

Data-assimilaation menetelmät

Reima Eresmaa
Ilmatieteen laitos

HydMet: Sään ennustaminen



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

Sisältö

- Johdanto data-assimilaation maailmaan
- Numeerinen säänennustusmalli: peruskäsitteitä
- Säähavainnot
 - Mitä havaintoja data-assimilaatiossa käytetään?
 - Miten eri havainnot jakautuvat maantieteellisesti?
 - Mitä ongelmia havaintojen hyödyntämiseen liittyy?
- Data-assimilaation tilastomatemattisia perusteita



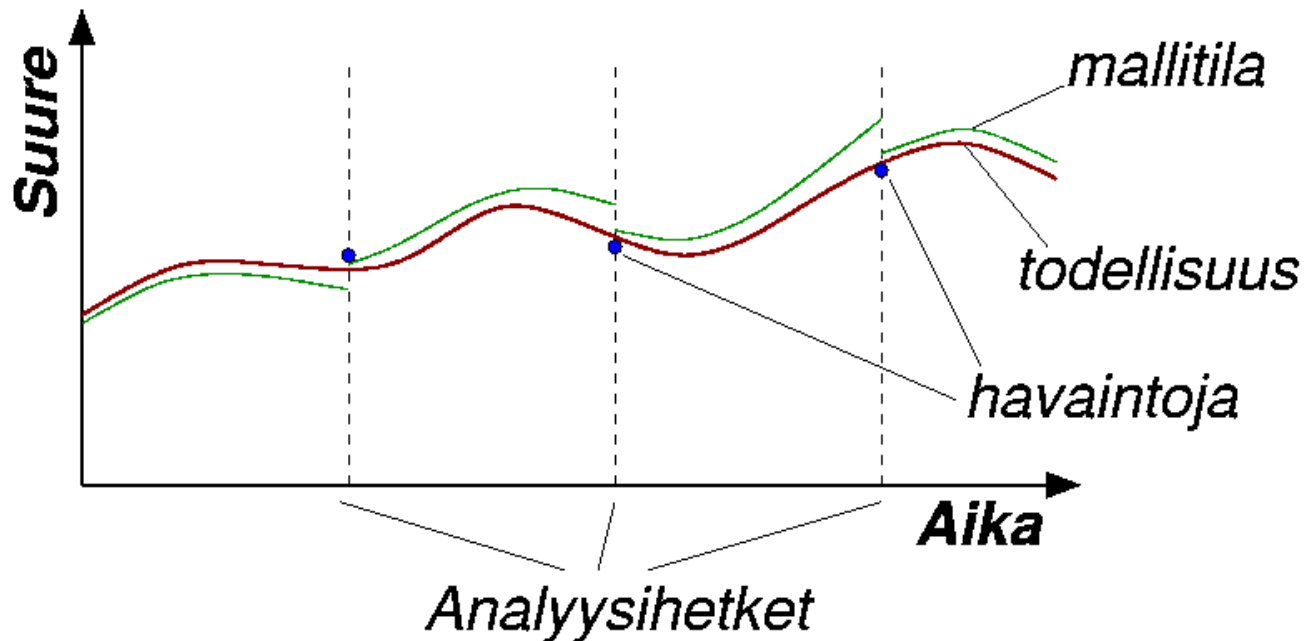
Johdanto

- Data-assimilaatio: heterogeenisen tiedon yhteensulauttaminen
- Meteorologiassa data-assimilaation tehtävänä on tuottaa *vallitsevan säätilan analyysi* numeeriselle ennustusmallille
- vrt. päivystävän meteorologin tekemä synoptinen analyysi
- Miten tietokone saadaan tekemään analyysi siten, että siitä johdetut ennusteet osuisivat kohdalleen mahdollisimman hyvin?
 - Vallitsevan säätilan mahdollisimman realistinen kuvaus
- Numeeristen analyysimenetelmien kehitys on keskeinen osa säänennustusmallin kehitystyötä



Johdanto

- Ilmakehä on kaottinen järjestelmä, jossa kaikki ilmiöt vuorovaikuttavat toistensa kanssa
 - Tieto vallitsevasta säätilasta on ehdoton edellytys sääennusteen onnistumiselle
- vrt. ilmastomallit, joissa mallin alkutilanteen merkitys pyritään saamaan mahdollisimman pieneksi



Johdanto

- Analyysin on edustettava niitä ilmakehän ilmiöitä joita ennustusmallilla pyritään kuvaamaan
 - planetaariset aallot
 - synoptiset häiriöt
 - mesomittakaavan ilmiöt
 - pienimittakaavaiset ja ei-meteorologiset ilmiöt on suodatettava pois
- Analyysin on oltava fysikaalisesti uskottava
 - jatkuvuus



