

# Hullámterjedés alapú helymeghatározási módszerek

Hollósi Gergely<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

2015

# Bevezető

- ▶ Alapvető technikák a hullámterjedésből történő helymeghatározásra
- ▶ Legelterjedtebb helymeghatározási módszer
- ▶ Négy fontos módszer
  - ▶ Közelségérzékelés
  - ▶ Jelerősség alapú
  - ▶ Időmérésen alapuló
  - ▶ Iránymérésen alapuló
- ▶ Fontos hibaforrások
  - ▶ Környezeti zaj
  - ▶ Interferencia
  - ▶ Többutas terjedés

# Hullámterjedés áttekintés

## Íránymerésen alapuló megoldások

- ▶ Általánosságban keskenysávú modell  $\rightarrow$  sávszélesség kicsiny a vivőhöz képest
  - ▶ modulált jel:  $s(t)e^{j\omega t}$
- ▶ Terjedési irány
  - ▶ Általában radiális irányban
  - ▶ Gyakran izotróp
- ▶ Terjedési sebesség:  $c$ 
  - ▶ például rádióhullám levegőben:  $c \sim 3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- ▶ Jelerősség távolsággal arányos
  - ▶  $E \sim \frac{1}{r}$  és  $P \sim \frac{1}{r^2}$
  - ▶ Tipikusan a teljesítmény a releváns

# Hullámterjedés áttekintés – fázisviszonyok

Íránymérésen alapuló megoldások

- ▶ Nézzünk egy modulálatlan síkhullámot!
- ▶ Az adóantennánál:  $r(t) = e^{j\omega t}$
- ▶  $s$  távolsággal messzebb a jel korábbi állapotát látjuk:

$$r(t) = e^{j\omega(t-\tau)} = e^{j\omega(t-\frac{s}{c})}$$

- ▶ A fázisváltozás található a két hely között

$$\Delta\varphi = -\omega\frac{s}{c} = -2\pi f\frac{s}{c} = -\frac{2\pi s}{\lambda}$$

- ▶ Hullámhosszonként a fázis teljesen átfordul
  - ▶ Például  $f = 2.7 \text{ GHz} \rightarrow \lambda \simeq 11.1 \text{ cm}$
  - ▶ Nagyon érzékeny a távolságra

# Közelségérzékelés alapú módszerek

- ▶ „Eldöntendő” módszerek
- ▶ A jeladó megfelelő közelségben található
  - ▶ A hely a fix eszközhöz tartozó, előre rögzített koordináta
  - ▶ Tipikusan pl. NFC, RFID
- ▶ A jeladó egy adott bázisállomáshoz kapcsolódik („cella”)
  - ▶ A hely a bázisállomás helyzetéből származtatható
  - ▶ Tipikusan pl. a GSM cella információ, WiFi Access Point
- ▶ Egyszerű megvalósítás, nem szükséges célhardver
- ▶ Pontatlan (akár több 10 km)

# Jelerősség alapú megoldások (1)

- ▶ A hullámterjedés során a jelerősség csökken, arányos a távolsággal
  - ▶ Például elektromágneses hullám  $E \sim \frac{1}{r}$  és  $P \sim \frac{1}{r^2}$
- ▶ Felhasználható a távolság becslésére, és távolságmérésen alapuló technika használható
- ▶ A többutas terjedés, és a számos akadály és elnyelés következtében azonban nagyon hektikus
- ▶ Adott helyen azonban jellemző lehet
  - ▶ infrastruktúra oldali mérés
  - ▶ eszköz oldali mérés

## Jelerősség alapú megoldások (2)

- ▶ A térerősség általában rádiós technológiáknál elérhető (hand over)
- ▶ Felépíthető a térerősségtérkép
  - ▶ az  $f(\mathbf{I})$  térerősségfüggvény mintavett rekonstrukciója
- ▶ Későbbi mérések ( $p_{rssi}$ ) az inverz  $f^{-1}$  függvénnyel felhasználhatók
  - ▶  $\mathbf{I} = f^{-1}(p_{rssi})$
- ▶ Kérdés a függvény invertálásának módszere
  - ▶ Legközelebbi érték (metrika)
  - ▶ Interpoláció
  - ▶ Adatbányászat

