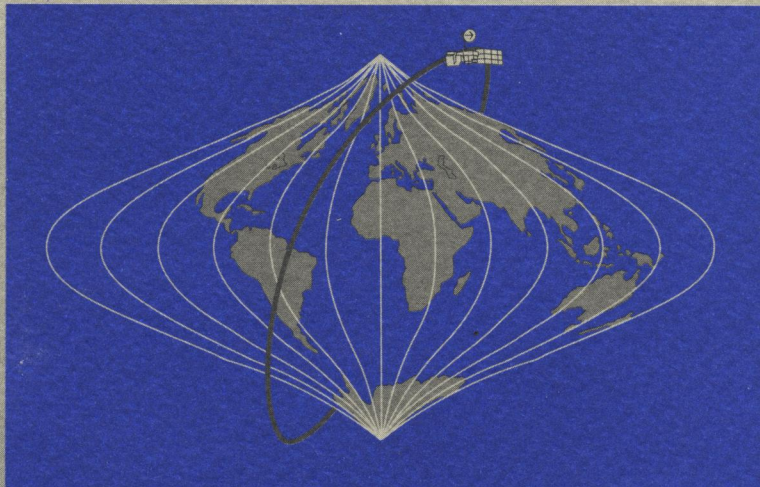


HRVATSKA AKADEMIJA ZNANOSTI I UMJETNOSTI
ZNANSTVENO VIJEĆE ZA DALJINSKA ISTRAŽIVANJA I FOTOINTERPRETACIJU

ZBORNİK RADOVA

PROCEEDINGS



STO GODINA FOTOGAMETRIJE U HRVATSKOJ
100 YEARS OF PHOTOGRAMMETRY IN CROATIA

20. - 22. svibanj 1998.

Z A G R E B

Hiparh kao računska osnova za digitalne sustave koji povezuju terestričke i daljinski prikupljene prostorne podatke

Hipparchus as a computational base for computer systems combining terrestrial and remote sensing data

Hrvoje Lukatela

Chief Scientist, Geodyssey Limited, Calgary, Alberta

SAŽETAK: Tradicionalne geodetske računске osnove nisu pogodne za digitalne sustave koji opisuju postupke ili pohranjuju podatke prikupljene daljinskim istraživanjima. Dva su tome glavna razloga: njihovo prostiranje daleko premašuje uobičajene političke ili administrativne jedinice pa time i njihove prostorno ograničene ravninske koordinatne sustave. Nadalje, visoki volumen podataka zahtjeva veću učinkovitost u prostornom pristupu, nego li što je to slučaj sa relativno skromnim volumenom podataka prikupljenih klasičnim mjerničkim postupcima. Konstrukcija novih, svrsishodnih računskih osnova uvelike je olakšana elipsoidnim računanjima u kojima je normala (za razliku od kutne mjere klasičnih geodetskih koordinata) numerički predstavljena svojim vektorskim komponentama. Da bi tako razvijene računске osnove bile ekonomično primjenljive u gradnji digitalnih sustava i baza podataka, potrebno je uobličiti ih kao programe koje je moguće upotrijebiti u čim mnogobrojnijim okruženjima operativnih sustava, programskih jezika, sustava za podršku baza podataka i sustava grafičkih prikaza na digitalnim računalima. Rad opisuje jednu od takvih računskih osnova, i njezinu primjenu u dva aplikacijska sustava vrlo različitih informatičko-tehnoloških karakteristika.

Ključne riječi: Elipsoidna geometrija, daljinska istraživanja, Voronojevi poligoni, iterativni algoritmi, globusne baze podataka.

1. Uvod - Introduction

Fultonov parobrod, Stephensonovu lokomotivu i Gaussovo računanje hanoverske triangulacije dijeli tek jedno desetljeće. Može se dakle reći, da je računska geodezija zasnovana na konformnoj projekciji elipsoida u ravninu tehnološki vršnjak parnoga stroja.

Pretpostavke koje su početkom 19. stoljeća dovele do prihvaćanja takvog načina geodetskog računanja mogu se sažeti ovako: položaj relativno malog broja točaka koje predstavljaju geodetsku osnovicu najvišeg reda izmjeren je na elipsoidu i prenesen u projekcijsku ravninu, da bi se zatim veliki broj numeričkih zadataka, kako u razvijanju geodetske mreže nižih redova, tako i u primjenjenoj geodeziji, rješavao koordinatnim računanjem u ravnini projekcije.