Säänennustusmalli

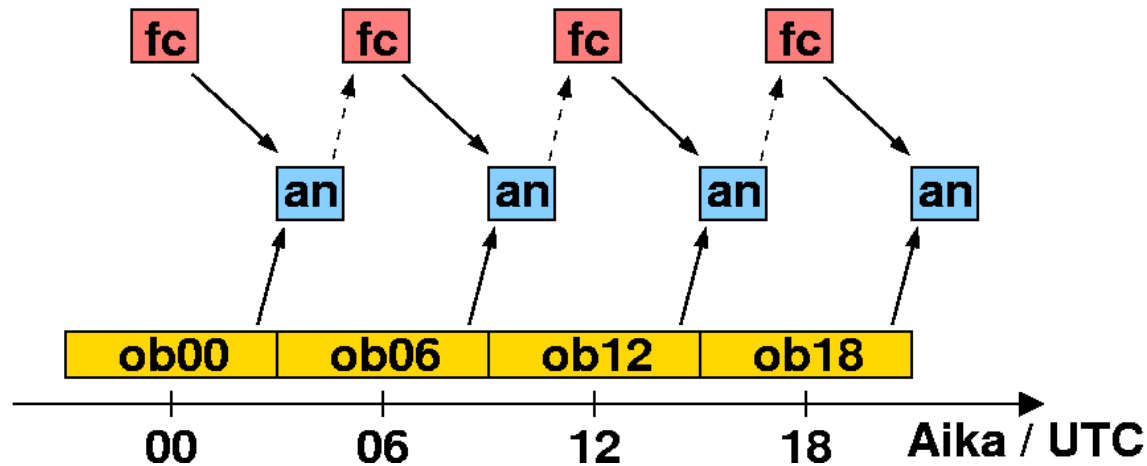
Mallihila

- Ilmakehämalli kuvaa sääsuureiden jakaumat kolmiulotteisessa mallihilassa
 - **ilmanpaine, lämpötila, kosteus ja tuulen pohjois- ja itäkomponentit**
- Hilaruudun koko on nykyisin luokkaa
 - 10km x 10km alueellisessa ilmakehämallissa
 - 50km x 50km globaalissa ilmakehämallissa
- Malli sisältää tyypillisesti 30-60 laskentatasoa; alimmat kuvaavat rajakerrosta, ylimmät stratosfääriä
- Mallimuuttujien tyypillinen lukumäärä 20 000 000



Säänennustusmalli

Operatiivinen toiminta



- *Analyysi* (**an00**, **an06**, ...) tuotetaan data-assimilaation menetelmin hyödyntäen *havaintotietoa* (**ob00**, **ob06**, ...) ja lyhyen aikavälin *ennustetta* (**fc18+06**, **fc00+06**, ...)
- *Ennuste* tehdään integroimalla mallia ajassa eteenpäin analyysistä lähtien



Säähavainnot

In situ -mittaukset

- **Radioluotaukset**
 - lämpötila, kosteus ja tuuli
 - pystyprofiilit havaintopaikan yltä
- Synoptinen havaintoverkko ja laivat
 - **pintailmanpaine**, 10m tuuli, 2m lämpötila ja -kosteus
 - pintahavaintojen merkitys (nykyään) melko vähäinen
- **Lentokonehavainnot**
 - lämpötila, kosteus ja tuuli
 - pystyprofiilit lentokenttien kohdalta
 - vapaa ilmakehä lentoreittien varrella



Säähavainnot

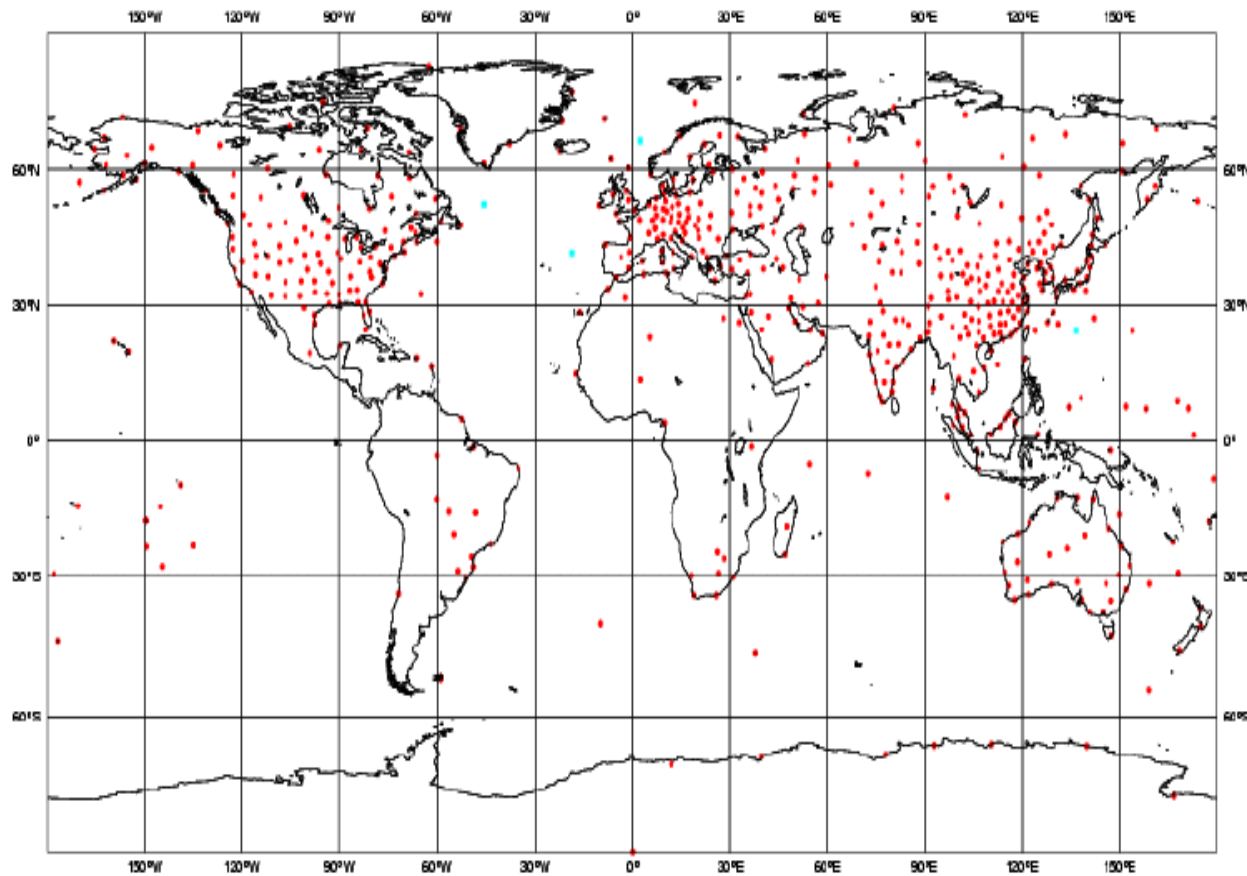
Kaukokartoitusmenetelmät

- **Sääsatelliitit**
 - irradianssi --> lämpötilan ja kosteuden pystyprofiilit
 - (pintailmanpaine, pintatuuli)
- Säätukaverkko
 - (tutkaheijastuvuus --> sadealueen sijainti)
 - tutkasäteen suuntainen tuulikomponentti --> 3D -tuulikenttä
- Tuulikeilaimet
 - tuulen pystyprofiili
- (Navigointisatelliittijärjestelmät)



