzése. A fenti követelmények kielégítésére a hálózatokban szinkronizációs eljárásokat alkalmazunk, amelyek segítségével a szinkronizációban részt vevő eszközök számára közös időalap hozható létre. Az irodalomban ismert eljárások a szinkronizációt általában egy referencia eszköztől kiindulva, a szinkronizációs állapotot továbbterjesztve valósítják meg. Az ilyen

eljárások közös jellemzője, hogy a hurkokat a szinkronizációs gráfban kerüljük, így strukturálisan biztosítják az szinkronizációs eljárás konvergenciáját.

Egy ettől igen eltérő, nagyon érdekes elméleti probléma a gyűrű topológiájú hálózatok szinkronizálása. Ugyan ezen hálózatok mesterséges felszakításával a hagyományos szinkronizációs mechanizmusok alkalmazhatók, de a felszakítást határoló két csomópontnál – a felszakítással keletkező lineáris topológiából és a lépésenként akkumulálódó hibából adódóan – sokkal nagyobb szinkronizációs hiba jön létre, mint a többi szomszédos csomópont-pár között, ami felborítja a gyűrű topológia szimmetriáját és az adott alkalmazásban elfogadhatatlan lehet. Az hagyományos protokollok naiv alkalmazása gyűrű topológiájú hálózatokban pedig a nem várt nagy hibák mellett akár stabilitási problémákat is felvet: az ilyen algoritmusok sok esetben nem konvergálnak.

Új időszinkronizációs protokollt javasoltam időosztásos (TDMA) ütemezést alkalmazó egyirányú gyűrű topológiájú hálózatok szinkronizálására. A protokoll a szomszédos csomópontok között azonos szintű, igen alacsony szinkronizálási hibát ad és a teljes hálózatra számított globális szinkronizálási hibát is alacsony szinten tartja (mely arányos a csomópontok közötti távolsággal). Ezen tulajdonság a legtöbb alkalmazásban igen előnyös: mivel a kommunikáció a szomszédos eszközök között lép fel, itt a hatékony működés elérése érdekében igen szoros szinkronizációt kívánunk meg (akár mikrosec nagyságrendben), míg a teljes hálózatra vetített globális megkívánt pontosságot az alkalmazás jellege határozza meg, de ez tipikusan kisebb igényű (pl. msec vagy akár sec nagyságrendben).

A protokoll járulékos költsége igen alacsony: csak a rendszer meglévő üzeneteit használja, ezekre ültetjük rá a szinkronizáláshoz szükséges néhány bájtnyi információt. A módszer további előnye, hogy a szomszédok közötti szoros szinkronizációnak köszönhetően az eszközöknek nem kell hosszú biztonsági időrést hagyva a szükségesnél előbb felébredniük, így a hálózat energiafelhasználása alacsony szinten tartható és igen kis kitöltésű tényezőjű hálózatok valósíthatók meg. Ennek eredményeképpen nagy pontosságú szinkronizálás válik lehetővé a szinkronizálási protokoll ritka alkalmazásával.

A javasolt protokoll vázlatos működése a következő:

- A protokoll feltételezi az időosztásos ütemezés ismeretét és ennek megfelelően a csomópontokat lépésenként, egy irányban szinkronizálja: minden csomópont a következő csomópontnak adja tovább a szinkron információt az ütemezésének megfelelő időpontban.
- A szomszédos csomópontok közötti páronkénti szinkronizálást a közeghozzáférési rétegben végezzük, így a lépésenként elkövetett hiba alacsony szinten tartható.
- Minden csomópont 2 logikai órát használ: az egyik a korábbi szinkronizálási körben használt időt mutatja (WUC), a másik pedig a jelenlegi szinkron-időt tartalmazza (SC). A két óra azon időszakban, amikor az adott csomópont már szinkronizálódott az előző csomóponthoz, de a szinkron információt még nem adta tovább a következő csomópontnak, más értéket mutathat.
- A szinkron információ a normál hálózati csomagokra ültetjük, amelyek előre definiált TDMA ütemezés szerint haladnak a hálózatban. Minden csomópont a WUC óra szerint ébred fel, így biztosítva, hogy a kommunikáló felek együtt ébrednek. A szinkronizáló fél saját SC óráját küldi tovább a szinkronizált félnek, majd végrehajtja saját WUC óráján a $WUC=SC$ állítást.
- A szinkron információ vételekor minden csomópont megméri a legutóbbi szinkronizálási körben felgyülemlett hibát, amelyet visszacsatolásként alkalmazva meghatározza az SC új értékét.

A protokoll az alkalmazott visszacsatolás segítségével képes a rendszerben lévő órák eltérő sebességét (drift) is kompenzálni.

A protokollt valós hardveren egy 6 csomópontból álló hálózaton teszteltük. A mérések szerint a szomszédos csomópontok órái közötti eltérés a teszt során maximum 6 tick volt, de átlagosan kevesebb, mint 0.7 tick, ahol 1 tick az alkalmazott óra felbontása.

A protokoll bekapcsolás utáni kezdeti konvergenciája a rendszeren belül létrejövő visszacsatolás miatt kérdéses. A konvergencia különösen fontos kérdés valós elosztott rendszerekben, hiszen itt az órák kezdeti állapota, illetve az eszközök bekapcsolási sorrendje is számíthat. Vizsgálatokat végeztem a protokoll konvergenciatulajdonságait illetően. Meghatároztam annak szükséges és elégséges strukturális feltételét, hogy a protokoll kezdeti konvergenciája garantálható legyen.

Legyen a hálózat TDMA ütemezésének periódusideje T , és jelöljük BL_i -vel azt a köridőt, amely idő alatt az üzenet az i -ik csomópontból egy teljes kört megtéve az $(i - 1)$ -ik csomópontra visszajut. Legyen továbbá $L = \min_i BL_i$. Amennyiben $T > 2L$, a rendszer mindig konvergens, függetlenül az ütemezés konkrét megvalósításától és a kezdeti óraállásoktól. Amennyiben $T \leq 2L$, a hálózat az órák kezdeti értékétől függően lehet konvergens vagy nem konvergens. Azonban ebben az esetben mindig található olyan kezdeti óraállítás, amiből indulva a rendszer nem konvergál.

A fenti tulajdonság felhasználásával kiegészítettem az eredeti algoritmust, amely így garantáltan stabillá vált: bármely ütemezéssel bármely kezdeti értékből indulva konvergens.

Kapcsolódó publikáció: [S26], [S27], [S28].

3.3. Prowler: magas szinten programozható szimulációs eszköz elosztott mérőrendszerek tervezéséhez

Elosztott vezetékek nélküli mérőrendszerek tervezése során gyakran felmerül prototípusok készítésének, a rendszer szimulálásának igénye már a tervezés korai fázisában. A tervezést különösen nehezíti a rendszer elosztott volta, a vezetékek nélküli kommunikáció jelenléte: a kommunikációs csatornák által a rendszerbe vitt nem determinisztikus késleltetések és hibák a tervezett rendszer viselkedését alapvetően képesek befolyásolni, amit a tervező eszköznek figyelembe kell vennie. A tervezés és prototípuskészítés másik fontos eleme, hogy a programozás magas szintű legyen: a tervező a megvalósítás részletei helyett a működésre koncentrálhasson. Ezen igények figyelembevételével megterveztem és megvalósítottam a Prowler névre keresztelt, eseményvezérelt, valószínűségi alapon működő, magas szinten programozható szimulátort, amely alkalmas vezetékek nélküli szenzorhálózatokban futó alkalmazások gyors implementálására és végrehajtására. A szimulátor MATLAB környezetben készült olyan igénnyel, hogy a felhasználónak csak a tényleges alkalmazás logikáját kelljen egy jól ismert, magas szintű nyelvi környezetben beprogramoznia.