Osobine koje su se tražile od odnosa elipsoidnih i ravninskih koordinata određene su potrebom za čim širim prostiranjem jednog kontinuiranog ravninskog sustava - uz unaprijed zadanu, relativno visoku maksimalnu devijaciju između geometrijskih odnosa izvedenih iz ravninskih koordinata i odgovarajućih odnosa u naravi, kao i zahtjevom za čim jednostavnijim prijenosom najčešće mjerene geodetske veličine - smjera ili kuta - iz vrijednosti izmjerene u naravi, u odgovarajuću vrijednost u ravnini projekcije. Zbog relativno malog broja točaka koje je trebalo tek jednokratno prenijeti sa elipsoida u ravninu, niti brzina računanja projekcije, ni točnost, a ni brzina računanja obrnutog zadatka - nisu bile važan element pri njezinom izboru. Konformne projekcije elipsoida u ravninu odgovorile su vrlo dobro postavljenim zahtjevima, a kako su u to vrijeme konformne projekcije općenito bile jedno od glavnih područja interesa primjenjene matematike, urasle su i brzo i duboko u najširu geodetsku praksu.

Dva elementa mijenjaju tijekom posljednjih nekoliko desetljeća zahtjeve koji se postavljaju na geodetske računске osnove: upotreba digitalnih računala za pohranu i obradu geodetskih podataka, i sve šire prostiranje jedinstvenih geodetskih sustava, od kojih danas mnogi - pogotovo u daljinskim istraživanjima - zahtjevaju kontinentalno ili čak globusno prekrivanje.

Za razliku od klasične geodetske prakse, izvođenje prostornih elemenata iz grafičke sheme (naprimjer, mehaničko planimetriranje površina ili određivanje elemenata iskolčenja očitanjem sa plana) - nije više ni nužno, ni ekonomično. Jedina svrha grafičke predstave ostaje dakle vizualizacija geodetskih podataka. (SOM (Space Oblique Mercator) projekcija, predložena i opisana u (Snyder, 1982) primjer je tehničkih aberacija do kojih dovode pokušaji da se sustavi daljinski opažanih podataka zasnivaju na klasičnim kartografskim metodama). Sve metričke zadaće moguće je riješiti dovoljno brzo i točno, bilo neposredno na referentnoj plohi rotacijskog elipsoida, bilo u lokalnom sustavu neposrednog okoliša problema čije se numeričko rješenje traži. Projekcija u ravninu postaje time nužna tek u trenutku kada se konstruira grafička shema. Ta je opet najčešće prikazana na zaslonu računala, a vrijeme potrebno za njezinu konstrukciju (za razliku od vremena potrebnog za konstrukciju trajnog otiska plana ili zemljovida) od kritičnog je utjecaja na vremenski učinak korisnika sustava. U takvom okruženju zahtjevi koji odlučuju o izboru računске osnove i ravninske projekcije razlikuju se bitno od onih koji su doveli do prihvaćanja klasičnih geodetskih koordinatnih sustava zasnovanih na konformnim projekcijama. Brzina računskog postupka pri prijelazu sa elipsoida (ili nekog drugog sferoidnog, kontinuiranog planetarnog koordinatnog sustava) u projekcijsku ravninu crtanja postaje nadasve važna. U cilju indeksiranja globusnih baza podataka potrebno je razviti algoritme

kontinuirane prostorne klasifikacije točke (koji dakle nisu ograničeni na jednu projekcijsku ravninu), a čiju je granulaciju moguće lagano podešavati učestalosti pristupa i rasporedu gustoće podataka u bazi.

U sustavima koji obrađuju daljinska istraživanja, javljaju se tipično dvije osnovne vrste podataka. Prva se vrsta sastoji od elemenata putanje platforme i vanjske orijentacije i zahvata senzora. Druga se vrsta sastoji od stvarno prikupljenih podataka: velikog broja gustih mjerenja izvjesne fizikalne veličine (npr. intenziteta elektromagnetskog ili optičkog odraza u određenom valnom području) organiziranih u dvodimenzionalnoj shemi, čiji je prirodni koordinatni sustav kut otklona senzora (s) i vrijeme u orbiti (t).

