



Rádiós/hullámterjedés alapú helymeghatározás

Lukovszki Csaba

Tematika

- » Helyalapú szolgáltatások és alkalmazások
- » Módszerek
 - » Helymeghatározás alapjai
- » Technológiák
 - » Rádiós/hullámterjedés alapú technológiák
 - » Globális helymeghatározás (GPS)
 - » Képi alapú helymeghatározási technológiák
 - » Inerciális helymeghatározás

- » ZH: 2016. október 26. Szerda

Helymeghatározás

Felhasználási eset

Az alkalmazás körülményei?
A felhasználás követelményei?

Architektúra

Milyen infrastruktúrával
valósítható meg a feladat?

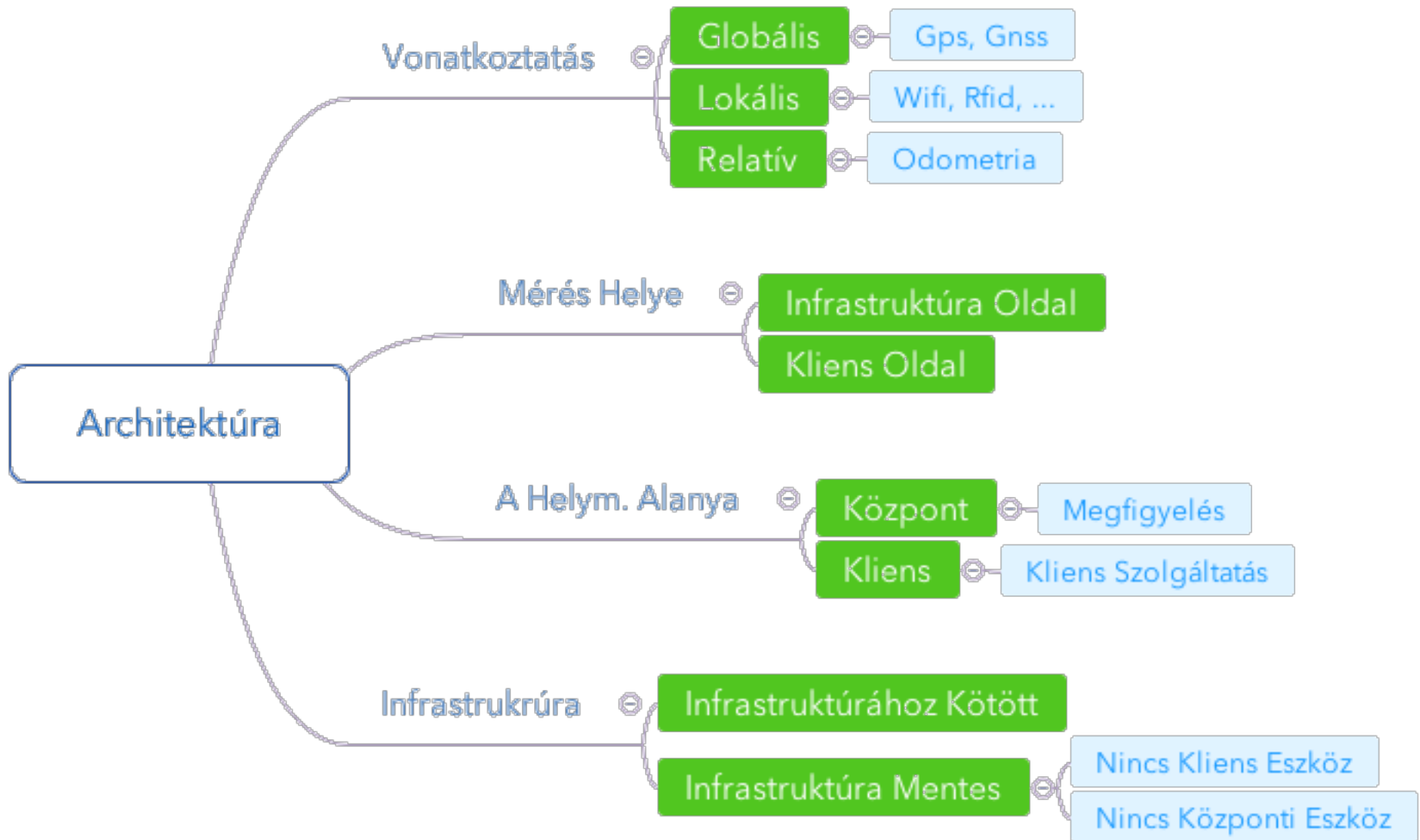
Technológia

Milyen technológia a leginkább
hatékony?

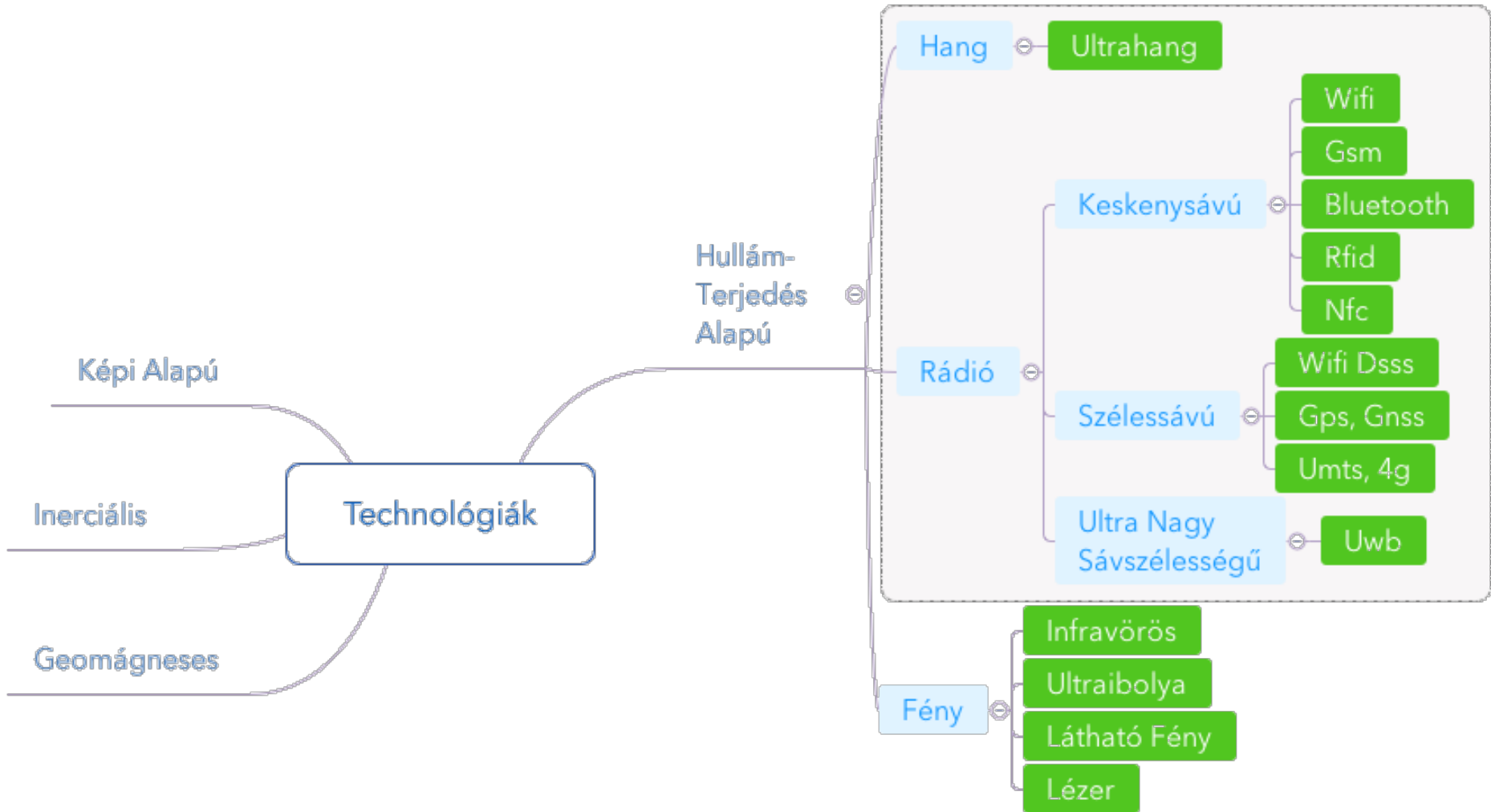
Módszer

Az adott technológián milyen
módszer hatékony?

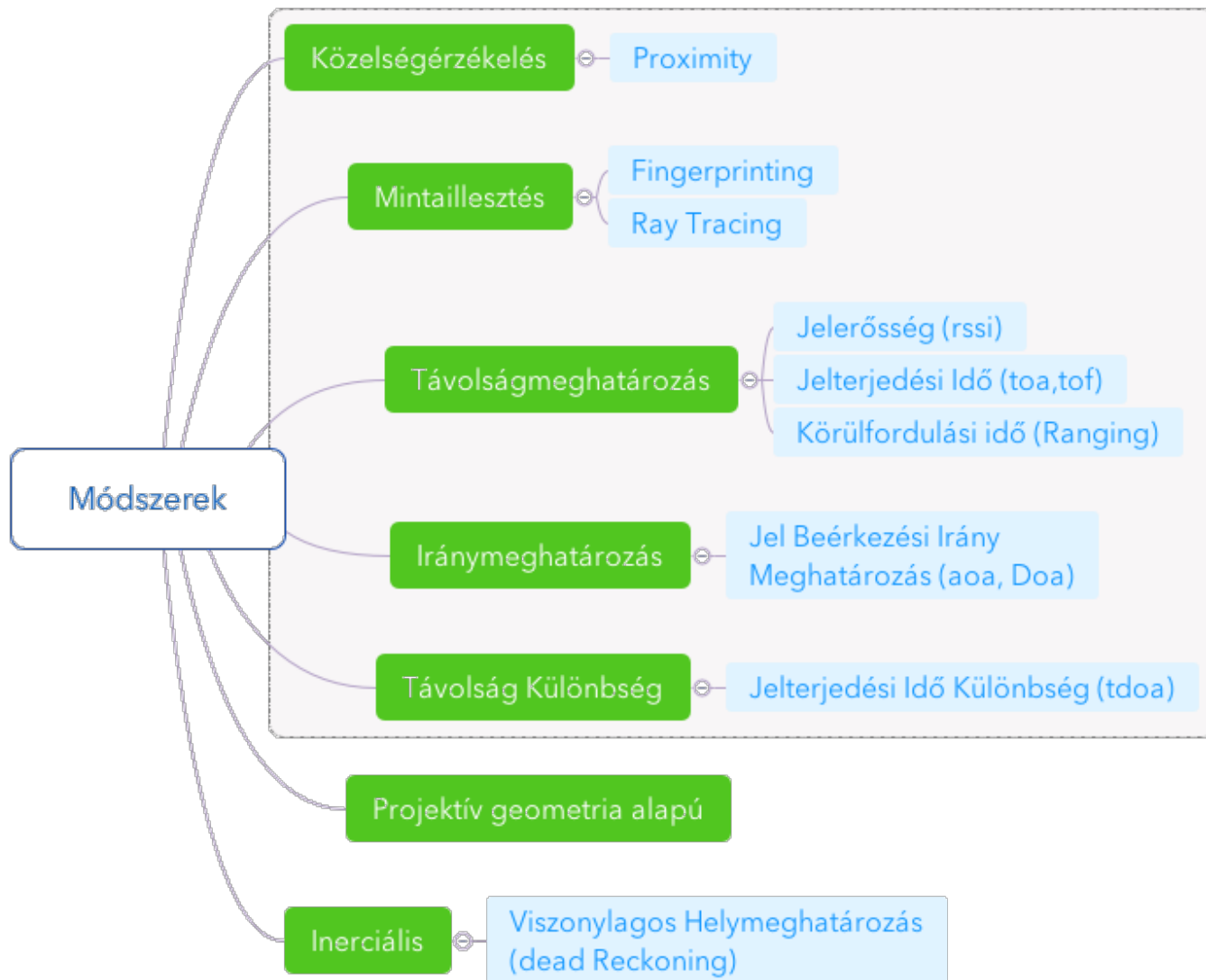
Architektúra



Technológia



Módszerek



RÁDIÓS TECHNOLÓGIA

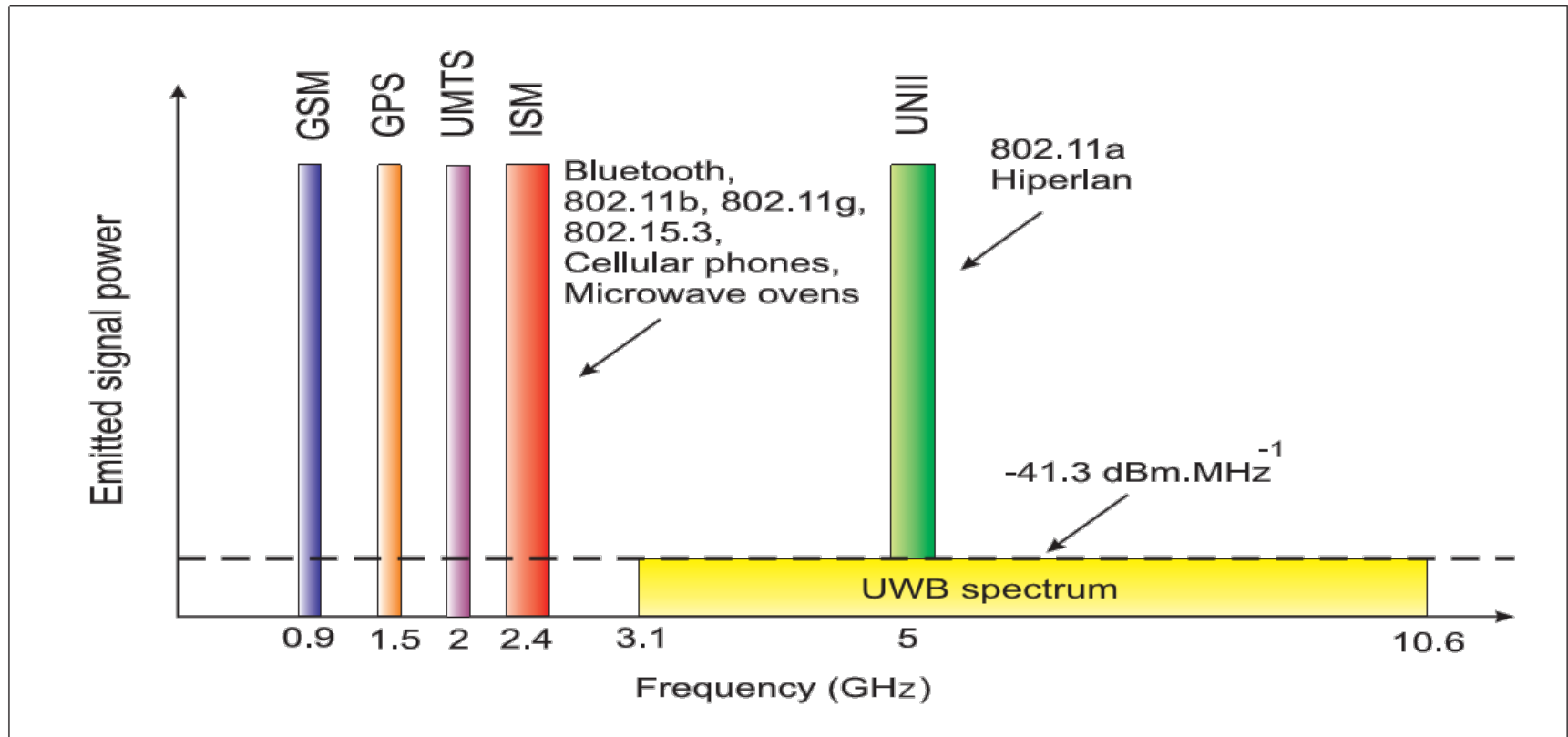
Helymeghatározás rádióhullámok alapján

- » Legszélesebb körben alkalmazott megoldás
- » A technológia célja
 - » Adatátviteli design
 - » Shannon csatorna kapacitás
 - » C [b/s], B [Hz], S/N : Jel-zaj viszony

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

- » Helymeghatározás
- » Kétféle alapvető átviteli megoldás
 - » Keskeny- és szélessávú átvitel
 - » Ultra szélessávú átvitel

Rádiós sávok



Helymeghatározás rádióhullámok alapján

- » Alkalmazható módszerek
 - » Közelégérzékelés
 - » Távolságmérés (távolságkülönbség mérés)
 - » Jelerősség alapján
 - » Időmérés alapján
 - » Iránymeghatározás
 - » Mintaillesztés
- » Előnyei:
 - » Tipikusan a vágyott megoldás
 - » Láthatatlan, pontos, kicsiben megvalósítható
 - » Sok esetben már rendelkezésre áll
 - » Adatkommunikációra is alkalmazható
- » Hátránya:
 - » Nem embert, hanem jeladót követ
 - » Beruházást igényel (infrastrukturális, vagy módszer)
 - » Pontosság

RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Keskenysávú modell

- » Keskeny és szélessávú modell
- » Vivő alapú jelátvitel, a vivő szinusz:

$$r(t) = A(t) \cos(\varphi'(t))$$

- » A fázis általában

$$\varphi'(t) = \omega t + \varphi(t)$$

- » A pillanatnyi frekvencia

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi'(t)}{dt}$$

Alapsávi ekvivalens

- » Kezeljük a vivőt úgy mint egy **fazort** – van nagysága és fázisa, írjuk le komplex számként:

$$r(t) = A(t) \cos(\omega t + \varphi(t)) = \operatorname{Re}\{A(t)e^{j(\omega t + \varphi(t))}\}$$

- » Emeljük ki magát a vivőt:

$$\{A(t)e^{j\varphi(t)}\}e^{j\omega t}$$

- » **Komplex alapsávi ekvivalens**

$$s(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}$$

- » A jel vivővel szorzását nevezzük IQ modulációnak

$$r(t) = \operatorname{Re}\{s(t) e^{j\omega t}\}$$

- » A vevő a demodulációt szorzással végzi:

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

Alapsávi ekvivalens

- » Az alapsávi ekvivalens

$$s(t) = A(t)e^{j\varphi(t)} = I(t) + jQ(t)$$

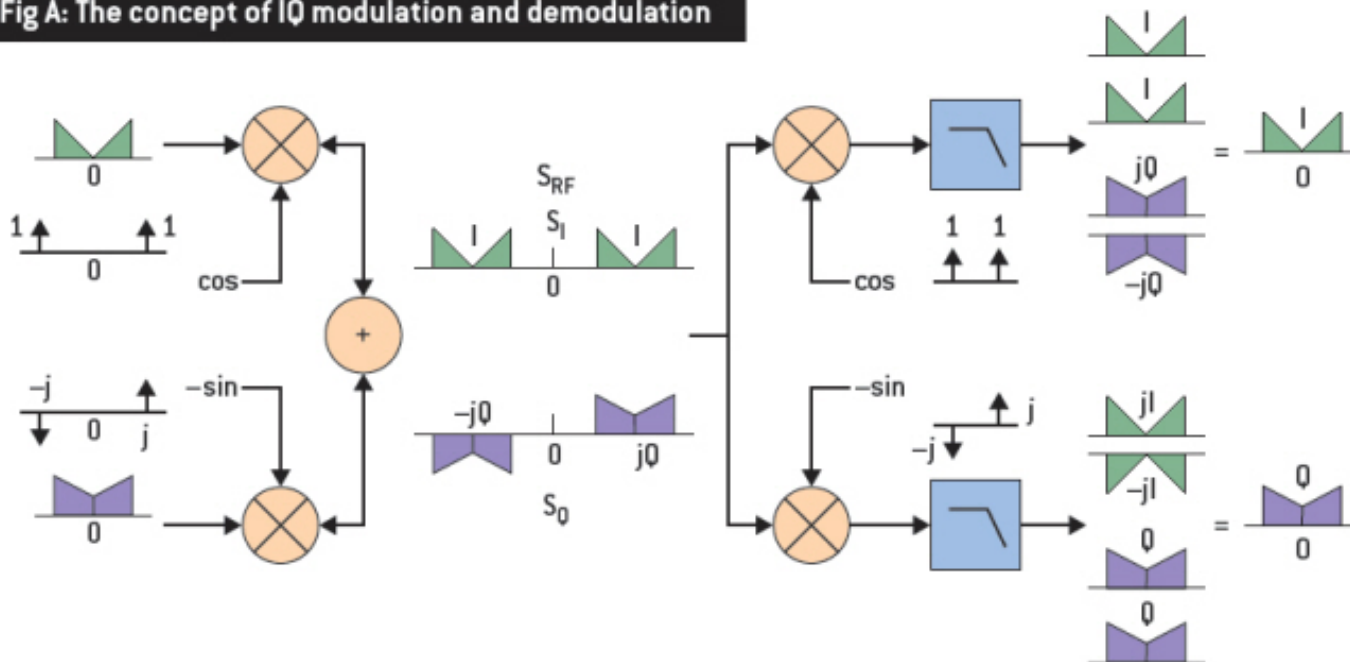
- » Az alapsávi ekvivalens komponensekből áll
 - » In-phase komponens (I) (valós komponens)
 - » Kvadratúra komponens (Q) (imaginárius komponens)
- » A módszert hívják kvadratúra felbontásnak is
- » Előnye – értelme:
 - » A jelet a vivő nélkül is tudjuk kezelni
 - » A PAM modulációkat kényelmesen le tudjuk írni

RÁDIÓS JELTERJEDÉS

IQ moduláció

- » Az IQ moduláció és demoduláció az alapsávi ekvivalens „megvalósítása”
- » Az eszközök könnyen beszerezhetők
- » In-phase (valós) és kvadratúra (imaginárius) komponensek

Fig A: The concept of IQ modulation and demodulation



RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Moduláció

- » Modulációk típusa a keskeny és szélessávú átvitelben
 - » PAM (Pulse Amplitude Modulation)
 - » Pl. Wi-Fi, GPS, Ethernet, stb.
 - » CPM (Continuous-Phase Modulation)
 - » GSM, RTLS, Bluetooth, stb.
- » IQ modulációval mindegyik megvalósítható
 - » Most csak a PAM modulációkkal foglalkozunk
- » Miért kell moduláció?
 - » Jelátvitel szimbólumokkal
 - » Adatátvitel bitekkel
 - » Tehát bitek → szimbólumok

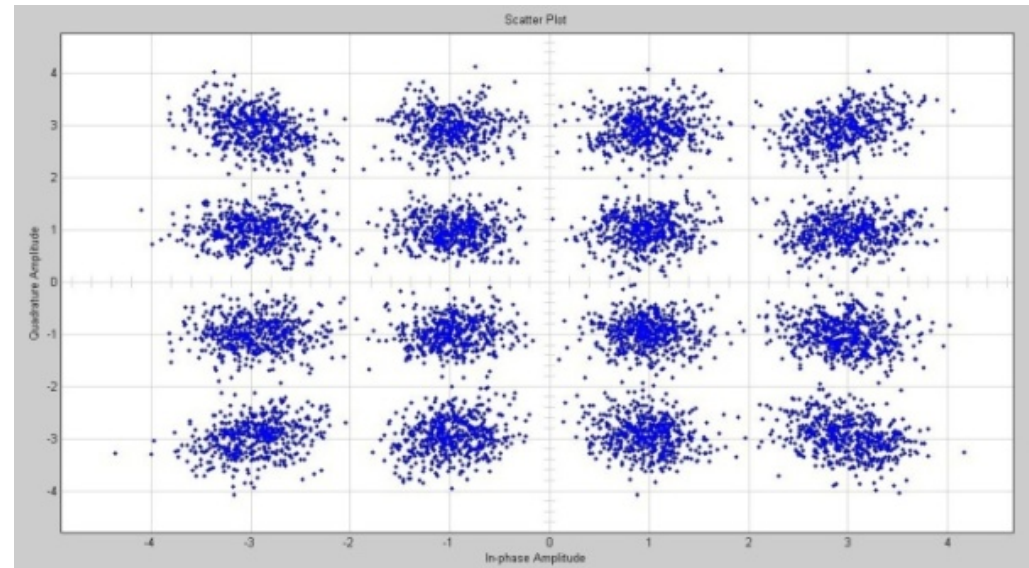
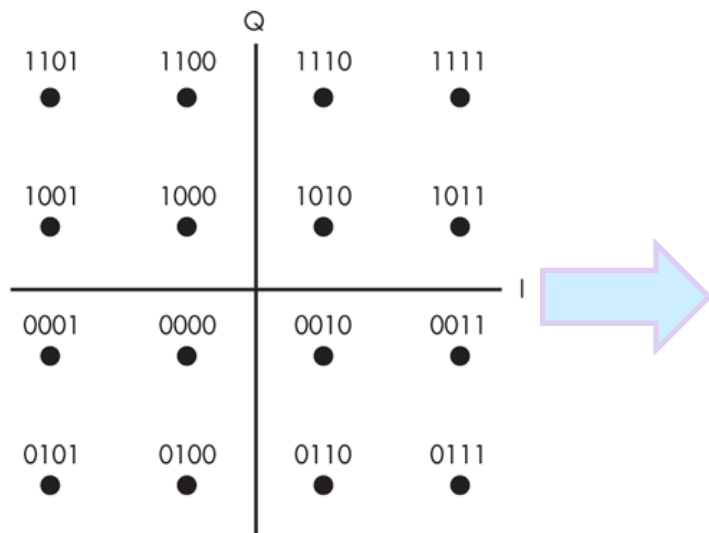
RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Moduláció

- » Adatbitek: $b_i \in \{0,1\}$
- » Szimbólumok: $c_i \in \mathcal{C}$ (komplex számok)
- » Ábrázolás konstellációs diagrammon
- » Modulációk
 - » Phase Shift Keying (PSK)
 - » M-PSK, BPSK
 - » Amplitude Shift Keying (ASK)
 - » Quadrature Amplitude Modulation (QAM)
 - » Differenciális modulációk

RÁDIÓS JELTERJEDÉS

64QAM példa

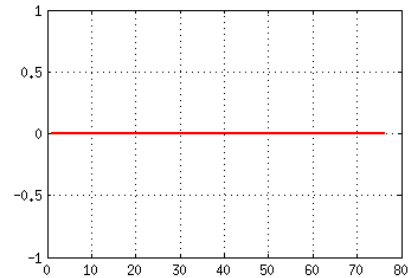
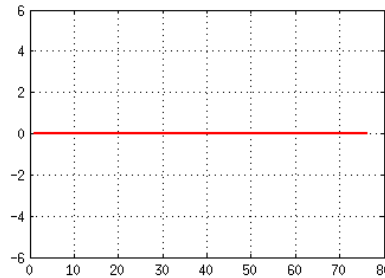
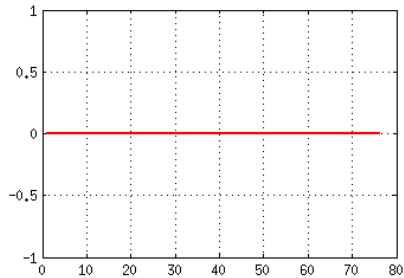
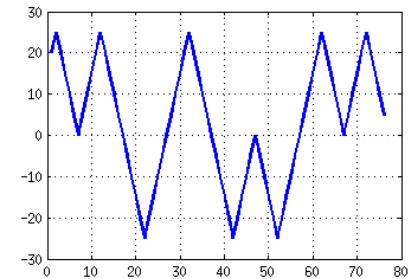
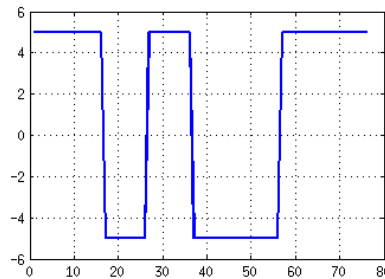
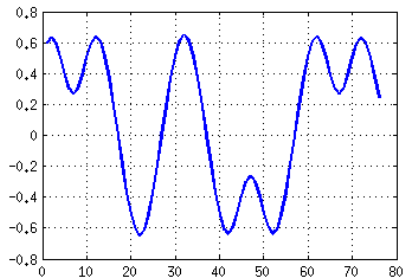
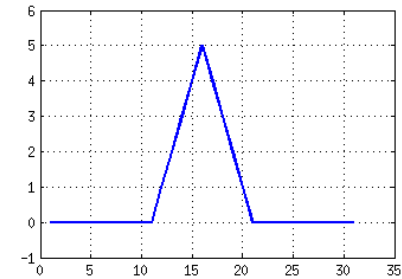
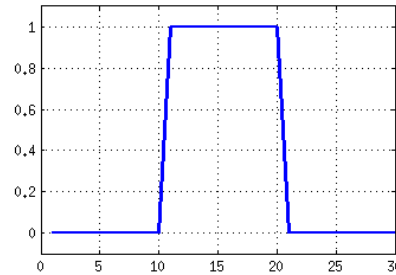
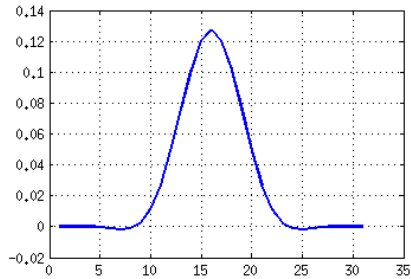


Jelformázás

- » Már vannak komplex szimbólumaink
- » Tudunk nagyfrekvencián analóg jelet továbbítani
- » Hogy lesz a komplex szimbólumokból analóg alapsávi jel?
- » Jelformázás – minden komplex szimbólumnak egy analóg jelet feleltetünk meg
 - » Nem feltétlenül véges hosszúságú
 - » Azonban véges sáv szélességű!
- » Tipikus használt jelalakok:
 - » Nyquist impulzus
 - » Emelt koszinusz impulzus
 - » Négyyszögjel

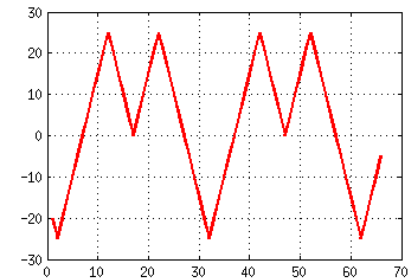
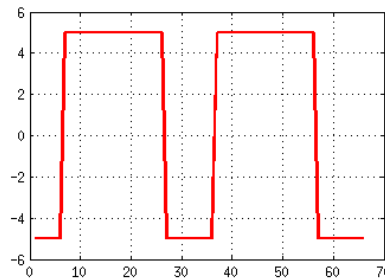
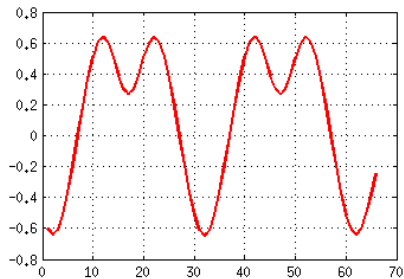
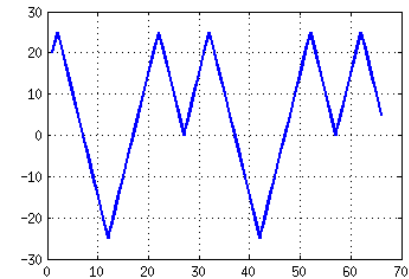
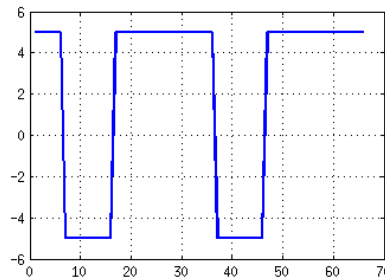
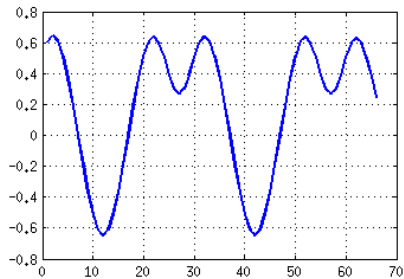
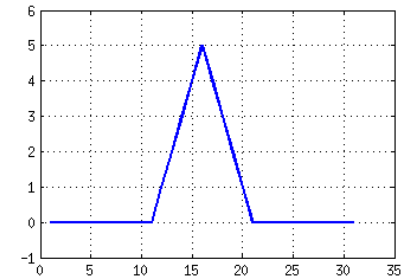
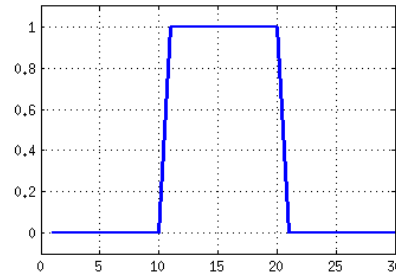
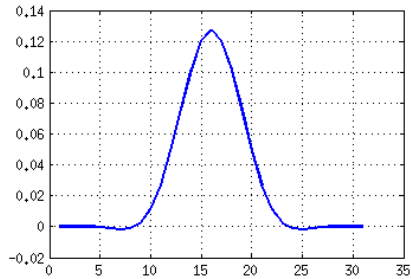
RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Jelformázás példa



RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Jelformázás példa



RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Átviteli lánc



Többszörös hozzáférés

- » TDM – Time division multiplexing
 - » Időben elhatárolt adások
- » FDM
 - » Frekvenciában elhatárolt adások
 - » Több frekvencia
- » CDM
 - » Kódosztásos hozzáférés
 - » Egyedi kód alapján különböztetjük meg
 - » DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum
 - » Megnövelt sáv szélesség

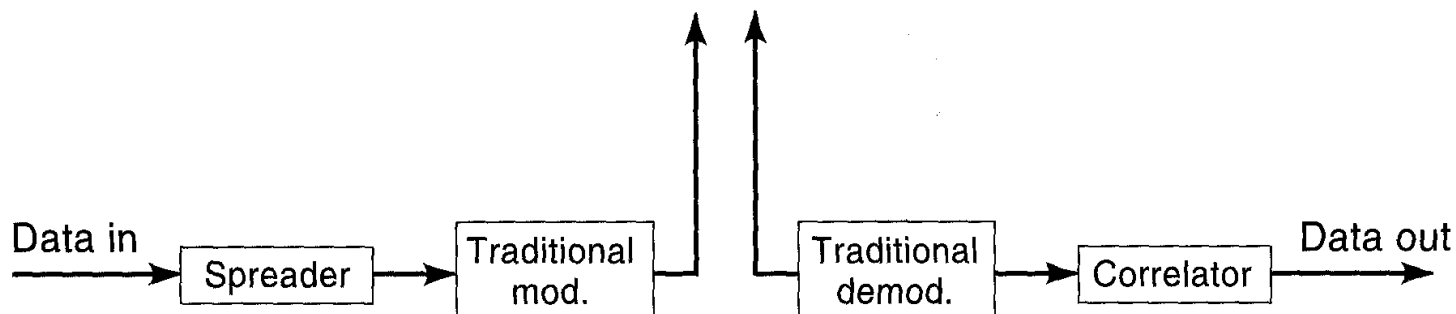


Javítják a frekvencia szelektív interferenciát

RÁDIÓS JELTERJEDÉS

802.11 DSSS

- » A kód (a Barker code) melyet a 802.11 használ a következő formájú: $[1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, 1, -1]$. Tehát egy adatbit 11 chip.
- » A Baker nem egy titkos kód, nem titkosításra használják hanem a sáv szélesség növelésére.