Säähavainnot

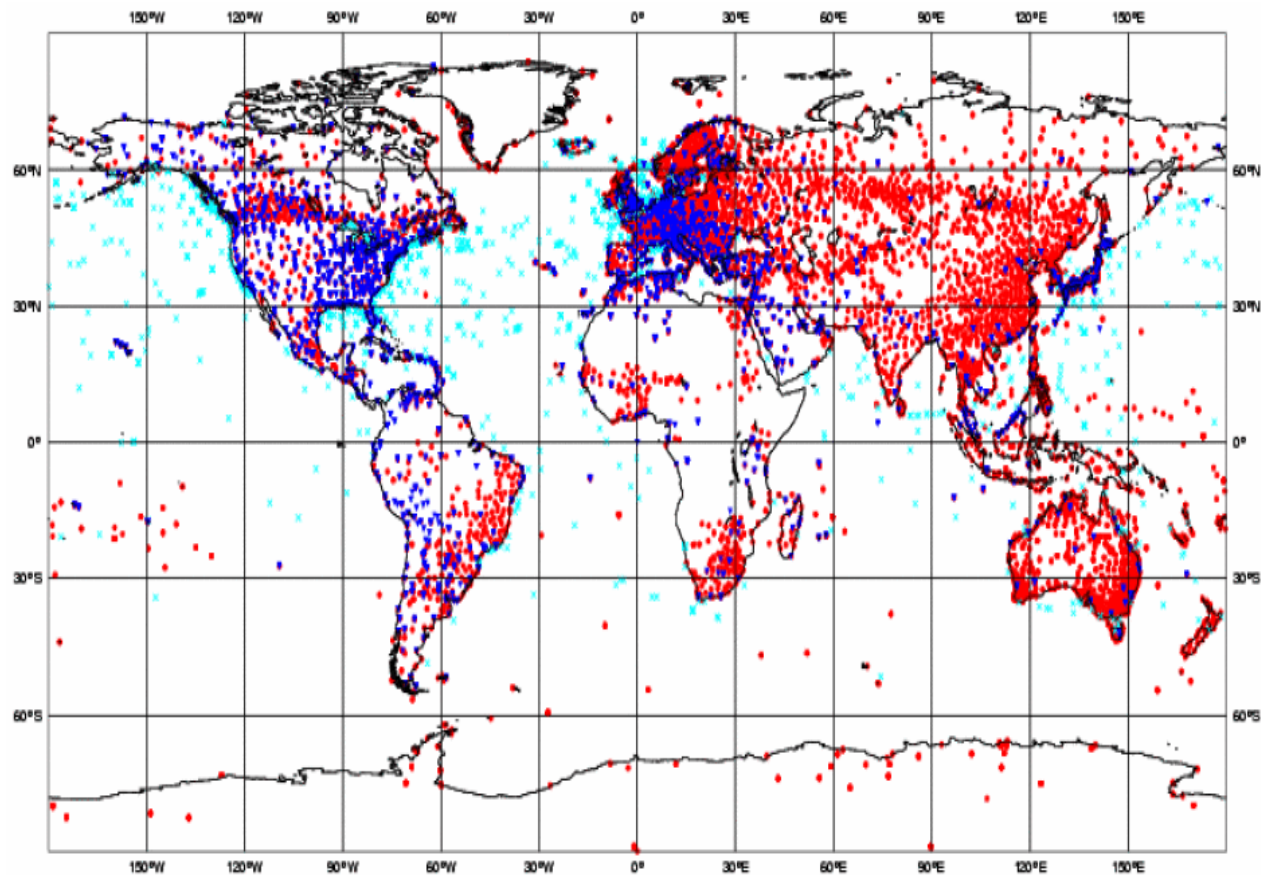
Havaintojen maantiet. jakautuminen: radioluotaukset