# Időmérésen alapuló megoldások



# Áttekintés

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Távolságmérésen alapuló technika
  - ▶ távolságmérés
  - ▶ távolságkülönbség mérés
- ▶ A terjedési sebesség  $c$ , a terjedési idő  $\tau$  és a távolság  $s$  kapcsolata

$$s = c\tau$$

# Időmérés pontossága

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ A távolságmérés pontossága arányos az időmérés pontosságával

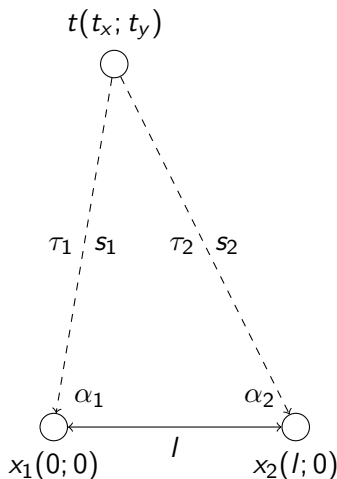
$$\Delta s = c \Delta \tau$$

- ▶ Milyen pontos időmérés kell?
  - ▶ függ a technológiától
- ▶ Rádiós esetben  $c = 3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , ultrahang esetén  $c = 333 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- ▶ Nézzünk egy példát!

# Időmérés pontossága

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Egyszerű modell:
  - ▶ két vevő  $l$  távolságban
  - ▶ egyik vevő a  $(0, 0)$  pontban
  - ▶ másik vevő a  $(l, 0)$  pontban
  - ▶ a  $t$  adó a síkon mozog



# Időmérés pontossága

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ A távolságkülönbség:

$$\tau_2 - \tau_1 = \frac{d(x_1, t)}{c} - \frac{d(x_2, t)}{c} = \frac{1}{c} \left( \sqrt{t_x^2 + t_y^2} - \sqrt{(t_x - l)^2 + t_y^2} \right)$$

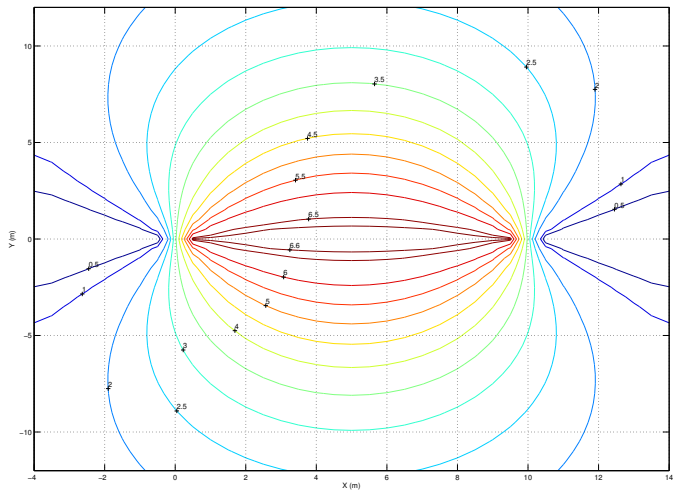
- ▶ A pontosság meghatározásához vegyük a gradienst!

$$\left( \frac{\partial(\tau_2 - \tau_1)}{\partial t_x}, \frac{\partial(\tau_2 - \tau_1)}{\partial t_y} \right)$$

- ▶ A gradiens vektor komponensei megadják, hogy adott irányban történő 1 méter elmozdulás mekkora időkülönbség változással jár
- ▶ Ezek az értékek felhasználhatók
  - ▶ a megkívánt időmérési pontosság meghatározásához
  - ▶ az elrendezésben található olyan helyek megtalálásához, ahol a helymeghatározás a legpontosabb
- ▶ Csak numerikusan számítjuk ( $l = 10\text{m}$ )