RÁDIÓS JELTERJEDÉS

802.11 DSSS

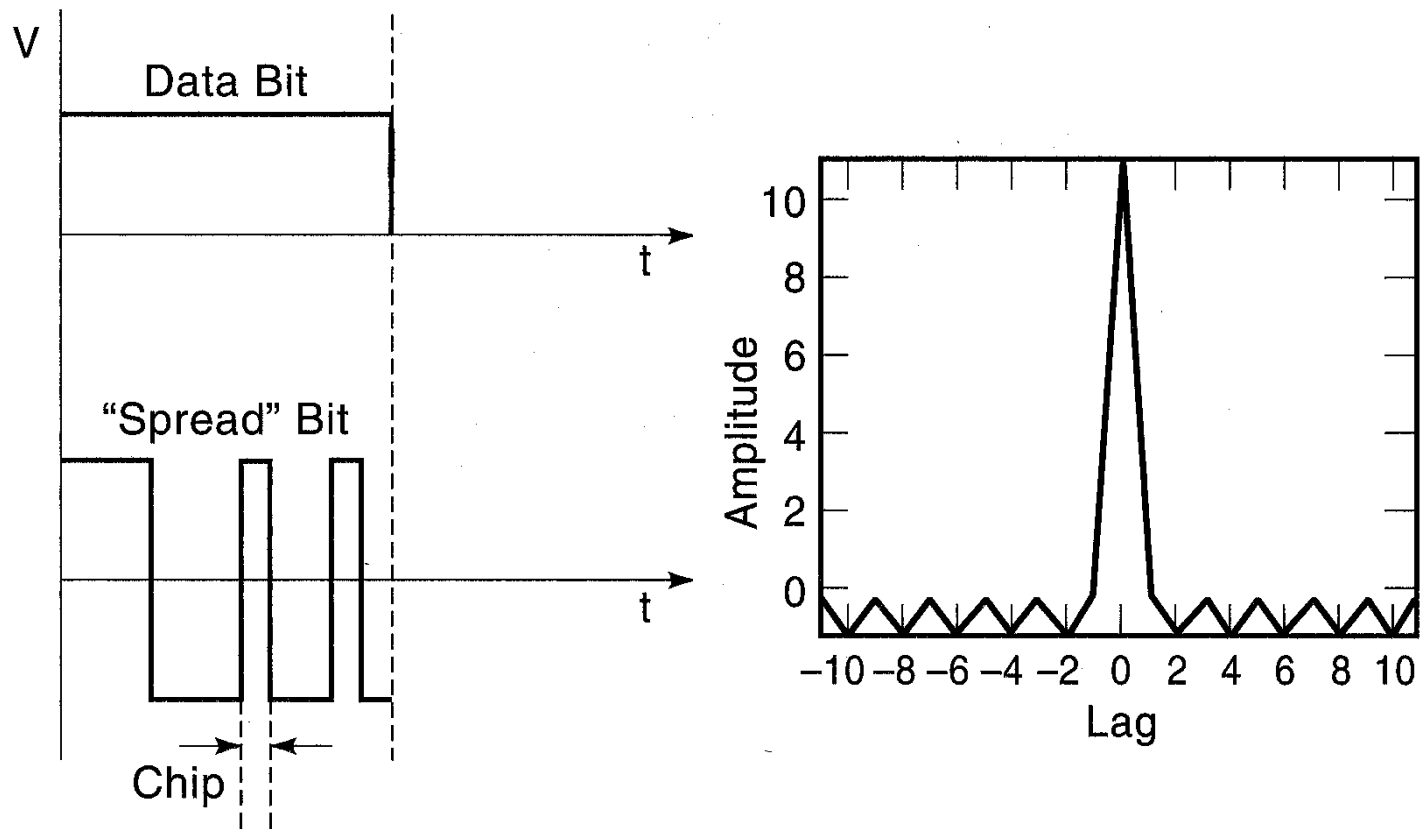
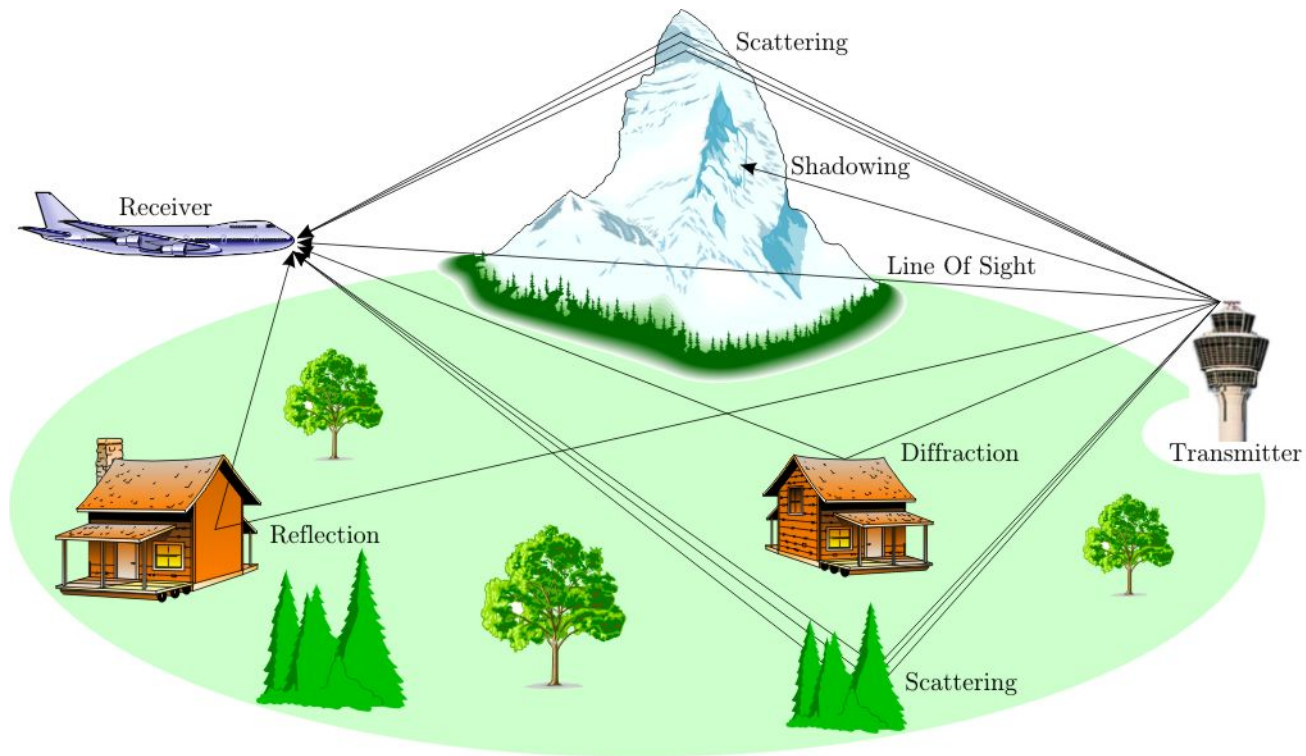


Figure 3.23 Barker code modulated DSSS signal in IEEE 802.11 and its autocorrelation.

RÁDIÓS JELTERJEDÉS – HATÁSOK

RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Többutas terjedés



RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Többutas terjedés

- » Jelenségek
 - » Csillapodás
 - » A jel amplitúdója csökken
 - » Zaj
 - » Interferencia
 - » Többutas terjedés
 - » Reflexió, Scattering
 - » A jel egy adott felületről egy irányban visszaverődik (spekuláris visszaverődés)
 - » A jel egy adott felületről több irányban szórtan visszaverődik (diffúz visszaverődés)
 - » Diffrakció
 - » Éles határokon módosul a jel iránya
- » LOS (Line-of-Sight)
- » NLOS (Non Line-of-Sight)
- » Az egyes jelenségeknél fellép
 - » Amplitúdó változás
 - » Fázisváltozás
 - » Időkésés

RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Többutas terjedés

» Többutas terjedés leírása

» Determinisztikus

- » A kibocsájtott jel valamilyen igényvel kiválasztott útvonalain történt hatásokat összegezzük
- » Gyakorlatilag lehetetlen, főleg beltérben
- » Ennek ellenére nagyon fontos a **helymeghatározásban**

» Statisztikus

- » Statisztikai modellek kidolgozása a jel torzulására
- » Adatátvitelben nagyon hasznos az átvitel minőségének meghatározására, **csatorna szimulációra**

RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Többutas terjedés

» Determinisztikus leírás

- » A kibocsájtott jel több példánya is megérkezik
- » Legyen a kibocsájtott jel:

$$r(t) = s^t(t)e^{j(\omega^t + \varphi^t)}$$

- » A vevőbe érkező jel az összes útvonalon különböző időkésltetéseket és komplex amplitúdó változásokat szenvedett jel:

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

RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Többutas terjedés

» A vevő lekeveri a saját oszcillátorával a jelet:

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

» Amennyiben figyelmen kívül hagyjuk az adó és vevő vivő frekvenciájának különbségét:

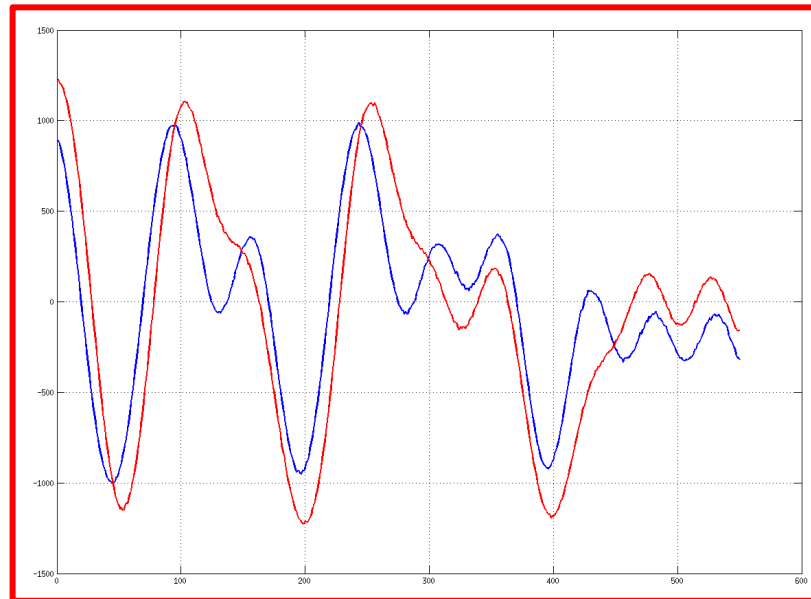
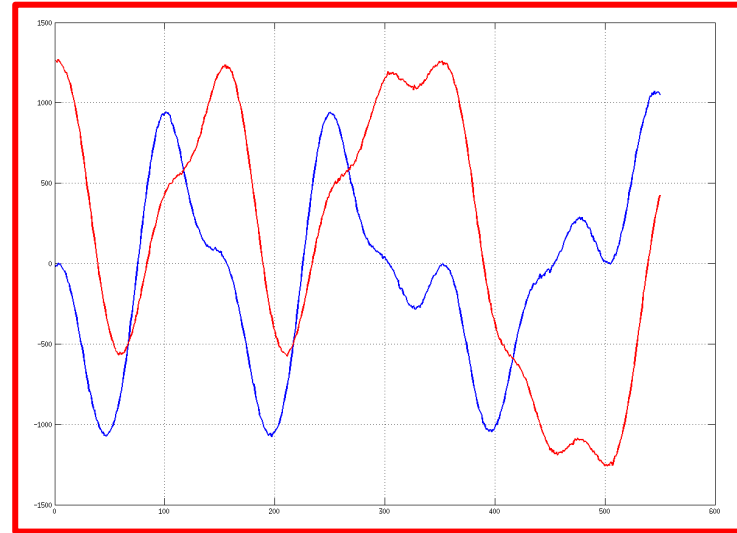
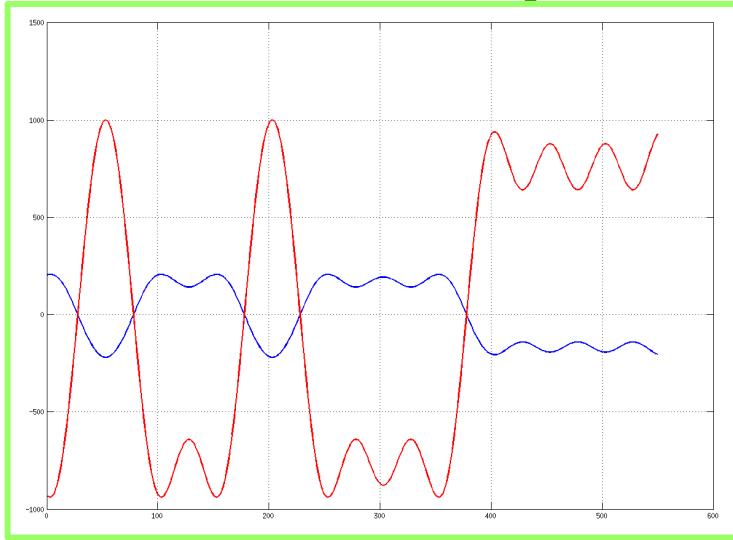
$$s^r(t) = \sum_k A_k s(t - \tau_k) e^{-j(\omega^t \tau_k + \varphi_0)}$$

A következőkben ezt használjuk, mivel a jel vétel során a frekvencia különbség dekompenzálható.

» Tehát minden komponens szenved valamilyen amplitúdó és fázisváltozást, valamint időkésést. Az egyes komponensek lineárisan összegződnek.

