

A satellite in space, viewed from a low angle, with a white background. The satellite has several rectangular panels and a circular antenna.

**Eötvös Loránd Tudományegyetem
Informatikai Kar**

Térinformatikai és távérzékelési alkalmazások fejlesztése

Helymeghatározás és navigáció

Giachetta Roberto, Cserép Máté
mcserep@inf.elte.hu
<http://mcserep.web.elte.hu>

Helymeghatározás és navigáció

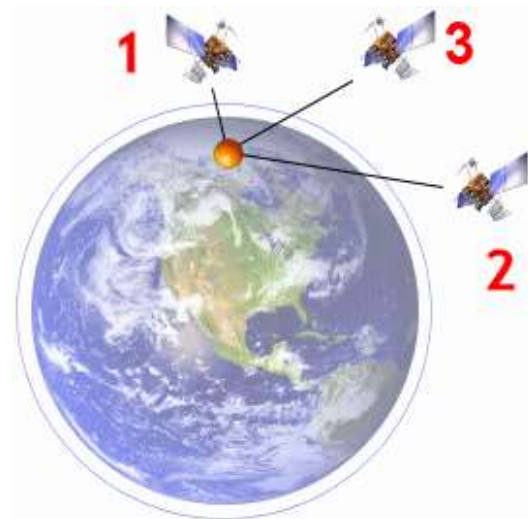
Helymeghatározó rendszerek

- A globális helymeghatározó rendszerek (*Global Navigation Satellite System, GNSS*) feladata a földfelszíni pozíció megállapítása műholdas távolsági mérés alapján
 - a pozíció számítása a műholdak által küldött jelek információi (küldési idő, műhold pozíció) alapján történik
 - a beméréshez több műhold által küldött adatok szükségesek, minél több az adatforrás, annál precízebb a pozicionálás
 - rendszertől függően 20-30 közepes föld körüli (MEO) pályán (kb. 20 000 km-es magasságban) mozgó műhold szükséges a globális beméréshez
 - az 1. generációs rendszerek (pl. *GPS, GLONASS*) után jelenleg a 2. generációsok (pl. *Galileo*) fejlesztése folyik

Helymeghatározás és navigáció

A GPS rendszer

- A legismertebb globálisan működő navigációs rendszer az amerikai *GPS (Global Positioning System)*
 - 24-32 műhold (jelenleg 31), egy fő és egy tartalék irányítóállomás, 11 antenna, 15 nyomkövető állomás
 - a műholdak 6 csoportra vannak osztva, 60° -os kelet-nyugati eltérésű pályákon, sík terepen maximum 6-12 műhold érzékelhető, ebből minimum 3 szükséges a pozicionáláshoz (4 a 3 dimenziós pozicionáláshoz)
 - 3 dimenziós adatközlés, méteres pontosság



Helymeghatározás és navigáció

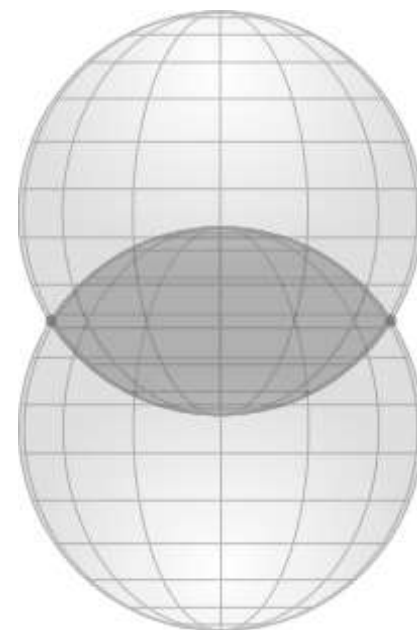
Adatküldés

- A műholdak két frekvencián (L1: 1575,42 MHz, L2: 1227,6 MHz) sugároznak szórt spektrumú jelet (*pseudo-random noise*, *PRN*), amelynek két fajtája van:
 - *Coarse/Acquisition Code (C/A)*: durva elérésű kód, civil használatra (maximum 1 méteres pontosság)
 - *Precision code (P)*: pontos elérésű kód, katonai használatra
- Időkezelésre minden műholdon két atomóra helyezkedik el, amelyek UTC időzónában mérnek, míg a földi pozíciót a WGS84 ellipszoid alapján állapítja meg
- A jel tartalmazza a küldési időt, és a műhold pontos orbitális pozícióját, valamint általános rendszerinformációkat