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

Säähavainnot

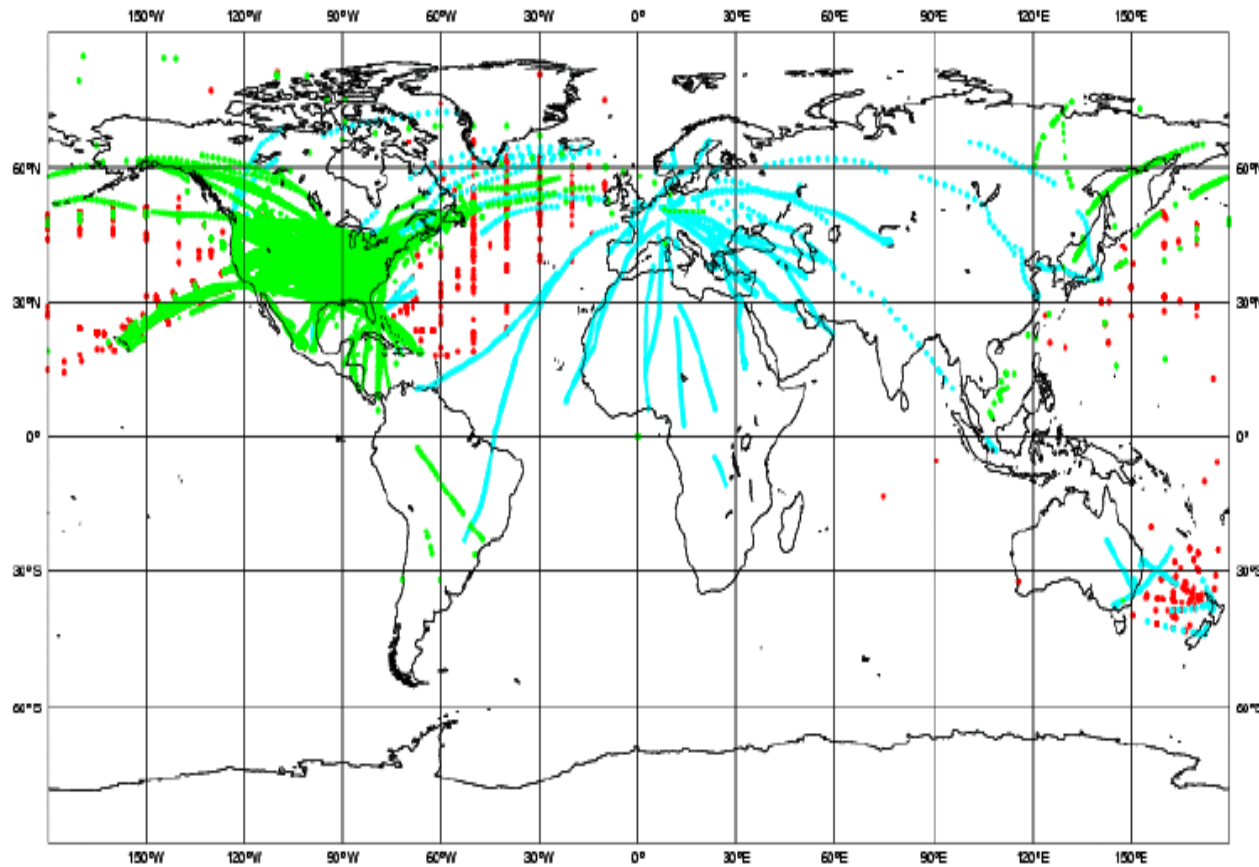
Havaintojen maantiet. jakautuminen: synop-havainnot



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

Säähavainnot

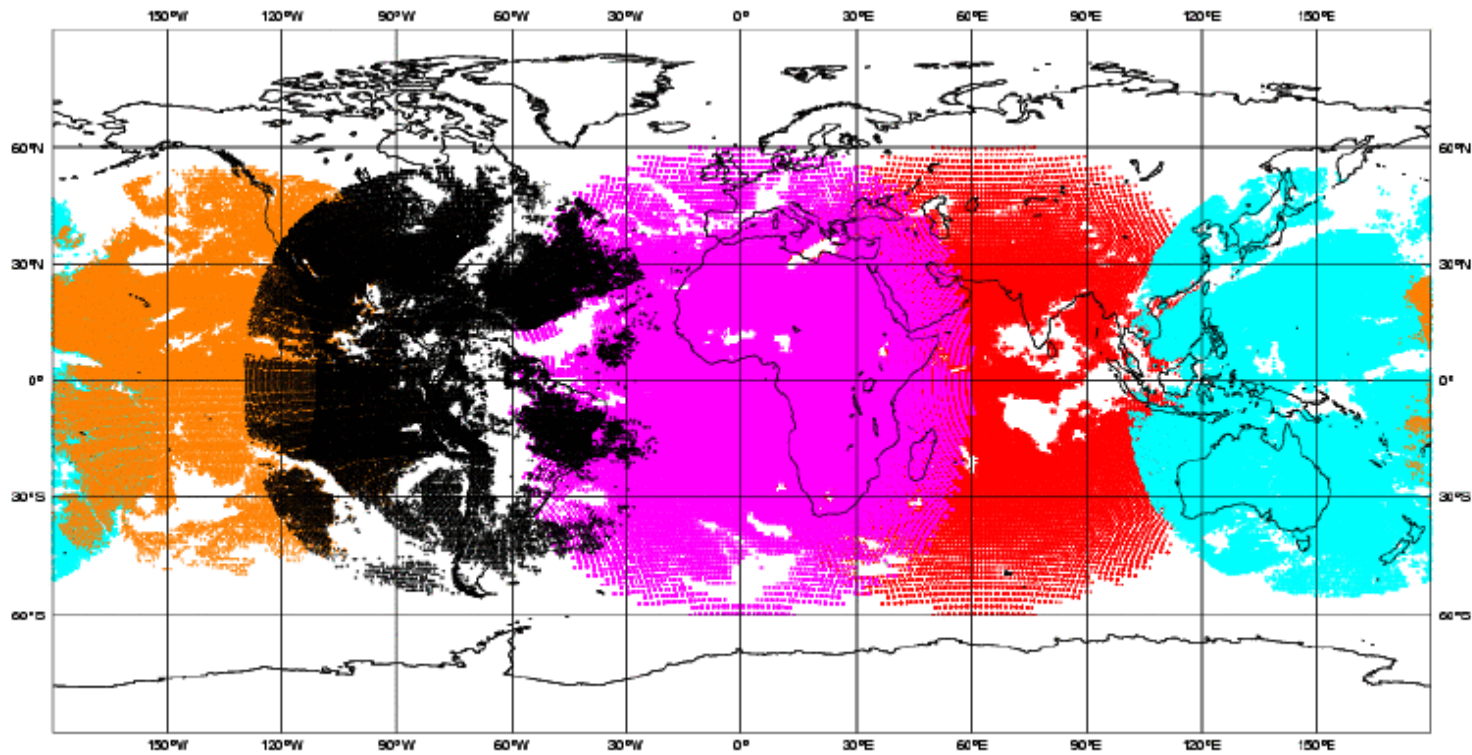
Havaintojen maantiet. jakautuminen: lentokonehavainnot