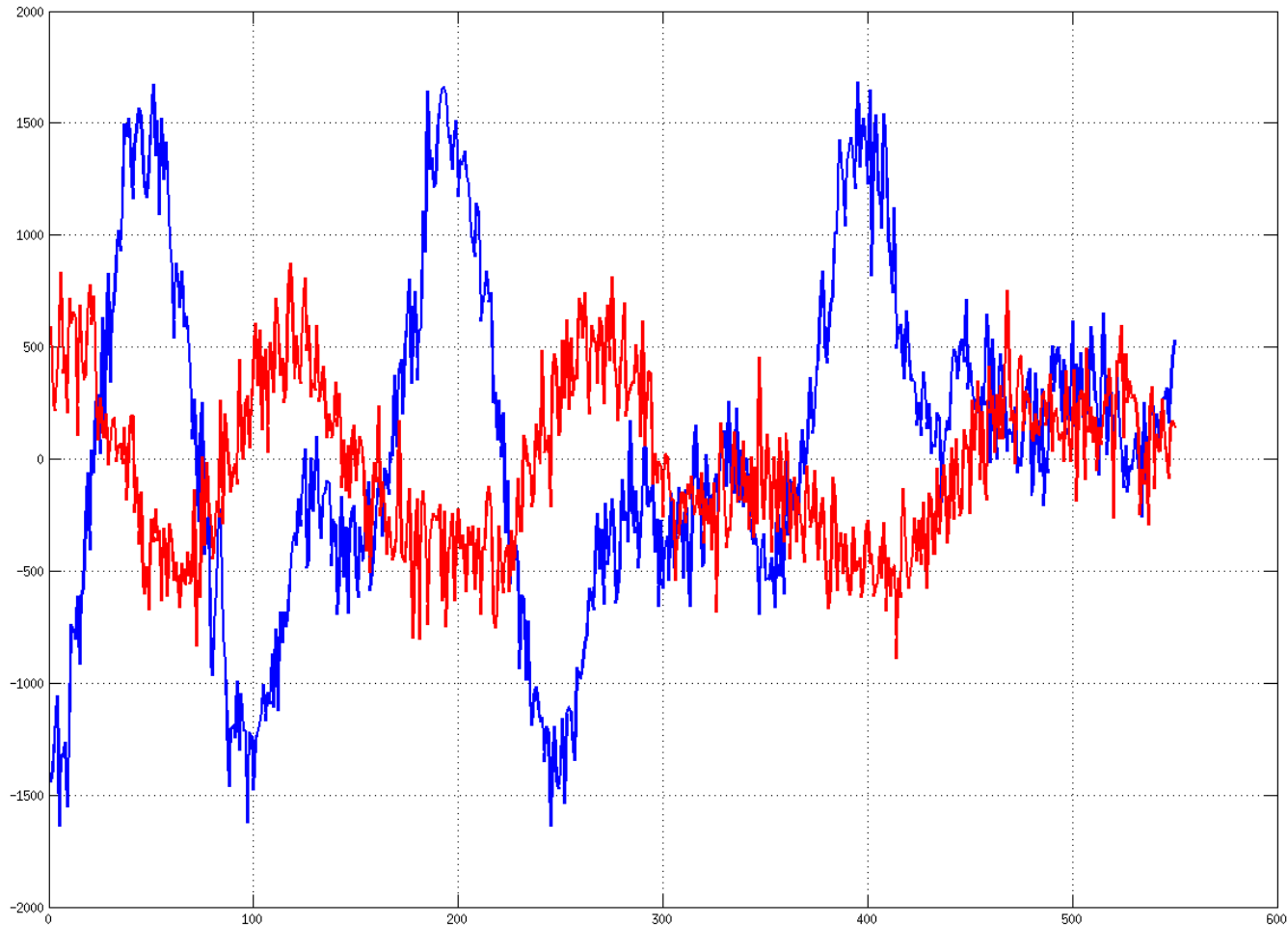
RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Többutas terjedés példa



Többutas terjedés példa

» Sajnos legtöbbször bizony ez látszik ☹️



RÁDIÓS JELTERJEDÉS

Többutas terjedés

- » Mit tehetünk ellene?
 - » DSSS, OFDM
 - » Nagy sáv szélesség
 - » Diverzitás

Diverzitás

- » Időbeli diverzitás (temporal diversity)
 - » A hatások időbeli változását kihasználva egymás után többször megismételt jel vételével növeljük a vételt.
- » Frekvencia diverzitás (frequency diversity)
 - » Ugyanazt az alapsávi jelet több frekvencia tartományban, vagy esetleg ultra nagy sáv szélességgel küldjük ki.
- » Térbeli (antenna) diverzitás (spatial (antenna) diversity):
 - » A tér különböző pontjain mérjük a beérkező jelet.
- » Kapcsolt diverzitás (switched diversity):
 - » Küszöbérték alatt vevők között kapcsolgatunk.
- » Polarizációs diverzitás (polarization diversity):
 - » Különböző polarizációval vesszük a jeleket, melyek során polarizált komponensek szűrhetőek ki.
- » Szögbeli antenna diverzitás (angular antenna diversity):
 - » Több nagy irányítottságú antennával vesszük a jelet.

ULTRA SZÉLESSÁVÚ TECHNOLÓGIA

Ultra szélessávú átvitel

- » Az UWB technológia nagyon egyszerű, de speciális megoldásokat használ
- » Alapelve a nagyon rövid impulzusok továbbítása
 - » Rövid idő \rightarrow nagy sáv szélesség
- » Nagyon kicsi jelteljesítmény
- » Előnye:
 - » A nagy sáv szélesség miatt jól ellenáll a többutas terjedésnek
 - » Kis energiaigény
- » Hátránya:
 - » Még nem túl elterjedt

HULLÁMTERJEDÉS ÁTTEKINTÉS

Alapok

- » Általában keskenysávú modell
 - » A sáv szélesség relatív kicsi a vivő frekvenciához képest
 - » Modulált jel:

$$s(t)e^{j\omega t}$$

- » Terjedés iránya
 - » Általában radiális irányban
 - » Gyakran izotróp
- » Terjedési sebesség (c)
 - » Hang esetében: $c = 300 \frac{m}{s}$
 - » Rádióhullám esetében: $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$
- » Vett jel
 - » A jelerősség távolsággal arányos
 - » A teljesítmény a távolság négyzetével

HULLÁMTERJEDÉS ÁTTEKINTÉS

Fázisviszonyok

» Modulálatlan síkhullám

» Adó antennánál:

$$r(t) = e^{j\omega t}$$

» Az adó antennától s távolságban:

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

» A két hely közötti fázisviszony:

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

» Hullámhosszonként a fázis teljesen átfordul

» Rádiós: $2.7GHz \rightarrow \lambda = 11.1 \text{ cm}$

» Ultrahang: $40kHz \rightarrow \lambda = 7.5 \text{ mm}$

KÖZELSÉGÉRZÉKELÉS ALAPÚ MÓDSZEREK

Közelségérzékelés alapú módszerek

- » Eldöntendő kérdés
- » A jeladó megfelelő közelségben található
 - » A hely a fix eszközöz tartozó, előre rögzített koordináta
 - » Tipikusan pl. NFC, RFID
- » A jeladó egy adott bázisállomáshoz kapcsolódik
 - » A hely a bázisállomás helyzetéből származtatható
 - » Tipikusan pl. a GSM cella információ, vagy WiFi AP
- » Egyszerű megvalósítás
 - » Nem szükséges célhardver
- » Pontatlan

JELERŐSSÉG ALAPÚ MEGOLDÁSOK

JELERŐSSÉG ALAPÚ MEGOLDÁSOK

(1)

- » A hullámterjedés során a jelerősség csökken, a távolsággal arányosan
 - » Elektromágneses hullám esetében

$$E \sim \frac{1}{r}, \quad P \sim \frac{1}{r^2}$$

- » Felhasználható a távolság becslésére
- » A többutas terjedés, számos akadály

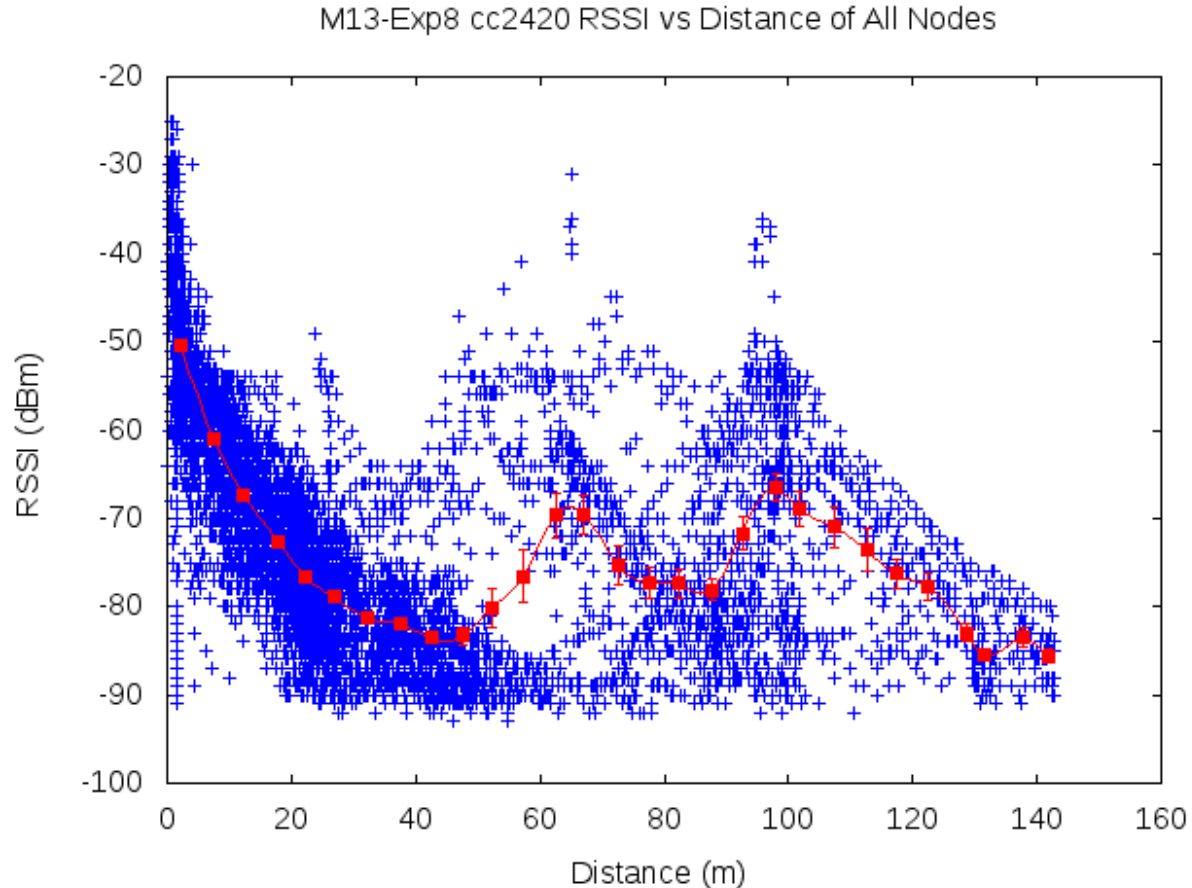
JELERŐSSÉG ALAPÚ MEGOLDÁSOK (2)

- » A térerősség általában rádiós technológiáknál elérhető
- » Felépíthető térerősségtérkép
 - » Az $f(l)$ térerősségfüggvény mintavett rekonstrukciója
- » Lehetőségek
 - » Mintaillesztés alapú
 - » Mért minták
 - » Ray Tracing minták
 - » Jelterjedési modell alapú
 - » Jelterjedési modellek

JELERŐSSÉG ALAPÚ MEGOLDÁSOK

RSSI alapú helymeghatározás

- » Az RSSI általában elérhető
 - » Sajnos nem feltétlenül kalibrált, sokszor nem lineáris skála
 - » Érintett a többutas terjedés miatt is



JELERŐSSÉG ALAPÚ MEGOLDÁSOK

RSSI - módszerek

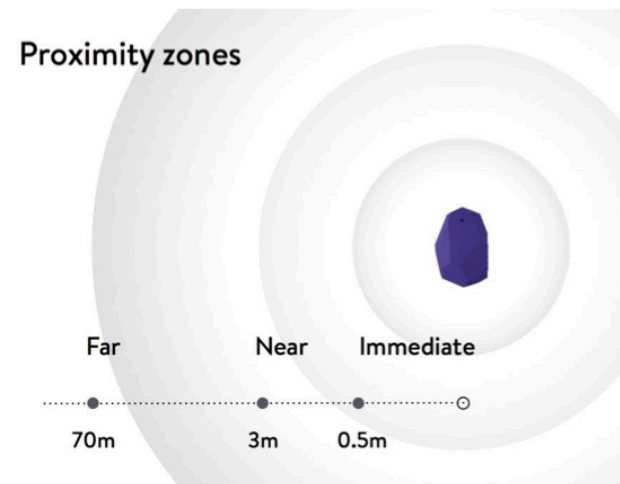
- » Beacon alapú
 - » Kis teljesítményű adók – hatáskör adja a durva pozíciót
 - » Kapuknál áthaladás
- » Modell alapú
 - » Terjedési modell alapján
 - » Háromszögeléssel határozható meg a pozíció
- » „Location fingerprinting”
 - » Előre elvégzett kalibráció alapján
 - » Kalibrációt igényel
 - » A google is ezt használja

Beacon alapú módszerek

- » Sok jeladót igényel, melyek kis teljesítménnyel forgalmaznak
 - » Általában nem túl gyakori a küldés – elem
- » A jelerősség állításával lehet a beacon-ök körüli kört növelni/csökkenteni
 - » Trade-off: pontosság/beacon-ök száma
- » Több térerővel való küldés
 - » Lassúbb a pozicionálás
- » Pontokon való áthaladás észrevételére jó

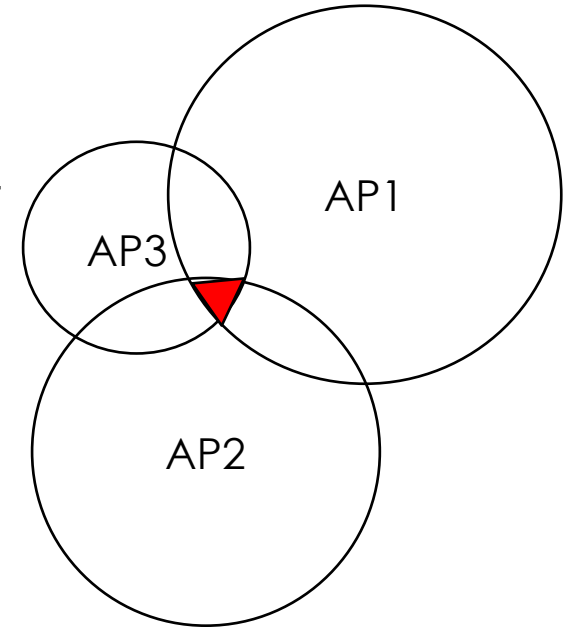
Beacon alapú módszer - technológiák

- » Bluetooth 4.x
 - » Bluetooth Low Energy, ujabban Bluetooth Smart
 - » Elemes működés, 2.4GHz
 - » ritka megszólalás, állítható teljesítmény
 - » Apple iBeacon
- » RFID, több szabvány
 - » UHF, 868/900MHz
 - » ISO/IEC 15693 – vicinity cards, 13.56MHz
 - » Olvasási távolság méterekben mérhető



Modell alapú helymeghatározás

- » Terjedési modell: $P \sim \frac{1}{r^2}$
 - » Jelerősség \rightarrow r sugarú kör
 - » A körök metszéspontja adja a pozíciót



- » Nem veszi figyelembe a falakat
 - » Azokat is bevehetjük a modellbe
 - » Térkép alapján, elnyelés alapján
- » A többutas terjedés nehezen vehető be a modellbe
 - » Ray tracing: túl komplex, túl sok a paraméter

Location fingerprinting

- » A leggyakrabban használt módszer
- » Térerősségtérkép építhető
 - » Adott kalibrációs pontokban a környező AP-k jelerőssége
 - » 2-3m pontosság érhető el
- » Többféle algoritmust használnak
 - » Determinisztikus
 - » Probabilisztikus
- » A született pozíció szűréssel tovább javítható
 - » Hibás vagy hiányos mérések nagy ugrásokat eredményeznek
 - » Szűréssel és átlagolással jól javítható

Determinisztikus algoritmusok

- » A legjobban illeszkedő fingerprint keresése egy metrika alapján
 - » Általában euklideszi távolságot néznek
 - » Egyéb, súlyozott metrika is használható

- » Döntés: K Nearest Neighbour
 - » $K = 1$ a legközelebbit választja
 - » $K = 3$ tipikus érték
 - » Súlyozottan figyelembe lehet venni az erősebb (közelebbi) AP-eket

JELERŐSSÉG ALAPÚ MEGOLDÁSOK

Probabilisztikus módszerek

- » Valószínűségi döntés – Bayes döntés
 - » X – pozíció, Y – mérés
 - » $p(y|x) = \frac{p(y|x)p(x)}{p(y)}$, ahol $p(y|x)$ a valószínűség (likelihood)
 - » A valószínűség többféleképpen számolható
 - » Hisztogram, Gauss, Log-normal stb.
- » A valószínűségek alapján kapunk pozíciót

Utólagos szűrés

- » Az esetleges mérési hibák ugrásokat eredményeznek
 - » Hiányzó AP, eltakart AP – nagy ugrás
 - » Egyébként is van szórás
- » Szűrési módszerek
 - » Outlierek szűrése – fontos
 - » Mozgás modell alapú (Kalman szűrő)
 - » Valószínűségi (Bayes szűrő)
 - » Particle filtering
- » További javítás – térkép alapján
 - » Haladási útvonalak, falak figyelembe vétele

ULTRAHANG

Ultrahang

- » Hasonló a rádióhullámokhoz
- » Előnyei:
 - » Kis terjedési sebesség (levegő, ~330 m/s)
 - » Nem kell olyan pontos időzítés (ToA, TDoA)
 - » Pontos
- » Hátrányai
 - » Falon nem hatol át
 - » Sok vevő kell
 - » Nem elterjedt
 - » Kutyákat zavarhatja 😊

LÁTHATÓ FÉNY ALAPÚ TECHNOLÓGIA

Látható fény alapján

- » Egyre elterjedtebbek a LED-es „izzók” 😊
- » Újdonság: modulálható a fény
 - » Minden égő saját azonosítót modulál
 - » A telefon kamerája érzékelni tudja a modulált jelet
 - » Beacon stílusú helymeghatározást tesz lehetővé
- » Lehetséges nem látható tartományba tenni a modulált fényt – 1 Infra LED

IDŐMÉRÉSEN ALAPULÓ MEGOLDÁSOK

Bevezetés

- » Az időmérés eredménye a távolság
 - » Távolságmérés
 - » Távolságkülönbség mérés
- » A távolság és a terjedési idő kapcsolata

$$s = c * \tau$$

- » Távolság: s , terjedési idő: τ , hullám terjedési sebesség: c
- » Az időmérés pontossága

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

- » Milyen pontos időmérés szükséges?