Helymeghatározás és navigáció

A helymeghatározás folyamata

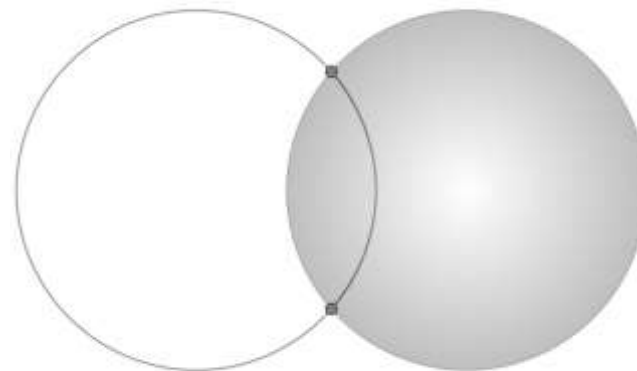
- A műholdadatok alapján a vevő egy műholdra vonatkozó adatai az $[x_i, y_i, z_i, t_i]$ négyessel írhatóak le, amely megadja a műhold pozícióját, valamint az üzenet küldésének idejét
 - ebből a fogadás ideje ($t_{r,uc}$) kiszámolható a hatósugár (p_i) fénysebességgel mérve az adatközlést:
$$p_i = (t_{r,uc} - t_i)c$$
 - a hatósugár alapján megállapítható egy gömb, és a vevő ennek a gömbnek a felületén helyezkedik el
 - kettő gömb metszete megad egy kört, míg három gömb metszete két pontot definiál (*háromszögelés*)



Helymeghatározás és navigáció

A helymeghatározás folyamata

- a két pont közül az egyik a földön kívül helyezkedik el, a másik pont adja meg a vevő elhelyezkedését
- elvileg 3 műhold szükséges, gyakorlatilag a vevő órájában a legapróbb hiba is pozicionálási hibához vezet
 - pl. 1 milliomod másodperc eltérés 300 méteres eltolást okoz
 - nem éri meg drága vevőket készteni pontos órával, a hibakezeléshez szükséges egy negyedik műhold



Helymeghatározás és navigáció

A helymeghatározás folyamata

- a negyedik gömb és a megtalált pont közötti távolság felhasználható a korrekcióra

- a vevő időkorrekciós értéke (b_r) kiszámítható a

$$b_r = \frac{p_4 - r_4}{c}$$

ahol r_4 a jelenleg mért távolság a negyedik műholdtól

- A GPS vevő feladatai:
 - a műholdak adatainak fogadása
 - a pozíció megállapítása háromszögeléssel és a hibák korrigálása a lehetőségeknek megfelelően
 - a pozíció közlése egy adott formátumon

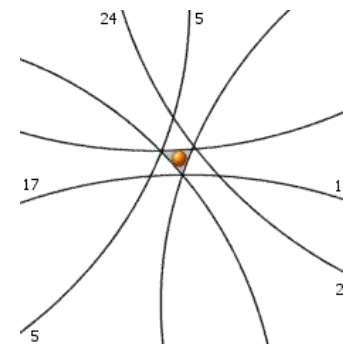
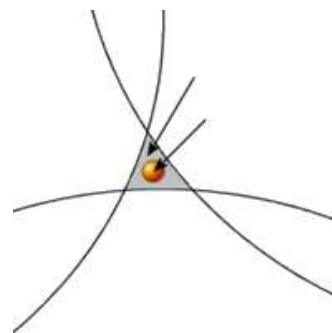
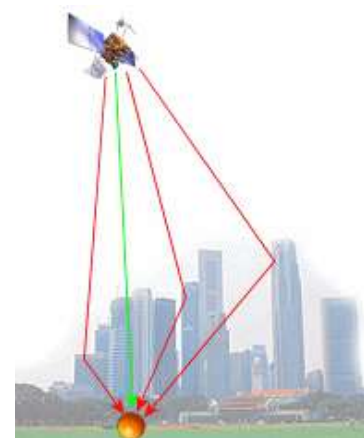
Helymeghatározás és navigáció

Hibák

- A pozíció meghatározása során (az órahiba mellett) különböző külső hibaforrásokkal is számolnunk kell

- pl. légköri zavarok, időjárás, műhold pályájának hibái, felszíni visszaverődés

- a háromszögelés nem két pontban metsződik, hanem egy területet ad, amelynek egy pontjában helyezkedik el a vevő, a műholdak számának növelésével a terület csökkenthető



Helymeghatározás és navigáció

Pontosság

- A mérés pontosságát a *DOP (Dilution of Precision)* érték határozza meg
 - a különböző korlátozó tényezők kombinációja
 - 1 alatt: tökéletes, 1-2: kitűnő (magas precíziójú eszközöknek), 2-5: jó, 5- közepes (közúti navigációra még elfogadható), 10-20: gyenge, 20 felett: elégtelen
 - megadható külön vertikális (VDOP), horizontális (HDOP), pozíciós (PDOP) és időbeli (TDOP) komponensenként
- A maximális mérési hiba a DOP és vevő pontosságának szorzata (a kereskedelmi vevők 5-7 m pontosak, így pl. 6-os DOP mellett $5 \cdot 6 = 30$ m hibakorlát várható)