A szimulátor főbb jellemzői a következők:

- A felhasználónak az alkalmazást 3 nézetből kell definiálni: (1) topológia, ahol az eszközök elhelyezkedését, esetleges mozgását kell definiálni, (2) megjelenítés, ahol a működés során megjelenítendő eseményeket kell meghatározni, valamint (3) logika, ahol az egyes eszközökön futó alkalmazás logikáját kell leírni.

- A szimulátor esemény alapú: a működést a rendszerben megjelenő eseményekre adott tevékenységekként kell leírni. A tevékenységek a rendszerben újabb eseményeket válthatnak ki.
- A szimulátor kezeli a kommunikációhoz kapcsolódó alacsony szintű tevékenységeket és fizikai jelenségeket: valószínűségi alapon szimulálja a közeghozzáférést, a jelterjedést, az üzenetek ütközését, sérülését.
- A rádiós kommunikáció szimulálása beépülő modulként van megvalósítva, ezek tetszés szerint cserélhetők. Jelenleg 3 modell van implementálva: (1) távolság alapú jelerősség, vétel vett jelerősség alapján, (2) távolság alapú jelerősség, vétel jel/zaj-interferencia alapján, (3) Rayleigh fading alapú jelterjedési modell vétel jel/zaj-interferencia alapján.
- A szimulátor jelterjedési modelljei statisztikai alapon működnek, de az implementált rendszerek könnyebb tesztelése, hibakeresése érdekében determinisztikus működésre is lehetőség van.
- A szimulátor vezérelhető parancssorból, valamint kényelmes grafikus felhasználói felület is rendelkezésre áll.

Elosztott mérőrendszerekben a működési logika tipikusan speciális eseményeken alapul: pl. üzenetek küldése/fogadása, idő múlása, mérések végzése. A szimulátor jól illeszkedik ehhez a modellhez és esemény-vezérelt természete különösen alkalmassá teszi ilyen alkalmazások leírására.

A szimulátor kényelmes grafikus felületéről jól használható a fejlesztett alkalmazások iteratív fejlesztésére/tesztelésére, míg a parancssori felület alkalmassá teszi más alkalmazásokból történő hívásra (pl. protokoll paraméterek optimalizálása céljából)

Kapcsolódó publikációk: [S32], [S33]

Az eredmények hasznosítása

A javasolt *k*-lefedő algoritmus minden olyan mérőhálózat esetében alkalmazható, ahol garantált szolgáltatásminőségre van szükség. A kidolgozott megoldás előnyös tulajdonsága, hogy hibatűrő tulajdonságai formálisan bizonyítottak, valamint működése során a hálózat kommunikációs többletterhelése alacsony. A javasolt megoldást általánosítottunk olyan esetekre is, ahol a mérőeszközök több paramétert, esetleg más-más lefedettségi igényekkel mérnek [S25].

A javasolt szinkronizációs mechanizmus TDMA alapon működő, garantált válaszidejű vezetéknélküli biztonsági keretrendszerben került felhasználásra, ahol az alacsony energiafelhasználási kulcs tervezési szempont volt. A megvalósított szoros szinkronizáció segítségével <0.5% kitöltési tényezővel tudtuk üzemeltetni a hálózatot és garantálni a megkívánt 5 sec válaszidőt [S29], [S30], [S31].

A Prowler szimulátort sikeresen alkalmaztuk az általunk fejlesztett szolgáltatások és alkalmazások fejlesztése során. A program ingyenesen felhasználható, továbbfejlesztették (JProwler, RMASE), a világ számos helyén alkalmazzák oktatási és kutatási célokra (több, mint 100 közleményben hivatkoznak rá).

Hivatkozások:

- [1] J. Schoukens, R. Pintelon, G. Vandersteen and P. Guillaume (1997). Frequency-domain system identification using non-parametric noise models estimated from a small number of data sets. *Automatica*, Vol. 33, no.6, pp. 1073-1086.
- [2] Y. Rolain, J. Schoukens, and R. Pintelon (1997). Order estimation for linear timeinvariant systems using frequency domain identification methods. *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 42, No. 10, pp. 1408- 1417.
- [3] J. Schoukens, T. Dobrowiecki, and R. Pintelon (1998). Identification of linear systems in the presence of nonlinear distortions. A frequency domain approach. *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 43, No.2, pp. 176-190.
- [4] I. Kollár, Frequency Domain System Identification Toolbox homepage. Online: http://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/product_35570.html
- [5] P. Volgyesi, G. Balogh, A. Nadas, C. Nash, and A. Ledeczki , “Shooter Localization and Weapon Classification with Soldier-Wearable Networked Sensors,” in *Proc. 5th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, June 11–13, 2007, San Juan, Puerto Rico, pp. 113-126.
- [6] S. Kumar, T. H. Lai, and J. Balogh, “On k-coverage in a mostly sleeping sensor network,” in *Proc. MobiCom*, 2004, pp. 144–158

Kapcsolódó saját publikációk jegyzéke:

- [S1] Simon Gy. and J. Schoukens, "Robust Broadband Periodic Excitation Design," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/99, Venice, Italy, May 24-26, 1999, Vol. 2. pp. 1217-21.
- [S2] Simon, Gy. and J. Schoukens, "Robust Broadband Periodic Excitation Design," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 49, No. 2, pp. 270-274, Apr. 2000.
- [S3] Simon, Gy. Rik Pintelon, L. Sujbert, J. Schoukens, "An Efficient Nonlinear Least Square Multisine Fitting Algorithm," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC/2001, May 21-23, Budapest, Hungary, 2001, Vol. 2, pp. 1196-1201.
- [S4] Sujbert, L., Gy. Simon, J. Schoukens, "Resonator Based Non-Parametric Identification of Linear Systems," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC/2001, May 21-23, Budapest, Hungary, 2001, Vol.1, pp. 166-169.
- [S5] Simon G, Pintelon R, Sujbert L, Schoukens J., "An efficient nonlinear least square multisine fitting algorithm," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No. 4, pp. 750-755, Aug. 2002.
- [S6] Simon, Gy., J. Schoukens, and Yves Rolain, "Automatic Model Selection for Linear Time-Invariant Systems," Proceedings of the 12th IFAC Symposium on System Identification, SYSID 2000, Santa Barbara, CA, USA, 21-23 June 2000, Vol. I., pp. 379-384
- [S7] Schoukens, J.; Rolain, Y.; Simon, G.; Pintelon, R.; "Fully automated spectral analysis of periodic signals", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 52, No. 4, pp. 1021-1024, Aug. 2003.
- [S8] Kollár, I., J. Schoukens, R. Pintelon, G. Simon and G. Román, "Extension for the Frequency Domain System Identification Toolbox: Graphical User Interface, Objects, Improved Numerical Stability," Proceedings of the 12th IFAC Symposium on System Identification, SYSID 2000, Santa Barbara, CA, USA, 21-23 June 2000, Vol. II., pp. 699-702.
- [S9] Kollár, I., Pintelon R., Rolain, Y., Schoukens, J., Simon, G., "Frequency Domain System identification Toolbox for MATLAB: Automatic Processing – From Data To Models," 13th IFAC Symposium on System Identification SYSID 2003, Rotterdam, The Netherlands, August 27-29, 2003
- [S10] Kollar, I.; Pintelon, R.; Schoukens, J.; Simon, G.; "Complicated procedures made easy [GUI]," IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Volume: 6, Issue: 3, pp. 19-26, Sept. 2003.
- [S11] Daboczi, T.; Kollar, I.; Simon, G.; Megyeri, T.; "How to test graphical user interfaces," IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Volume: 6, Issue: 3, pp. 27-33, Sept. 2003.
- [S12] Dabóczi T., Kollár I., Simon G., and Megyeri T., "Automatic testing of graphical user interfaces," Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/2003, Vail, CO, May 20-22, 2003, pp. 441-445.
- [S13] Simon, G., Maróti, M., Lédeczi, A., Balogh, G., Kusy, B., Nádas, A., Pap, G., Sallai, J., Frampton, K., "Sensor Network-Based Countersniper System," In Proc of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), Baltimore, MD, USA, Nov. 2004, pp.1-12.
- [S14] Maroti, M., Simon, G., Ledeczi, A., Sztipanovits, J., "Shooter localization in Urban Terrain," Computer, Vol. 37, No. 8, pp. 60-61, Aug. 2004.