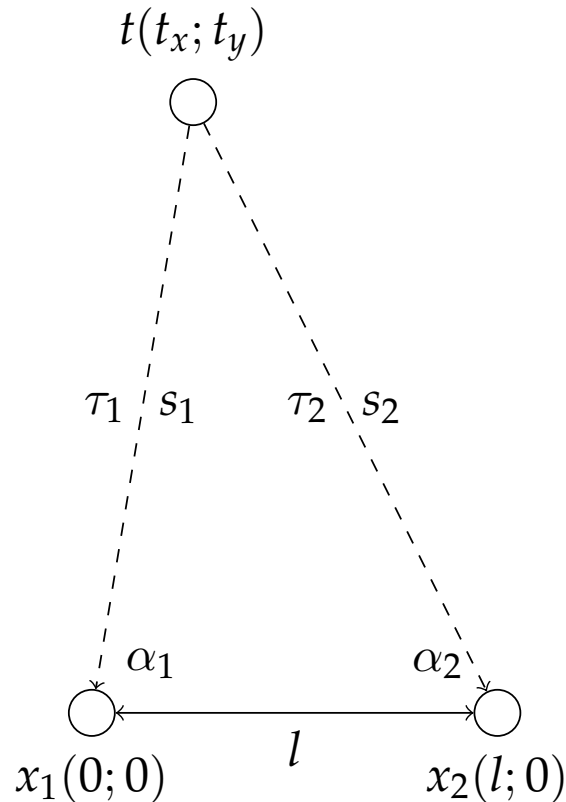
- » **Hang:** $\Delta \tau = \frac{\Delta s}{c} = \frac{1m}{300m/s} = 3.33 * 10^{-3}s = 3.33ms$

- » **Rádió:** $\Delta \tau = \frac{\Delta s}{c} = \frac{1m}{3*10^8} = 3.33 * 10^{-9}s = 3.33ns$

IDŐMÉRÉS

Időmérés pontossága

- » Egy egyszerű modell
 - » Két vevő l távolságban
 - » A t adó síkban mozog



- » Távolságkülönbség

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

- » Gradiens

- » Megmutatja, hogy az adott irányban történő 1 méter elmozdulás mekkora időkülönbséggel jár

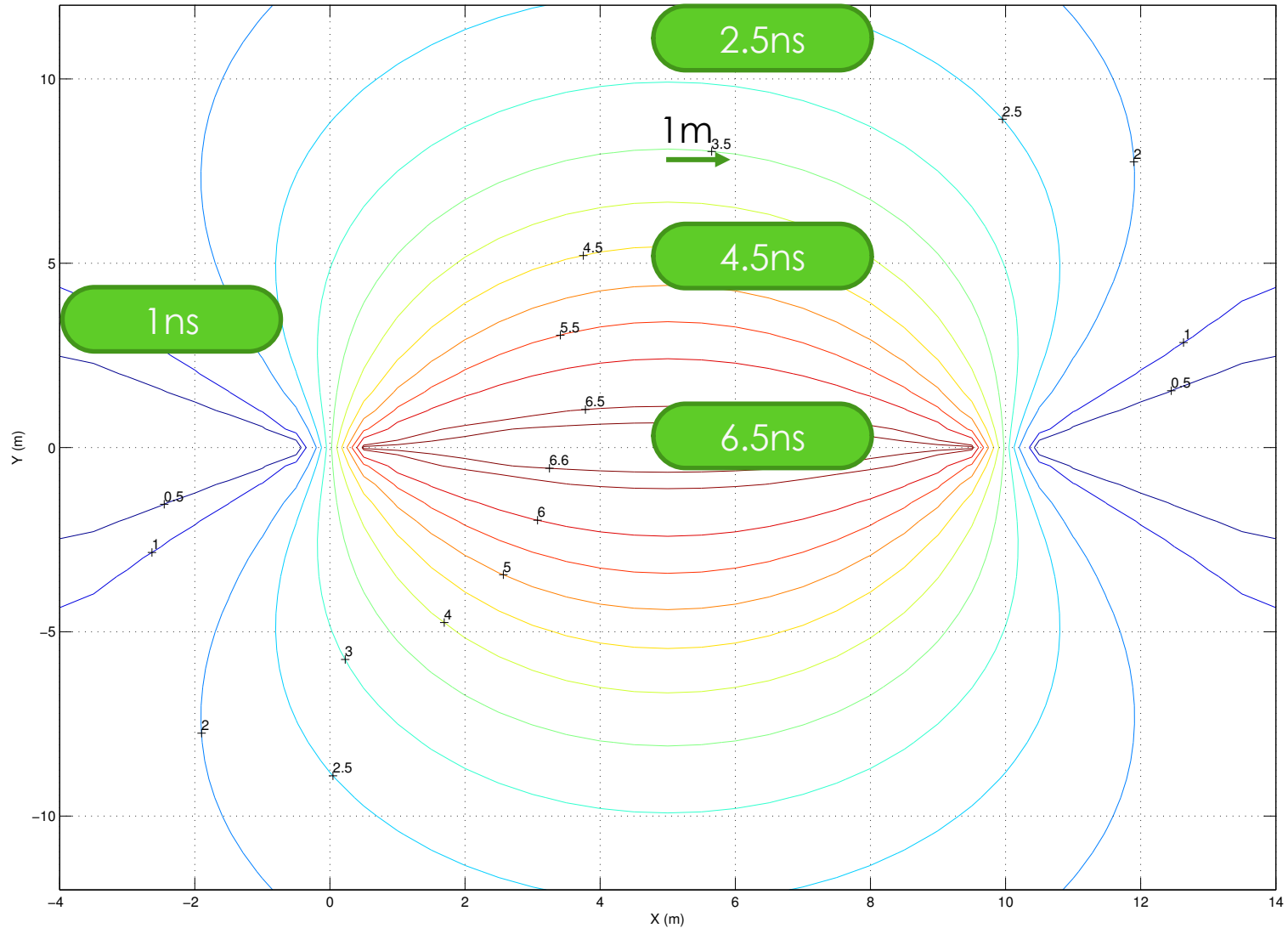
$$\left(\frac{\partial(\tau_2 - \tau_1)}{\partial t_x}; \frac{\partial(\tau_2 - \tau_1)}{\partial t_y} \right)$$

- » Numerikusan

$$l = 10m$$

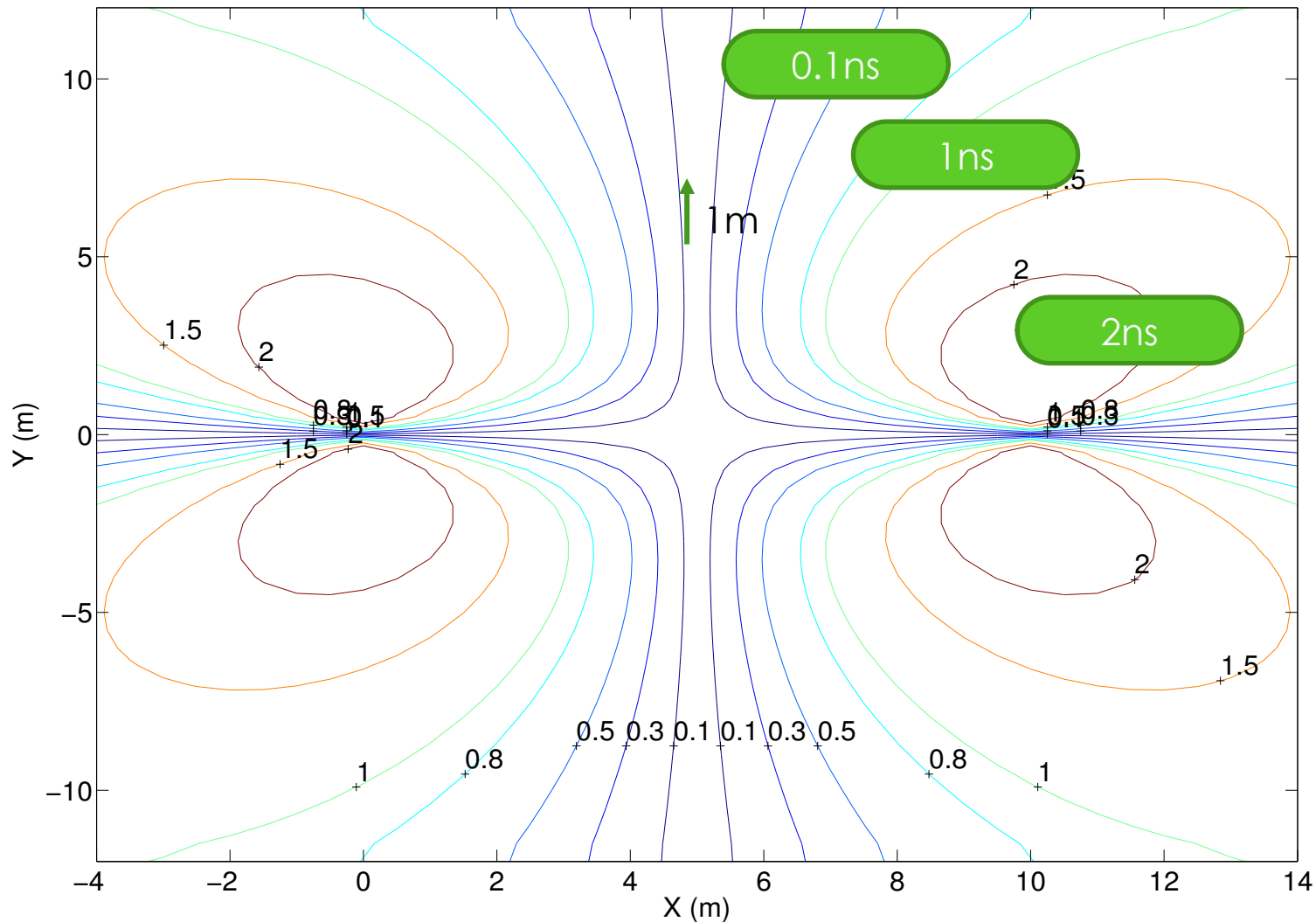
IDŐMÉRÉS

Időmérés pontossága, x irányú elmozdulás



IDŐMÉRÉS

Időmérés pontossága, y irányú elmozdulás



Beérkezési idő meghatározása

» Megkötések

- » Hullámterjedés lineáris alapsávi modellben
 - » Például PAM (Pulse Amplitude Modulation) rendszerek
- » Többutas terjedés során vett jel

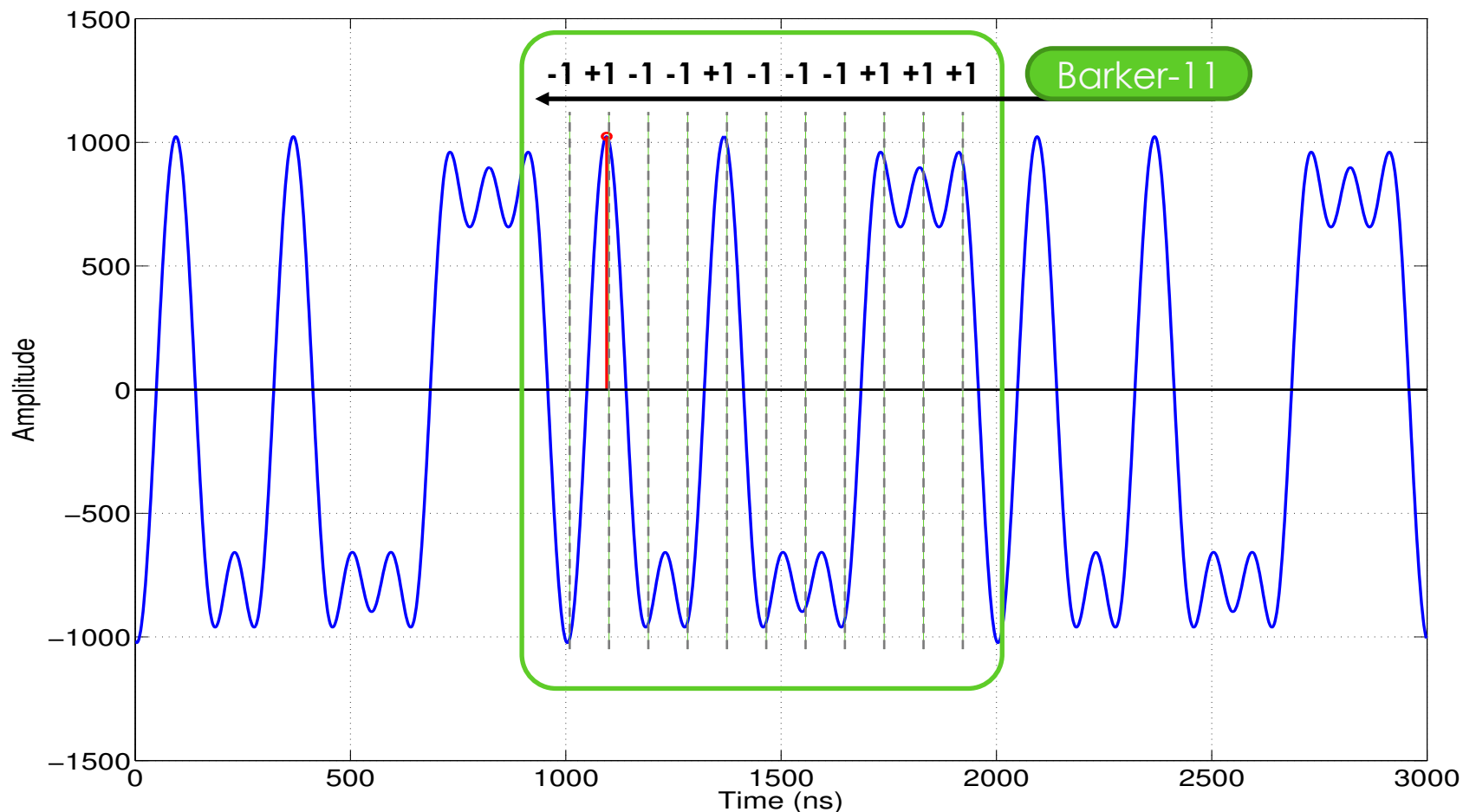
$$s^r(t) = \sum_k A_k s(t - \tau_k) e^{-j(\omega^t \tau_k + \varphi_0)}$$

- » Nincs korrelálatlan interferencia
 - » A zaj eloszlása normális eloszlást követ
- ### » Jelterjedési idő
- » Beérkezési időpont – továbbítási időpont
 - » Időpont egy referencia szimbólum alapján
 - » Pl. 802.11b esetében (11MHz) 90.9ns

IDŐMÉRÉS LEHETŐSÉGEI

Beérkezési idő meghatározása

» Példa 802.11b jelre



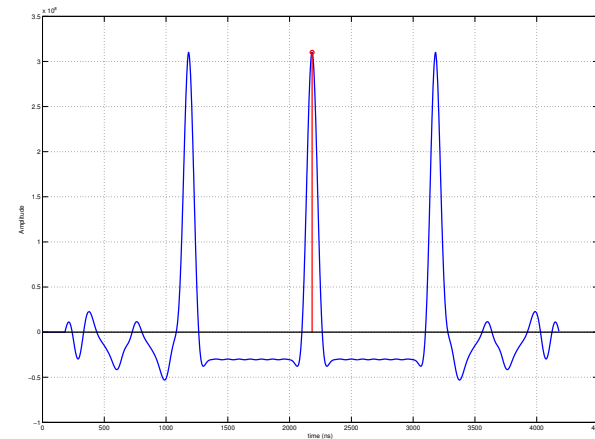
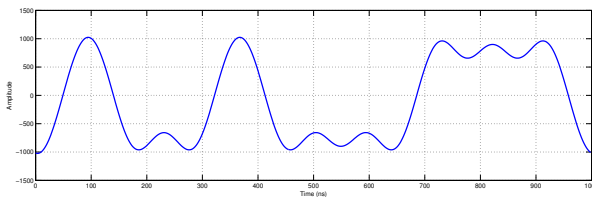
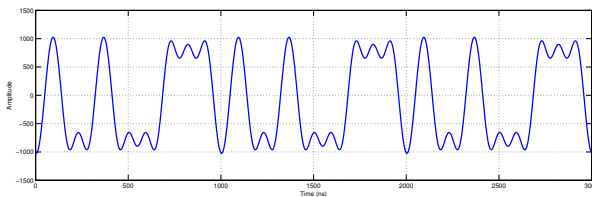
Beérkezési idő meghatározása

- » Alkalmazzuk az elméleti megoldást
 → kereszt- és autókorreláció

$$R_{fg}(\tau) = (f \star g)(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t + \tau)dt$$

- » Akkor maximális, ha a két jel illeszkedik
- » Beérkezési idő meghatározása

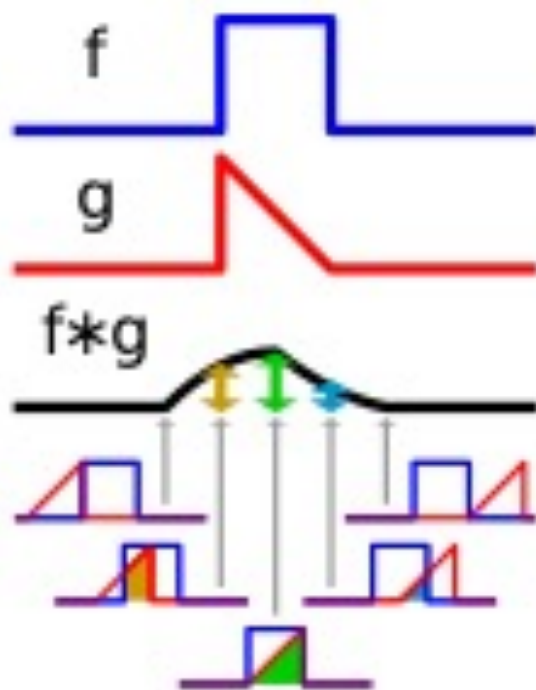
$$t_{rec} = \operatorname{argmax}_{\tau} R_{fg}(\tau)$$