Helymeghatározás és navigáció

Előnyök, hátrányok

- A rendszer előnyei:
 - napszaktól, (adott határig) sebességtől és földfelszíni magasságtól független
 - adott korlátokon belül (néhány méter) pontos eredményt ad gyengébb minőségű vevővel is
- A rendszer hátrányai:
 - a szükséges adatok vétele és kalibrációja sok ideig tart
 - csak nyílt területen alkalmazható, a visszaverődő jelek nem küszöbölhetőek ki teljesen
 - időjárási tényezők rontják az érzékelést, erős napkitörések alatt használhatatlan

Helymeghatározás és navigáció

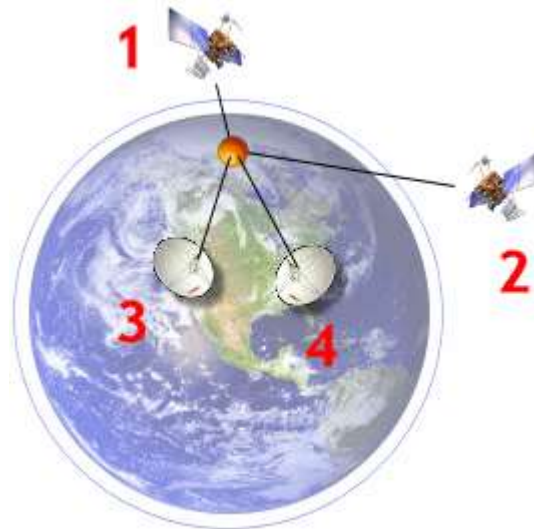
Támogatott GPS

- Amennyiben a rendszer által biztosított pontosság nem elegendő, lehetőségünk van további eszközökkel növelni
- A támogatott GPS (Assisted GPS, aGPS) lehetőséget ad az egyéb hálózatba (pl. internet, mobilhálózat) is bekapcsolt eszközöknek további adatok letöltését a hálózatról, két módja:
 - kliens oldali pozicionálás javítása (pontos idő lekérés, műholdadatok továbbítása, bázisállomások adatainak elérése)
 - szerver oldali pozicionálás (egy precízebb számítást végezni képes szerver, a bázisállomástól mért távolság segítségével adja meg a vevő pozícióját)

Helymeghatározás és navigáció

Differenciális GPS

- Egy továbbfejlesztése a GPS rendszernek a *differenciális GPS* rendszer (*Differential GPS, DGPS*), amely földi állomások segítségével korrigálja a GPS mérési hibáit
 - a földi vezérlőállomások helyzete állandó, hibakorrekciós rádiójelet továbbítanak
 - egy állomás hatótávolsága 370 km, de távolodva csökken a biztonság (pl. 100 km-re a hiba mértéke 0,67 m-re csökken)
 - a vevő rendelkezhet külön antennával a korrekciós jel vételére, egyszerre több korrekciós jelet is fogadhat



Helymeghatározás és navigáció

További globális helymeghatározó rendszerek

- A *GLONASS* Szovjetunió felbomlása után fejlesztése és karbantartása elmaradozott, de 2011-től újból globális lefedettséggel bír (24 műhold a 27-ből).
- Egyre elterjedtebbek a GPS+GLONASS képes eszközök.
- Technológiai összevetés a *GPS*-szel:
 - A *GLONASS* frekvencia felosztású (*FDMA*), míg a *GPS* kód felosztású (*CDMA*) többszörös hozzáférésű rendszer.
 - Emiatt a belső jelkésés (vevő antennája és jelfeldolgozó egysége közötti szakasz) műholdanként eltérő.
- A *Galileo* az EU kereskedelmi alapú alternatívája.
 - Jelenleg 18 műholddal rendelkezik, a tervek szerint 2019-ig ezt 24-re (globális lefedettség), 2020-ra 30-ra bővítik.

Helymeghatározás és navigáció

Navigációs rendszerek alkotóelemei

- A navigációs rendszer feladata útvonal meghatározása egy kiinduló pontból egy célpontba, részei:
 - *vevő*, amely megadja a helymeghatározó rendszer (pl. GPS) által megjelölt koordinátákat szabványos csatornán (pl. MNEA)
 - *térképi adatbázis*, tartalmazza egy adott terület teljes vektoros térképi megfelelőjét, kiegészítve attribútumokkal
 - *útvonalkereső algoritmus*, amely megadja az aktuális pont és a célpont közötti megfelelő utat
 - *vizualizációs és interakciós felület*, amely megjeleníti a navigációt a felhasználó számára, és fogadja a bemenetet

Helymeghatározás és navigáció

Navigációs rendszerek típusai

- A navigációs rendszer működése szerint lehet:
 - *kapcsolatmentes (offline)*: a térképi adatok a navigációs készülékben helyezkednek el, amelyet külön tudunk frissíteni
 - a frissített tartalom több hónap lemaradásban lehet a ténylegessel
 - általában kifejezetten navigációs készülékek szoftverei
 - *folyamatos kapcsolatú (online)*: az adatok betöltésére és a navigáció egy szerver segítségével történik, amely az adatokat folyamatosan biztosítja
 - állandó szélessávú (internetes) kapcsolat szükséges, általában mobil telefonok szoftverei

