

Meteorologi med GPS-signaler

Det globale positioneringssystem GPS er udviklet til at levere præcise positionsbestemmelser.

Men som det er tilfældet med så megen anden højteknologi, har der også vist sig andre interessante anvendelsesmuligheder af GPS. F.eks. til at bestemme atmosfærens temperatur og luftfugtighed.

Af Kjartan Münster Kinch og Kent Bækgaard Lauritsen

I år 2000 blev det amerikanske *Global Positioning System* (GPS) gjort nemmere tilgængeligt for civilt brug, og siden da har dets popularitet bredt sig, så GPS nu anvendes i stor stil i den civile sektor. Skibstrafikken anvender GPS-navigation, GPS-vejvisere i privatbiler er uhyre udbredte, og moderne smart-phones er som standard udstyret med en GPS-modtager. Folk tager GPS'en med på vandretur og sejltur. GPS'en i telefonen anvendes til at finde nærmeste busstop, nærmeste restaurant og meget andet. Fælles for de nævnte anvendelser er, at de på forskellig vis udnytter det formål, som GPS er designet til, nemlig at levere præcise positionsbestemmelser.

Der findes imidlertid også en række kreative anvendelser af GPS til at levere andet end positioner. Radio-okkultation er en metode til at bestemme atmosfærens temperatur og luftfugtighed ved hjælp af GPS-signaler. Målingerne foretages af en GPS-modtager på



Computergenereret grafik, der viser Metop-satellitten over Europa.

en meteorologisk satellit i lav jordbane. Den meteorologiske satellit måler påvirkningen af GPS-signalet, når jordens atmo-

sfære kommer imellem – det vil sige når GPS-satellitten “går ned” eller “står op” set fra den meteorologiske satellit. Sådanne

målinger anvendes rutinemæssigt i vejrmodeller, og de bliver også i stigende grad værdifulde som klimadata efterhånden som tidsserierne bliver længere.

Fra Solsystemet til Jorden

Radio-okkultationsmetoden blev oprindeligt udviklet i forbindelse med udforskningen af Solsystemet. Rumsonderne Mariner 3 og Mariner 4 studerede i 1960'erne atmosfæren på Mars ved at analysere Mars-atmosfærens påvirkning af radioforbindelsen mellem rumsonden og Jorden. Metoden har siden været anvendt – og bliver stadig anvendt – til studiet af stort set alle legemer med en atmosfære i solsystemet. Alle rumsonder har en radioantenne til kommunikation og okkultationsmålinger er derfor en billig måde at få information om strukturen af planeters atmosfærer.

Metoden var i mange år ikke relevant for anvendelse på Jorden. Fordi vi kender Jordens atmosfære så meget bedre skulle data fra Jorden være af meget højere præcision for at være brugbare. Med oprettelsen af GPS-netværket blev det for før-