Razmatrajući geometriju tih dvodimenzionalnih shema, u razvoju sustava daljinskih istraživanja možemo uočiti tri generacije. U prvoj - danas već tehnološki zastarjeloj - dvodimenzionalna je shema ostavljena u koordinatnom sustavu u kojem je i prikupljena. Glavna je svrha prikupljenog materijala direktna vizualna observacija foto-interpretatora sa tek povremenom - isto tako vizualnom - korelacijom sa podacima iz drugih izvora. U drugoj generaciji, primjenom rigoroznih metoda razvijenih u klasičnoj fotogrametriji (ili, često, tek približnim "krpanjem"), materijal se prebacuje ("re-sampling") iz svojeg prirodnog s/t sustava u x/y kartografskog ili geodetskog koordinatnog sustava, čime se omogućuje direktna korelacija - često na zajedničkoj podlozi - daljinski prikupljenog materijala sa materijalom prikupljenim geodetskom izmjerom. Glavna je međutim svrha tako pripremljenog materijala još uvijek samo prezentacija očima fotointerpretatora. Treću generaciju - koja se upravo pojavljuje - čini nužnom dinamika prikupljanja daljinskih opažanja, koja redovima veličina premašuje količine za koji je razumno pretpostaviti da će ikada biti prikazane ljudskim očima. (RADARSAT, opisan niže u ovom tekstu, primjer je sustava sa vrlo skromnim izlaznim volumenom slikovnog materijala od (samo) $20 \cdot 10^9$ slikovnih elemenata na dan. Ako učinkovitost jednog fotointerpretatora procijenimo na $20 \cdot 10^6$ elemenata slikovnog materijala dnevno, za puno iskorištenje samo tog sustava bilo bi potrebno oko tisuću fotointerpretatora. Taj pak sustav čini mnogo manje od jednog postotka svakodnevno daljinski prikupljenog materijala). Da bi dakle imalo svrhe prikupljati podatke u količini u kojoj se prikupljaju (a pogotovo u kojoj će se u budućnosti prikupljati), nužno je naći metode i postupke koji ih čine upotrebljivim u automatiziranoj, digitalnoj analizi. Za tu je pak x/y kartografske projekcije nepotrebna komplikacija, kako zbog svoje računske nepodobnosti, tako i zbog parcelacije podataka na mnogobrojne, međusobno nepovezane koordinatne sustave. Tako se u trećoj generaciji dvodimenzionalna shema "čisti" od ondulacija putanje i vanjske orijentacije senzora, ali se ostavlja u svojem prirodnom s/t sustavu, da bi se automatska, digitalna analiza i

računska korelacija sa podacima iz drugih izvora izvodila ili na referentnoj plohi rotacijskog elipsoida ili u lokalnom sustavu analitičke zadaće.

Računska osnova Hiparh, opisana u ovom radu, predstavlja jednu od mogućih osnova sustava za obradu daljninski prikupljenih podataka. Njezini principi opisani su detaljno u (Lukatela, 1987), a mogu se naći i u tehničkom opisu na "web" stranicama <http://www.geodyssey.com>. Uobičajena geometrijska definicija globusne točke - normala na površinu elipsoida - nije predstavljena dvjema kutnim veličinama, geografskom širinom i dužinom, već sa tri veličine: komponentama vektora smjera normale u geocentričnom koordinatnom sustavu. Interesantno je primijetiti da su prednosti računanja sa takvom numeričkom predstavom normale spomenute već u (Bomford, 1975), ali bez ikakvih naputaka o tome kako klasična računanja sa kutnim mjerama zamijeniti računanjima sa vektorskim komponentama. Jedna od takvih mogućnosti zamjenjuje razvoj u redove po potencijama elipsoidnog ekscentriciteta iterativnim algoritmima, koji uspoređuju virtualne pomake dviju točaka na elipsoidnoj normali: točke na površini i one točke koja je najbliža koordinatnom ishodištu.

