

Szenzorhálózatos, könnyen kezelhető felhasználói felülettel rendelkező sokcsatornás aktív zajcsökkentő rendszer

Balogh Tibor Csaba és Székely Gábor

Konzulens: Dr. Sujbert László

2007. december 13.

Áttekintés

Aktív zajcsökkentés

A rendszer hardverfelépítése

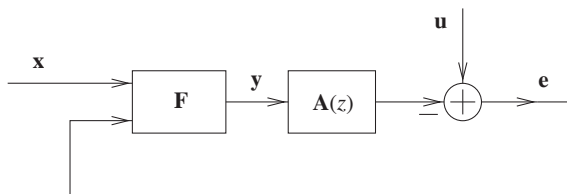
Kezelői felület

Kiegészítés

Aktív zajcsökkentés (ANC, Active Noise Control)

- ▶ Feladat: csendes zónák kialakítása bizonyos számú mérőmikrofon környezetében
- ▶ Elv: a zajjal ellentétes fázisú hang kisugárzása a beavatkozó hangszórókból
 - ▶ az akusztikai rendszerek széles tartományban lineárisnak tekinthetők
 - ▶ alkalmazható a szuperpozíció elve
- ▶ Működési frekvenciatartomány:
 - ▶ infrahangoktól akár néhány kHz-ig
 - ▶ fölötte: passzív hangszigetelés és -csillapítás
- ▶ Korlátok:
 - ▶ a csendes zónák mérete a hullámhosszal arányos (kb. $\lambda/4$), a frekvencia növekedésével egyre csökken
 - ▶ a mérőmikrofonok a fülektől viszonylag távol vannak

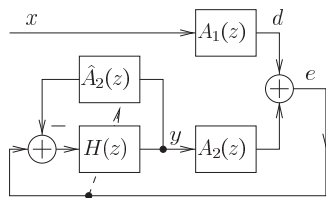
Aktív zajcsökkentő rendszerek általános felépítése



ábra: aktív zajcsökkentő rendszer

- ▶ **F**: aktív zajcsökkentő rendszer
- ▶ **x**: referenciajel
- ▶ **y**: zajcsökkentő rendszer kimenőjele
- ▶ **A(z)**: akusztikai átviteli függvény-mátrix
- ▶ **u**: elnyomandó zaj
- ▶ **e = u - A(z)y**: különbségi jel

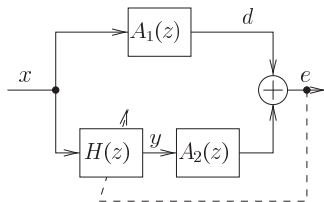
Aktív zajcsökkentő eljárások – visszacsatolt struktúra



ábra: visszacsatolt (feedback) struktúra

- ▶ Jellegzetesség: nem használja fel az x referenciajelet
- ▶ Fő alkalmazás: szélessávú zajok elnyomása
 - ▶ $A_1(z)$: elsődleges út (primary path)
 - ▶ $A_2(z)$: másodlagos út (secondary path) – eddig: $\mathbf{A}(z)$
 - ▶ $\hat{A}_2(z)$: másodlagos út modellje (identifikálni kell)
 - ▶ $H(z)$: adaptív szűrő, együtthatók adaptálása LMS algoritmussal

Aktív zajcsökkentő eljárások – előrecsatolt struktúra



ábra: előrecsatolt (feedforward) struktúra

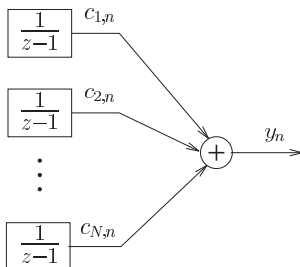
- ▶ Jellegzetesség: felhasználja az x referenciajelet
- ▶ Probléma:
 - ▶ gyakorlatban a referenciajelet is mikrofonnal vesszük, és ha behallatszik a beavatkozó jel, az így létrejött parazita hurok instabilitást okozhat
 - ▶ megoldás: a referenciajelet más módon kell mérni, pl. a zajforrásra erősített rezgésmérővel
- ▶ Fő alkalmazás: periodikus zajok elnyomása