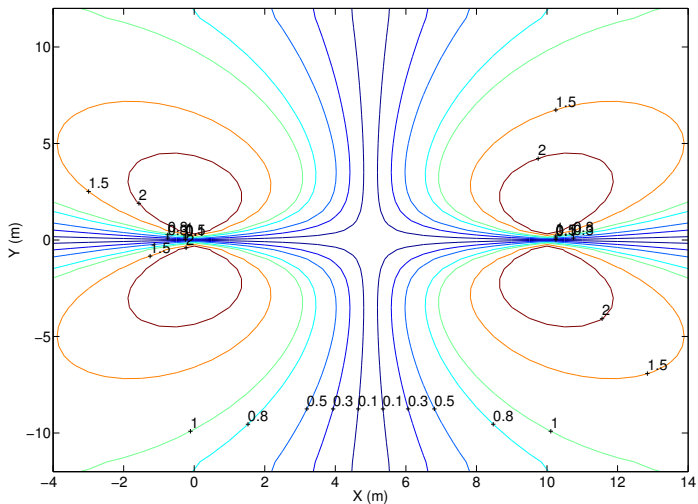
# X irányú elmozdulás

Időmérésen alapuló megoldások



# Y irányú elmozdulás

Időmérésen alapuló megoldások



# Időmérés pontossága – következtetések

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ 1 métert a rádióhullám  $t = \frac{1}{c} = 3.33\text{ns}$  idő alatt tesz meg
- ▶ TDoA esetén ennek a kétszerese az elérhető legjobb felbontás, a két vevő között
  - ▶ ez is csak a két vevőt összekötő egyenesen történő elmozdulásra
- ▶ A két vevőt összekötő egyenesre merőleges mozgásra meglehetősen érzéketlen
- ▶ Tehát méteres pontosság eléréséhez nagyjából  $\sim 6\text{ ns}$  pontosságú időmérésre van szükség!
  - ▶ Ugyanez ultrahangra  $\sim 6\text{ ms}$

# Időmérés lehetőségei – megkötések

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Hullámterjedés lineáris alapsávi modellben
  - ▶ Például PAM (Pulse Amplitude Modulation) rendszerek
- ▶ Többutas terjedés

$$s^r(t) = \sum_k A_k s(t - \tau_k) e^{-j(\omega^t \tau_k + \varphi_0)}$$

- ▶ Nincs korrelálatlan interferencia
- ▶ Zaj eloszlása normális



# Időmérés lehetőségei – beérkezési idő

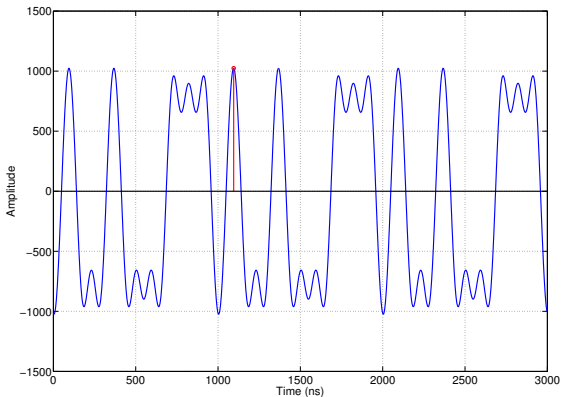
## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Jelterjedési idő = beérkezési idő - továbbítási idő
- ▶ Hol van a beérkezési és továbbítási időpont?
  - ▶ Választani kell egy referenciaszimbólumot az adásban
  - ▶ A jel egy ismert részlete (pl. frame-jel vége)
- ▶ Sokszor egy ilyen referencia túl széles, pl. 11 MHz esetén 90.9 ns
- ▶ A referenciaszimbólumon belül válaszunk ki egy pontot

# Időmérés lehetőségei – beérkezési idő

Időmérésen alapuló megoldások

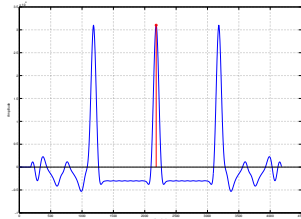
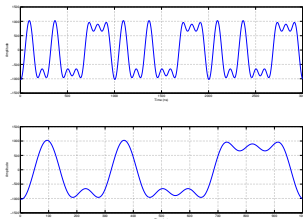
- ▶ Például egy 802.11b jelre