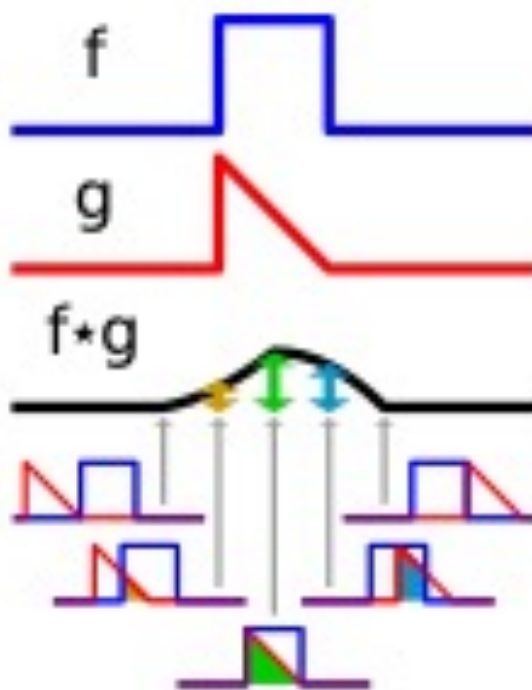
IDŐMÉRÉS LEHETŐSÉGEI

Beérkezési idő meghatározása

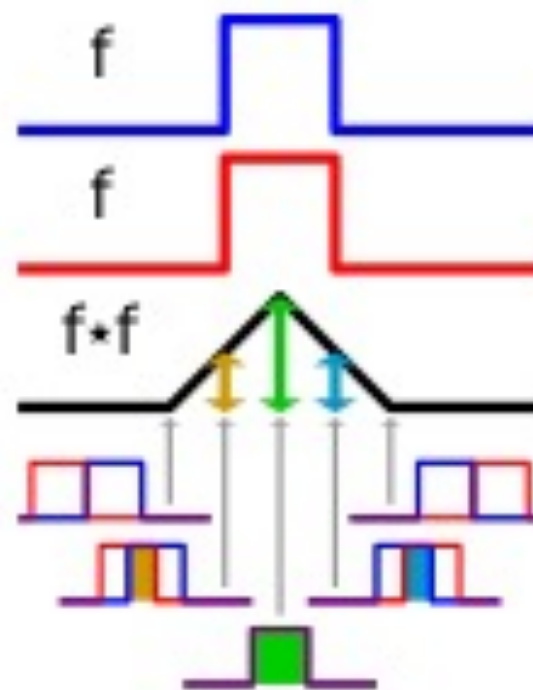
Konvolúció



Kereszt-korreláció



Autokorreláció



Forrás: Wikipédia

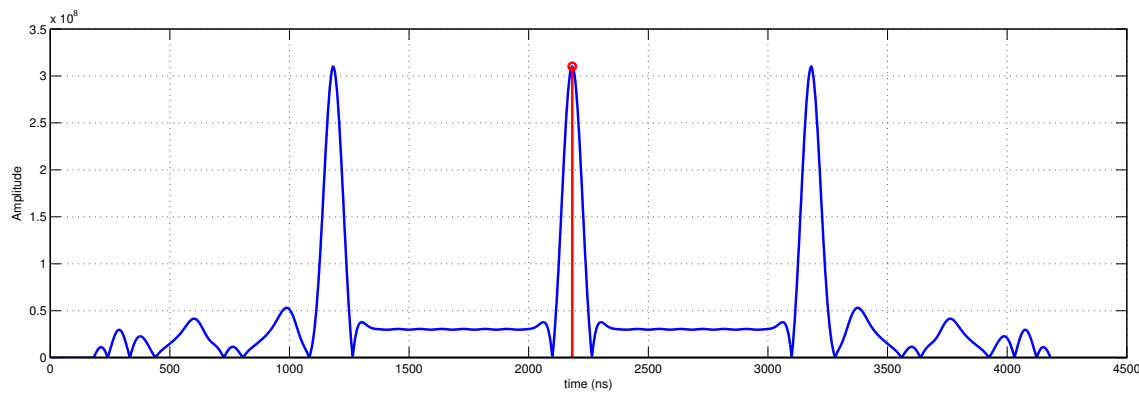
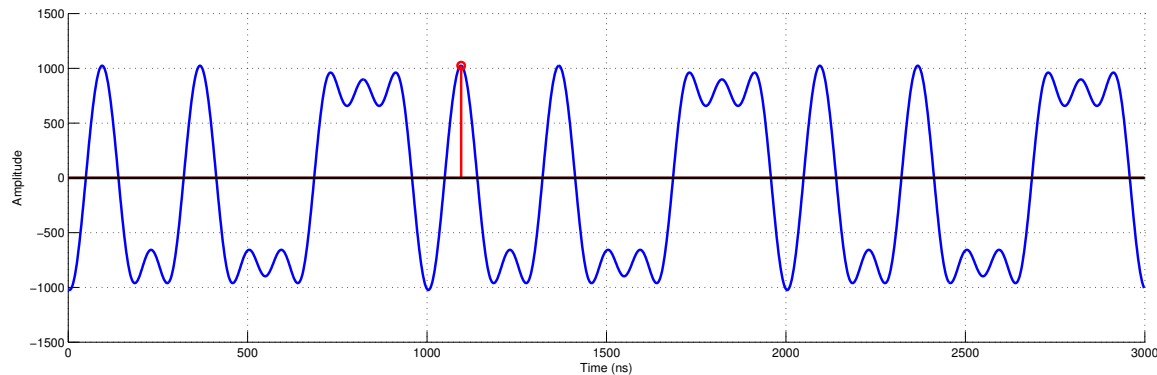
Beérkezési idő meghatározása

- » Pontosabb beérkezési idő meghatározás
 - » Nulla várható értékű zaj
 - » Interpoláció a digitális minták között
 - » Lineáris
 - » Polinom (pl. kvadratikus)
 - » Ideális sávkorlátozott (Nyquist)
- » Nehezen számítható

IDŐMÉRÉS LEHETŐSÉGEI

Beérkezési idő meghatározása

» Ideális esetben (802.11b)

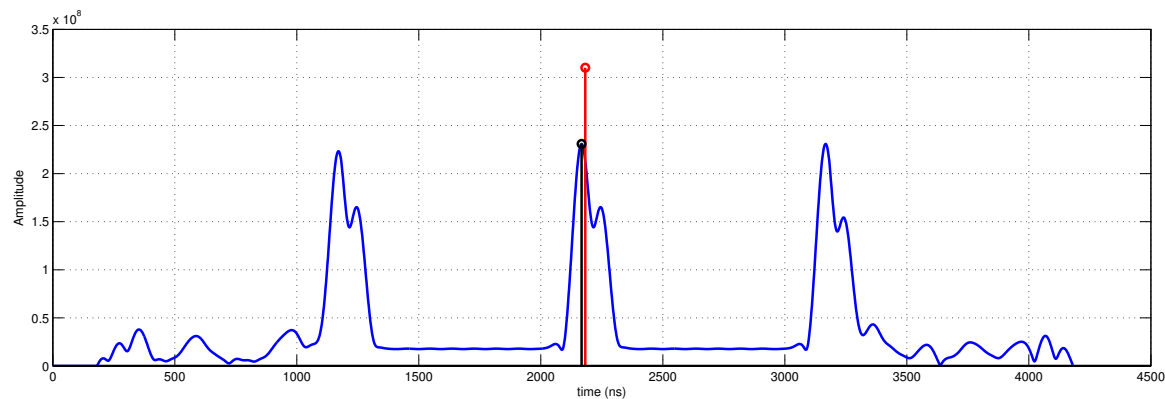
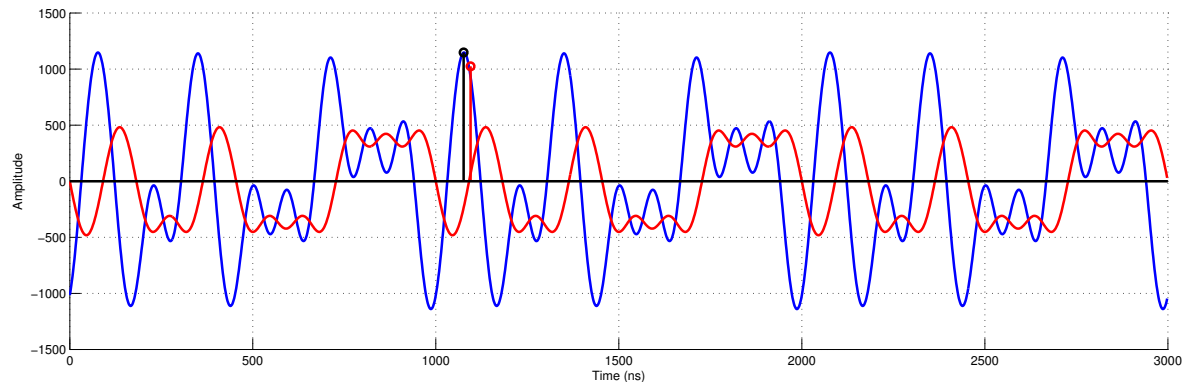


IDŐMÉRÉS LEHETŐSÉGEI

Beérkezési idő meghatározása

» Többutas terjedés esetében

» Egy komponens (41ns késés, 0.8 csillapítás, 140 fok fázis)

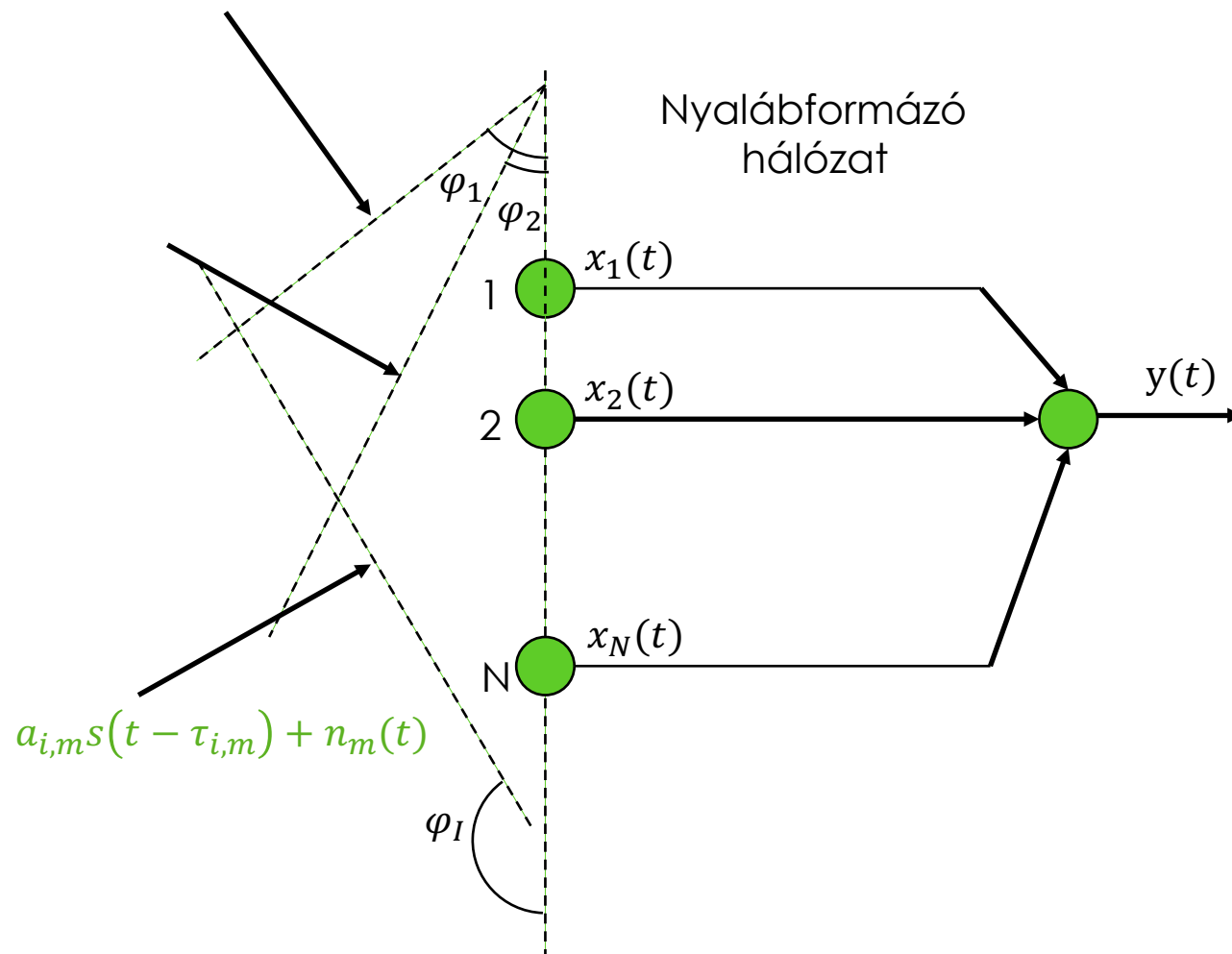


» 41.8ns hiba az időmérésben: $\Delta s = c * \Delta t = 12.54m$

Beérkezési idő meghatározása

- » Miért kaptunk ekkora hibát?
 - » 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 kinyerése
 - » Több antenna használata a terjedés jellemzői felismerésének érdekében

Többantennás modell



Többantennás modell

- » A jelterjedés általánosítása több vevő antennára
- » Keskenysávú modell
 - » A jel sáv szélességének reciproka jóval nagyobb, mint az antennák közötti terjedés ideje

» Modell

- » Jel komponensek: $i = 1..I$
- » Antennák: $m = 1..M$

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

» Digitális jelfeldolgozás esetén a minták

- » $\mathbf{x}_n = \mathbf{x}(t_n), \mathbf{s}_n = \mathbf{s}(t_n - \tau_i)$
- » Minták: $n = 1..N$

 τ_i

Amennyiben az antennák helyének különbsége elhanyagolható az adó-vevő távolsághoz, valamint a mintavételezés idejéhez képest képes

Többantennás modell

- » Mátrix formában

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

$N \times M$ $N \times I$ $I \times M$ $N \times M$

- » Jelterjedésre jellemző komplex együttható mátrix, átviteli karakterisztika:

- » \mathbf{A}

- » Komponensek késleltetése:

- » $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_i]$

- » Mintavett jelek antennánként:

- » $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n]^T$

- » Alapsávi jel mintavett parametrikus értékei:

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

Többba. modell a frekvenciatartományban

- » Sajnos a modell nemlineáris az időbeli eltolás miatt
- » Fourier-transzformációval kezelhető

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

- » A frekvencia tartományban

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

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

$$\mathbf{V}(\boldsymbol{\tau}) = [\mathbf{v}(\tau_1) \dots \mathbf{v}(\tau_l)] = \begin{bmatrix} e^{-j\omega_1\tau_1} & \dots & e^{-j\omega_1\tau_l} \\ \dots & \dots & \dots \\ e^{-j\omega_N\tau_1} & \dots & e^{-j\omega_N\tau_l} \end{bmatrix}$$

Egyenletek megoldása

- » Maximum Likelihood megoldás Gauss-zaj feltételezéssel

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}, \hat{\mathbf{A}} = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{\tau}, \mathbf{A}} \|\mathbf{X} - \mathbf{S}(\boldsymbol{\tau})\mathbf{A}\|^2$$

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

- » $\mathbf{S}(\boldsymbol{\tau})$, \mathbf{A} , $\mathbf{V}(\boldsymbol{\tau})$ nem ismertek
- » Megoldási lehetőségek
 - » Egyenletrendszer megoldása
 - » Multipath Mitigation Technique
 - » Pszeudo inverz
 - » Iterative quadratic maximum likelihood
 - » Komponensek kiszűrésével
 - » Iránymeghatározás alapján

Multipath Mitigation Technique

- » Egyantennás megoldás időtartományban
- » Maximum Likelihood megoldás
 - » Legkisebb négyzetes hiba minimalizálása
 - » $\Gamma(\tau_i, \mathbf{a}_i) = \int_0^T (x(t) - \sum \mathbf{a}_i \mathbf{s}(t - \tau_i))^2 dt$
 - » $\tau_i, \mathbf{a}_i = \operatorname{argmin}_{\tau_i, \mathbf{a}_i} \Gamma(\tau_i, \mathbf{a}_i)$
- » A komplex amplitúdók kiszámíthatók zárt alakban
 - » $\frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{a}_i} = -2R_{im}(\tau_i) + 2\mathbf{a}_i R_{mm}(0) + 2 \sum_{i \neq j} \mathbf{a}_j R_{mm}(\tau_i - \tau_j) = 0$
- » A módszer csökkenti a változók számát
 - » Keresni csak τ -k szerint kell