Periodikus zaj elnyomása

- ▶ Módszer: Fourier-reprezentáció
 - ▶ x_n sávkorlátozott, periodikus jel felírható komplex exponenciálisok súlyozott összegeként, ahol f_1 az alapharmonikus frekvenciája

$$x_n = \sum_{k=-L}^L X_k c_{k,n}, \text{ ahol } c_{k,n} = e^{j2\pi f_1 kn}, \quad k = -L \dots L$$

- ▶ Jelet generáló modell (konceptcionális jelmodell)

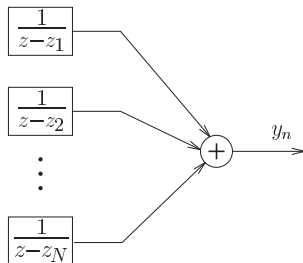


ábra: a konceptcionális jelmodell integrátorokkal

Alternatív kialakítás: rezonátorokból

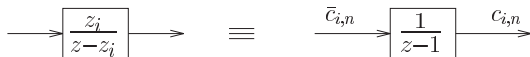
- ▶ Egy csatornának egyetlen pólusa van az egységkörösön

$$z_i = \frac{C_{i,n+1}}{C_{i,n}} = e^{j2\pi f_i}, \quad i = 1 \dots N$$



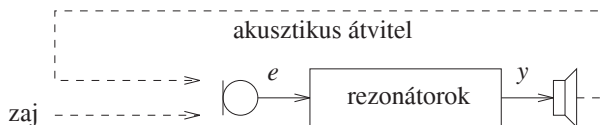
ábra: a koncepcionális jelmodell rezonátorokkal

- ▶ Az kétféle jelmodell egy csatornája ekvivalens:



Jelmodell alapú zajcsökkentő rendszerek

- ▶ Jól alkalmazható periodikus zajcsökkentési feladatokra
 - ▶ kis számítási igény
 - ▶ az elnyomandó jelet nagyon pontosan elő tudja állítani

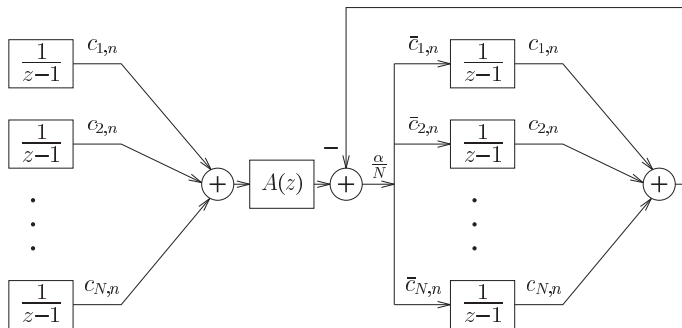


ábra: zajcsökkentő rendszer rezonátoros struktúrával

- ▶ A kimeneti jel az akusztikus átvittel szűrve kell, hogy kioltsa a zajt, ezért a rendszerben szükséges ennek inverzét ismerni, hogy a rezonátorok visszacsatolása (késleltetéstől eltekintve) 1 legyen

Az akusztikai átviteli függvény mérése (identifikációja)

- ▶ Az integrátoros jelmodell alkalmazása esetén állandósult állapotban az állapotváltozók a Fourier komponensek
- ▶ Hátrány: egyszerre csak N frekvencián mérhető az átvitel
- ▶ Megoldás: mérés léptetett szinuszos gerjesztéssel, az átvitel fokozatos meghatározása
- ▶ Kis variancia, könnyű átlagolás, pontos mérés