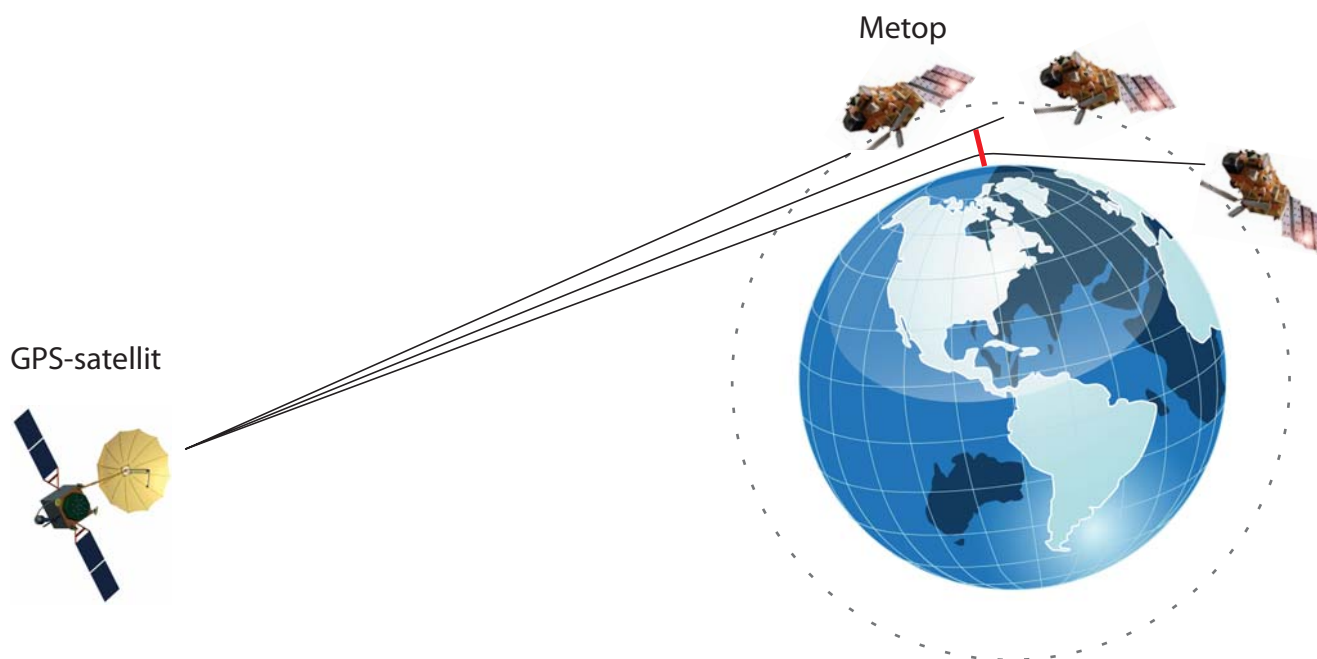


Illustration af en radio-okkultationsmåling: Atmosfæren afbøjer radiosignalet på vej fra GPS-satellitten til den meteorologiske satellit. Afbøjningsvinklen kan bestemmes meget præcist fra Doppler-forskydningen af det modtagne signal. Når afbøjningen er målt i alle højder fra rummet og ned til jordoverfladen kan man bestemme brydningsindekset som funktion af højde. Brydningsindekset i den neutrale atmosfære er bestemt af atmosfærens tæthed og luftfugtighed og er størst tættest ved Jordens overflade.

ste gang praktisk muligt at lave okkultationsmålinger af Jordens atmosfære med en præcision og hyppighed, der gjorde data interessante. Det første instrument, som udnyttede GPS-signaler til at studere Jordens atmosfære, hed GPS/MET og blev opsendt af NASA i 1995 om bord på satellitten Microlab 1. GPS/MET var en stor succes og demonstrerede på overbevisende vis metodens potentiale. Dette ledte i de følgende år NASA til at sponsorere en række okkultationsinstrumenter på internationale satellit-missioner. Et af disse instrumenter fløj på den danske Ørsted-satellit i 1999.

De vigtigste moderne okkultationsmålinger foretages af en serie satellitter under navnet *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate* (COSMIC) samt af instrumentet *GNSS Receiver for Atmospheric Sounding* (GRAS) på satellitten Metop-A.

Atmosfæren bøjer radiosignalet

På samme måde som lys afbøjes, når det passerer fra luft og ind gennem glas eller vand, afbøjes

radiosignaler, når de passerer fra det tomme rum og ind i Jordens atmosfære. Okkultationsinstrumentet måler denne afbøjning af radiosignalet. Jo mere af atmosfæren, der kommer mellem GPS-satellitten og den meteorologiske satellit, jo større bliver afbøjningsvinklen. Ved hver måling følges afbøjningsvinklen fra nul grader, når kun det tomme rum er mellem de to satellitter, og hele vejen ned til signalet tabes, fordi jordoverfladen kommer imellem. Selv når afbøjningsvinklen er størst er den typisk stadig kun omkring én grad, så det er små vinkel-variationer, der skal måles. GPS-systemets høje præcision er derfor helt nødvendig for at få brugbare data.

Afbøjningen kan deles i ét bidrag fra frie elektroner højt oppe i den øvre atmosfære og ét bidrag fra den neutrale atmosfære længere nede. Afbøjningen pga. frie elektroner afhænger på simpel vis af signalets bølgelængde, mens afbøjningen i den neutrale atmosfære er uafhængig af bølgelængden. Derfor kan man udnytte, at GPS-satellitterne sender ved to frekven-

ser (1,57542 GHz og 1,22760 GHz) til at skille de to bidrag fra hinanden. De fleste anvendelser fokuserer på den neutrale atmosfære, men metoden kan altså også anvendes til at studere elektrisk aktivitet i den øvre atmosfære (ionosfæren).