U cilju razdiobe prostorne domene, računaska shema uključuje i vrlo brzu dvostranu transformaciju sa elipsoida na kuglu, koja je numerički vrlo bliska rigoroznoj konformnoj projekciji. Na tako korespondirajućoj jediničnoj "pseudo-konformnoj" kugli, površina se dijeli sferoidnim Voronojevim poligonima. Dužine koje u ravnini definiraju geometriju Voronojevih poligona zamjenjuje kvadrat sferne tetive, koji je u računanju tek nešto sporiji od kvadrata ravninske diagonale ($dx^2+dy^2+dz^2$, naspram dx^2+dy^2). Površinski objekti (skupovi točaka, linija i površina) imaju svoje kanoničke reprezentacije u kontekstu određenog skupa takvih poligona, koji time preuzimaju ulogu prostornog indeksa. (Win95/NT program "Galileo", koji je raspoloživ na <http://www.geodyssey.com> poslužitelju, pruža ilustrativni pregled kako funkcijskog repertoara, tako i brzine izvedbe različitih produkcija terestričke i orbitalne geometrije).

2. Hiparh kao COTS - Hipparchus as a COTS

Napudbeno uobličenje geodetskih računskih osnovica mora odgovarati ne samo svrsishodnim geodetskim računskim principima, već mora omogućiti i jednostavnu i ekonomičnu ugradnju u različite aplikacijske sustave. U suvremenoj informatičkoj praksi, takve se napudbene komponente često označuju kraticom "COTS" (Commercial-Off-The-Shelf). Predpostavljajući visoku aplikacijsku semantiku i pouzdanost COTS produkata, najčešći

problemi koji se javljaju pri njihovoj primjeni uzrokovani su funkcijskim "prekrivanjem" različitih COTS komponenata. Da bi se to izbjeglo, biblioteka Hiparh sastoji se od "jezgre" i nekoliko koncentričnih "ljuski".

Integracija u konačni korisnički produkt prihvaća jezgru i samo one ljuske koje se ne sukobljavaju sa ostalim napudbenim komponentama (GUI, DB, itd.) projekta. Jezgra biblioteke sastoji se od funkcija koje rješavaju pojedine, vrlo usko definirane geometrijske probleme: npr. računanje koordinata pola iz zadane, proizvoljno položene male kružnice na kugli ili pak konstrukciju presjeka dvaju elipsoidnih površina predstavljenih u svojem kanoničkom obliku. Dio jezgre čine i funkcije koje iterativnim algoritmima (vrlo sličnim onima koji rješavaju probleme elipsoidne geodezije) rješavaju prostorno-vremenske odnose postulirane Keplerovim zakonima i geometrijske odnose zahvata senzora i elipsoidne plohe. Funkcije, koje čine jezgru biblioteke, komuniciraju sa aplikacijskim programskim komponentama jedino razmjenom adresa memorijskih struktura, pa su time nezavisne od posebnosti operativnih sustava, podrške grafičkog sučelja ili metoda pristupa vanjskim memorijama. Srednja ljuska programske biblioteke sadrži funkcije koje ostvaruju grafičke predstave kanoničkih objekata i omogućuju prostorno indeksiranje datoteka. Kako te funkcije ne sadrže algoritme geodetskih računanja, rad sa njima - uključujući i moguće modifikacije - pristupačan je i programerima koji ne poznaju teoretske osnove geodetskih računanja. Vanjska se ljuska sastoji od oko 30K izvornih naredbi u programskom jeziku C sa dvojakom ulogom: detaljnih primjera naredbi koje okružuju pozivanje funkcija jezgre, kao i gotovi "katalog" programskog koda kojega je moguće preuzeti u konačni aplikacijski sustav sa tek minimalnim prilagođenjima. Uz već spomenuti program "Galileo", vanjska ljuska uključuje i izvorne naredbe demonstracijskog programa Atlasa svijeta, koji je, sa oko 450 MB geografskih podataka, pod imenom "**Georama**" otisnut na CD-ROM-u.

