

## POPRAVEK KEPLERJEVIH ELEMENTOV IZ MERITVE DOPPLERJEVEGA POJAVA

Matjaž Vidmar, Univerza v Ljubljani, FER, Tržaška 25, 61001  
Ljubljana, Slovenija

Povzetek. V članku je prikazana uporaba rezultatov meritve Dopplerjevega pomika za popraviljanje majhnih napak keplerjevih elementov tirnice satelita, na primer zaradi upora vrhnjih plasti ozračja. Metoda je uporabna predvsem v sistemih, ki niso bili načrtovani za Dopplerjeve meritve ali navigacijo, ko je kvaliteta izmerjenih podatkov razmeroma slaba (slabo razmerje signal/šum, slaba stabilnost frekvence). Metoda je bila uspešno preiskušena v majhni sprejemni postaji NOAA HRPT.

Ključne besede: NOAA HRPT, Keplerjevi elementi tirnice, Dopplerjev pomik.

## CORRECTION OF KEPLERIAN SATELLITE ORBITAL ELEMENTS FROM DOPPLER MEASUREMENTS

Abstract. Using the results of Doppler-shift measurements, small errors of satellite orbit keplerian elements can be corrected, for instance the influence of atmospheric drag. The method shown is especially useful in systems that were not originally designed for Doppler measurements or navigation, when the quality of the measured data is poor (poor signal-to-noise ratio, poor frequency stability). As practical example the above correction algorithm was successfully tested in a small NOAA HRPT receiving station.

Key words: keplerian orbital elements, Doppler shift.

### 1. Uvod

-----  
Tirnico umetnega Zemljinega satelita lahko opišemo na več načinov. Razen časa opazovanja potrebujemo za popoln opis tirnice skupaj še šest podatkov. To je lahko vektor stanja (položaj in hitrost satelita), pogosteje pa uporabljamo takšen opis tirnice, ki vsebuje časovno čim bolj konstantne številke. Eden takšnih zapisov tirnice satelita so tudi tako imenovani Keplerjevi elementi.

Tirnico satelita je treba dobro poznati iz več razlogov. Iz podatkov o tirnici lahko izračunamo čas preleta, se pravi čas, ko bo satelit zanas viden na nebu. Lahko izračunamo tudi položaj satelita na nebu, da na satelit usmerimo sprejemno ali oddajno anteno. Končno, če so na krovu satelita razni senzorji in poznamo orientacijo satelita, lahko iz podatkov o tirnici satelita izračunamo, kateremu območju na Zemlji ali v vesolju ustrezajo izmerjeni podatki. Na primer, iz točnih podatkov o tirnici lahko natančno določimo, kateri del Zemlje je satelit slikal.

Tirnica satelita se s časom spreminja, to je odstopa od preproste Keplerjeve rešitve problema dveh teles iz več razlogov. Nekatere od teh sprememb se da opisati z matematičnim modelom, na primer odstopanje težnostnega polja Zemlje od idealne točkaste mase ali vpliv težnosti drugih nebesnih teles. Teže je vnaprej napovedati vpliv pritiska sončne svetlobe, popolnoma nepredvidljiv pojav pa je trenje z vrhnjimi plastmi zemeljskega ozračja.

Tirnico satelita si lahko iz radijskih ali optičnih opazovanj izračunamo sami, vendar je za točen izračun takšen postopek tehnično zahteven in zamuden. Podatke o tirnicah

satelitov lahko dobimo tudi od ustanov, ki se ukvarjajo s temi meritvami (NORAD/NASA). V tem članku je opisana kombinacija obeh možnosti: grobe začetne podatke dobimo od NORAD/NASA, njihovo točnost pa izboljšamo in veljavnost podatkov podaljšujemo z lastnimi meritvami.

## 2. Keplerjevi elementi tirnice satelita

---

Osnovni Keplerjevi elementi vsebujejo razen časa opazovanja še šest podatkov:

a = velika polos elipse tirnice

e = ekscentričnost elipse tirnice

i = kot naklona tirnice glede na ekvator

O ali veliki omega = rektascenzija dvižnega vozla (kot)

w ali mali omega = argument perigeja (kot)

M = srednja anomalija (v kotnih enotah)

Namesto velike polos elipse se uporablja tudi perioda ali frekvenca tirnice, saj obstaja preprosta povezava med periodo in veliko polosjo elipse (Keplerjev zakon).

V takšni obliki so Keplerjevi elementi običajno tudi na voljo, najpogosteje v formatu "NASA 2-LINE" in so dostopni prek različnih računalniških omrežij.

Da bi podaljšali "živiljsko dobo" oziroma veljavnost Keplerjevih elementov, so v format "NASA 2-LINE" vgrajeni še dodatki: drugi in tretji časovni odvod srednje anomalije oziroma prvi in drugi časovni odvod frekvence tirnice satelita. S temi dodatnimi podatki naj bi opisali dolgotrajni vpliv teže predvidljivih pojavov, na primer težnosti drugih nebesnih teles, pritiska sončne svetlobe ali trenja z zemeljskim ozračjem.