ábra: az átviteli függvény mérése integrátoros struktúrával

Problémák

- ▶ Az akusztikus átvitel változik, amely egy határon túl instabilitást eredményez
 - ▶ Megoldás: instabilitás detektálása
 - ▶ A kimeneti rezonátorkészlet állapotváltozói exponenciálisan növekednek, azaz deriváltjuk is növekvő, ez a jelenség detektálható, és a megfelelő becsatoló együttható fázisa korrigálható
- ▶ Az elnyomandó zaj változik
 - ▶ A rezonátoros struktúra frekvenciái korrigálásra szorulnak
 - ▶ Megvalósítás: AFA – Adaptív Fourier Analizátorral
 - ▶ Az AFA egy rezonátoros struktúra, amely a rezonátorok pólusait az bemenő jel frekvenciáira hangolja
 - ▶ Biztosítható általa a bemenőjel pontos felbontása

Áttekintés

Aktív zajcsökkentés

A rendszer hardverfelépítése

Kezelői felület

Kiegészítés

A megvalósított zajcsökkentő rendszer áttekintése

- ▶ Adatgyűjtés: szenzorhálózattal
 - ▶ Berkeley MICAz mote-ok
 - ▶ Szenzorkártyák a mote-okon
 - ▶ 1 db átjáró mote a programozói kártyán
- ▶ Jelfeldolgozás: DSP fejlesztőkártyával
 - ▶ Analog Devices ADSP-21364 EZ-KIT Lite fejlesztőkártya

A megvalósított szenzorhálózat

- ▶ Digitális, vezérlő logikával ellátott mérésadatgyűjtő és továbbító hálózat
- ▶ Célja a vezetékes mikrofonok kiváltása rádiós adattovábbítással
- ▶ Jellemzői:
 - ▶ kis sáv szélesség
 - ▶ nem megbízható kapcsolat
 - ▶ késleltetés
- ▶ Felhasználása problémás szabályozási körökben a fenti okok miatt, mi mégis erre a célra alkalmazzuk
 - ▶ az aktív zajcsökkentő rendszerek a többi szenzorhálózati alkalmazáshoz képest viszonylag nagy sebességűek, és érzékenyek a visszacsatolás minőségére
 - ▶ adatátvitellel és időzítéssel kapcsolatos problémák, mote-ok szinkronizálása

MICAz mote (1)

- ▶ ATmega128 mikrokontroller
 - ▶ 8 bites, RISC
 - ▶ A jelenlegi CLK: 7,3728 MHz
 - ▶ 128 kB Flash, 4 kB SRAM, 4 kB EEPROM
 - ▶ Flash memória (AT45DB041B), 512 kB
 - ▶ Szinkron/aszinkron soros interfész
 - ▶ 4 db időzítő/PWM modul



MICAz mote (2)

- ▶ 8 csatornás (multiplexelt) 10 bites AD átalakító
- ▶ Rádiós IC (CC2420)
 - ▶ 2,4 GHz ISM sáv
 - ▶ 250 kbps (ZigBee)
- ▶ Csatlakoztatható szenzorkártya
- ▶ Programfejlesztés: TinyOS beágyazott operációs rendszerben, NesC nyelven

Szenzorkártya és programozói kártya

- ▶ MTS310 szenzorkártya
 - ▶ Mikrofon
 - ▶ Analóg jelkondicionáló áramkörök
 - ▶ Egyéb, jelen feladatban nem használt szenzorok
 - ▶ Piezo buzzer
- ▶ MIB510 programozói kártya
 - ▶ Mote-ok programozása PC-vel soros porton keresztül
 - ▶ A rádió érkező adatokból RS232 kimenet



A DSP fejlesztőkártya

- ▶ Analog Devices ADSP-21364 DSP processzor
 - ▶ SHARC család (Super Harvard ARchitecture Computer)
 - ▶ Maximális órajel: 333 MHz, amely az utasítás cache segítségével 2 GFLOPs sebességet tesz lehetővé
 - ▶ 3 Mbit On-Chip SRAM
 - ▶ 6 db soros port
 - ▶ 2 db bemenet
 - ▶ 8 db kimenet
 - ▶ S/P DIF
- ▶ Számábrázolás:
 - ▶ Lebegőpontos (IEEE-754)
 - ▶ 32 bites (single-precision)
 - ▶ 40 bites (extended-precision)
 - ▶ Fixpontos: 32 bit