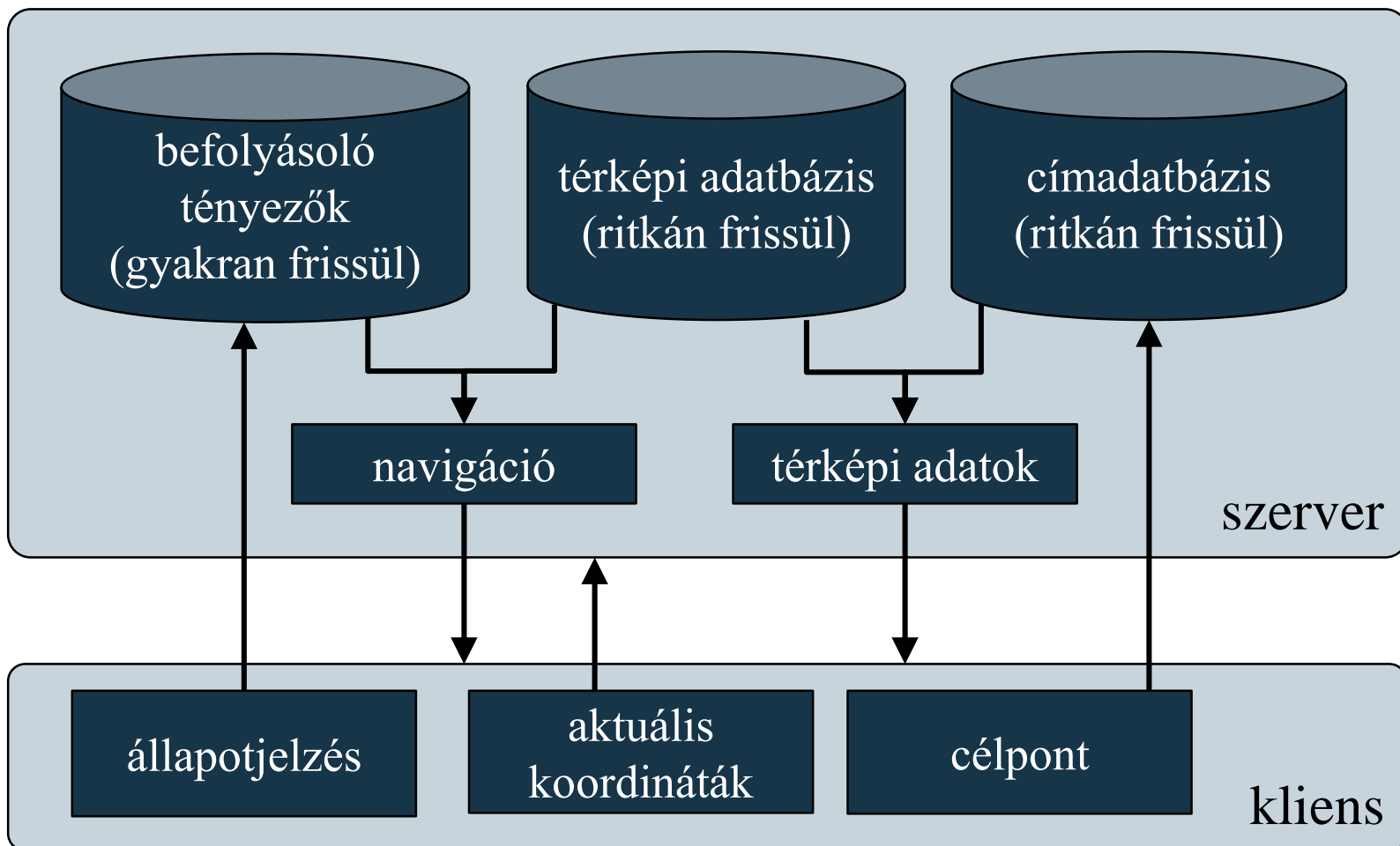
Helymeghatározás és navigáció

Kapcsolattartás

- Az online rendszerek hálózati tevékenységei:
 - *térképi tartalom letöltése*: így az adatok nem foglalnak helyet az eszközön (csak a gyorsítótár), továbbá a szerveren tárolt friss adatok kerülnek letöltésre
 - *geokódolás*: a pozíció visszafejtése a címből
 - *navigációs útvonal letöltése*: az útvonalszámítást is a szerver végzi, amely rendelkezik a befolyásoló tényezőkkel (pl. forgalmi helyzet, útlezárások)
 - *állapot visszatöltés*: a kliens visszaküldhet adatokat a szerverre (pozíció, sebesség), amely felhasználható befolyásoló tényezők számításában (pl. forgalmi dugók)