3. Primjer ugradnje u PC aplikacijski sustav - Integration in a PC application

"RADARSAT" (vlasnik: Canadian Space Agency, Canada Centre for Remote Sensing), pušten u eksploataciju krajem 1996 godine, prvi je SAR sustav sa opažanjem sa satelita namijenjen prvenstveno u komercijane svrhe. Sustav koristi radarsko frekventno područje "C" (5.3 GHz), a odlikuje se podesivom širinom oslikane površine (50-500 km) i prostornim razlučivanjem (10-50 metara). Zbog visokog utroška energije potrebne za radarsko snimanje, u određenom vremenu moguće je vršiti samo jednu od tri osnovne operacije: punjenje baterija (fotoćelijama), snimanje (sa istovremenim zapisom snimke na

magnetoskopski uređaj), i konačno, prenošenje snimljenog materijala na jednu od prijemnih stanica. Svakoj operaciji je potrebno, u prosjeku, posvetiti oko trećinu vremena tijekom orbitalnog perioda od 101 minute. Eksploatacijski režim komplicira činjenica da je punjenje baterija moguće vršiti jedino dok je satelit na sunčanoj strani Zemlje, a prenošenje materijala moguće je jedino dok je satelit u dosegu jedne od prijemnih stanica.

Uz takva ograničenja, potrebno je osigurati vremenski maksimalno oslikavanje onog dijela vidljivog područja, za koje postoji mogućnost prodaje slikovnog materijala. Da bi se to opet ostvarilo, potrebno je svakom potencijalnom korisniku omogućiti čim jednostavniji način na koji može odrediti periode u kojima je njegovo područje vidljivo, tako da bi mogao operativnom centru pravovremeno priopćiti svoj interes za određeni slikovni materijal. Temeljem takvih informacija od svih potencijalnih korisnika, operativni centar optimizira vremenski raspored punjenja baterija, snimanja i prenošenja, posebno za svaku nadolazeću orbitu. Originalni projekt predvidio je tiskane "atlase pokrivanja", koje je trebalo staviti u ruke najšireg kruga korisnika. Taj je pristup opterećen sa dvije mane: relativno veliki trošak tiskanja i raspodjele "papirnatog" atlasa, kao i potrebe da se skupocjeno gorivo (satelit nema mogućnosti dopune gorivom nakon lansiranja) troši na povremene korekcije orbite, i to samo zato da bi ta odgovarala pokrivanju u unaprijed otisnutim kopijama atlasa. Nezadovoljan tim ograničenjima, nakon puštanja sustava u pogon, vlasnik je zatražio ponude za izradu digitalnog sustava koji bi savladao obadva problema: digitalnom distribucijom uklonio troškove tiskanja i fizičke razdiobe atlasa, i - još važnije - u kojemu bi se elementi orbite (pa prema tome i područje oslikavanja) mogli jednostavno ažurirati, tako da u svakom trenutku predstavljaju najbolju moguću procjenu elemenata orbite za naredni period od oko mjesec dana. Projekt izrade tog sustava izvela je informatička tvrtka Dataquest Inc. u Halifaxu upotrebom Hiparh biblioteke. Opisan u (d'Appolonia i dr. 1997) sustav je primjer samostojne aplikacije na PC klasi računala. Sustav je sagrađen sa svega 25K izvornih naredbi u C programskom jeziku, a dovršen je za manje od godine dana. Neposredno po dovršenju, sustav je uspješno primijenjen u pripremi i izvedbi operacijskog režima potrebnog za kompletno radarsko kartiranje Antarktika. Taj je projekt uključio i privremenu promjenu nagiba orbite nužnu za oslikavanje južne polarne kape.