# Időmérés lehetőségei – beérkezési idő

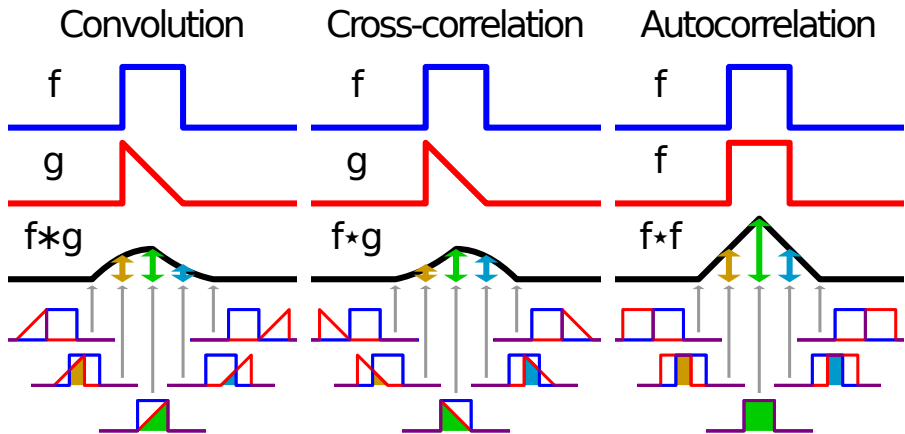
## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Alkalmazzuk az elméleti megoldást  $\rightarrow$  kereszt- és autokorreláció
- ▶  $R_{fg}(\tau) = (f \star g)(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t + \tau)dt$
- ▶ Elvileg akkor maximális, ha a két jel illeszkedik
  - ▶ Főleg akkor hasznos, ha ortogonális kóddal kódolt a jel (pl. DSSS)
  - ▶ Ismert jelsorozatra van szükség
- ▶ Ekkor is a maximumot keressük:  $\hat{t}_{rec} = \arg \max_{\tau} R_{fg}(\tau)$



# Időmérés lehetőségei – beérkezési idő

Időmérésen alapuló megoldások



Forrás: Wikipédia

# Időmérés lehetőségei – beérkezési idő

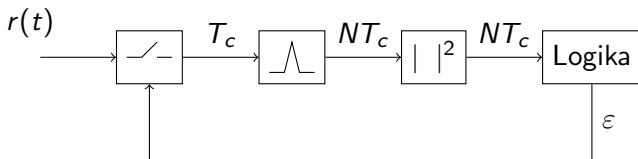
## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Mindkét megoldás nagyon pontos, amennyiben nincs zaj
- ▶ Nulla várható értékű zaj esetén a korreláció integrális tulajdonsága miatt valamelyest pontosabb
- ▶ Digitális jelfeldolgozás esetén interpoláció szükséges
  - ▶ lineáris
  - ▶ polinom (pl. kvadratikus)
  - ▶ ideális sávkorlátozott (Nyquist)
- ▶ Korreláció problémája → nehezen számítható

# Időmérés lehetőségei – DSSS

## Időmérésen alapuló megoldások

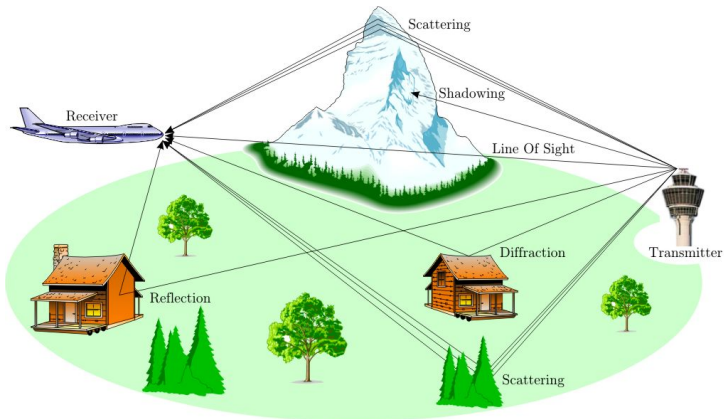
- ▶ A korrelációs megoldás kézenfekvő DSSS rendszerekben
- ▶ Vevő szinkronizálás  $\leftrightarrow$  időszinkron
- ▶ Az időszinkront általában a korreláció maximumához igazítják
  - ▶ Visszacsatolt szabályzó kör
- ▶ Gyakran DLL (Delayed Lock Loop)