Brydningsindeks afslører atmosfærens beskaffenhed

Afbøjningen af lys (og radiobølger) beskrives normalt ved hjælp af brydningsindekset. Brydningsindekset er en materialekonstant, som har værdien 1 i det tomme rum, og i den neutrale del af atmosfæren altid har værdier større end 1. Når afbøjningsvinklen er målt fra rummet og ned til jordoverfladen kan atmosfærens brydningsindeks som funktion af højde udregnes ved hjælp af den såkaldte Abel-transformation, som er en matematisk transformation udviklet af den norske matematiker Niels Henrik Abel (1802-1829). Brydningsindekset i en given højde er et udtryk for atmosfærens beskaffenhed i denne højde. I praksis er atmosfærens brydningsindeks ved GPS-signalernes frekvens lavt

(mindre end 1,0005) og afhænger af atmosfærens temperatur, tryk og luftfugtighed.

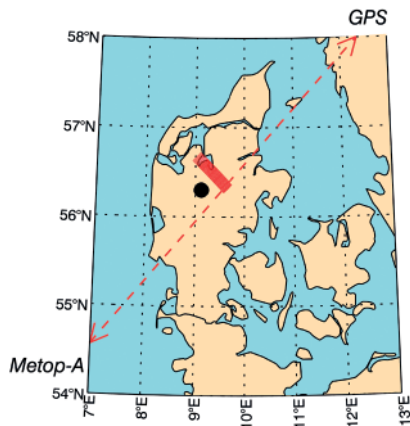
Trykket i en given højde kan beregnes hvis overfladetrykket er kendt sammen med temperaturen og luftfugtigheden som funktion af højde, men man kan ikke ud fra okkultationsmålingen bestemme både temperatur og luftfugtighed. Man kan kun bestemme en af de to størrelser, hvis den anden er kendt. I mange tilfælde er luftfugtigheden dog så lav, at man reelt måler temperaturen direkte. Dette gælder tæt ved polerne helt ned til overfladen og generelt overalt over troposfæren (fra ca. 12 kilometers højde og op). Målingerne er nu så præcise, at de foranlediger et ønske om bedre bestemmelse af de fundamentale konstanter, der forbinder brydningsindeks, tryk, temperatur og luftfugtighed ved GPS-frekvenserne.

Forudsigelse af vejret og overvågning af klimaet

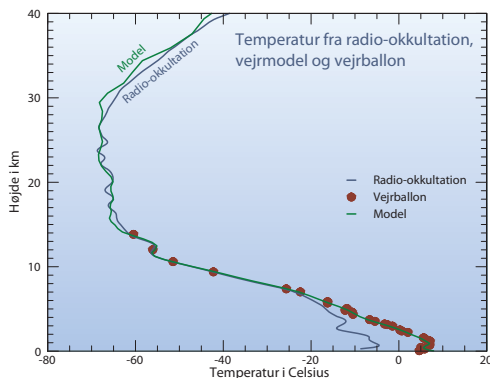
Moderne vejrmødelles er uhyre komplekse beregningssystemer, som kører kontinuerligt på supercomputere ved de for-

En radio-okkultationsmåling over Danmark

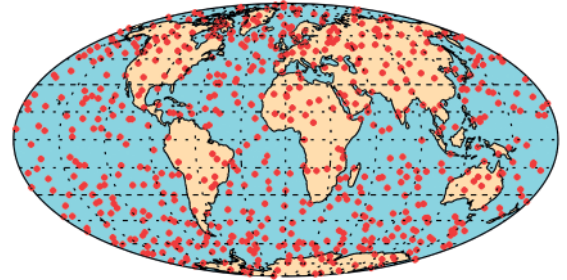
Figur 1: Her ses alle 650 okkultationer, som GRAS-instrumentet ombord på Metop-A-satellitten målte den 25. oktober 2007. Punkterne angiver de steder, hvor radioforbindelsen mellem en GPS-satellit og Metop-A skar Jordens atmosfære. Metop-satellitten flyver i en sol-synkron polar bane med en omløbstid på omkring 100 minutter. Sol-synkron betyder, at satellitten altid krydser ækvator på samme tidspunkt lokal tid, nemlig 9:30 på vej sydover og 21:30 på vej nordover. Denne bane giver en god spredning af okkultationsmålingerne over et døgn, og banen tillader to nedhentninger af data pr. omløb: Én via Svalbard og én via McMurdo-basen på Antarktis. →