- [S15] Ledeczki A., Nadas A., Volgyesi P., Balogh G., Kusy B., Sallai J., Pap G., Dora S., Molnar, K., Maroti M., Simon G., "Countersniper System for Urban Warfare," ACM Transactions on Sensor Networks, Vol. 1, No. 2, pp. 153-177, Nov. 2005.
- [S16] Lédeczi Á., Völgyesi P., Maróti M., Simon G., Balogh G., Nádas A., Kusy B., Dóra S., Pap G.: "Multiple Simultaneous Acoustic Source Localization in Urban Terrain", IPSN 05, CD-Rom, Los Angeles, CA, April 25, 2005
- [S17] Balogh, Gy., Lédeczi, Á., Maróti, M., Simon, G., "Time of Arrival Data Fusion for Source Localization," WICON Workshop on Information Fusion and Dissemination in Wireless Sensor Networks, SENSORFUSION 2005, Visegrád, Hungary, July 14, 2005
- [S18] Vakulya, G., G. Simon, „Efficient Sensor Network Based Acoustic Localization”, in Proc. 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Hangzhou, China, May 10-12, 2011, pp.582-586
- [S19] Simon, G., Sujbert, L., "Acoustic source localization in sensor networks with low communication bandwidth," in Proceedings of the Fourth International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, WISES 06, Vienna, Austria, June 30, 2006, pp. 155-163.
- [S20] Vakulya, G., G. Simon, „Adaptive Acoustic Localization Algorithm”, in Proc. 2010 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Austin, TX, May 3-6, 2010, pp. 405-411.
- [S21] Vakulya, G., G. Simon, "Fast Adaptive Acoustic Localization for Sensor Networks," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 60, No. 5, pp.1820 - 1829, May 2011.
- [S22] Simon, G., M. Molnár, L. Gönczy, B. Cousin, "Dependable k-coverage algorithms for sensor networks," Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC 2007, Warsaw, Poland, May 1-3, 2007. CD-ROM ISBN 1-4244-1080-0, 6 pages.
- [S23] Molnár, M., G. Simon, L. Gönczy, "Robustness and Performance Analysis of a Dynamic Sensor Network Scheduling Algorithm," First International Workshop on Future Trends on Design and Analysis of Dynamic Networks (FTDA-DN), Hong Kong, China, July 31, 2008, pp. 52:1-52:6.
- [S24] Simon, G., M. Molnár, L. Gönczy, B. Cousin, "Robust k-coverage algorithms for sensor networks," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 8, pp.1741 - 1748, Aug. 2008.
- [S25] Molnár, M., Simon, G. and Gönczy, L., "Quasi-optimal scheduling algorithm for area coverage in multi-functional sensor networks," Int. J. Ad Hoc and Ubiquitous Computing, Vol. 14, No. 2, pp.109-122, Oct. 2013
- [S26] G. Simon, „Efficient time-synchronization in ring-topology wireless sensor networks”, in Proc. 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Graz, Austria, May 13-16, 2012, pp. 958-962
- [S27] G. Simon, „Convergence Analysis of a Ring Time-Synchronization Protocol,” kézirat, publikáció alatt.
- [S28] Maroti M., Kusy B., Simon G., Ledeczki A., "The Flooding Time Synchronization Protocol," In Proc of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), Baltimore, Mariland, USA, Nov. 2004, pp. 39-49.
- [S29] G. Vakulya, G. Simon, „Energy-Efficient and Reliable Round-Robin TDMA for Wireless Sensor Networks”, in Proc. 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Graz, Austria, May 13-16, 2012, pp.1179-1183

- [S30] G. Vakulya, G. Simon, „Extended Round-Robin TDMA Scheduling Scheme for Wireless Sensor Networks”, in Proc. 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Minneapolis, USA, May 6-9, 2013, pp.253-258
- [S31] G. Vakulya, Z. Tuza, and G. Simon, "Optimal Multi-TDMA Scheduling in Ring Topology Networks," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2015, Article ID 837074, 14 pages, Jan 2015. doi:10.1155/2015/837074
- [S32] Simon G., Völgyesi P., Maróti M., Lédeczi Á., “Simulation-based optimization of communication protocols for large-scale wireless sensor networks,” 2003 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, March 8, 2003, pp. 3_1339-3_1346.
- [S33] Zhang, Y., Simon, G., Balogh, G., "High-Level Sensor Network Simulations for Routing Performance Evaluations", Third International Conference on Networked Sensing Systems, INSS 2006, Chicago, IL, USA, May 31, 2006.

Robust measurement and estimation processes

Habilitation thesis

Gyula Simon

University of Pannonia

2016

Introduction

Measurement and estimation processes are utilized in many application fields. Children estimate the width of the puddle before trying to jump over it, hawks estimate the distance of the pigeon, sport medicine physicians measure the body fat index of the athletes training for the Olympic Games, and the navigation system estimates the current position of the vehicle. In many cases the measurement and parameter estimation is the final goal (e.g. body fat index), while in most cases these processes are embedded in and are services of other higher level applications (e.g. GPS service in the navigation system). One important requirement of applicability of such processes is their robustness; e.g. they should be resistant against noise in the application domain, malfunctions of devices, or mistakes of the human operators.

The results presented in this thesis include robust measurement and estimation processes, divided into three theses.

In the first thesis estimation processes for model parameters are presented. Results include a robust excitation signal design, which is resistant against user misuse; an efficient spectrum estimation process, which is applicable even for problems of extreme large size, not manageable with conventional methods; and an automatic model selection process, which eliminates the need of user intervention from complex parameter estimation process chains, thus allows the efficient use of such methods by inexperienced users as well.

The second thesis introduces novel and robust position estimation processes. The common feature and the source of the robustness of the presented methods is that they are based on the consensus of a subset of measurements. The fundamental method is able to select consistent measurements from the set of measurements, using a measurement error limit, and thus it provides good quality estimates even in case of the presence of many outliers. Two extensions are also presented: in the first extension with an additional step the accuracy is increased: the method provides accuracy close to the theoretical limit. The second extension opens new application fields: while in the fundamental method well defined trigger events are required (e.g. muzzle blast of a weapon), the extension generates acceptable events from continuous signals (e.g. speech) automatically.