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

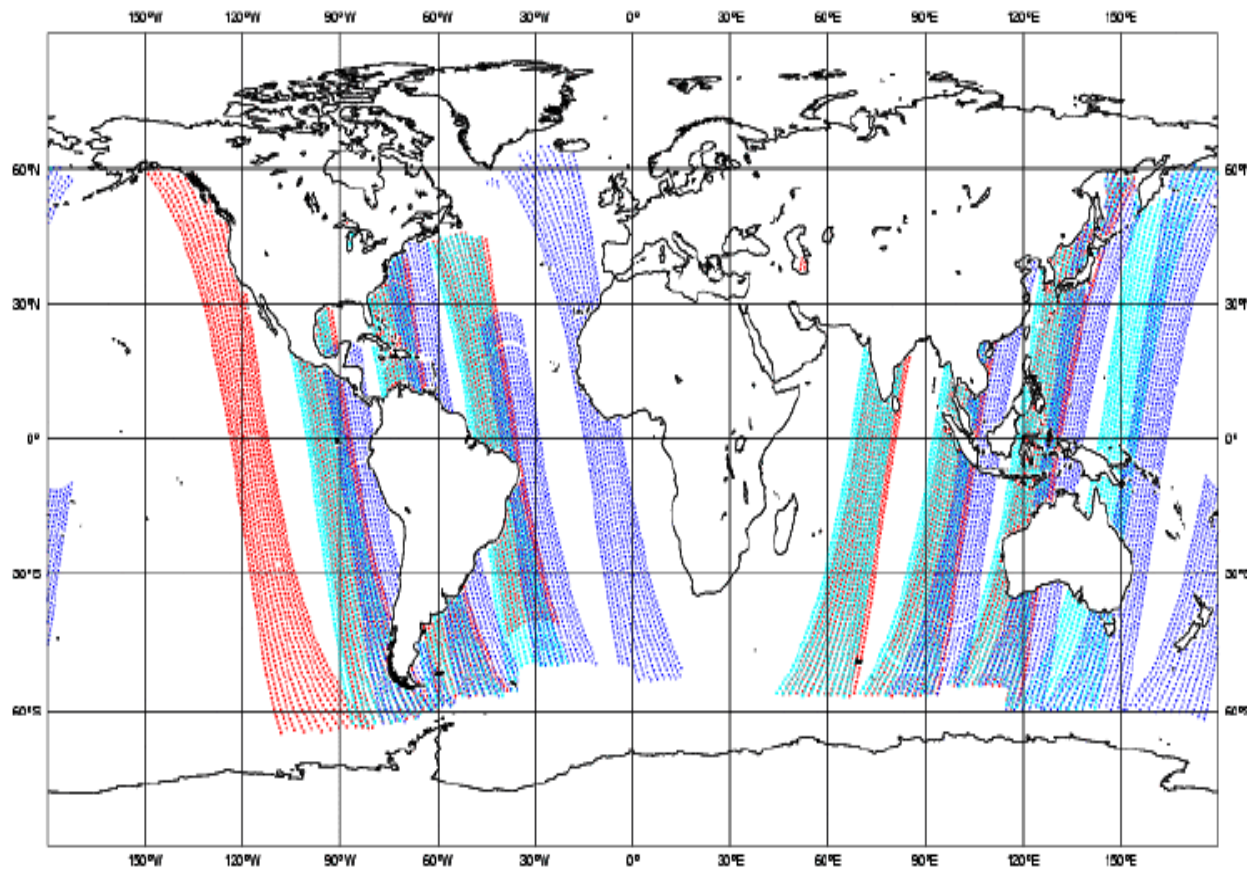
Säähavainnot

Havaintojen maantiet. jakautuminen: geostationääriset satelliitit



Säähavainnot

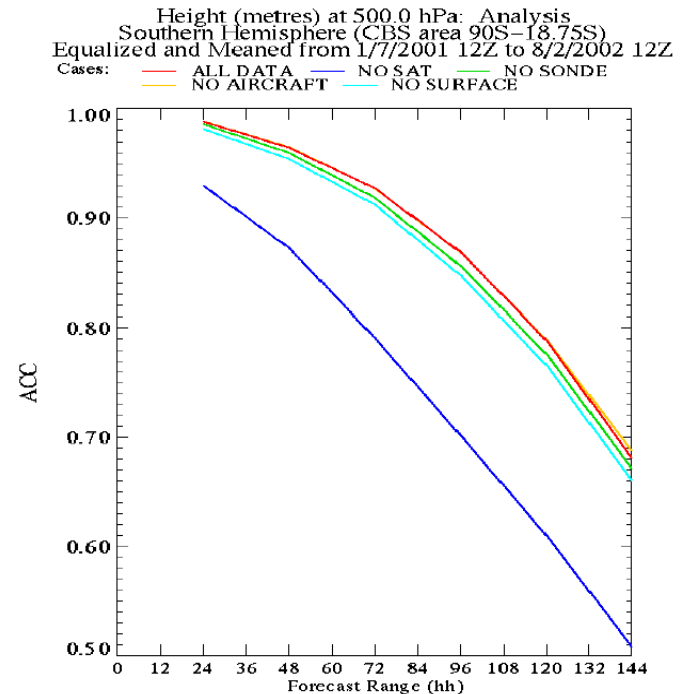
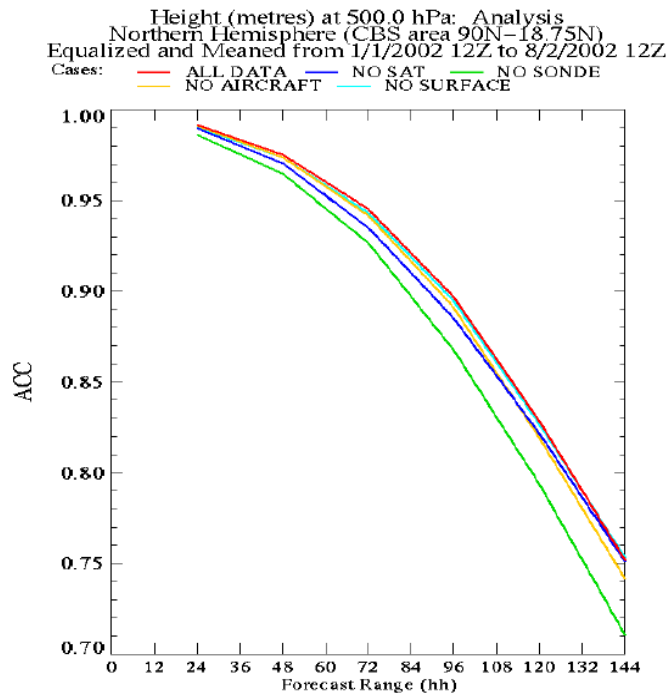
Havaintojen maantiet. jakautuminen: naparatasatelliitit