Áttekintés

Aktív zajcsökkentés

A rendszer hardverfelépítése

Kezelői felület

Kiegészítés

A kezelői felület megvalósításának céljai

- ▶ Lehetőség a rendszer működésének egyszerű és gyors demonstrációjára
- ▶ Az eddigiekben emberi beavatkozást igénylő műveletek gépesítése
- ▶ A teljes rendszer egyszerű skálázhatóságának és konfigurálhatóságának megoldása
- ▶ Esetlegesen, a későbbiek során hallgatói mérés keretében való alkalmazhatóság lehetővé tétele

A kezelői felület megvalósításának elvi lehetőségei

- ▶ Soros porti kommunikáció a DSP kártyával
 - ▶ Vezérlő célhardver
 - ▶ PC + célprogram (pl. Visual C++)
 - ▶ PC + LabVIEW
- ▶ PC-n futó VisualDSP fejlesztői környezet vezérlése (COM - Component Object Model)

Felmerülő nehézségek

- ▶ Változó méretű adatstruktúra kinyerése a DSP-ből
- ▶ Változó méretű, változó számú komplex mátrix pszeudo-invertálása
- ▶ Az identifikáció eredményeinek vizuális megjelenítése
- ▶ DSP felprogramozása különféle programokkal
 - ▶ Identifikáció
 - ▶ Zajcsökkentés

Felmerülő követelmények a kezelői felülettel szemben

- ▶ Foglaljon egységbe minden részfeladatot
 - ▶ A rendszer teljes felkonfigurálása
 - ▶ DSP kártya kezelése
(program fordítása, letöltés, vezérlés, I/O)
 - ▶ A rendszerkomponensek közötti adatcsere
(kommunikáció, konverziók)
- ▶ Tegye áttekinthetővé az egyes folyamatokat és azok egymáshoz való viszonyát
- ▶ Tájékoztasson a műveletek sikerességéről vagy az esetleges hibákról
- ▶ Az egyes részegységek rugalmasan – lehetőleg magas szinten – továbbfejleszthetők legyenek

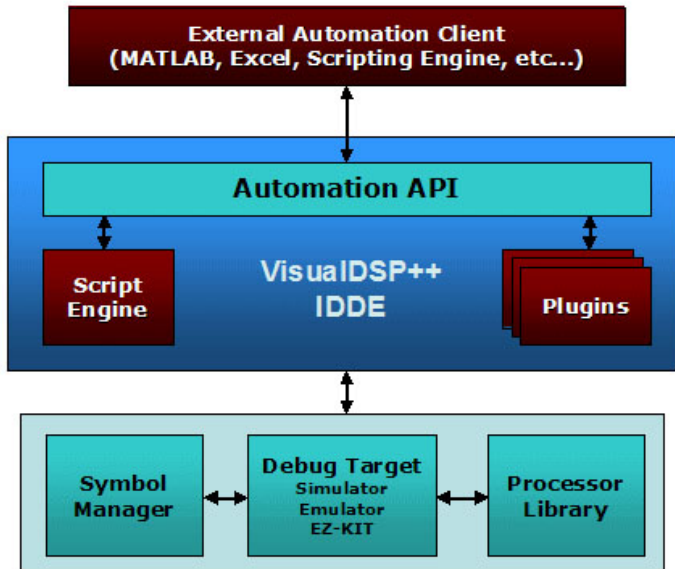
Megfontolások

- ▶ A bonyolult számítások miatt a PC kikerülése nehézkes volna
- ▶ A VisualDSP rendelkezésre áll, és magasszintű objektum-orientált felületet biztosít funkcióinak elérésére
- ▶ A MATLAB biztosítja a számítások dinamikus fejlesztetőségét, valamint magas szintű hibakeresési felületet biztosít (grafikus függvényábrázolás, stb.)