In the third thesis middleware services and design tools are presented, used in distributed measurement systems. Results include a robust coverage algorithm, allowing the energy-efficient operation of sensor networks, and at the same time providing guaranteed sensor coverage; a structurally stable time synchronization protocol for ring-topology networks, and a simulation tool aiding the design and test of wireless distributed systems.

1. Robust estimation of model parameters

1.1. Method for the design of robust broadband periodic excitation signals

Multisine excitation signals are very popular in system identification, and several well established methods are used to design them. During the excitation design the power of the signal is usually uniformly distributed in the band of interest, but the phases of the components are free parameters. Using the phase values another practically important property, the crest factor can be minimized. For this purpose in the literature the Schroeder-multisine, or its optimized versions are utilized. Unfortunately these excitation signals are not robust against inexperienced utilization: the excitation of certain frequency bands can be as much as 30dB lower than expected. Such utilization is very common, e.g. the user divides the excitation signal into two parts for identification and verification. The proposed method provides excitation signals, which are robust against such *truncation* misuse.

I provided a statistical estimate to calculate the power loss, originating from truncation of random phase excitation signals. I proved that the power loss is low (typically 1-3dB) in case of random phase signals, as compared to the high power loss (30-40dB) of the signals from Schroeder-type design. I also showed that popular crest-factor optimization algorithms do not change statistical properties of the signals significantly. Based on these results and observations I proposed the following method for the design of robust multisine excitations signals: the design uses random phase multisines, as initial signal (as opposed to the popular Schroeder-multisine), then a conventional crest-factor optimization is applied. According to the tests, the crest factor of the proposed method is comparable to that of conventional methods (sometimes even better), while the potential power loss, originating from the truncation misuse is significantly lower. The convergence properties of the proposed method were analyzed using two well-known crest-factor optimization algorithms: the convergence speed was acceptable even in the presence of very high number of frequency components (e.g. for 1000 frequency components the execution time is approx. 2 minutes).

Related publications: [S1], [S2].

1.2. Efficient method for estimating the harmonic content of periodic signals

I proposed an efficient method to estimate the harmonic content of periodic signals. The iterative method contains two computing steps. In the first step, based on the estimated fundamental frequency, the spectrum is estimated, solving a linear least squares (LS) problem. Using the result, the fundamental frequency is updated, by solving a nonlinear LS (NLS) problem. By repeating the two steps until the convergence criterion is met (i.e. the residual error does not change significantly), the (locally) optimal LS estimator can be computed. To solve the LS problem the proposed method utilizes a resonator-based recursive computing method, while in the second step a quadratic fitting method is used to determine the new frequency estimate.

The main advantage of the proposed method is that it requires significantly lower computational resources than conventional (matrix-based) methods. For the conventional method the required storage space and number of operations are $O(MN^2)$ and $O(MN)$, respectively, while for the proposed method the requirements are much lower: $O(MN)$ and $O(N)$, respectively, where M is the number of harmonic components and N is the number of samples. Since for real-sized problems both the memory consumption and computation needs are decreased with orders of magnitude, the proposed method is able to solve large-size problems, which cannot be solved with conventional methods.

Another advantage of the proposed method is that for long data records the computation of variance can be performed by conventional block-based methods, but without the need of data segmentation, resynchronization, and re-estimation, common in conventional methods. For short data records the variance cannot be estimated, using block-based computation, but the proposed method can provide a recursive variance estimates with acceptable quality.

Related publications: [S3], [S4], [S5].

1.3. Automatic model selection method for the identification of linear time-invariant systems

Users of system identification processes and tools may not have deep knowledge on system identification theory. The utilization of complex tools with many parameters is often troublesome for such users; they would rather prefer fully automatic processes. In the literature several building blocks of the system identification process are well covered, but such automatic method was not available.

I proposed a novel, completely automatic frequency-domain model selection methods, which requires only measurement data and provides the identified model of the system under test, with textual validation information, understandable even for the inexperienced user. The method is the following:

- a. Pre-processing of measurement data. The input and output spectra are calculated using DFT, and the sample means, sample variances, and sample covariances are calculated as described in [1].
- b. Course order estimation. A fast non-parametric algorithm [2] is utilized to provide a statistical approximate of the system order. The speed of the methods results from the fact that the residual error is approximated without calculating the model parameters. From now on this method will be called *fast test*. As a result of this processing step, an initial - and probably slightly conservative – model order is provided.
- c. Parameter estimation and model validation. Since in step (b) the applied fast algorithm is stochastic, the initial order may be too low, despite of the expectations. In this step the model parameters are calculated and a correlation test is performed on the residual error [3], from now on called *slow test*. If the estimator fails on the slow test, the model order is increased until the slow test is successful. This processing step provides a validated model, but potentially with unnecessarily high order.
- d. Order reduction I. In this processing step the order of the model is decreased iteratively while the reduced-order model is still satisfactory. The order reduction is performed by elimination of poles, zeros, or pole-zero pairs, where the potential roots are selected using Rolain's significance test [2]. After the elimination of each potential root the quality of the remaining model is checked: in case of successful test the iteration is continued using the reduced model, otherwise another potential root is selected for elimination. In order to increase the speed of the algorithm, the quality is tested by the fast test; if this method fails to improve the model, a slow test is applied. After each successful slow test the fast test is used again, while possible. The alternation of the two test methods results fast convergence and accurate estimates. The output of this processing step is a minimal-order parametric model, which satisfies both the error-function test and the correlation test.
- e. Order reduction II. In many practical cases it is advantageous to use lower model order, even at a price of some decrease of the model accuracy. This processing test further decreases the

model order, similarly to step (d), but here no correlation tests are used, instead the error limit, calculated from the validated model of step (d), is utilized in the error-function test.

- f. Validation. The validation and evaluation of models calculated in steps (c) and (d) is performed. Based on the ratio of the theoretical and measured errors, and the result of the correlation test the system creates a textual evaluation, which can be used by even inexperienced user to decide which model to use in his/her application.

Related publications: [S6], [S7].

Utilization of the results

The development of the proposed methods was triggered by real practical needs: model parameter estimation is required in many application fields, where the users may be expert of the application domain but not that of system identification. The proposed methods provide tools for such users to perform professional and accurate modeling.

The proposed methods were applied and further improved in the Frequency Domain Identification Toolbox (FDIDENT), developed by István Kollár. In the Toolbox a user-friendly graphical user interface was also developed, which integrates and helps the application of model selection and validation tools in an intuitive manner ([S8], [S9], [S10], [S11], [S12]). The Toolbox is for sale for commercial use or can be downloaded for free for non-profit purposes [4].

2. Robust position estimation methods

2.1. Consensus-based robust sensor fusion for time-difference-of-arrival (TDOA)-based location estimation

Localization methods are often based on measurements of Time of Arrival (TOA) or Time Difference of Arrival (TDOA) of various signals (e.g. acoustic signals or radio-frequency signals). The TDOA problem is the following: the unknown position of a signal source is $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$, emitting a signal at unknown (random) time t_0 . (Note that if time t_0 is known, the TDOA problem is reduced to the much simpler TOA problem.) The signal is propagated with constant speed v . There are N sensors deployed at known positions $p_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, sensing the emitted signals and detecting their time of arrival t_i , $i = 1, 2, \dots, N$. Using the sensor positions p_i and detection times t_i the unknown position p_0 is to be determined.