Pszudoinverz

- » A pszeudoinverz széles körben használatos
- » Előállítunk számos késleltetett $s(t - \tau)$ jelet és megpróbáljuk megkeresni az amplitúdójukat (lásd MMT)

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} s(t_1 - \tilde{\tau}_1) & \dots & s(t_1 - \tilde{\tau}_K) \\ \dots & \dots & \dots \\ s(t_N - \tilde{\tau}_1) & \dots & s(t_N - \tilde{\tau}_K) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{G}\mathbf{A}$$

- » Ekkor a pszeudoinverz használatával:

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

- » Ill-posed probléma \rightarrow regularizációs megoldások

Iterative quadratic maximum likelihood

- » Az előzőek szerint látható, hogy \mathbf{A} meghatározható
- » A behelyettesítést elvégezve:

$$\hat{\boldsymbol{\tau}} = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{\tau}} \left\| \mathbf{X} - \mathbf{S}_{\omega} \mathbf{V}(\boldsymbol{\tau}) (\mathbf{S}_{\omega} \mathbf{V}(\boldsymbol{\tau}))^{\dagger} \mathbf{X} \right\|^2 = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{\tau}} \left\| \mathbf{P}_{\mathbf{S}_{\omega} \mathbf{V}(\boldsymbol{\tau})}^{\perp} \mathbf{X} \right\|^2$$

- » Ha $V(\tau)$ Vandermonde alakú, akkor létezik \mathbf{B} , melyre

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

- » amelyben a polinom együtthatói szerepelnek

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

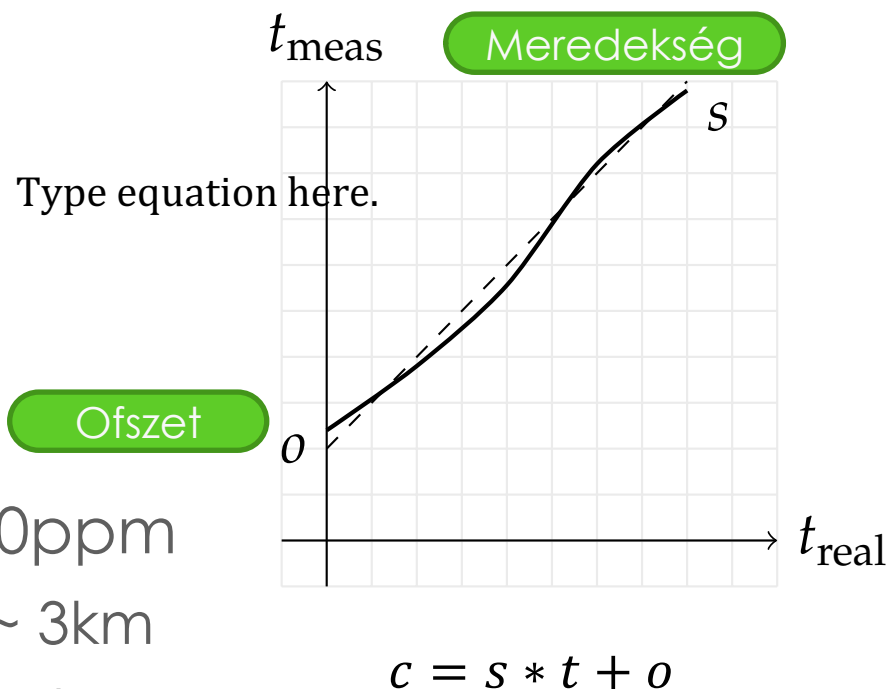
- » A gyökök adják az egyes jelkomponensek késleltetését

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

IDŐMÉRÉS

Időmérés lokális órával

- » A lokális óra az időt nem pontosan méri
- » Hibák
 - » Linearitási hiba
 - » Ofszet hiba
 - » Erősítési hiba
 - » Thermális függés
- » Lineáris modell
 - » Jó közelítés
- » Klasszikus oszcillátor ~ 10ppm
 - » 1 másodperc → 10us ~ 3km
 - » OCXO, atomóra ~ 10ppb
- » Digitális óra → számláló

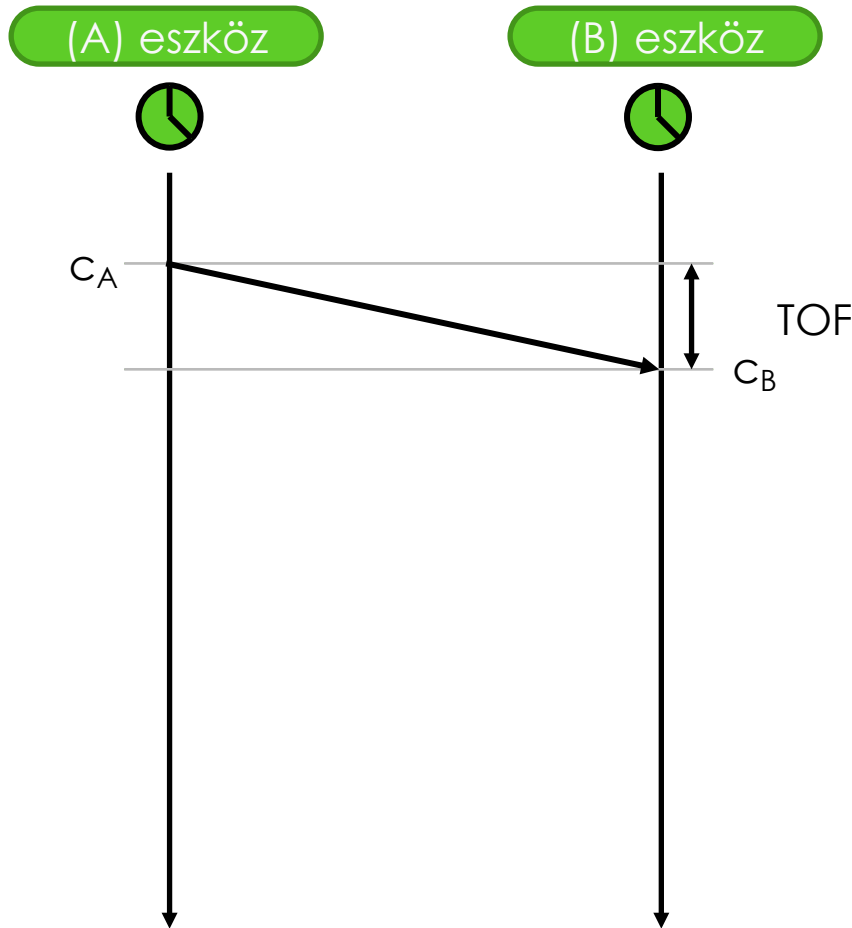


Jelterjedési idők meghatározása

- » Jelterjedési idő
 - » TOA (Time of Arrival)
 - » TOF (Time of Flight)
- » Jelterjedési idő különbség
 - » TDOA (Time Difference of Arrival)
- » Ranging
 - » One-way ranging
 - » Two-way ranging

IDŐMÉRÉS

Time of Flight



- » Független órák
 - » $c_A = s_A * t_A + o_A$
 - » $c_B = s_B * t_B + o_B$
- » Jelterjedési idő
 - » $TOF = c_B - c_A$
- » Lokális óra szinkronizáció szükséges
 - » s_A, s_B, o_A, o_B meghatározására

A beérkezési idők egyenletrendszere

- » Egyenletrendszer lineáris órákra, infrastrukturális mód

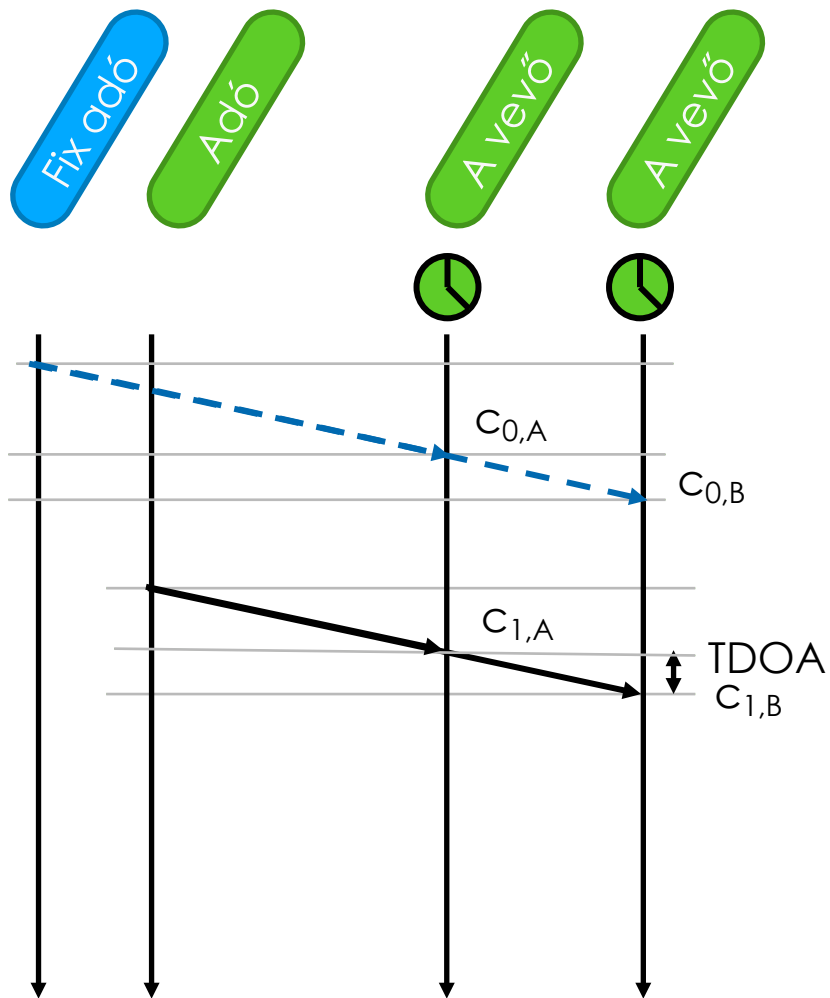
$$c_{i,k}^l = s_k(t_i^l + \tau_{i,k}^l) + o_k$$

- » i : az adó sorszáma
- » k : az vevő sorszáma
- » l : a kibocsájtott jel sorszáma
- » t_i^l : a jel kibocsájtásának ideje
- » $\tau_{i,k}^l$: a jel terjedésének ideje
- » I adó, K vevő, L csomag esetében
 - » $I * L * K$ egyenlet
 - » $I * L + I * L * K + 2 * K$ ismeretlen
- » Több ismeretlen, mint egyenlet

Lokális órák szinkronizálása

- » A helymeghatározástól függetlenül
 - » TOF esetében
 - » PI.
 - » Közös oszcillátor használata
 - » EthernetSynch
- » A helymeghatározás során
 - » TDOA
 - » Ranging
 - » Two-way ranging (TWR)
 - » Symmetric double-sided two-way ranging (SDS-TWR)

TDOA - Lokális órák szinkronizálása



» Órák különbsége

» $c_{0,B} - c_{0,A} = s_B(t + \tau_B) + o_B - s_A(t + \tau_A) + o_A \cong s_B \sim s_A \sim 1$

» $\tau_B - \tau_A + o_B - o_A = f(d_{0,B} - d_{0,A})$

» Időkülönbség

» $\tau_{1,B} - \tau_{1,A} = c_{1,B} - c_{1,A} - (o_B - o_A)$

» Több megszólalás
esetében a meredekség
különbség is számolható

A beérkezési idők egyenletrendszere

- » Legyen I^* adó legyen fix helyen, ebben az esetben I pedig mozgó
 - » Ismeretlenek:
 - » $L(I + I^*) + 2K + IK + LIK = LI^* + 2K + KI^* + LIK$
 - » Egyenletek:
 - » $LK(I + I^*) = LKI^* + LKI$
- » Ekkor mikor igaz az egyenlőség
$$LI + 3K + (L + K - LK)I^* < 0$$
- » Fix adókkal megoldható általánosan a rendszer
 - » A helyzetüket nem kell feltétlenül ismerni

A beérkezési idők különbsége

- » Az időkülönbségekre

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

- » Keressük az időkülönbség párokat

$$\tau_{i,j}^l - \tau_{i,k}^l$$

- » Ismernünk kell az órák lineáris paramétereit

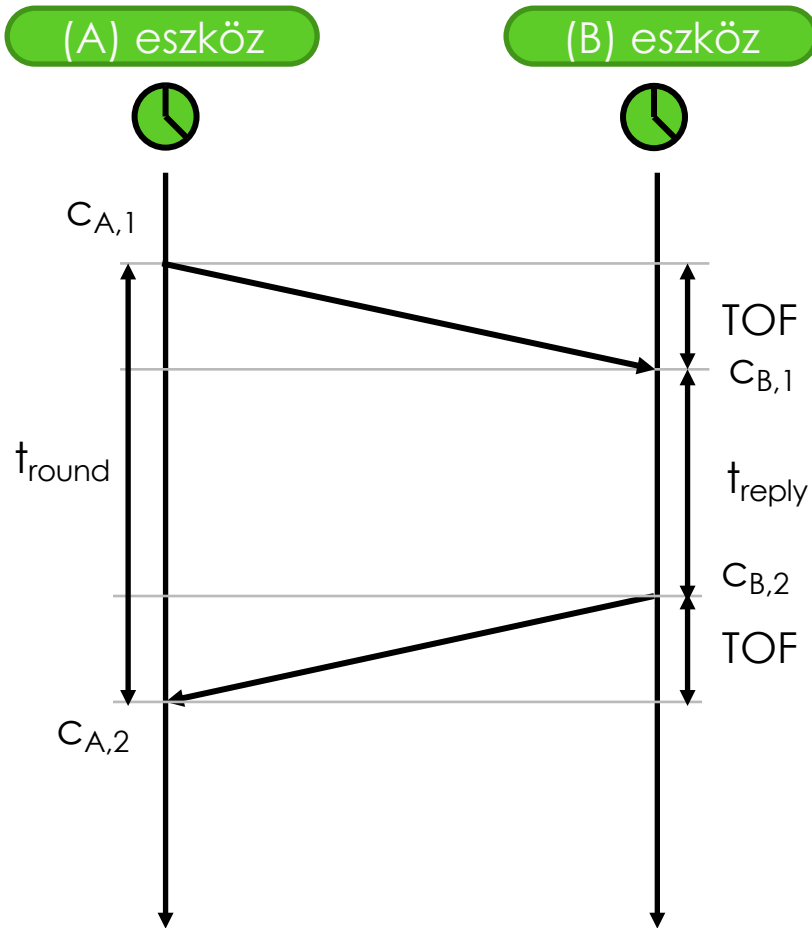
- » Ha $s_j = s_k$ minden j, k párosra

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

- » Sajnos az ofszet ismeretlen, kell egy fix adó a kiküszöböléshez

- » Pl. vevőn lévő referencia adó

Two-way ranging (TWR)