# Időmérés lehetőségei – többutas terjedés

Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ A jel a rádiócsatornán különféle torzításokat szenved
- ▶ Ebből a legsúlyosabb a többutas terjedés okozta torzítás



# Időmérés lehetőségei – többutas terjedés

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Hatások
  - ▶ csillapítás
  - ▶ reflexió (spekuláris, diffúz)
  - ▶ diffrakció
- ▶ LOS és NLOS jelek
- ▶ determinisztikus vs. stohasztikus leírás
- ▶ alapegyenlet:

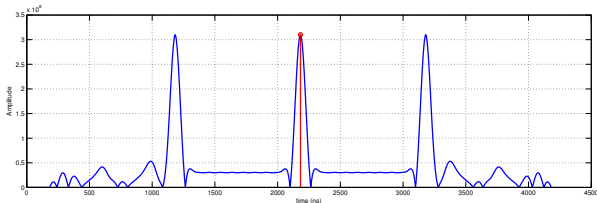
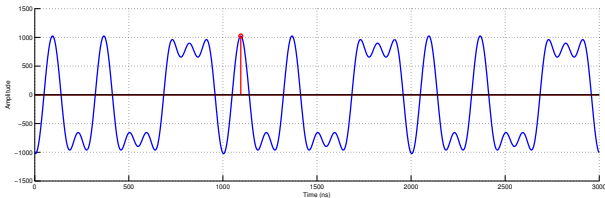
$$s^r(t) = \sum_k A_k s(t - \tau_k) e^{-j(\omega^t \tau_k + \varphi_0)}$$



# Időmérés lehetőségei – többutas terjedés példa

Időmérésen alapuló megoldások

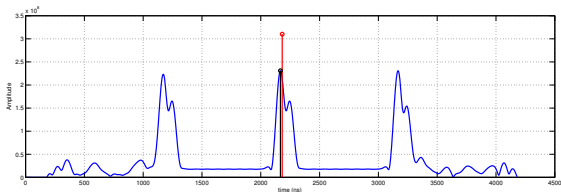
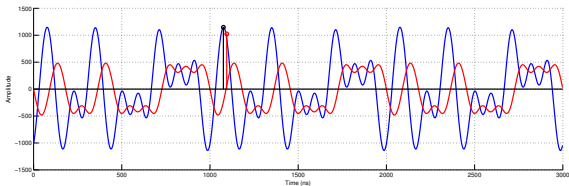
- ▶ Alapesetben az ideális jelet kapjuk (802.11b)



# Időmérés lehetőségei – többutas terjedés példa

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Legyen egy további komponens (41 ns késés, 0.8 amplitúdó, 140 fok fázistolás)
- ▶ 34.5 ns és 41.8 ns hiba az időmérésben → hatalmas



# Miért kapunk ekkora hibát?

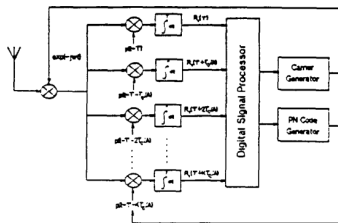
## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ A többutas terjedésnek köszönhetően a jel egy példánya *időben* később érkezik meg
- ▶ Sávkorlátozott jel esetén összefolynak a jelek, és megváltozik mind a jelalak, mind a korreláció
- ▶ Mit tehetünk?
  - ▶ Az egyes komponensek felismerése és feloldása
  - ▶ Több antenna használata a terjedés mélyebb megismerése érdekében