The problem can geometrically be interpreted: to each sensor pairs a hyperboloid surface can be assigned, where the surfaces depend on the time differences of arrivals. Since the unknown position must be on the hyperboloid surfaces, the solution is their intersection. In n dimensions the problem can be solved with $N > n$ sensors. To increase the robustness of the estimators, more (or much more) sensors can be applied. In such cases the main problem is the solution of the overdetermined equation system. The popular Least Squares method defines a quadratic error surface $e(p)$, the minimum of which defining position p_0 . The LS method is advantageous where the measurements has small measurement error, but the estimates can be heavily distorted when large outliers are present (e.g. false detections because of reverberation).

I proposed a novel, consensus-based fusion for TDOA measurements, which tolerates well even large measurement errors. The proposed method automatically discards measurements with error larger than a predetermined error limit. The position estimate is the position in the search space where the most measurements, within the error limit, supports the common hypothesis that the source is in position p . For TDOA the consensus-based estimator is the following:

- The source emits a signal at random time instant t_0 , which is sensed by the sensors at time instants t_i ($i = 1, 2, \dots, N$).
- Let us assume that the source is at position $p = (x, y, z)$. In this case, using p, p_i, t_i , and v , time instant $\hat{t}_i$ can be calculated for each sensor i , where $\hat{t}_i$ is the time at which the signal emission must have happened at source position p , according to sensor i .
- Let us define error band $\tau \geq 2(\frac{\Delta}{v} + T)$, where Δ and T are the maximum position error of the sensors and the maximum time measurement error (resulting from both time synchronization errors and detection errors), respectively.
- Let us find a time instant t , for which in interval $[t - \frac{\tau}{2}, t + \frac{\tau}{2}]$ there are the most estimates $\hat{t}_i$. Let the consistency value for position p be the number $C_\tau(x, y, z)$ of these estimates.
- The position estimate is at the maximum of consistency function $C_\tau(x, y, z)$. Usually the maximum of C_τ is above a larger area Ψ , the size of which depends on the value of τ . In practice the position estimate is the center of Ψ , while the size and shape of Ψ can be used to characterize the estimation error.

The above algorithm assumes that the value $C_\tau(x, y, z)$ can be computed at every point of the search space, which is not realistic. For real applications an iterative, discretized version was proposed. A

Branch and Bound (B&B) search is performed in cubes with decreasing size in time. During the search, parameter Δ , and thus parameter τ , are adapted to the actual size of the cubes.

The proposed method can be applied when the source emits well defined discrete trigger signals. Such sources include e.g. weapons (acoustic source) or radio impulse signals (ultra-wide band radio sources). During the evaluation of the method acoustic sources were used with microphones, as sensors.

In large real environments (with size of 100m x 100m) using large number of sensors ($N > 50$) the proposed method is able to perform the fusion in real time. The main advantage of the method is its robustness: even in case of large number of erroneous detections (the ratio of bad measurements were often higher than 50% during the tests) the fusion provides good accuracy. The mean localization error in the above test was 1.3m.

Related publications: [S13], [S14], [S15], [S16], [S17].

2.2. Extension of the consensus based fusion to increase localization accuracy

The algorithm proposed in 2.1 performs the search in the discrete space. Since the measurement noise is always present, parameter τ cannot be arbitrarily low, thus the resolution of the method cannot be decreased arbitrarily. The value of τ could be adapted if the noise model were accurate, but this is not a practically realistic solution. Instead, in order to increase the accuracy, an extension was proposed. First the fundamental method is applied to (1) calculate an initial position estimator and (2) identify sensors which consistently support the estimate, within an error limit. Using the measurements of these sensors, a gradient search provides a more accurate estimate. The operation of the extended estimate is the following:

- a. Using a coarse noise and error model, similarly to 2.1, the value of τ is set and the fundamental algorithm is executed. The result is a position $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ where $C_\tau(x, y, z)$ is maximal.
- b. For position $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$, an associated time estimating emission time $\tilde{t}$, and the interval $I = [\tilde{t} - \frac{\tau}{2}, \tilde{t} + \frac{\tau}{2}]$, are provided. Let set Γ contain sensor indices i for which $\{\hat{t}_i\} \in I$.
- c. Let us define the following quadratic error function: $E(x, y, z, t) = \sum_{i \in \Gamma} e_i^2(x, y, z, t)$, where $e_i(x, y, z, t) = d_i(x, y, z) - v(t_i - t)$.
- d. Let us determine the minimum of $E(x, y, z, t)$, using gradient search, where the initial position is $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{t})$. The position estimate is where $E(x, y, z, t)$ is minimal.

The method was tested in an acoustic shooter localization application, where the accuracy was compared to that of the fundamental method. According to the test results, the error decreases with 30%. The measured accuracy was compared to the theoretical limit. According to simulation tests, the accuracy of the proposed method is close to the Cramer-Rao bound calculated for sensor set Γ . Naturally, the accuracy is lower than the theoretical limit calculated for all sensors. Since the operation of the sensors (whether they provide good or false result) cannot be controlled, the proposed method is close to optimal: it provides results, which are close to the theoretical limit under the given circumstances.

Related publication: [S18]

2.3. Generalized consensus-based sensor fusion for TDOA-based localization

The fundamental method proposed in 2.1 is applicable when the signal source emits discrete and well defined signals. In many applications, however, the source is different (e.g. in case of human speech) and it is difficult to define such events which occur surely and can be detected reliably by the sensors.

Conventional speaker localization algorithms (beam forming, correlation techniques) require wide bandwidth communication between sensors and the processing units (typically the raw signals sensed by the microphones are used for further processing). This feature is not advantageous in application where there communication bandwidth is limited (e.g. networks using Zigbee connection). The generalized consensus-based sensor fusion can be applied in such environments.

I generalized the consensus based sensor fusion for localization using TDOA measurements. In the new algorithm an a priori defined set of events $\Pi_k, k = 1, 2, \dots, K$ are utilized, which are detected by the sensors and the detection times are recorded. Sensors build the event descriptor triplets $\langle i, k, t \rangle$, where i is the sensor ID, k is the event ID, and t is the time of detection. The generalized consensus based estimator for TDOA measurements is the following:

- The source emits a signal continuously. Sensors watch for events in the sensed signal and record their sensing time for measurement interval W . The sensors forward the detected event descriptors to the fusion center after time W , then a new measurement interval is started.
- Let us assume that the unknown position of the source is $p = (x, y, z)$. Using p, p_i, t_n and v , for each sensor the assumed emission time $\hat{t}_n$ can be computed, when the observed event Π_k occurred in the assumed position p .
- Let us define error bound $\tau \geq 2(\frac{\Delta}{v} + T)$, where Δ is the maximum position error of the sensors, and T is the maximum error of the time measurement. Let us also define minimal consensus index Λ .
- Let the sparse set of time instants $Y = \{t_i\}$ such that for every $t_1, t_2 \in Y: |t_1, t_2| > \tau$. Set Y defines a disjoint set of intervals $Y_\tau = \{\lambda_i\}$, where $\lambda_i = [t_i - \tau, t_i + \tau]$. Let the number of estimates $\hat{t}_n$, related to event Π_k , in interval λ_i be n_i . Let $\tilde{n}_i = n_i$, if $n_i \geq \Lambda$ and $\tilde{n}_i = 0$, if $n_i < \Lambda$. Let $C_{k,\tau}(x, y, z) = \max_Y \sum_i \tilde{n}_i$.