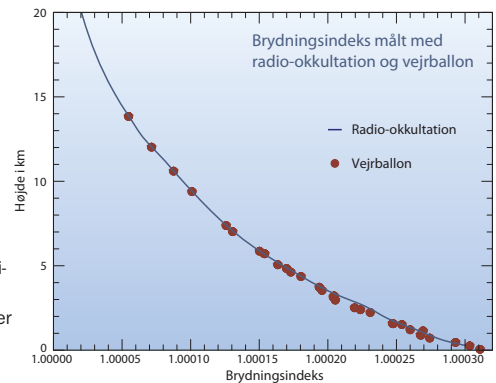
Figur 3: Her ses atmosfærens brydningsindeks som funktion af højden som målt over Viborg den 25/10 2007. Højden i atmosfæren er vist på y-aksen. Den blå linje viser okkultationsmålingen, mens de røde punkter er brydningsindekset udledt fra målinger af temperatur, tryk og luftfugtighed fra vejrballonen, som blev opsendt fra Karup omkring samme tidspunkt. Den dominerende tendens i begge målinger er eksponentielt aftagende med højden og stammer fra den velkendte eksponentielt aftagende tæthed i atmosfæren med højde. De interessante variationer i temperatur og luftfugtighed er et mindre signal overlagt på den dominerende tendens.



Figur 5: Her ses luftfugtigheden i de nederste 10 km af atmosfæren fra radio-okkultationen, fra vejrballonen samt fra ECMWF's vejrmiddel. Luftfugtigheden er udledt fra radio-okkultationen ved en beregning, som effektivt svarer til, at temperaturen i denne del af atmosfæren er sat lig med model-temperaturen, hvorefter luftfugtigheden er fundet som den værdi, der tilnærmer det observerede brydningsindeks bedst muligt. Det ses, at der er ganske meget støj på måledata fra vejrballonen. Generelt kendes luftfugtigheden i den nedre del af atmosfæren langt fra lige så godt som temperaturen, og der er forhåbninger om, at okkultationsmålingerne også her kan yde et bidrag.

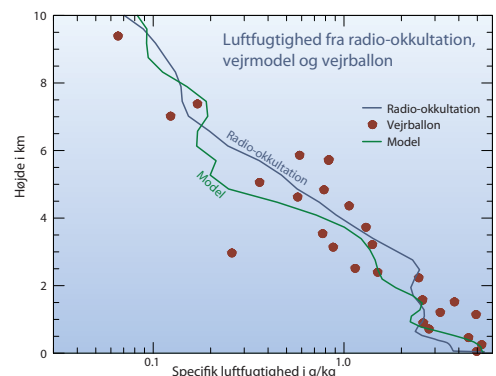


Figur 2: En enkelt af målingerne den dag lå over Danmark. Metop-A satellitten var på vej sydover 800 km over Atlanterhavet ud for Marokkos kyst og havde kontakt med en GPS-satellit 20.000 km over Japan. Klokket 12:40 dansk tid trængte radioforbindelsen mellem de to satellitter ned i stratosfæren 50 km over Skive. Det punkt, hvor radiosignalet var tættest på jordoverfladen, bevægede sig nedad og mod sydøst hen over Viborg og mindre end et minut senere blev forbindelsen mellem de to satellitter tabt, da Jordoverfladen kom imellem ved Bjerringbro. Den tykke røde linje på kortet illustrerer bevægelsen af det punkt, hvor radioforbindelsen var tættest på Jorden. Det er også det område, som bidrager langt mest til den målte afbøjning af radiosignalet og dermed det område af atmosfæren, som okkultationen måler på. Den stiplede røde linje viser retningen mellem de to satellitter omkring da signalet blev tabt. Den sorte plet er Flyvestation Karup, hvor en meteorologisk ballon blev sendt op klokken 12. Målingerne fra denne ballon kan bruges som sammenligning med okkultations-målingen.