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

Säähavainnot

Eri havaintotyyppien merkitys (UK Met Office)



- Pohjoisella pallonpuoliskolla radioluotaukset ovat tärkein tietolähde
- Eteläisellä pallonpuoliskolla satelliittihavaintojen merkitys on suurin

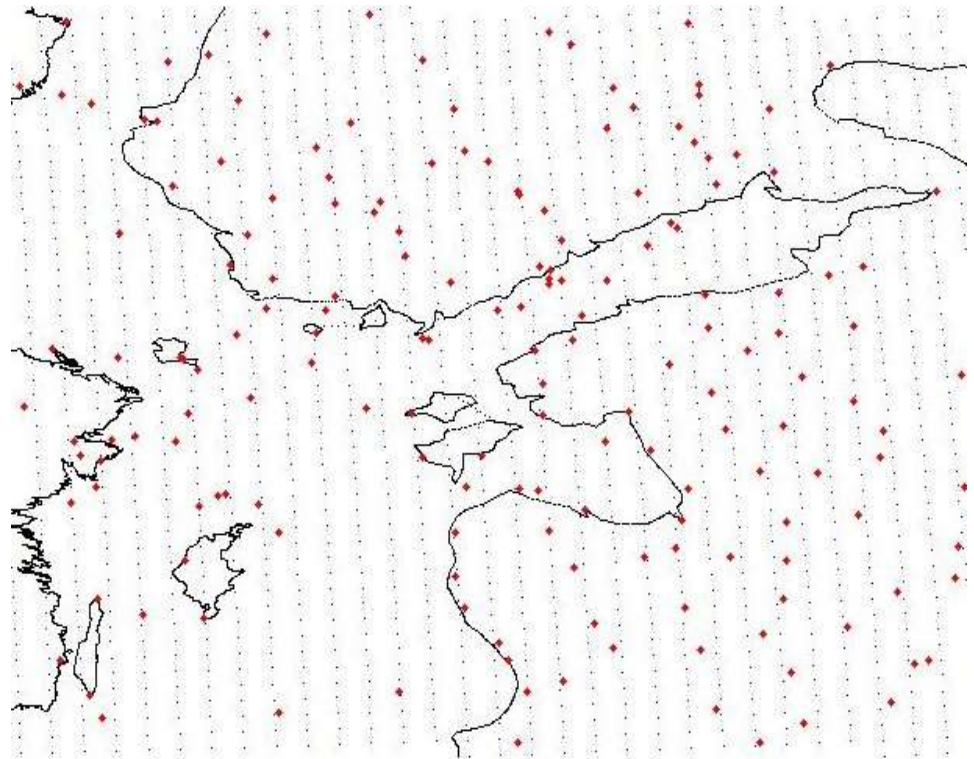


Säähavainnot

Havaintoihin liittyviä ongelmia

Ongelma:

- Havaintojen lukumäärä on yleensä kertaluokkaa pienempi kuin analyysiongelman vapausasteiden lukumäärä; ts. analyysiongelma on alimääriteltä



Säähavainnot

Havaintoihin liittyviä ongelmia

Ongelma:

- Havaintojen lukumäärä on yleensä kertaluokkaa pienempi kuin analyysiongelman vapausasteiden lukumäärä; ts. analyysiongelma on alimääriteltä

Ratkaisu:

- Käytetään alkuarvausta ilmakehän tilasta, eli ennakkokenttää; ennakkokenttänä käytetään yleensä edellisestä analyysistä johdettua lyhyen aikavälin ennustetta
 - analyysiongelma muuttuu ylimääritellyksi ja siis ratkaistavaksi
 - ennakkokentän hilapistearvot voidaan ajatella pseudohavaintoina, joten havaintojen kokonaismäärä on aina suurempi kuin analysoitavien hilapistearvojen määrä