Note: Y contains the set of estimated time instants, in which presumably the source generated an event Π_k , and $C_{k,\tau}(x, y, z)$ is the number of consistent measurements supporting these events, assuming the source is at position (x, y, z) . In the computation only those events are used which are supported by at least Λ consistent measurements.

- Let the value of the consistency function be the following: $C_\tau(x, y, z) = \sum_k C_{k,\tau}(x, y, z)$. The position estimate, similarly to the original consensus-based estimator, is derived from the maximum of the consistency function.

Note: The generalized method is reduced to the original version with the following simplifications:

$$k = 1, \Lambda = 1, C_{k,\tau}(x, y, z) = \max_Y \max_i \tilde{n}_i.$$

The evaluation of the consistency function, similarly to the original consensus-based estimator, is made by iterative B&B search. Instead of exact optimization, the selection of set Y , and the computation of $C_{k,\tau}$ is performed using fast heuristic methods.

The method was tested using speech signals. The experiment was conducted indoors, where 5 microphones was placed in an area of size 6m x 10m, and the accuracy of the detection was approx. 0.2m. During the experiments a simple filter bank was run on the sensors, and events were defined as fast energy increases in the individual bands. The data rate, due to forwarding the event descriptors, was 2 orders of magnitude than data rate necessary for the transmission of raw signals. The difficulty of event definition is illustrated by the fact that less than 5% of the detected events was consistent with $\Lambda = 3$. Despite of the large number of inconsistent measurements, the location estimate was accurate, which show the robustness of the consensus based estimator.

Related publications: [S19].

Utilization of the results

The application of consensus based localization technique was very successful in acoustic counter-sniper systems. The method provided accurate estimated even in scenarios where reverberations make localization difficult. Before the development of the system, urban shooter-localization systems were unreliable, according to my knowledge, our system was the distributed sensor network based system applicable in this domain.

The proposed consensus based estimator was extended in later methods:

- An extension of the consensus based estimator allows the utilization of trustworthiness of sensors [S20].
- Using a stochastic acceleration method the speed of the search was increased by 3 orders of magnitude [S21].
- The consistency function was expanded to handle both TDOA and directional measurements and was successfully applied on systems deployed on helmets [5].

3. Robust middleware services for distributed measurement systems

3.1. k -coverage algorithm with guaranteed quality of service for distributed measurement systems

Related to accuracy or fault-tolerance issues, in distributed measurement systems and sensor networks a frequently occurring task is to provide coverage for every point of the observed territory by at least k sensors. The necessary structural condition is that the deployment of the sensors be adequate, i.e. the sensors must be placed densely enough. If the density of the sensors is higher than the minimal requirement, further optimization is possible: providing k -coverage, some sensors may be sent to low-power (sleeping) mode, thus preserving energy. If the roles of operating and sleeping sensors are scheduled properly, the operating time of the whole network can be extended.

The k -coverage problem can be formalized using bipartite graph $G(R \cup S, E)$, where vertices S and R represent sensors and observed regions, respectively. In G there is an edge e between region $r \in R$ and sensor $s \in S$ if and only if s (completely) covers region r . The simple k -coverage problem is to find a subgraph $G'(R \cup S', E')$ of G , so that for all vertices R in G' , the degree is at least k .

The minimal k -coverage problem is to find a non-redundant subgraph G' that solves the k -coverage problem with the minimal number $|S'|$ of sensors. Even the static minimal k -coverage problem is NP-complete, but the tackled problem is more complicated: the lifetime of the network is to be prolonged

with the help of the alternation of appropriate k -covering sets by minimizing the power consumption and, thus, maximizing the network lifetime.

During the solution the following realistic assumptions are used:

- The sensing area of the sensors can be modelled by a circle, inside of which the sensing has guaranteed quality, while outside of the sensing radius the quality cannot be guaranteed.
- The communication radius of the sensors is at least double of the sensing radius.
- Every sensor knows its own coordinates and the observed area Σ . Sensors attempt to cover only areas inside of Σ .
- Sensors know their own energy status.

The following metrics are utilized to describe the quality of service:

- k -coverage ration: $\Theta_k = \frac{A_k}{A}$, where A_k is the area of k -covered regions, while A is the area of the full observed target space Σ .
- k -lifetime: $L_k(\lambda)$ is the maximum operational time of the network with $\Theta_k > \lambda$, where $0 < \lambda \leq 1$ (in practice $\lambda = 1$ or close to 1).

A distributed algorithm was proposed to solve the dynamic k -coverage problem. The sensor state is described by a *drowsiness factor*, which takes into consideration both the remaining energy of the sensor and its importance to solve the k -coverage problem: the drowsiness factor is high for sensors with low remaining energy and for those sensors, the observed territory of which is observed by only few other sensors.

The schematic description of the algorithm is the following:

- a. There is periodically an election in the network. After each elections, a k -coverage set is formed, which operates for time T . Sensor not participating in the coverage set are sent to sleep for time T . After T , a new election is performed.
- b. During the election sensors with energy enough for at least time period T send their positions to their neighbors and create a priority list proportional with drowsiness. Sensors send their priority to their neighbors, too.
- c. Based on the received information, each sensor builds the local coverage graph, describing its neighborhood. Then during the election process follows the actual coverage of those areas which can be potentially covered by itself.
- d. During the election the sensors declare their status sleeping or awaken, and the latest is broadcasted to the neighbors. The election process is greedy: a sensor can go to sleep if the coverage problem is solved by other sensors, or it can be solved by other, lower priority sensors; otherwise the sensors stays awake.

The operation of the algorithm was analyzed using the following realistic error model:

- In the network any message can be lost or can be damaged. Damaged messages can be detected with suitable error protection coding and can be treated as lost.
- The received messages are correct (due to error protection coding) and true (Byzantine errors can be avoided using secure channel coding).

The following statements were proven formally:

- If the sensor placement structurally allows k -coverage, the proposed algorithm is guaranteed to find a solution.
- In the presence of errors covered by the above error model the operation of the algorithm is guaranteed to be correct: if structurally possible, it provides k -coverage in a fault tolerant way.

The operation of the algorithm was examined in a simulated environment (with $k = 3$). The operation was compared to that of the distributed random election algorithm [6]. According to the tests, the proposed algorithm provided approximately two times longer network lifetime, providing the same required coverage, while provided 15% higher coverage when the network lifetime was the same. The operation of the algorithm was analyzed vs. the probability of message loss: according to the expectations the quality of the service did not change when the error rate increased (i.e. the algorithm always provided $\Theta_3 = 1$), but the network lifetime decreased approximately linearly with the increase of error rate.

Related publications: [S22], [S23], [S24], [S25].

3.2. Structurally stable time synchronization protocol for ring topology networks

In distributed measurement systems it is often required to know the order of observations, the time between measurements, or it may be necessary to provide synchronous measurements. To fulfill such requirements, synchronization services are utilized, which provide common time base for the network elements. Most of the methods in the literature spread the synchronization starting from a reference device. The common feature of these algorithms is that they try to avoid loops in the synchronization graph, thus the convergence of the synchronization is structurally provided.

A very different theoretical problem is the synchronization of ring topology networks. By artificially breaking of the loop, previous method can be utilized, but this way between the end nodes of the linear topology the synchronization error is much higher than between the other neighboring nodes, thus the symmetry of the ring topology is damaged, which may be unacceptable in certain applications. The application of conventional methods naively for ring topologies, apart from large synchronization errors, opens stability problems as well: such algorithms often do not converge.