Vpliv trenja z zemeljskim ozračjem je zelo težko napovedati, ker je gostota ozračja na velikih višinah zelo spremenljiva (za nekaj velikostnih razredov) in je odvisna predvsem od sončne aktivnosti ter 11-letnega cikla sončnih peg.

Trenje z vrhnjimi plastmi ozračja ima največji vpliv na višino tirnice satelita. Višina tirnice (velika polos elipse) se počasi niža, frekvenca tirnice in hitrost satelita pa se povečujeta. V Keplerjevih elementih opazimo po daljšem časovnem obdobju največji vpliv na srednjo anomalijo, saj je položaj satelita v tirnici časovni integral kotne hitrosti (frekvence) tirnice.

Opisani vpliv zemeljskega ozračja opazimo pri vseh vseh tirnicah, nižjih od približno 1200km. Praktično to pomeni, da bo čez mesec dni satelit še vedno letel po zelo podobni tirnici, le položaj satelita vzdolž tirnice bo precej drugačen zaradi nepredvidljivega vpliva zemeljskega ozračja. Če problem še bolj poenostavimo, bo prelet satelita časovno bodisi prehiteval bodisi zaostajal za napovedanim preletom iz Keplerjevih elementov, sicer pa se bo gibal čez nebo po povsem enaki krivulji.

## 3. Meritev Dopplerjevega pojava

---

Tirnico satelita lahko izmerimo na različne načine. Za uporabnike satelitske službe, ki že imajo grobe podatke o tirnici in jih zanimajo le popravki, je prav gotovo najzanimivejši način, ki ne zahteva drage dodatne opreme, pač pa pri njem uporabimo obstoječe sprejemnike, oddajnike in antene za komunikacijo s satelitom.

Za majhne popravke podatkov o tirnici satelita je primerna

meritev Dopplerjevega pojava, saj se uporabita obstoječa antena in sprejemnik ter dodatno zahteva le preprosto, poceni in zanesljivo elektronsko vezje, ki v nobenem pogledu ne omejuje delovanja sprejemnega sistema.

Dopplerjeva meritev je seveda smiselna le na signalih satelitov, ki se zadosti hitro premikajo glede na sprejemno postajo. Zato Dopplerjeva meritev ni uporabna za določanje popravkov pri geostacionarnih satelitih!

Dopplerjeva meritev da vedno uporabne rezultate pri satelitih v nizkih tirnicah (pod 2000km), saj se takšni sateliti gibljejo z razmeroma veliko hitrostjo (6-8km/s) in se geometrija glede na sprejemno postajo hitro spreminja, kar da v kratkem času dobro pogojen sistem enačb. (Glej sliko 1!)

Zato je Dopplerjeva meritev primerna za popravek učinka trenja z zemeljskim ozračjem v Keplerjevih elementih, saj trenje nastopa le pri satelitih v nizkih tirnicah, ki se gibljejo zadosti hitro in po primernih krivuljah za Dopplerjeve meritve.

Dopplerjev pomik lahko merimo na katerikoli signalu, ki ga oddaja satelit. Smiselno je seveda izbrati takšen signal, ki izvira iz frekvenčno čim bolj stabilnega izvora na krovu satelita. Frekvenčna stabilnost oddajnika in sprejemnika omejuje točnost predlaganega postopka in to je treba upoštevati pri popravljanju Keplerjevih elementov.

Postopek popravljanja je sicer mišljen za katerikoli satelit, ne pa za navigacijske satelite, se pravi razpoložljivi signali niso nujno najprimernejši za Dopplerjeve meritve. Načrtovalec mora zato izbrati najprimernejši signal, prav tako pa lahko izbira še med meritvijo na visokofrekvenčnem nosilcu ali pa na modulaciji signala.

#### 4. Izvedba meritve in popravkov

---

Opisana metoda je bila uspešno preiskušena v sprejemni postaji NOAA HRPT. Ameriški vremenski sateliti vrste NOAA se izstreljujejo v krožne polarne tirnice na višini okoli 800km (1,2,3). Glavna naloga satelitov NOAA je slikanje zemeljskega površja v več različnih spektrih in oddaja slik in drugih izmerjenih podatkov na Zemljo v S-območju (1.7GHz) s hitrostjo prenosa 665.4kbps. Povsem enak način slikanja Zemlje in prenosa podatkov uporabljajo tudi kitajski sateliti vrste FENG-YUN-1.

Sprejemna postaja NOAA HRPT potrebuje anteno z dobitkom okoli 20dB (zrcalo premera 1m) in ustrezen sprejemnik z demodulatorjem PSK. Ker se sateliti vrste NOAA hitro premikajo prek celotnega neba (prelet traja največ 15 minut), je treba anteno usmerjati proti satelitu s pomočjo servomotorjev, ki jih upravlja računalnik.

Pri satelitih NOAA je možno Dopplerjev pojav meriti naravnost na nosilcu oddaje na 1.7GHz. Žal je zagotovljena točnost frekvence nosilca komaj  $2 \cdot 10^{-5}$  in različni NOAA sateliti uporabljajo različne nosilne frekvence, zato ta rešitev ni niti enostavna niti točna.