Figur 4: Her ses den atmosfæriske temperatur som funktion af højde fra radio-okkultationen, fra vejrballonen samt fra en vejrmiddel drevet af European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF). Modellen og vejrballonen følger hinanden næsten perfekt, fordi modellen blandt andet er baseret på data fra denne vejrballon. Tilbage i 2007 blev okkultationsmålinger fra GRAS-instrumentet ikke brugt i vejrmodellen fra ECMWF.

Den blå linje i figuren viser temperaturen udledt fra okkultationsmålingen ved at foretage den meget simple antagelse, at luftfugtigheden er nul overalt. Som det ses, er denne antagelse ikke anvendelig i de nederste ca. 7 km. Over 7 km er luftfugtigheden så lav, at den ikke bidrager til brydningsindekset, og temperaturen kan dermed udledes direkte fra okkultationsmålingen. Fra 7 km og op til omkring 14 km er der god overensstemmelse mellem de to sæt måledata og modellen. Over 14 km, hvor vejrballonens datasæt ophører er der afvigelser mellem radio-okkultationen og vejrmodellen. I dette område fra 14 km og op til omkring 30 km er data fra radio-okkultationen meget præcise og afvigelserne mellem de to datasæt skyldes primært usikkerhed i modellen. Her kan modellen forbedres ved at inkludere radio-okkultationsdata. Siden 2008 anvendes data fra GRAS da også i ECMWF's model.



skellige meteorologiske centre. Kørslen af en sådan vejrmødel består af to skridt, som aktiveres på skift. Det ene skridt er en fremskrivning af atmosfærens tilstand i henhold til fysiske love samt nogle tilnærmede beskrivelser af processer som f.eks. skydannelse. Det andet skridt er den såkaldte assimilation, hvor en stor mængde data introduceres og modellens øjeblikksbillede af atmosfæren justeres for at bringe den i bedre overensstemmelse med målingerne. Den regelmæssige assimilation af nye data sikrer, at modellen ikke udvikler sig langt væk fra tilstanden i den virkelige atmosfære. Moderne vejrmødel-ler assimilerer data flere gange i døgnet og ved hver assimilering indføres millionvis af separate målepunkter fra satellitter, ballonopsendelser og målestationer på jordoverfladen.

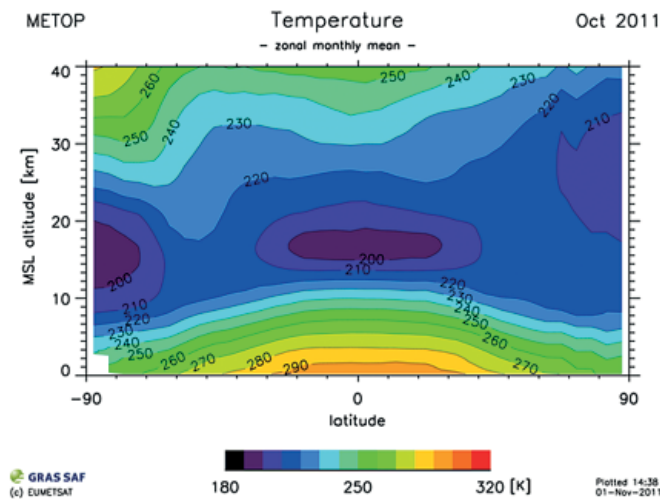
Radio-okkultationsdata forbedrer præcisionen af vejrforsudsigelserne betydeligt. Dette skyldes, at de supplerer andre datasæt godt. Målingerne er mest præcise i højdeintervallet fra omkring 10 - 25 km over jordoverfladen. De har en høj vertikal opløsning, de dækker hele kloden og instrumenterne er uhyre stabile over tid. For at kunne anvendes i vejrmødel-ler skal målingerne videregives til de meteorologiske centre i løbet af to-tre timer fra målingen er taget.