# Többutas terjedés feloldása

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Számos egyszerű, gyakorlati megoldás létezik
- ▶ Például polarizált antennák használata
  - ▶ Adás RHCP (Right Hand Circular Polarization) antennával
  - ▶ Visszaverődés polarizációt okoz
  - ▶ Vétel LHCP antennával
- ▶ Párhuzamos szinkronizáció (MEDLL – Multipath Estimating Delay Lock Loop)
- ▶ Fast Iterative Maximum-Likelihood Algorithm (FIMLA)



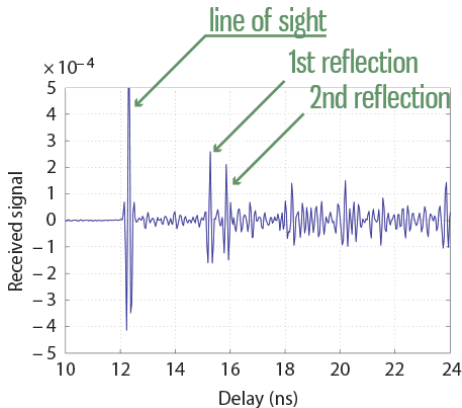
# Többutas terjedés feloldása – UWB

Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Nagyon nagy sáv szélességen az impulzusok rövidek (pl. 100 ps)
- ▶ Jól megismerhető a csatorna átviteli függvénye

$$h(t) = \sum_i c_i \delta(t - \tau_i)$$

- ▶ Ebből a terjedési komponensek megismerhetők
- ▶ Persze az élet nem ilyen kegyes, a komponensek nem egyértelműek



# Többutas terjedés feloldása

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Elméleti megoldások is léteznek – meglehetősen összetettek
- ▶ Általában többantennás vétel
- ▶ Alapvetően zaj feltételezésével ML megoldások
  - ▶ MMT
  - ▶ Pszeudoinverz
  - ▶ IQML
  - ▶ Espirit
  - ▶ MUSIC

# A többantennás modell

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Általánosítsuk a többutas terjedési modellt több antennára
- ▶ Ún. keskenysávú modellt alkalmazzuk  $\rightarrow$  a jel sávszélességének reciproka jóval nagyobb, mint az antennák közötti terjedés ideje
  - ▶ közeli antennák
- ▶ A modell  $i = 1 \dots I$  komponens és  $m = 1 \dots M$  antenna esetén:

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^I a_{i,m} s(t - \tau_i) + n_m(t)$$

- ▶ Digitális jelfeldolgozás esetén rendelkezésre állnak az  $x_n = x(t_n)$  és  $s_n = s(t_n - \tau_i)$  minták
- ▶ Ekkor mátrix formában:

$$\mathbf{X} = \mathbf{S}(\boldsymbol{\tau})\mathbf{A} + \mathbf{N},$$

$$\text{ahol } \boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_I], \quad \mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N]^T,$$

$$\mathbf{s}_i = [s(t_1 - \tau_i) \cdots s(t_N - \tau_i)]^T,$$

$$\mathbf{X} : N \times M; \quad \mathbf{S}(\boldsymbol{\tau}) : N \times I; \quad \mathbf{A} : I \times M; \quad \mathbf{N} : N \times M$$

# A többantennás modell a frekvenciatartományban

Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Sajnos a modell erőteljesen nemlineáris (időbeli eltolás)
- ▶ Csináljunk belőle szorzást Fourier-transzformációval, hiszen

$$\mathcal{F}\{x(t - \tau)\} = \mathcal{F}\{x(t)\} e^{-j\omega\tau}$$

- ▶ Ekkor frekvenciatartományban

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(\omega_1) \\ \vdots \\ \mathbf{x}(\omega_N) \end{bmatrix} = \mathbf{S}_\omega \mathbf{V}(\tau) \mathbf{A} + \mathbf{N}$$

$$\mathbf{S}_\omega = \begin{bmatrix} s(\omega_1) & & \\ & \ddots & \\ & & s(\omega_N) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}(\tau) = [\mathbf{v}(\tau_1) \quad \cdots \quad \mathbf{v}(\tau_I)] = \begin{bmatrix} e^{-j\omega_1\tau_1} & \cdots & e^{-j\omega_1\tau_I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega_N\tau_1} & \cdots & e^{-j\omega_N\tau_I} \end{bmatrix}$$