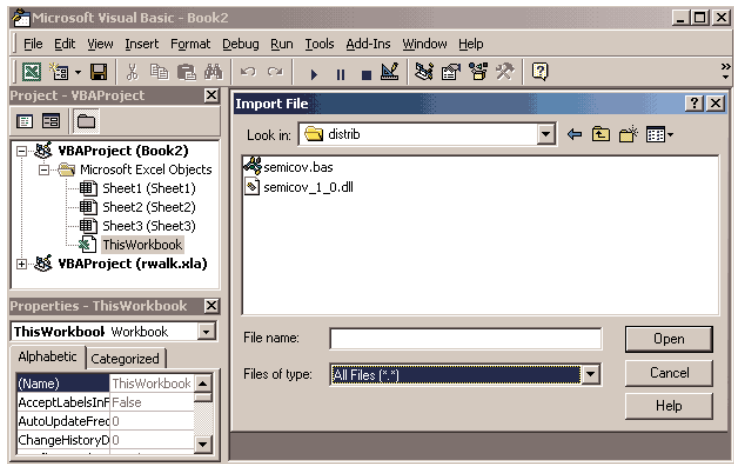
A fejlesztés során kipróbált lehetőségek

- ▶ VisualC++ felület \rightarrow VisualDSP \rightarrow fejlesztőkártya
- ▶ Excel feletti felhasználói felület + VisualBasic Script
 - ▶ \Leftrightarrow VisualDSP (COM felület)
 - ▶ \Leftrightarrow MATLAB (MATLAB Builder for Excel)