Helymeghatározás és navigáció

Kapcsolattartás



Helymeghatározás és navigáció

A TMC rendszer

- A forgalomkövetés leggyakrabban alkalmazott formája a *TMC* (*Traffic Message Channel*), amely FM, DAB, vagy szatellit vivőhullámon keresztül ad tájékoztatást a forgalmi állapotról
 - a forgalmi eseményekhez egy kód tartozik (2048 különböző esemény az Alert C szabvány szerint), amelyet az üzenetben egy pozíció követ, majd további részletes információk
 - RDS-TMC esetén a vivőhullámba másodpercenként 1-3 alkalommal küld 37 bites sorozatokat (a pozíció 16, a kód 11 bit), a pozíciót megfeleltetési táblával kódolja le
 - Magyarországon a pozíciós tábla 2.0 verziója érhető el, a kommunikáció az MR2 (Petőfi Rádió) frekvenciáján fut

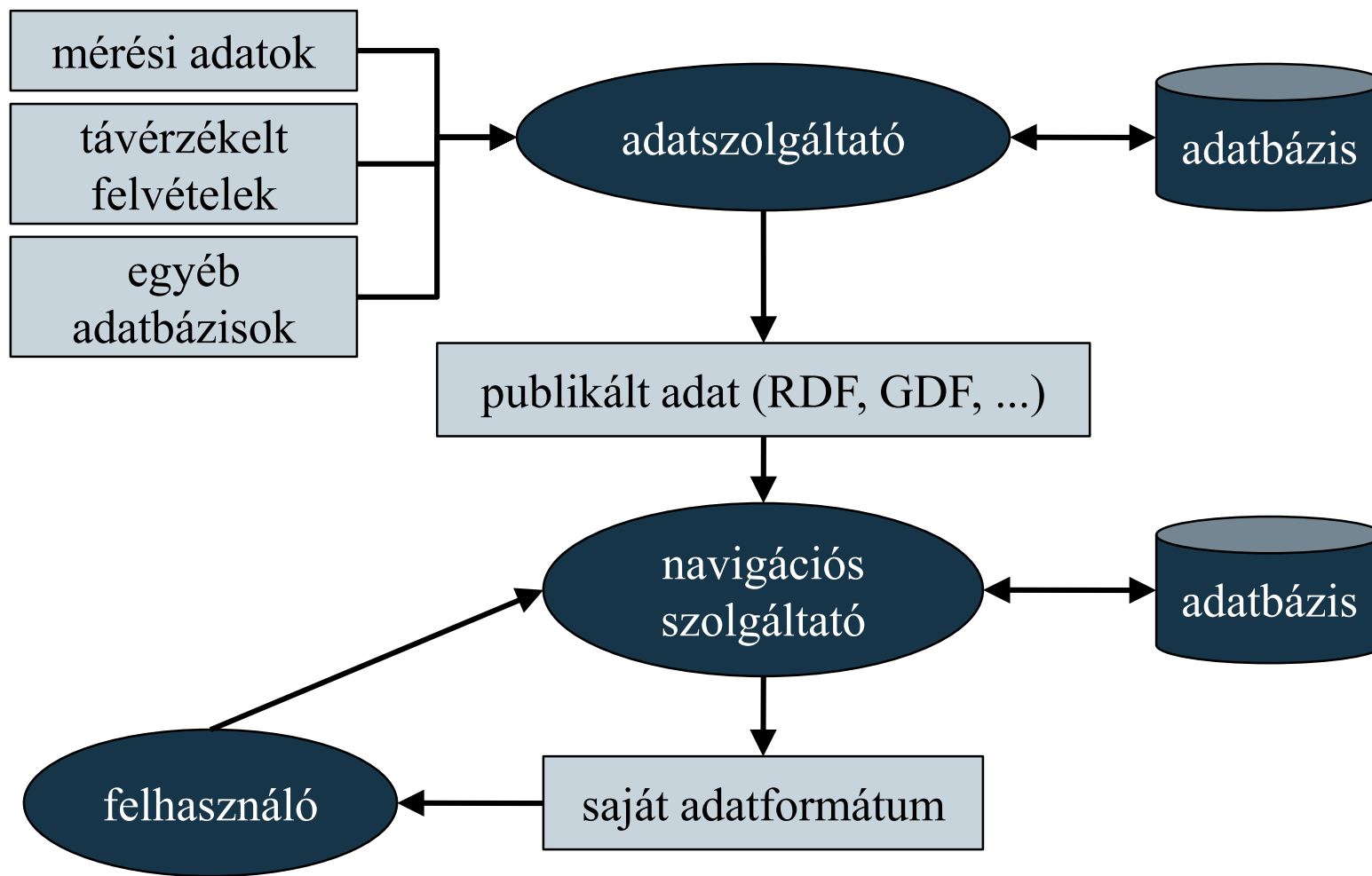
Helymeghatározás és navigáció

Adatok publikálása

- Az adatszolgáltatók (pl. Here, NavteQ, TeleAtlas, TopMap) különböző formátumban teszik elérhetővé az adatokat (*interchange format*), amelyet később adatbázisba kell szervezni, amelyet a felhasználók számára elérhetővé teszünk (*runtime format*)
- A publikálási formátumok megszokott szabványai:
 - általános: *Relational Data Format (RDF)*, *Geographics Data Format (GDF)*, *Standard Interchange Format+ (SIF+)*
 - speciális: *Oracle Data Format (ODF)*
 - egyéni: *NAVStreets* (Here formátum, ArcGIS és MapInfo kompatibilis)