# Az egyenletek megoldása

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Maximum Likelihood megoldás Gauss-zaj feltételezéssel

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}, \hat{\mathbf{A}} = \arg \min_{\boldsymbol{\tau}, \mathbf{A}} \|\mathbf{X} - \mathbf{S}(\boldsymbol{\tau})\mathbf{A}\|^2$$

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}, \hat{\mathbf{A}} = \arg \min_{\boldsymbol{\tau}, \mathbf{A}} \|\mathbf{X} - \mathbf{S}_\omega \mathbf{V}(\boldsymbol{\tau})\mathbf{A}\|^2$$

- ▶ Sem  $\mathbf{S}(\boldsymbol{\tau})$ , sem  $\mathbf{A}$ , sem  $\mathbf{V}(\boldsymbol{\tau})$  nem ismert
- ▶ Elméletileg mélységi kereséssel megoldható

# Multipath Mitigation Technique

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Egy antennás megoldás időtartományban
- ▶ Maximum Likelihood megoldás – legkisebb négyzetes hiba csökkentése

$$\Gamma(\tau_i, a_i) = \int_0^T \left( x(t) - \sum_i a_i s(t - \tau_i) \right)^2 dt$$

$$\tau_i, a_i = \arg \min_{\tau_i, a_i} \Gamma(\tau_i, a_i)$$

- ▶ A komplex amplitúdók kiszámíthatók zárt alakban parciális deriválással:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial a_i} = -2R_{im}(\tau_i) + 2a_i R_{mm}(0) + 2 \sum_{i \neq j} a_j R_{mm}(\tau_i - \tau_j) = 0$$

- ▶ A módszer egyszerűen csökkenti a változók számát, keresni csak  $\tau$ -k szerint kell

# Pszéudo inverz inverz

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Ún. pszéudo inverz – széleskörű használatban
- ▶ Előállítunk számos késleltetett  $s(t - \tau)$  jelet, és megpróbáljuk megkeresni az amplitúdójukat (lásd. MMT):

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} s(t_1 - \tilde{\tau}_1) & s(t_1 - \tilde{\tau}_2) & \cdots & s(t_1 - \tilde{\tau}_K) \\ s(t_2 - \tilde{\tau}_1) & s(t_2 - \tilde{\tau}_2) & \cdots & s(t_2 - \tilde{\tau}_K) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(t_N - \tilde{\tau}_1) & s(t_N - \tilde{\tau}_2) & \cdots & s(t_N - \tilde{\tau}_K) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{G}\mathbf{A} \quad (1)$$

- ▶ Ekkor a pszéudo inverz használatával:

$$\mathbf{A} = \mathbf{G}^\dagger \mathbf{X} = (\mathbf{G}^* \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^* \mathbf{X} \quad (2)$$

- ▶ „Ill-posed” probléma  $\rightarrow$  regularizációs megoldások

# Iterative Quadratic Maximum Likelihood

Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Az előzőekben láttuk, hogy  $\mathbf{A}$  meghatározható
- ▶ Helyettesítsük be:

$$\hat{\tau} = \arg \min_{\tau} \|\mathbf{X} - \mathbf{S}_{\omega} \mathbf{V}(\tau) (\mathbf{S}_{\omega} \mathbf{V}(\tau))^{\dagger} \mathbf{X}\|^2 = \arg \min_{\tau, \mathbf{A}} \|\mathbf{P}_{\mathbf{S}_{\omega} \mathbf{V}(\tau)}^{\perp} \mathbf{X}\|^2$$

- ▶ Ha  $\mathbf{V}(\tau)$  Vandermonde felépítésű, akkor létezik  $\mathbf{B}$  :

$$\mathbf{B}^* \mathbf{V}(\tau) = 0$$

amelyben a

$$b(z) = b_0 z^l + b_1 z^{l-1} + \dots + b_l$$

polinom együtthatói szerepelnek

- ▶ Ennek a gyökei adják majd a késleltetéseket

$$\hat{\mathbf{b}} = \arg \min_b \text{Tr}[\mathbf{S}_{\omega}^{-*} \mathbf{B} (\mathbf{B}^* \mathbf{S}_{\omega}^{-1} \mathbf{S}_{\omega}^{-*} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^* \mathbf{S}_{\omega}^{-1} \mathbf{X} \mathbf{X}^*]$$