I praksis måles afbøjningsvinklen ved at måle Dopplerverskydningen af det modtagne signal. Målingen er derfor i sin mest grundlæggende form en måling af tiden mellem to bølgetoppe i radiosignalet. Da ure generelt er nemmere at kalibrere, mere præcise og mere stabile i drift end f.eks. radiometre, undgår man herved mange problemer med kalibrering og med at sikre stabiliteten af det målte signal. Specielt for klimadata, hvor man generelt ønsker at måle en lille ændring i signalet over en lang tidsperiode, kan sådanne problemer være betydelige ved andre målemetoder. Radio-okkultation er derfor meget lovende som et uafhængigt, langtidstabil datasæt

Moderne okkultationsmålinger

De vigtigste okkultationsmålinger foretages i dag af en serie satellitter under fællesnavnet COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) samt af instrumentet GRAS (som står for GNSS Receiver for Atmospheric Sounding) på satellitten Metop-A. COSMIC er et taiwanesisk/amerikansk projekt, mens Metop-A drives af den europæiske organisation for meteorologiske satellitter, EUMETSAT. Data fra GRAS-instrumentet behandles og udsendes til brugere via en af EUMETSAT's decentrale Satellite Application Facilities, GRAS SAF, som ledes fra Danmarks Meteorologiske Institut. Metop-A blev opsendt i 2006 og en efterfølger, Metop-B, bliver opsendt midt i 2012. Metop-B bærer også et okkultationsinstrument, som er identisk med GRAS på Metop-A.

Data fra GRAS-instrumentet på Metop-A hentes ned to gange pr. kredsløb på stationer i Svalbard og Antarktis. Derfra går data til EUMETSAT's centrale facilitet i Darmstadt, Tyskland og derfra igen videre til Danmarks Meteorologiske Institut og til sidst ud til brugerne.



Eksempel på klima-data baseret på okkultationsmålinger. Her ses middeltemperatur i atmosfæren for oktober 2011 som udledt ved en kombination af GRAS målinger og data fra ECMWF's model. Figuren viser atmosfærisk temperatur i grader Kelvin som funktion af breddegrad og højde over havet.

til overvågning af det globale klima og til sammenligning med andre klima-datasæt.

Nye satellitter på vej

Med den planlagte opsendelse af Metop-B i 2012 vil DMI stå for distribution af data fra to modtagere, som i de kommende år vil få ekstra stor betydning fordi de Taiwanesiske/Amerikanske COSMIC-satellitter efterhånden er ved at nå enden på deres levetid. Lidt længere ude i fremtiden er der planer om et COSMIC-2 program samt en Metop-C, og om 5 år er det realistisk at forvente omkring 15 modtager-satellitter, der

løbende leverer data til meteorologiske centre og andre brugere. Med den nært forestående realisering af det europæiske GALILEO-program af navigationsatellitter (de første to satellitter er netop sat i kredsløb), samt med det tilsvarende, eksisterende russiske GLONASS-program kan man forvente en kraftig øgning også i antallet af sendere af GPS-lignende signaler. Det samlede antal målte okkultationer i døgnet vil dermed komme over 10.000 og radio-okkultationsområdet betydning vil vokse både inden for meteorologi og klimaforskning i de kommende år. ■

Om forfatterne:



Kjartan Münster Kinch er forsker ved Danmarks Klimacentre, Danmarks Meteorologiske Institut
kmk@dmi.dk



Kent Bækgaard Lauritsen er forsker ved Danmarks Klimacentre, Danmarks Meteorologiske Institut
kbl@dmi.dk

Videre læsning:

Hjemmeside for GRAS SAF projektet: www.grassaf.org

Technique from Outer Space Takes On Earth Observation. *Science* vol 312, s 48-49, 7. April 2006

R.A. Anthes: *Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather. Atmospheric Measurement Techniques*, 4, s. 1077-1103, 2011

Side om GRAS instrumentet hos ESA: www.esa.int/esalp/semseg23ie_lpmetop_0.html

Animation med GRAS: http://download.esa.int/wmv/gras_occultation_principle_wmv_high.wmv

Satellitter sladrer om atmosfæren, AN nr. 4-2004.