Helymeghatározás és navigáció

Az adattovábbítás folyamata



Helymeghatározás és navigáció

Útvonaltervezés

- Mivel a vektoros úthálózat egy gráfot épít fel, a probléma analóg a *legrövidebb út megtalálásával irányított gráfon*
 - a gráf csúcsai az útszakaszok kereszteződései és végpontjai
 - az élek az útszakaszok, irányítottságuk megegyezik az útszakasz irányítottságával, súlyuk arányos adott áthaladási tényezővel
 - az útszakasz hosszát a határoló pontok távolságával tudjuk kiszámítani a földfelszínen a *Haversine formulával*:

$$2R \sin^{-1} \sqrt{\sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)^2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin\left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2}\right)^2}$$

ahol $R = 6371,009$ km (a föld egyenlítői sugara)

Helymeghatározás és navigáció

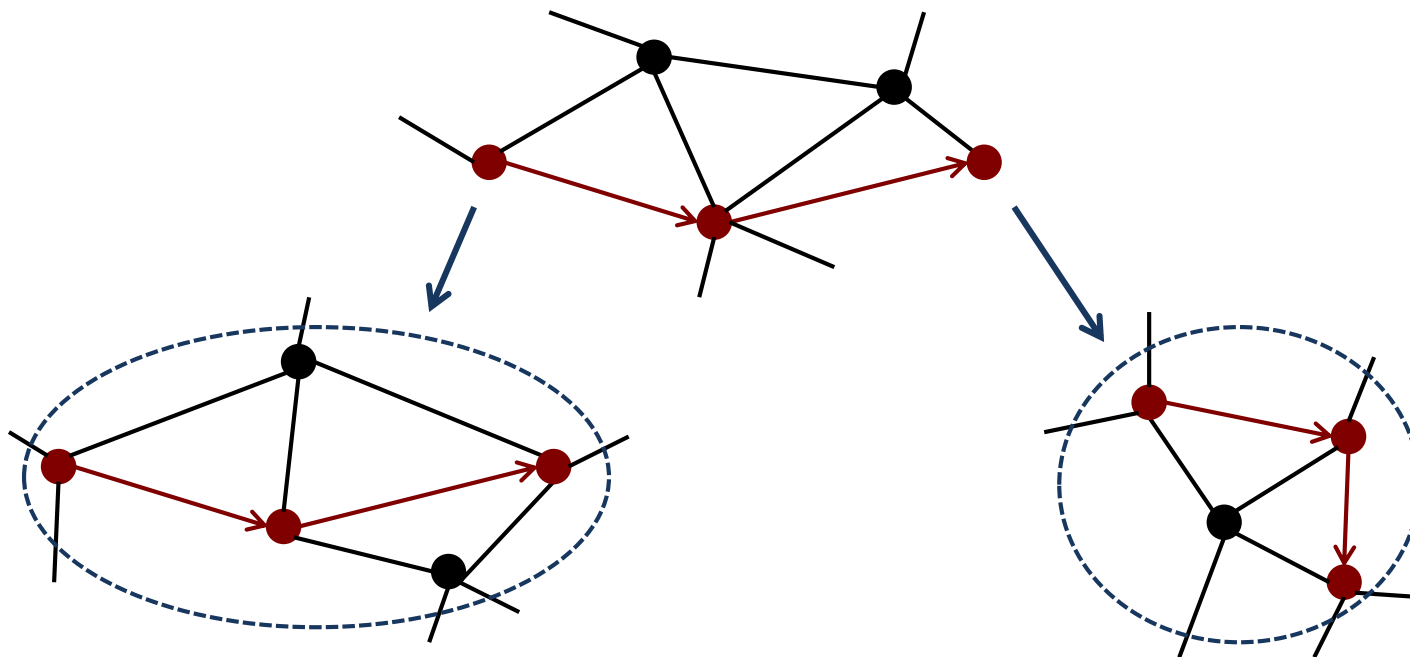
Útvonaltervezés

- Az útvonal hosszának meghatározása módjai:
 - a legrövidebb út kereséséhez összegeznünk kell a köztes utak hosszát
 - a leggyorsabb út kereséséhez az útszakasz teljesítésének idejét vesszük (a hosszat megszorozzuk a sebességhatárral), és minden csúcspontnál növelhetjük ezt a költséget további késleltető okok miatt (pl. kanyarodás, forgalmi lámpa)
 - amennyiben el akarunk kerülni egy útszakaszt, akkor az élköltségét végtelenre állíthatjuk
 - ha figyelembe vesszük az aktuális, vagy korábbi forgalmi adatokat, módosíthatjuk az élköltség számítás módját, és hatékonyabb útvonaltervet érhetünk el