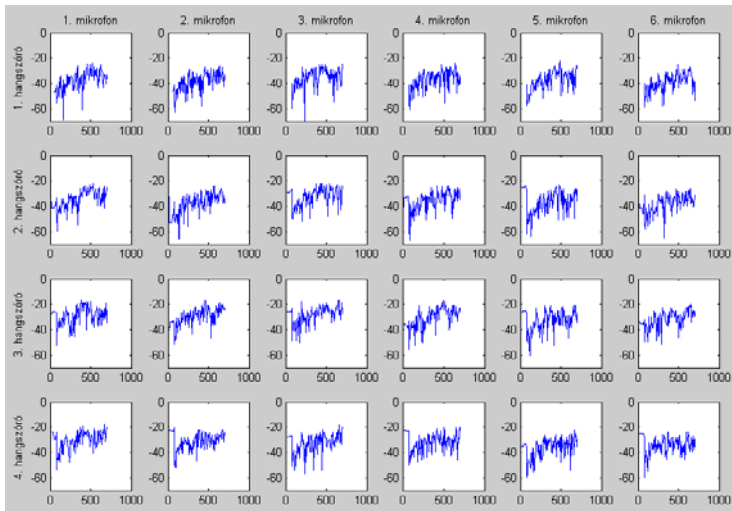
VisualDSP Component Object Model API



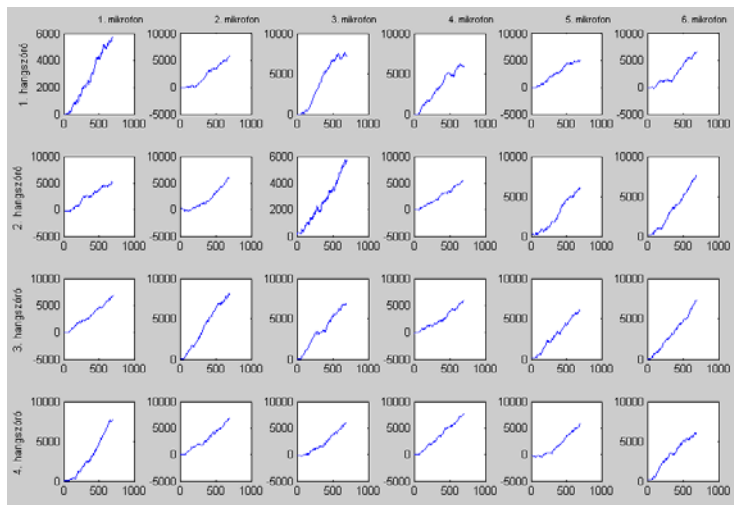
MATLAB Builder for Excel



Mért átviteli függvények amplitúdómenetének megjelenítése



Mért átviteli függvények fázismenetének megjelenítése



Összefoglalás

- ▶ Eredmények
 - ▶ Az összeállított elrendezés stabilan üzemelt immár sokcsatornás esetben is
 - ▶ A legnagyobb tesztelt rendszer: 6 mikrofon, 5 hangszóró
 - ▶ Füllel nagyon jól hallható zajelnyomás
 - ▶ A zaj frekvenciaváltozásának gyors követése
- ▶ Továbbfejlesztési lehetőségek
 - ▶ A kezelői felület továbbfejlesztése
 - ▶ A zajcsökkentő program továbbfejlesztése
 - ▶ Áttérés Mitmót alapú szenzorhálózatra (ehhez kiegészítő kártyákra van szükség)

Áttekintés

Aktív zajcsökkentés

A rendszer hardverfelépítése

Kezelői felület

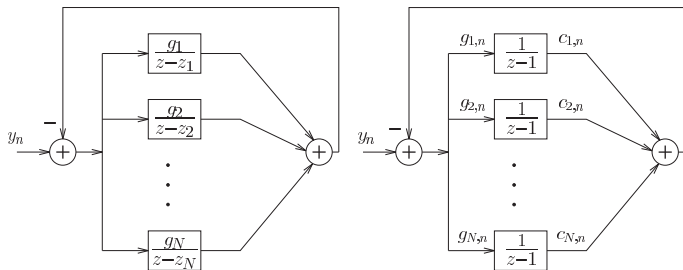
Kiegészítés

Akusztikus átvitel meghatározása – mérési lehetőségek

- ▶ Gerjesztés: fehér zaj, kiértékelés: FFT
 - ▶ nagy variancia, gerjesztés teljesítménye eloszlik
- ▶ Gerjesztés: multiszínusz, kiértékelés: FFT
 - ▶ kisebb variancia, gerjesztés teljesítménye eloszlik
- ▶ Gerjesztés: fehér zaj, kiértékelés: adaptív szűrő paramétereinek hangolása (pl. LMS algoritmussal)
 - ▶ ugyanazon problémák, mint az első esetben
- ▶ Gerjesztés: keskeny sávú (színusz), kiértékelés: rezonátoros struktúra alapján
 - ▶ kis variancia, könnyű átlagolás, pontos mérés

Megfigyelő a koncepcionális jelmodellhez

- ▶ A koncepcionális jelmodellhez megfigyelőt kell tervezni
- ▶ A rezonátoros és integrátoros jelmodellhez is tervezhető megfigyelő rendszer:



ábra: a rezonátoros és integrátoros jelmodellhez tartozó megfigyelő

- ▶ Ha a pólusok az egységkörön egyenletesen helyezkednek el:

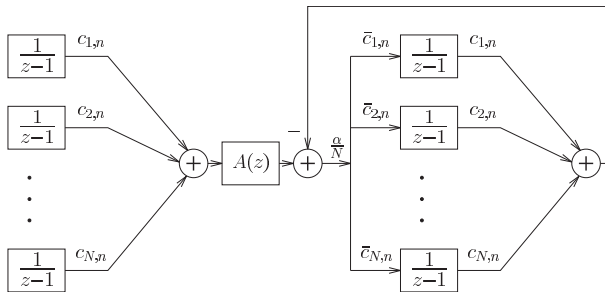
$$g_i = \frac{1}{N} z_i, \quad g_{i,n} = \frac{1}{N} \bar{c}_{i,n}$$

Megfigyelő (folytatás)

- ▶ Probléma: az elnyomandó zaj változik
- ▶ A rezonátoros struktúra frekvenciái korrigálásra szorulnak
- ▶ Megvalósítás: AFA – Adaptív Fourier Analizátorral
 - ▶ az AFA egy rezonátoros struktúra, amely a rezonátorok pólusait az bemenő jel frekvenciáira hangolja, így követi a jel változásait
 - ▶ biztosítható általa a bemenőjel pontos felbontása