4. Primjer podrške velike baze podataka - Integration in a large-scale database

Početak 1966 NASA je započela pripreme za gradnju EOS-DIS (Earth Observing System - Data and Information System) sustava. Djelomični pregled obuhvatnosti projekta moguće je dobiti pregledom projektnih "web" stranica dvaju glavnih izvođača: <http://edhs1.gsfc.nasa.gov/> i <http://ecsinfo.hitc.com/>. Primarni izvođač, Hughes Information Technology, izabrao je Informix Inc. kao snabdjevača programskih komponenti za pristup primarnoj bazi podataka EOS-DIS sustava. Informixova ponuda sastoji se od Informix Universal Server (IUS) osnovice, na koju se naslanjaju komponente (pod imenom "DataBlade") u koje je ugrađena visoka semantika aplikacijskog područja - u ovom slučaju prostornih objekata koji modeliraju vrijeme i geometriju daljinskih opažanja te objekata koji predstavljaju vremensko i prostorno zahvaćanje najrazličitijih opažanih setova (od pseudo-kvadratičnih "scena" do kontinuiranih, multi-orbitalnih "slikovnih nizova"). IUS arhitektura odlikuje se novim i fleksibilnim rješenjem zapisa podataka koji se ne uklapaju u tradicionalne "tabelarne" informatičke modele. Iako je Informix imao već nekoliko "geografskih" DataBlade inačica, te su bile osnovane na zapisu podataka predstavljenih u projekcijskoj ravnini, pa su kao takve bile neupotrebljive za projekt u kojem je jedan od kritičnih zahtjeva tražio kontinuirano pokrivanje globusne površine. Ekstremno visoki volumen podataka koji je predviđen u EOS-DIS projektu zahtijevao je pak računsku osnovicu vrlo visokog učinka.

U jesen iste godine, pod imenom "Geodetic DataBlade" Informix je pristupio gradnji DataBlade inačice na osnovu programske biblioteke Hiparh. Glavni kriteriji pri izboru računске osnovice bili su, redom važnosti: stabilnost, prostorna točnost i brzina. Prilagodba Hiparh biblioteke u DataBlade sustav nije zahtijevala nikakve promjene u usporedbi sa bibliotekom koja se ugrađuje u aplikacijske sustave na PC računalima. Kako glavna operacija pri izboru i prijetvorbi podataka u podsustavu primarne baze ne zahtijeva grafičku predstavu, jasno odvajanje grafike od prostornih operacija bilo je također nužno za uspješnu integraciju. Jedina svrsishodna modifikacija Hiparh biblioteke sastojala se je u dodavanju opcije "naglog povlačenja" pri izvođenju prostornih unija i presjeka, tako da je u slučajevima, u kojima je dovoljno samo ustanoviti postojanje presjeka dvaju objekata (kao kriterij pristupa vanjskoj bazi) moguće izbjeći nepotreban računski postupak konstrukcije presjeka. Projekt je dovršen za manje od godine dana, pri čemu je na razvoju radila skupina od šest programera. U okviru projekta, Informix je proveo i vlastiti program verifikacije računskih funkcija jezgre biblioteke.

Literatura - References:

Bomford, G., 1975: Geodesy. Oxford University Press

d'Appolonia, S. J., Russell, J. M., Fox, R., 1997: Custom Software Tools for Satellite Remote Sensing. Hydro International, GITC, Lemmer (Nizozemska), Voll, no.6.

Lukatela, H., 1987: Hipparchus Geopositioning Model: an Overview. Proceedings of AUTO-CARTO 8, Baltimore, MD

Ramaiyer, K., Ashkenas, D., Guttman, A., Uleman, R., Vadugna, J., 1997: Case Study od Non-Projective GIS: Informix Geodetic DataBlade., Informix Software, Inc. Oakland CA

Snyder, J. P., 1982: Map Projections Used by the U.S. Geological Survey, USGS Bulletin 1532.

***Abstract:** Traditional geodetic computation bases are not convenient for digital systems describing the procedures or saving the data gathered by means of remote sensing. There are two reasons for it: their expansion exceeds by far the usual political and administrative units, and thus also their spatially limited plane co-ordinate systems. Furthermore, high volume of data demands greater efficiency in spatial approach than it is the case with the relatively modest volume of data gathered through classical measuring procedures. The construction of new, purposeful computation bases is made considerably easier by ellipsoidal computation in which the normal (unlike the angle measure of classical geodetic co-ordinates) is numerically represented by its vector components. In order to apply thus developed computation bases economically in the production of digital systems and databases, it is necessary to form them as programs which can be used in as many situations of operative systems, program languages, systems for database support and systems of graphic presentations on digital computers, as possible. The paper describes one of such computation bases and its application in two application systems of entirely different information and technology characteristics.*

***Key words:** Ellipsoidal geometry, remote sensing, Voronoj's traverses, iterative algorithms, globe databases*