Helymeghatározás és navigáció

Útvonaltervezés összetett gráfokon

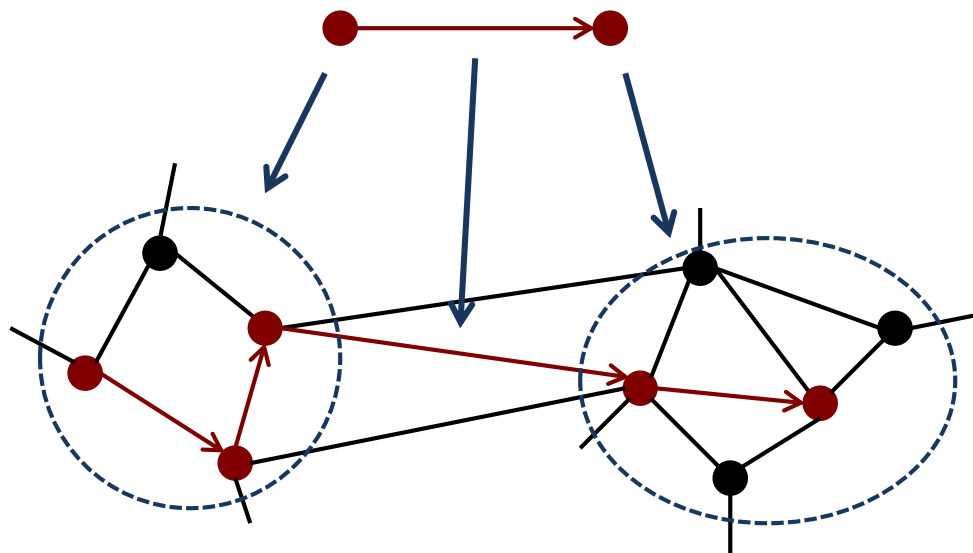
- A gráf szerkezetében figyelembe kell venni, hogy a térkép több rétegből is állhat, így a gráf is több rétegen át vezethet
 - először a felsőbb rétegekben végezzük el a keresést, majd haladunk az alsóbbak felé



Helymeghatározás és navigáció

Útvonaltervezés összetett gráfokon

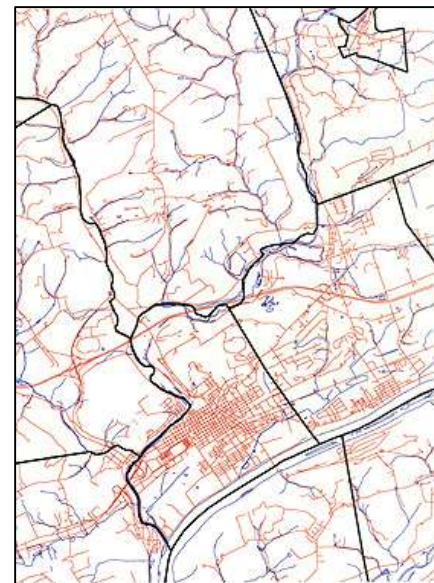
- a különböző rétegek megfelelő csúcsait össze kell kapcsolnunk, így egy csúcs, illetve egy él többel reprezentálhat a felsőbb rétegben, de mindegyik alsóbb rétegű csúcshoz egyértelműen megadható a felsőbb rétegben hozzá tartozó csúcs



Helymeghatározás és navigáció

Útvonaltervezés hierarchikus gráfokon

- Egy réteg esetén is felállíthatunk egy hierarchikus sorrendet az élek és csúcsok között
 - ez általában 4-5 szintet takar: fizetős autópálya, nem fizetős autópálya, autóút, főút, mellékút, ...
 - az útvonaltervezés során elsőbbséget rendelhetünk bizonyos szintekhez, illetve kizárhatjuk őket
 - külön gráfokat alkothatunk, amelyek csak bizonyos szintszámig bezárólag tartalmazzák az éleket