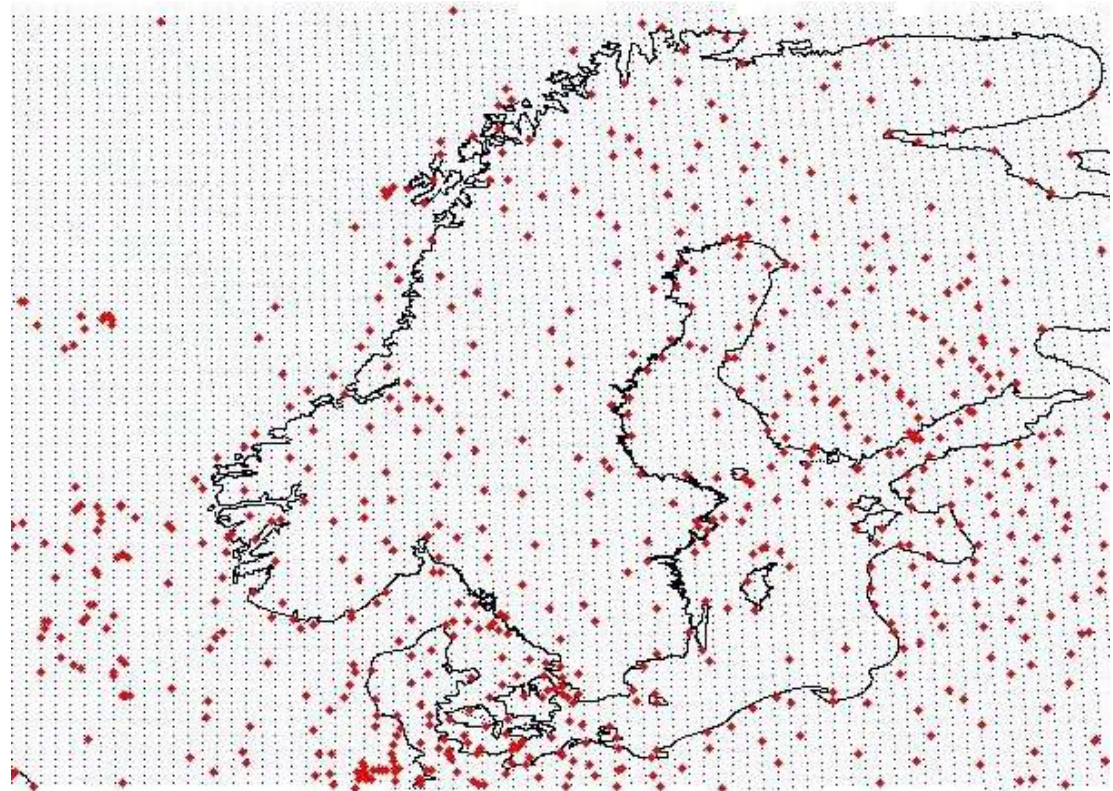


Säähavainnot

Havaintoihin liittyviä ongelmia

Ongelma:

- Havaintoasemaverkon geometria on epäsäännöllinen
 - esim. valtamerillä asemaverkko on harva, ja mantereillakin varsin epähomogeeninen



Säähavainnot

Havaintoihin liittyviä ongelmia

Ongelma:

- Havaintoasemaverkon geometria on epäsäännöllinen
 - Esim. valtamerillä asemaverkko on harva, ja mantereillakin varsin epähomogeeninen

Ratkaisu:

- Havaintojen mallintaminen ennakkokenttää käyttäen
 - mallisuureiden interpolointi hilapisteiköstä havaintopisteisiin

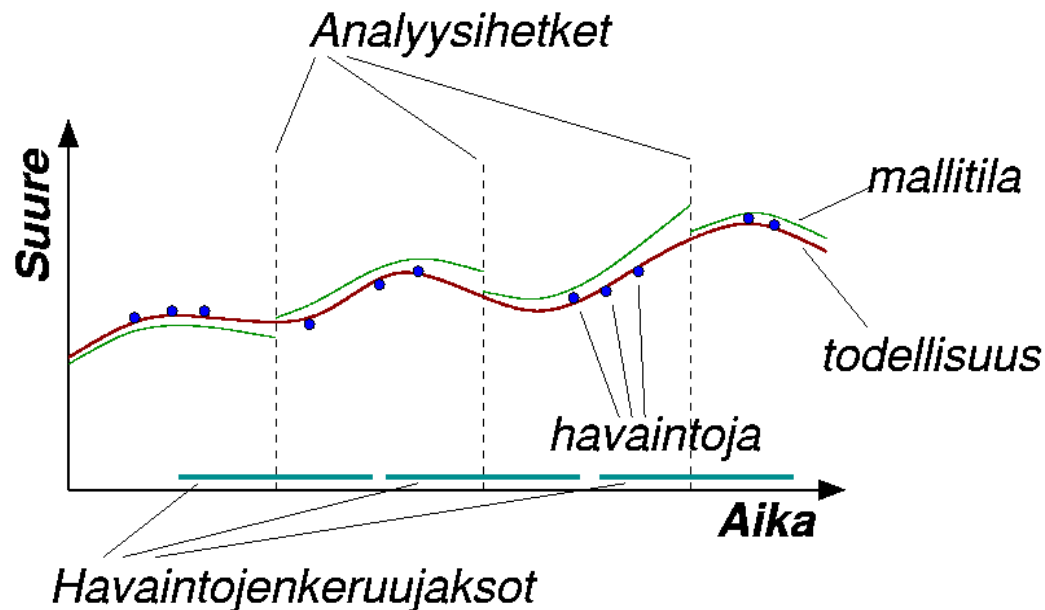


Säähavainnot

Havaintoihin liittyviä ongelmia

Ongelma:

- Havaintohetki ei ole sama kuin analyysihetki;
 - säätilan muuttuminen havaintojenkeruujakson aikana



Säähavainnot

Havaintoihin liittyviä ongelmia

Ongelma:

- Havaintohetki ei ole sama kuin analyysihetki;
 - säätilan muuttuminen havaintojenkeruujakson aikana

Ratkaisu:

- Voidaan ratkaista kytkemällä assimilointijärjestelmään dynaaminen ilmamallin malli (laskennallisesti vaativa menetelmä)
- Havaintojenkeruujakson (assimilointijakson) pitäminen riittävän lyhyenä ja analyysin tekeminen riittävän usein (käytännöllisempi ratkaisu)



Säähavainnot

Havaintoihin liittyviä ongelmia

Ongelma:

- Havaintosuure ei välttämättä ole sama kuin analysoitava suure
 - koskee erityisesti kaukomittauksia
 - esim. sääsatelliitin mittaama irradianssi, jonka odotetaan tuovan tietoa ilmakehän lämpötilasta

Ratkaisu:

- Havaintojen mallintaminen ennakkokenttää käyttäen
 - mallisuureiden interpolointi hilapisteiköstä havaintopisteisiin
 - havaintosuureen ja analyysisuureiden välinen *fysikaalinen kytkentä*



Säähavainnot

Havaintoihin liittyviä ongelmia

Ongelma:

- Havaintoihin sisältyvä havaintovirhe
 - *satunnainen, systemaattinen ja karkea* virhe
 - *edustavuusvirhe*: havainto edustaa (pienimittakaavaisia) ilmiöitä, joita malli ei pysty käsittelemään

Ratkaisu:

- Satunnainen virhe otetaan huomioon tilastomatemattisin menetelmin
- Systemaattinen virhe pyritään poistamaan havainnoista
- Karkeasti virheelliset havainnot pyritään eliminoimaan
- Edustavuusvirheen vaikutus pienenee havaintojen määrän kasvaessa



Säähavainnot

Havaintoihin liittyviä ongelmia

Edellä esitettiin ratkaisuja havaintojen hyödyntämiseksi *numeerisesti tehtävässä* säätilan analysoinnissa.