# Egyéb megoldások

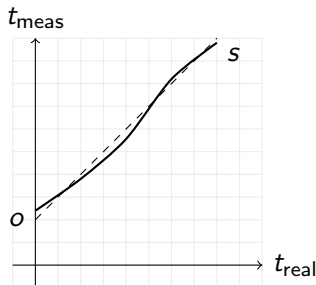
## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ ESPIRIT
- ▶ Beamforming
  - ▶ pl. Capon beamforming
  - ▶ jelteljesítmény maximalizálása
- ▶ MUSIC (Multiple Signal Classification)
  - ▶ alapvetően DOA/AOA megoldás
  - ▶ altér módszer a beérkező jelek szétválasztására
  - ▶ MUSIC spektrum

# Az beérkezési idők egyenletrendszere

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Az időmérő eszközök az időt nem mérik pontosan
- ▶ Az időmérés hibákat tartalmaz
  - ▶ linearitási hiba
  - ▶ ofszet hiba
  - ▶ erősítési hiba
- ▶ Lineáris modell
  - ▶ megfelelően jó közelítés
- ▶ Klasszikus oszcillátor  $\sim 10$  ppm
  - ▶ 1 másodperc  $\rightarrow 10 \mu\text{s} \sim 3$  km
  - ▶ OCXO, atomóra
- ▶ digitális óra  $\rightarrow$  számláló



# Az beérkezési idők egyenletrendszere

Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Egyenletrendszer lineáris órákra, infrastrukturális mód

$$c_{i,k}^l = s_k(t_i^l + \tau_{i,k}^l) + o_k$$

- ▶  $i$ : adó sorszáma
- ▶  $k$ : vevő sorszáma
- ▶  $l$ : kibocsájtott jel sorszáma
- ▶  $t_i^l$  a kibocsájtás ideje,  $\tau_{i,k}^l$  a terjedési idő
- ▶  $I$  adó,  $K$  vevő és  $L$  csomag esetén
  - ▶  $ILK$  egyenlet
  - ▶  $LI + 2K + LIK$  ismeretlen
- ▶ több ismeretlen, mint egyenlet

# Az beérkezési idők egyenletrendszere

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Legyen  $I^*$  a fix helyen álló adók száma,  $I$  pedig a mozgó adók száma
  - ▶  $L(I + I^*) + 2K + I^*K + LIK = LI^* + LI + 2K + KI^* + LIK$  ismeretlen
  - ▶  $LK(I + I^*) = LKI^* + LKI$  egyenlet
- ▶ Ekkor kérdés, hogy mikor igaz az egyenlőtlenség

$$LI + 3K + (L + K - LK)I^* < 0$$

- ▶ Fix adókkal megoldható az egyenletrendszer
  - ▶ A helyzetük nem feltétlenül ismert



# Az beérkezési idők egyenletrendszere – idődifferencia

## Időmérésen alapuló megoldások

- ▶ Nézzük az időkülönbséget:

$$\begin{aligned}c_{i,j}^l - c_{i,k}^l &= s_j(t_i^l + \tau_{i,j}^l) + o_j - s_k(t_i^l + \tau_{i,k}^l) - o_k \\ &= (s_j - s_k)t_i^l + s_j\tau_{i,j}^l - s_k\tau_{i,k}^l + o_j - o_k\end{aligned}$$

- ▶ Hasznos, ha  $s_j = s_k$  minden  $j, k$  párosra, hiszen ekkor

$$c_{i,j}^l - c_{i,k}^l = \tau_{i,j}^l - \tau_{i,k}^l + o_j - o_k$$

- ▶ Tulajdonképpen ez a TDOA megoldás
- ▶ Sajnos az ofszet ismeretlen, kell egy fix adó a kiküszöböléséhez
  - ▶ pl. az vevőn található referenciaadó