New time synchronization protocol was proposed for ring topology networks utilizing TDMA scheduling. The protocol provides the same low synchronization error between neighbors and the global synchronization error is also low (proportionally with the distance between nodes). This property is advantageous in most applications: since the communication is performed between neighboring devices, here tight synchronization (even in the microsecond level) is required, to provide energy efficiency; while for the whole network the required accuracy is determined by the application, usually with lower demand for accuracy (e.g. in the order of milliseconds or seconds).

The overhead of the protocol is very low: it utilizes the existing messages in the system and piggybacks only a few bytes of information. An additional advantage of the protocol is that, due to the tight neighbor-wise synchronization, there is no need to wake up devices long before the scheduled communication time, thus the energy efficiency of the network is high and low duty cycles can be reached. The protocol provides high accuracy synchronization with rare resynchronization.

The schematic description of the protocol is the following:

- The protocol utilizes the TDMA scheduling of the network and synchronizes the nodes step by step, in one direction: each node passes the synchronization information forward according to its own schedule.
- The synchronization of neighboring nodes is performed in the medium access layer, thus the pairwise synchronization error is low.
- Every node utilizes two logical clocks: WUC contains time used in the previous synchronization round, while SC contains current synch-time. The two clocks may show different times in the interval when a node is synchronized to its previous neighbor but the synchronization is not passed to the next neighbor.
- The sync information is piggybacked on normal messages, which are transmitted according to the TDMA schedule. Each node wakes up according to its WUC, thus communicating partners wake up together. The synchronizing node sends the content of its SC to the neighbor to be synchronized, and finally performs $WUC = SC$.
- Upon the reception of synch message the node measures the synch error accumulated during the last synch period, and utilizing it, calculates its new SC.

The protocol is able to compensate for the clock drifts in the network, using the applied feedback.

The protocol was tested in real hardware, composed of 6 nodes. According to the measurements, the maximum and average time difference between neighboring nodes was 6 ticks and 0.7 ticks, respectively, where 1 tick is the resolution of the utilized clock.

The initial convergence of the protocol is questionable, due to the inherent feedback loop in the system. The convergence is a crucial question in distributed measurement systems, where the initial state of the clocks, or the order of start-up of the nodes may vary. I examined the convergence properties of the protocol, and I determined the structural conditions (both necessary and sufficient) for guaranteed initial convergence.

Let the period of the network's TDMA schedule be T , and let BL_i be the roundtrip time, while the message from node i reaches the previous node ($i - 1$), after an almost full cycle. Let $L = \min_i BL_i$.

When $T > 2L$, the system is convergent, independently of the schedule and the initial clock values.

When $T \leq 2L$, the network may or may not be convergent, depending on the initial clock values. In this case, however, there exists an initial state, starting from which the system is not convergent.

Using the above theoretical result the algorithm was extended to provide stability: its convergence is guaranteed from any initial value.

Related publications: [S26], [S27], [S28].

3.3. Prowler: High level programmable simulation tool for the design of distributed measurement systems

In the early stage of design of distributed wireless measurement systems it is often advantageous to have prototypes and the possibility of system simulation. The design is complicated by the presence of wireless communication: the nondeterministic delays and errors, introduced by the communication channels, may change the behavior of the system under design, and it should be reflected by the utilized design tools. The design and prototype making should be as high level as possible: the designer should concentrate on the design instead of implementation details. Using the above requirements I created

Prowler, an event driven probabilistic, high level simulator, which is able to support the implementation and test of wireless sensor networking applications. The simulator was built in Matlab, thus the user needs to program the application logic in his/her well know high level programming environment.

The main properties of the system are the following:

- The application is defined using 3 views: (1) topology, where the placement and movement of nodes have to be defined, (2) view, where the event to be displayed need to be defined, and (3) application logic, where the programs running on the nodes are described.
- The simulator is event based, the operation is described as actions as a response to events in the system. The actions may generate new events.
- The simulator handles the low level communication details and the associated physical phenomena: the medium access, signal propagation, message collisions are simulated using a stochastic approach.
- The blocks simulating the radio communication are changeable plug-ins. Currently 3 models are implemented: (1) signal strength based on the distance, reception based on signal strength (2) signal strength based on the distance, reception based on signal to noise and interference ratio (SNIR), (3) Rayleigh fading signal propagation, reception based on SNIR.
- The signal propagation models are statistical models, but it is possible to apply deterministic models to aid testing and debugging.
- The simulator can be controlled from command line, and a graphical interface is also provided.

In distributed measurement systems the operation logic is usually based on special events, e.g. sending/receiving messages, performing measurements. The simulator supports well this operation model and its event-driven interface enables the easy description of such applications.

The graphical environment can be utilized for iterative development and testing of applications, while the command line interface allows its call from other applications (e.g. for optimization of protocol parameters).

Related publications: [S32], [S33]

Utilization of results

The proposed k -coverage algorithm can be utilized in case of distributed measurement systems where guaranteed services are required. The advantages of the proposed method are that its properties related to fault tolerance are formally proven, and its overhead is low. The proposed method was generalized for cases where the nodes measure multiple parameters simultaneously, possibly with different coverage requirements [S25].

The proposed synchronization protocol was applied in a security framework, where the operation was performed in a ring network with TDMA, guaranteeing response time and energy efficiency. With the tight synchronization the duty cycle was below 0.5%, providing the required guaranteed response time of 5 second [S29], [S30], [S31].

Simulator Prowler was successfully applied during our designs of middleware services and applications. The program can be downloaded for free, it was extended by others (JProwler, RMASE), and is utilized

for education and research in several places of the world (there is more, than 100 independent citation of the tool).

References:

- [1] J. Schoukens, R. Pintelon, G. Vandersteen and P. Guillaume (1997). Frequency-domain system identification using non-parametric noise models estimated from a small number of data sets. *Automatica*, Vol. 33, no.6, pp. 1073-1086.
- [2] Y. Rolain, J. Schoukens, and R. Pintelon (1997). Order estimation for linear timeinvariant systems using frequency domain identification methods. *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 42, No. 10, pp. 1408- 1417.
- [3] J. Schoukens, T. Dobrowiecki, and R. Pintelon (1998). Identification of linear systems in the presence of nonlinear distortions. A frequency domain approach. *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 43, No.2, pp. 176-190.
- [4] I. Kollár, Frequency Domain System Identification Toolbox homepage. Online: http://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/product_35570.html
- [5] P. Volgyesi, G. Balogh, A. Nadas, C. Nash, and A. Ledeczki , “Shooter Localization and Weapon Classification with Soldier-Wearable Networked Sensors,” in *Proc. 5th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, June 11–13, 2007, San Juan, Puerto Rico, pp. 113-126.
- [6] S. Kumar, T. H. Lai, and J. Balogh, “On k-coverage in a mostly sleeping sensor network,” in *Proc. MobiCom*, 2004, pp. 144–158

List of related publications:

- [S1] Simon Gy. and J. Schoukens, "Robust Broadband Periodic Excitation Design," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/99, Venice, Italy, May 24-26, 1999, Vol. 2. pp. 1217-21.
- [S2] Simon, Gy. and J. Schoukens, "Robust Broadband Periodic Excitation Design," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 49, No. 2, pp. 270-274, Apr. 2000.
- [S3] Simon, Gy. Rik Pintelon, L. Sujbert, J. Schoukens, "An Efficient Nonlinear Least Square Multisine Fitting Algorithm," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC/2001, May 21-23, Budapest, Hungary, 2001, Vol. 2, pp. 1196-1201.
- [S4] Sujbert, L., Gy. Simon, J. Schoukens, "Resonator Based Non-Parametric Identification of Linear Systems," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC/2001, May 21-23, Budapest, Hungary, 2001, Vol.1, pp. 166-169.
- [S5] Simon G, Pintelon R, Sujbert L, Schoukens J., "An efficient nonlinear least square multisine fitting algorithm," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No. 4, pp. 750-755, Aug. 2002.
- [S6] Simon, Gy., J. Schoukens, and Yves Rolain, "Automatic Model Selection for Linear Time-Invariant Systems," Proceedings of the 12th IFAC Symposium on System Identification, SYSID 2000, Santa Barbara, CA, USA, 21-23 June 2000, Vol. I., pp. 379-384
- [S7] Schoukens, J.; Rolain, Y.; Simon, G.; Pintelon, R.; "Fully automated spectral analysis of periodic signals", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 52, No. 4, pp. 1021-1024, Aug. 2003.
- [S8] Kollár, I., J. Schoukens, R. Pintelon, G. Simon and G. Román, "Extension for the Frequency Domain System Identification Toolbox: Graphical User Interface, Objects, Improved Numerical Stability," Proceedings of the 12th IFAC Symposium on System Identification, SYSID 2000, Santa Barbara, CA, USA, 21-23 June 2000, Vol. II., pp. 699-702.
- [S9] Kollár, I., Pintelon R., Rolain, Y., Schoukens, J., Simon, G., "Frequency Domain System identification Toolbox for MATLAB: Automatic Processing – From Data To Models," 13th IFAC Symposium on System Identification SYSID 2003, Rotterdam, The Netherlands, August 27-29, 2003
- [S10] Kollar, I.; Pintelon, R.; Schoukens, J.; Simon, G.; "Complicated procedures made easy [GUI]," IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Volume: 6, Issue: 3, pp. 19-26, Sept. 2003.
- [S11] Daboczi, T.; Kollar, I.; Simon, G.; Megyeri, T.; "How to test graphical user interfaces," IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Volume: 6, Issue: 3, pp. 27-33, Sept. 2003.
- [S12] Dabóczi T., Kollár I., Simon G., and Megyeri T., "Automatic testing of graphical user interfaces," Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/2003, Vail, CO, May 20-22, 2003, pp. 441-445.
- [S13] Simon, G., Maróti, M., Lédeczi, A., Balogh, G., Kusy, B., Nádas, A., Pap, G., Sallai, J., Frampton, K., "Sensor Network-Based Countersniper System," In Proc of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), Baltimore, MD, USA, Nov. 2004, pp.1-12.
- [S14] Maroti, M., Simon, G., Ledeczi, A., Sztipanovits, J., "Shooter localization in Urban Terrain," Computer, Vol. 37, No. 8, pp. 60-61, Aug. 2004.

- [S15] Ledeczki A., Nadas A., Volgyesi P., Balogh G., Kusy B., Sallai J., Pap G., Dora S., Molnar, K., Maroti M., Simon G., "Countersniper System for Urban Warfare," ACM Transactions on Sensor Networks, Vol. 1, No. 2, pp. 153-177, Nov. 2005.
- [S16] Lédeczi Á., Völgyesi P., Maróti M., Simon G., Balogh G., Nádas A., Kusy B., Dóra S., Pap G.: "Multiple Simultaneous Acoustic Source Localization in Urban Terrain", IPSN 05, CD-Rom, Los Angeles, CA, April 25, 2005
- [S17] Balogh, Gy., Lédeczi, Á., Maróti, M., Simon, G., "Time of Arrival Data Fusion for Source Localization," WICON Workshop on Information Fusion and Dissemination in Wireless Sensor Networks, SENSORFUSION 2005, Visegrád, Hungary, July 14, 2005
- [S18] Vakulya, G., G. Simon, „Efficient Sensor Network Based Acoustic Localization”, in Proc. 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Hangzhou, China, May 10-12, 2011, pp.582-586
- [S19] Simon, G., Sujbert, L., "Acoustic source localization in sensor networks with low communication bandwidth," in Proceedings of the Fourth International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, WISES 06, Vienna, Austria, June 30, 2006, pp. 155-163.
- [S20] Vakulya, G., G. Simon, „Adaptive Acoustic Localization Algorithm”, in Proc. 2010 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Austin, TX, May 3-6, 2010, pp. 405-411.
- [S21] Vakulya, G., G. Simon, "Fast Adaptive Acoustic Localization for Sensor Networks," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 60, No. 5, pp.1820 - 1829, May 2011.
- [S22] Simon, G., M. Molnár, L. Gönczy, B. Cousin, "Dependable k-coverage algorithms for sensor networks," Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC 2007, Warsaw, Poland, May 1-3, 2007. CD-ROM ISBN 1-4244-1080-0, 6 pages.
- [S23] Molnár, M., G. Simon, L. Gönczy, "Robustness and Performance Analysis of a Dynamic Sensor Network Scheduling Algorithm," First International Workshop on Future Trends on Design and Analysis of Dynamic Networks (FTDA-DN), Hong Kong, China, July 31, 2008, pp. 52:1-52:6.
- [S24] Simon, G., M. Molnár, L. Gönczy, B. Cousin, "Robust k-coverage algorithms for sensor networks," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 8, pp.1741 - 1748, Aug. 2008.
- [S25] Molnár, M., Simon, G. and Gönczy, L., "Quasi-optimal scheduling algorithm for area coverage in multi-functional sensor networks," Int. J. Ad Hoc and Ubiquitous Computing, Vol. 14, No. 2, pp.109-122, Oct. 2013
- [S26] G. Simon, „Efficient time-synchronization in ring-topology wireless sensor networks”, in Proc. 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Graz, Austria, May 13-16, 2012, pp. 958-962
- [S27] G. Simon, „Convergence Analysis of a Ring Time-Synchronization Protocol,” kézirat, publikáció alatt.
- [S28] Maroti M., Kusy B., Simon G., Ledeczki A., “The Flooding Time Synchronization Protocol,” In Proc of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), Baltimore, Mariland, USA, Nov. 2004, pp. 39-49.
- [S29] G. Vakulya, G. Simon, „Energy-Efficient and Reliable Round-Robin TDMA for Wireless Sensor Networks”, in Proc. 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Graz, Austria, May 13-16, 2012, pp.1179-1183

- [S30] G. Vakulya, G. Simon, „Extended Round-Robin TDMA Scheduling Scheme for Wireless Sensor Networks”, in Proc. 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Minneapolis, USA, May 6-9, 2013, pp.253-258
- [S31] G. Vakulya, Z. Tuza, and G. Simon, "Optimal Multi-TDMA Scheduling in Ring Topology Networks," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2015, Article ID 837074, 14 pages, Jan 2015. doi:10.1155/2015/837074
- [S32] Simon G., Völgyesi P., Maróti M., Lédeczi Á., “Simulation-based optimization of communication protocols for large-scale wireless sensor networks,” 2003 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, March 8, 2003, pp. 3_1339-3_1346.
- [S33] Zhang, Y., Simon, G., Balogh, G., "High-Level Sensor Network Simulations for Routing Performance Evaluations", Third International Conference on Networked Sensing Systems, INSS 2006, Chicago, IL, USA, May 31, 2006.