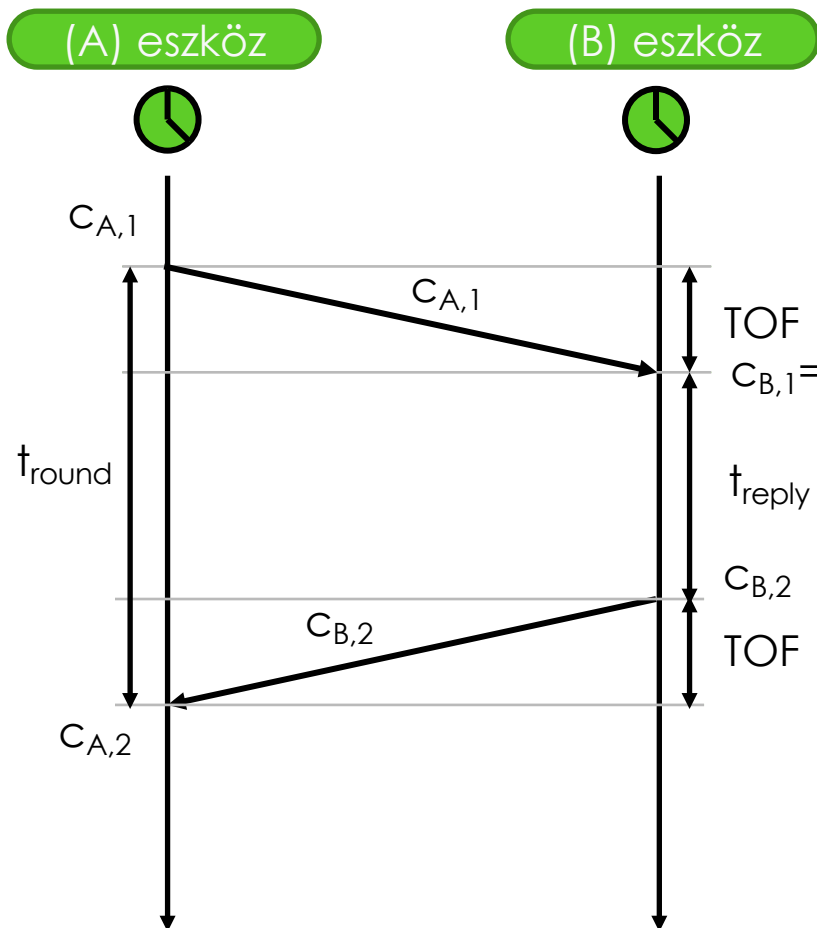
» Az A eszköz méri az időt

$$t_{round} = 2TOF + t_{reply}$$

» Mivel t_{reply} adott

$$TOF = \frac{1}{2}(t_{round} - t_{reply})$$

Two-way ranging (TWR) without fix reply



» Az A eszköz méri az időt

$$t_{round} = c_{A,2} - c_{A,1}$$

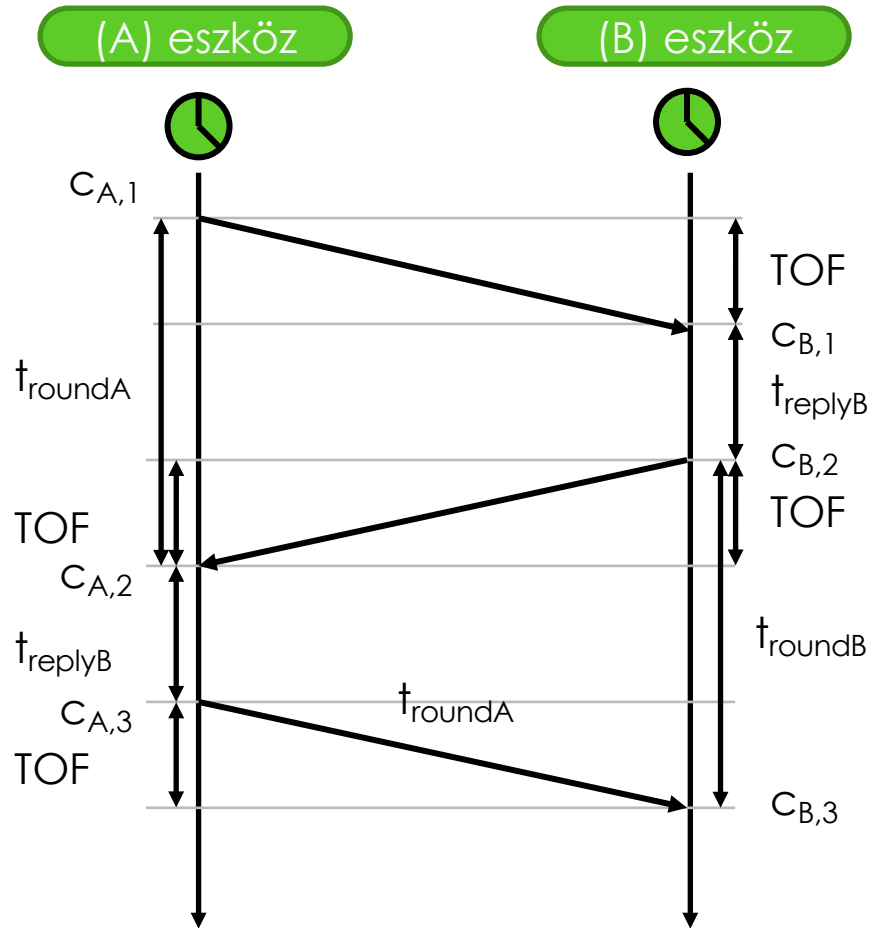
$$t_{round} = 2TOF + t_{reply}$$

$$t_{reply} = c_{B,2} - c_{A,1}$$

» Ebből következően

$$TOF = \frac{1}{2} (c_{A,2} - c_{B,2})$$

Symmetric double-sided TWR (SDS-TWR)



» A B eszköz méri az időt

$$t_{roundA} = 2TOF + t_{replyB}$$

$$t_{roundB} = 2TOF + t_{replyA}$$

» t_{replyA} és t_{replyB} adott

$$TOF =$$

$$\frac{1}{4} (t_{roundA} - t_{replyA} + t_{roundB} - t_{replyB})$$

» Segítségével a frekvencia drift is kompenzálható

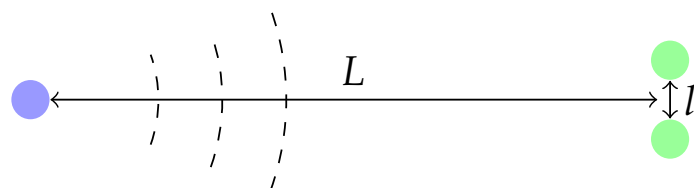
IRÁNYMÉRÉSEN ALAPULÓ MEGOLDÁSOK

A beérkezési irány mérés alapelve

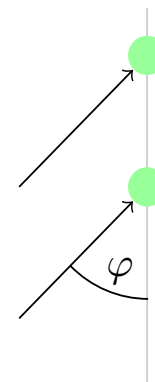
- » Az adó és vevő közötti távolság nagy a vevőantennák távolságához képest

$$l \ll L$$

- » A beérkező jeleket párhuzamosnak tekintjük
- » A beérkezési idők különbsége az antennák között elhanyagolható



- Adóantenna
- Vevőantenna

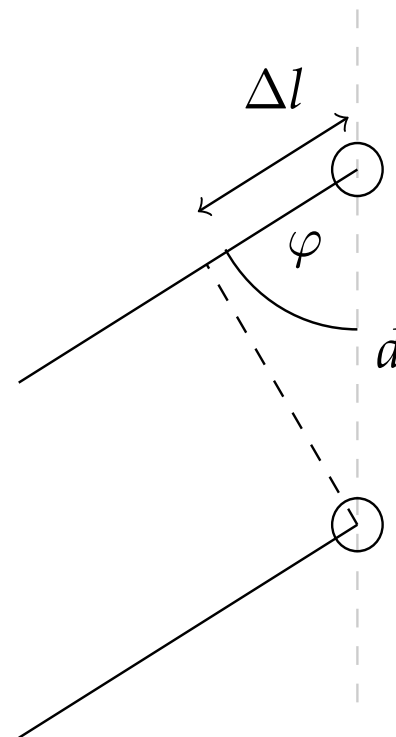


A beérkező irány mérés alapelve

- » A megoldás a jelterjedési távolság és a fázis közötti összefüggést használja ki
- » A vett jel fáziskülönbsége két antenna esetén

$$\Delta\phi = -\omega \frac{s}{c} = -\frac{2\pi s}{\lambda} = -\frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = -\frac{2\pi}{\lambda} d \cos\varphi$$

- » A beérkező jelek fázisaiból a beérkezés szöge könnyen számolható



Többutas terjedés

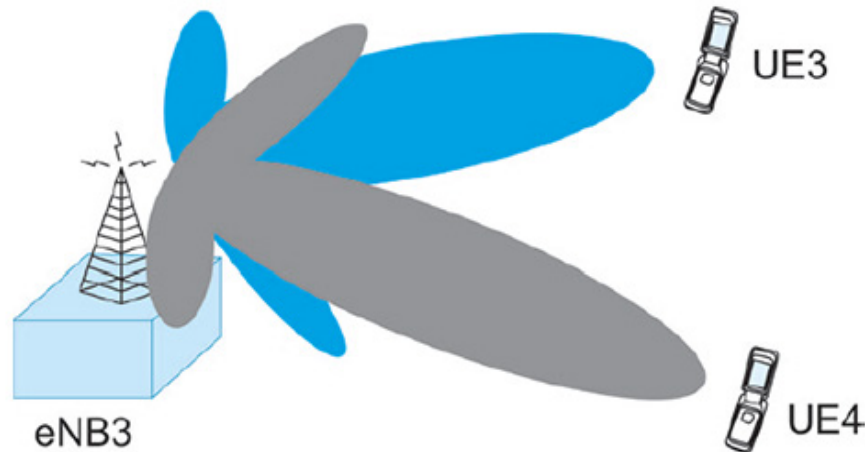
- » Gyakorlatban többutas terjedés tapasztalható
 - » A szögmérést nagyon elrontja a több komponens

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

- » A megoldás az antenna tömbök használata

Antenna tömbök

- » Diverzitás megvalósítása
 - » Térbeli diverzitás (spatial diversity)
 - » A rádiófrekvenciás jelek vételi lehetőségeinek javítása
 - » Jelek helyreállítása
- » Antenna tömbök
 - » A vételi és sugárzási minta (nyaláb) irányítható



Antenna tömbök

- » Fázisviszonyok meghatározása
- » Megkötés
 - » A tömb mérete kisebb, mint az adótól való távolság
- » Vett jelre a fázisviszony

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

- » Az s a terjedési irányban való távolság
- » A jel beérkezés iránya $k = (\sin\varphi \cos\theta, \sin\varphi \sin\theta, \cos\varphi)$
 - » Gömbi polárkoordináták
 - » Azimuth: φ
 - » Elevation: θ

Antenna tömbök

- » Az antenna helye

\mathbf{r}

- » A jel terjedési iránya

\mathbf{k}

- » Csak az iránya számít
- » A nagyságot választjuk

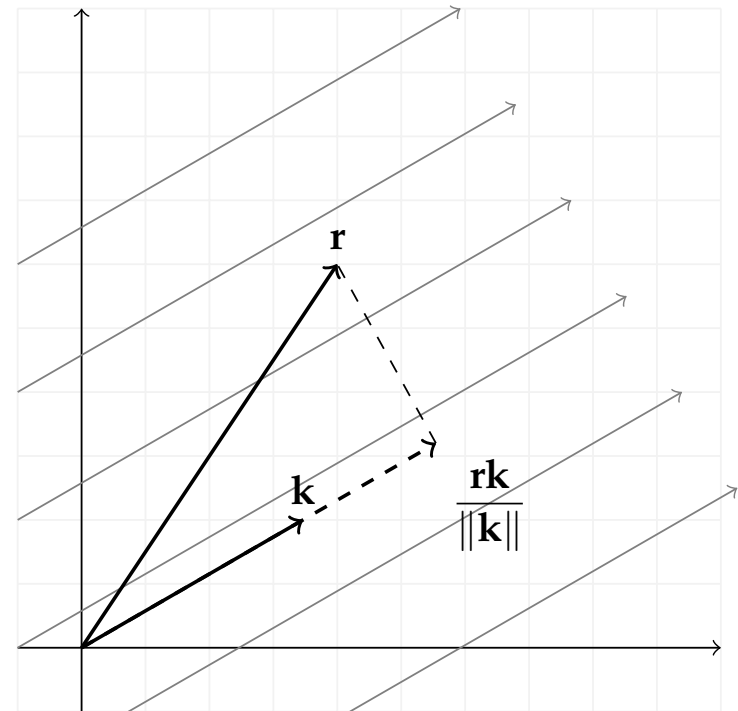
$$\|\mathbf{k}\| = \frac{2\pi}{\lambda}$$

- » Ekkor skaláris szorzattal

$$\Delta\phi = -\omega \frac{s}{c} = -\frac{2\pi}{\lambda} s = -\mathbf{k}\mathbf{r}$$

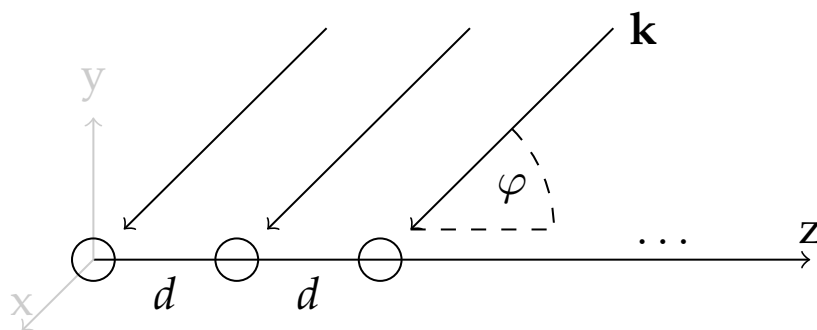
- » Origóban

$$\Delta\phi_0 = 0$$



Antenna tömbök – Steering vector, ULA

- » Megmutatja, hogy a φ, θ irányból érkező hullámfront milyen fázisviszonyokat eredményez
- » Például ULA (Uniform Linear Array) esetében
 - » N darab antenna egy vonalban egyenletesen



$$\mathbf{r}_n = (0, 0, n * d), n = 0 \dots N - 1$$

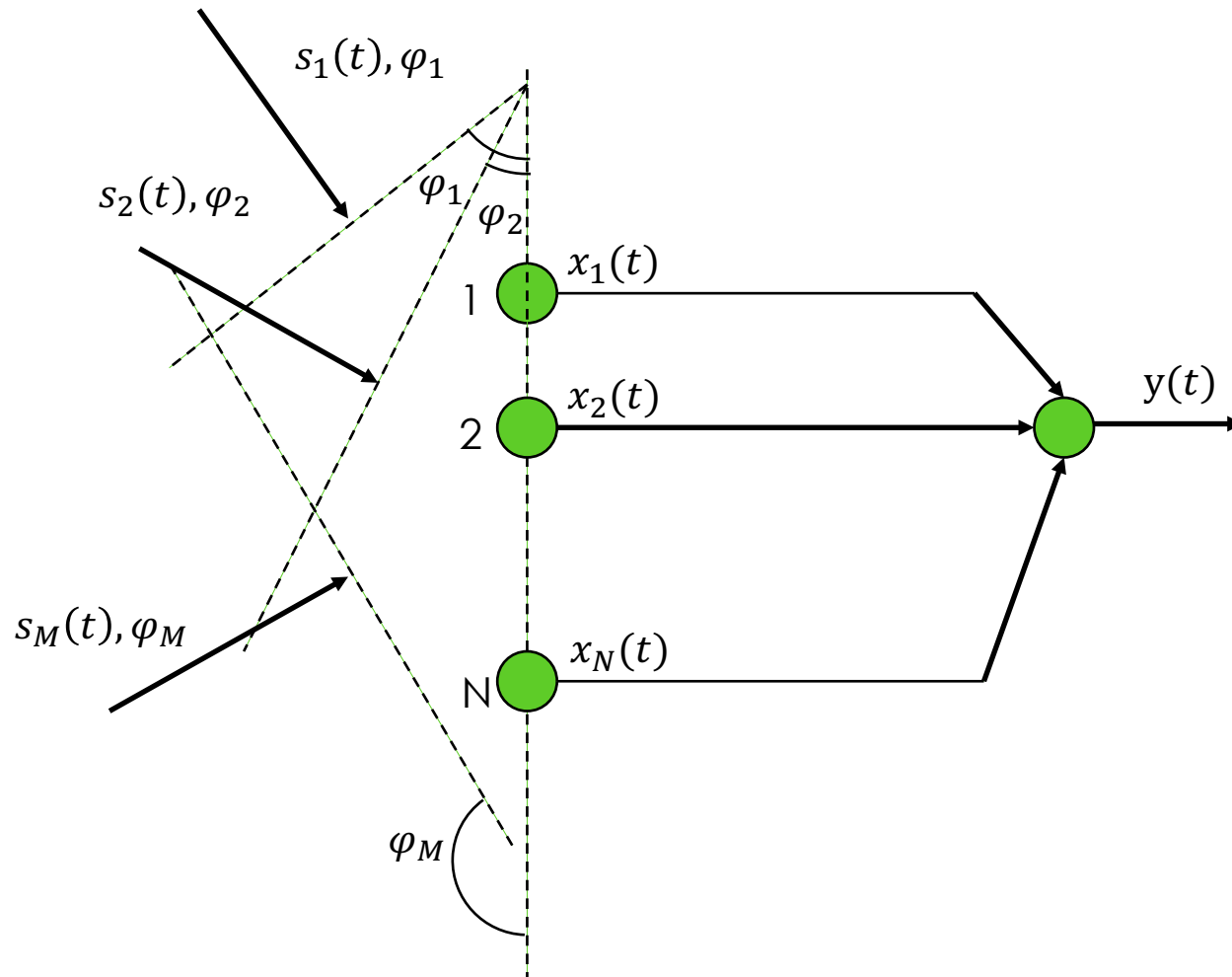
$$\Delta\phi_n = -\mathbf{k}\mathbf{r}_n = -\frac{2\pi}{\lambda}nd \cos \varphi$$

- » A steering vektor

$$\mathbf{a}(\varphi) = \left[1, e^{-j\frac{1}{\lambda}2\pi d \cos\varphi}, \dots, e^{-j\frac{1}{\lambda}2\pi(N-1)d \cos\varphi} \right]$$

IRÁNYMÉRÉS

Íránymeghatározás



Íránymeghatározás

- » M jel:
 - » Többfelhasználós környezet – Korrelálatlan zaj
 - » Többutas terjedés esetében – Korrelált zaj
- » Az iránymeghatározás egyenlete

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t)$$

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{a}(\varphi_1), \mathbf{a}(\varphi_2), \dots, \mathbf{a}(\varphi_M)][\mathbf{s}_1(t), \mathbf{s}_2(t), \dots, \mathbf{s}_M(t)]^T + \mathbf{n}(t)$$

- » $\mathbf{n}(t)$ a $N \times 1$ méretű zajvektor, normális eloszlású
- » Az egyenlet diszkrét időpillanatokban (L minta) is megfogalmazható, ebben az esetben
 - » \mathbf{s} $M \times L$ méretű mátrix
 - » \mathbf{x} $N \times L$ méretű mátrix

Nyalábformázás (Beamforming)