Helymeghatározás és navigáció

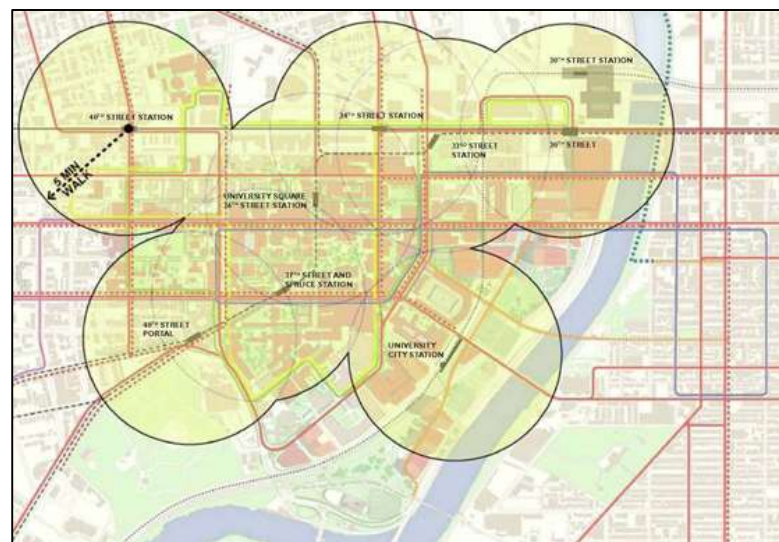
Útvonalkereső algoritmusok

- Az útvonalkeresést csak pozitív élsúlyokból álló gráfon végezzük, így alkalmazható a *Dijkstra* vagy az A^* algoritmus
 - az A^* heurisztikát használ, figyelembe veszi a célpont távolságát a már kiszámolt távolságtól
 - további lehetséges javítások:
 - nem a célirány körzetébe vezető útvonalak kizárása
 - útvonaltervezés a kezdőpontból és a végpontból párhuzamosan, és az útvonalak egyesítése
 - alternatív útvonalak keresése (pl. *K-Dijkstra*)
- Az útvonal újratervezés megvalósítható visszalépéses, vagy mélységi kereséssel

Helymeghatározás és navigáció

Tranzit csomópont alapú útvonalkeresés

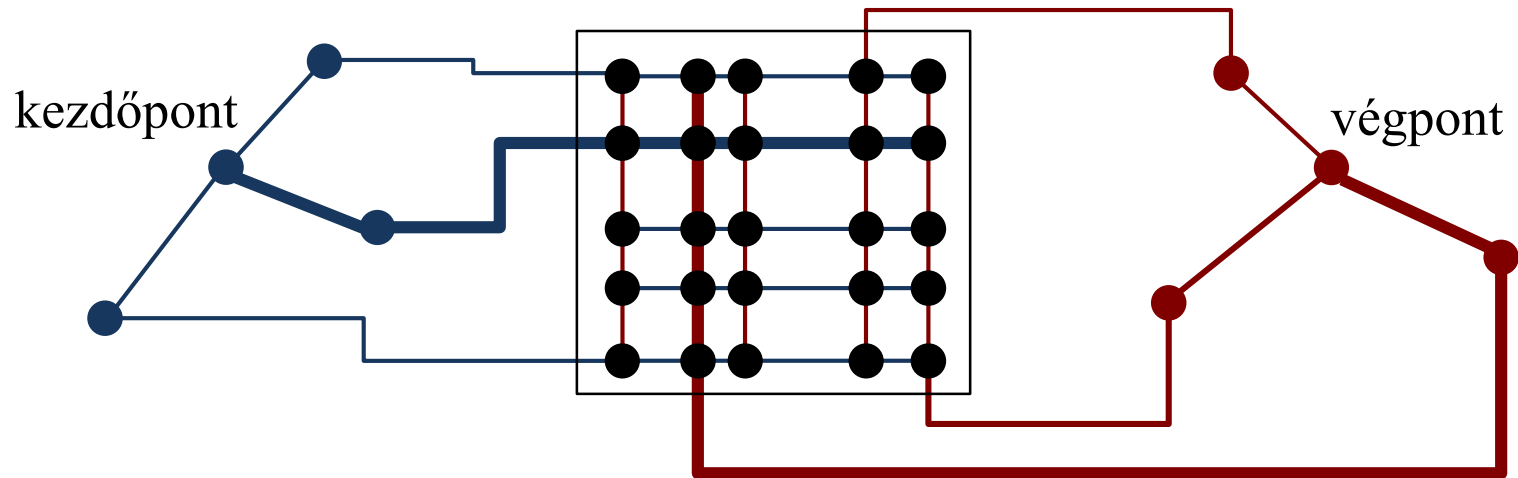
- Egy további lehetőség a gyorsításra a tranzit csomópontos útvonalkeresés (*transit node routing*)
 - bizonyos fontosabb forgalmi csomópontokat, mint tranzitpontokat eltárolunk, ezek a tranzitpontok közel azonos távolságra vannak egymástól
 - egy táblázat (*tranzittábla*) tartalmazza a köztük átvezető legrövidebb utakat (ez statikus időben kiszámítható, és mellékelhető az adatbázishoz)



Helymeghatározás és navigáció

Tranzit csomópont alapú útvonalkeresés

- legrövidebb út kereséskor egy adott körzeten belüli tranzitpontokba vezető utakat keressük meg mindkét végpontból, amelyek távolsága már adott



- jelentősen növeli a hatékonyságot, de befolyásolja az útvonal optimalizáltságát a pontok megválasztása