Miten samat ongelmat voitaisiin ratkaista päivystävän meteorologin tekemän *synoptisen analyysin* yhteydessä?

- **Havaintojen verraten pieni lukumäärä?**
- **Havaintoasemaverkon epäsäännöllinen geometria?**
- **Havaintohetki ei ole sama kuin analyysihetki?**
- **Havaintosuure ei ole sama kuin analysoitava suure?**
- **Havaintovirheet?**



Data-assimilaation perusteet

Tilastollinen lähestymistapa

- Sekä ennakkotieto että havainnot sisältävät aina satunnaisvirheen, jota ei tunneta
 - satunnaisvirheen oletetaan yleensä noudattavan normaalijakaumaa
- Ilmakehän todennäköisimmän tilan määrittäminen perustuu pienimmän neliösumman menetelmään
 - Esimerkki: Helsingin ulkoilman lämpötilan määrittäminen



Pienimmän neliösumman estimointi

Esimerkki: ulkoilman lämpötilan määrittäminen

- Yksi mahdollinen tapa:
 - Helsingin keskustassa sijaitsevan keittiön ikkunan vieressä olkoon lämpömittari, jonka mittaustarkkuus σ_m tunnetaan.
 - Mitataan lämpötila käyttäen keittiön ikkunan mittaria --> saadaan ulkoilman lämpötilalle estimaatti T_m , jonka tarkkuus on σ_m .
- Toinen mahdollinen tapa:
 - Valtakunnan johtava sanomalehti julkaisee lämpötilaennusteita, joiden tarkkuus σ_e oletetaan tunnetuksi.
 - Luetaan sanomalehdestä tarkasteluajankohtaa vastaava Helsingin lämpötilaennuste --> saadaan ulkoilman lämpötilalle estimaatti T_e , jonka tarkkuus on σ_e .



Pienimmän neliösumman estimointi

Esimerkki: ulkoilman lämpötilan määrittäminen

- Yhdistämällä kaksi toisistaan riippumatonta estimaattia (T_m ja T_e), saadaan ulkoilman lämpötilasta tarkempi käsitys kuin pelkästään toiseen estimaattiin luottamalla
- Lasketaan lämpötilaestimaateista painotettu keskiarvo; annetaan keittiön ikkunalla tehdyille mittaukselle paino k ja sanomalehtiennusteelle paino $(1-k)$. Painotetuksi keskiarvoksi tulee

$$T_p = kT_m + (1-k)T_e$$

- Miten kannattaa määrätä painokertoimet k ja $(1-k)$?
- Osoittautuu, että paras (tarkin) mahdollinen estimaatti lämpötilasta saadaan, kun painokertoimeksi asetetaan $k = \sigma_e^2 / (\sigma_e^2 + \sigma_m^2)$



Data-assimilaation perusteet

Tilastollinen lähestymistapa

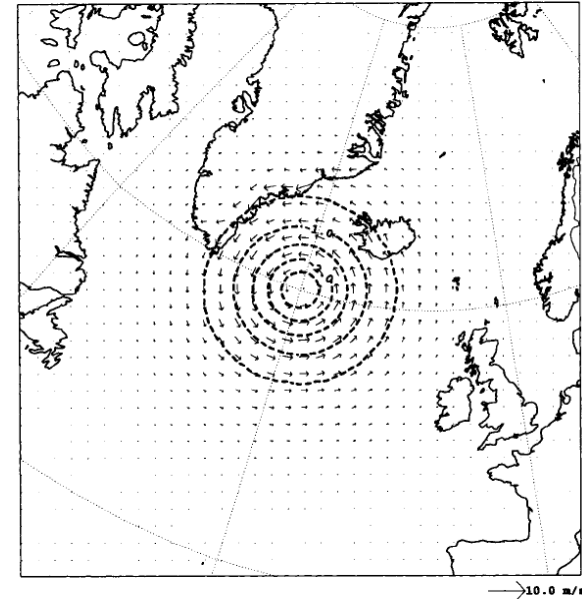
- Ulkoilman lämpötila -esimerkki yleistyy myös huomattavasti monimutkaisempaan ja -ulotteisempaan meteorologiseen data-assimilaatio -ongelmaan
- Pienimmän neliösumman menetelmän soveltaminen säätilan analyysiin johtaa assimilointialgoritmeihin
 - Optimaalinen interpolaatio (OI)
 - Kolmiulotteinen variaatioassimilointi (3D-Var)
 - Neliulotteinen variaatioassimilointi (4D-Var)



Data-assimilaation perusteet

Mallisuureiden väliset kytkennät

- Oikein toimiessaan data-assimilaatio-järjestelmä ottaa huomioon analyysisuureiden väliset dynaamiset kytkennät
- Tällöin esim. yksittäinen lämpötilahavainto korjaa paitsi mallin lämpötilakenttää, myös tuulikenttää



Kirjallisuutta ym.

- Daley, R, 1991: *Atmospheric data analysis*. Cambridge University Press, 457 s.
- Kalnay, E, 2003: *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*. Cambridge University Press, 341 s.
- Bouttier F ja P Courtier, 1999: *Data assimilation concepts and methods*. ECMWF lecture note, 58 s.
- “Understanding data assimilation”
<http://meted.ucar.edu/nwp/pcu1/ic6/index.htm>
- “Ten common NWP misconceptions”
<http://meted.ucar.edu/norlat/tencom/>