Akusztikai átviteli függvény mérése (identifikációja) rezonátoros struktúrával

- ▶ Az integrátoros jelmodell alkalmazása esetén állandósult állapotban az állapotváltozók a Fourier komponensek
- ▶ Hátrány: egyszerre csak N frekvencián mérhető meg az átvitel
- ▶ Megoldás: mérés léptetett szinuszos gerjesztéssel, az átvitel fokozatos meghatározása



ábra: az átviteli függvény mérése integrátoros struktúrával

Az akusztikus átvitel változásának kezelése

- ▶ Az akusztikus átvitel időben változik, amely egy határon túl instabilitást eredményez
- ▶ Megoldási lehetőségek:
 - ▶ On-line identifikáció fehérzaj gerjesztéssel (hallható zajt okoz működés közben), ezért nem alkalmazzuk
 - ▶ Instabilitás figyelése, és a becsatoló együtthatók fázisának forgatásával a rendszer stabilizálása
 - ▶ Instabilitás detektálása: a kimeneti rezonátorkészlet állapotváltozói exponenciálisan növekednek, azaz deriváltjuk is növekvő, ez a jelenség detektálható, és a megfelelő becsatoló együttható fázisa korrigálható

Gyakorlati alkalmazások

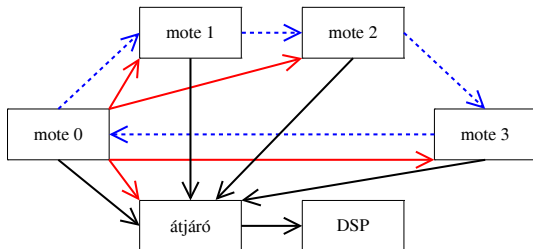
- ▶ Ipari környezet (leginkább periodikus zajok):
 - ▶ motorok
 - ▶ ventilátorok, szellőztető berendezések
 - ▶ transzformátorok
 - ▶ kompresszorok
 - ▶ gépjárművek, légi járművek belső tere
- ▶ Háztartási, irodai környezet (jellemzően széles sávú zajokkal kell számolni):
 - ▶ szobában, irodában csendes zóna kialakítása
 - ▶ (ANC fejhallgató)

A szenzorhálózat problémái

- ▶ Mintavételezés a mote-okon (a mikrokontroller AD átalakítójával):
 - ▶ nem feltétlenül egyszerre
 - ▶ de szigorúan fix ütemezéssel kell
- ▶ Szinkronizációra van szükség a mote-ok között:
 - ▶ megvalósítás: egy referencia mote frekvenciájához hangolódó időzítő, szoftveres programozható órajelosztó
 - ▶ az egyes mote-ok időzítőjében lévő számláló értéke egymással fázismerev kapcsolatban legyen
- ▶ A TinyOS miatt a mintavételezés pontos időzítése nehéz, mert a timer megszakításkérése alapesetben nem közvetlenül indítja a mérést, amely változó értékű késleltetést (jittert) okoz

Az adattovábbítás

- ▶ A mote-ok között (rádiós):
 - ▶ TinyOS formátumú csomagokban
 - ▶ vezérjeles gyűrű topológia szerint
- ▶ Az átjáró mote és a DSP kártya között (vezetékes):
 - ▶ időben összetartozó mintákat egy csomagba gyűjtve
 - ▶ lényegében bájtfolyam formátum (formátumkonverzió)
 - ▶ +1 bit, amely egy csomag első adatában 1 értékű
 - ▶ szinkronizálás a DSP soros port órajeléhez



ábra: fekete: adat, kék: vezérjel átadása, piros: szinkronizáció

Adatfogadás a DSP-n

- ▶ Probléma: a DSP-ban lévő kodek mintavételi frekvenciája fix (néhány előre definiált érték közül választható)
 - ▶ nem hangolható
 - ▶ nem szinkronizálható a szenzorhálózathoz
- ▶ Megoldás: lineáris interpoláció megvalósítása
 - ▶ az átjáró mote-okból érkező adatok segítségével becslést adunk a minták értékeire a kodek által generált megszakítás időpillanatában