Bolj smiselna je meritev Dopplerjevega pojava na frekvenci bitne hitrosti prenosa podatkov 665.4kHz. Bitna hitrost je na krovu satelita sinhronizirana z vrsto instrumentov na zelo stabilno frekvenčno normalo. Razen tega je ta frekvenca enaka za vse satelite in je običajno naravnost na voljo v bitnem sinhronizatorju sprejemnika, kar za vhodno frekvenco (mikrovalovni nosilec) ne velja.

Ker znaša Dopplerjev pomik pri 665.4kHz komaj  $\pm 15$ Hz, za popravek Keplerjevih elementov pa računalnik potrebuje ločljivost meritve 0.001Hz in nov podatek vsako sekundo, je merjenje frekvence bitne hitrosti izvedeno preko digitalnega procesiranja signala, kot je prikazano na sliki 2.

## 5. Prikaz rezultatov

-----  
Dopustno napako in učinkovitost opisane metode je najlažje opisati z navidezno napako v napovedanem času preleta satelita. Pri krmiljenju smeri opisane antene zadošča že napaka +/- 30 sekund za popolno izgubo zveze s satelitom. Učinkovitost popravkov sicer natančneje preverimo tako, da iz izračunanega položaja satelita projeciramo zemljevid (poldnevnik, vzporednik, obrise obal in meje) na sprejeto satelitsko sliko.

Na sliki 3 je prikazana pravilna projekcija zemljevida na satelitsko sliko. Za primerjavo je na sliki 4 vnesena napaka 20 sekund, ki je zelo dobro vidna. Algoritem je bil sicer preiskuvan vse do napake 1 minute in je bil vedno sposoben odpraviti napako do meje natančnosti računanja (manj kot 1 sekunda) v enem samem ugodnem preletu satelita NOAA.

## Literatura

- 
- (1) John R. Schneider: "Guide For Designing RF Ground Receiving Stations For Tiros-N", NOAA Technical Report NESS 75, Washington, D.C., December 1976.
  - (2) Arthur Schwalb: "THE TIROS-N/NOAA A-G SATELLITE SERIES", NOAA Technical Memorandum NESS 95, Washington, D.C., March 1978.
  - (3) Levin Lauritson, Gary J. Nelson, Frank W. Porto: "DATA EXTRACTION AND CALIBRATION OF TIROS-N/NOAA RADIOMETERS", NOAA Technical Memorandum NESS 107, Washington, D.C., November 1979.

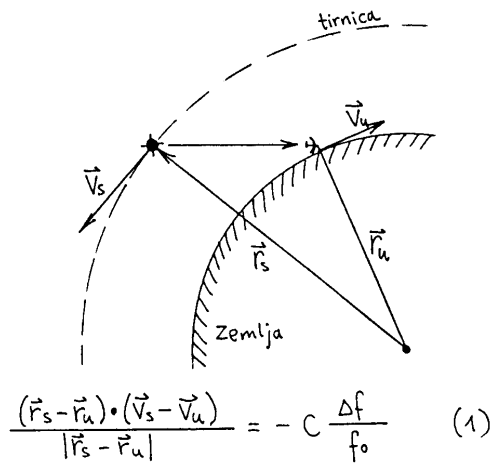
## Seznam slik:

- 
- Slika 1 - Geometrija satelit/sprejemnik
  - Slika 2 - Merjenje Dopplerjevega pomika na bitni hitrosti
  - Slika 3 - Pravilno sprejeta slika s satelita NOAA-13
  - Slika 4 - Ista slika z napako 20s v podatkih o tirnici

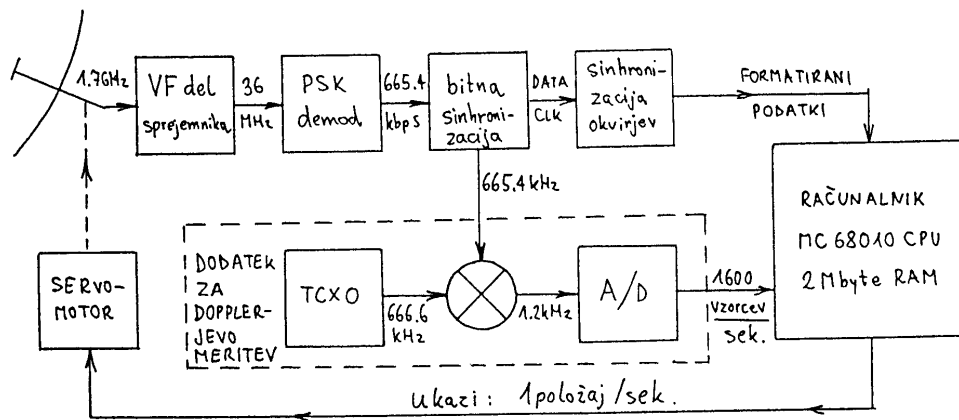
## Življenjepis

-----

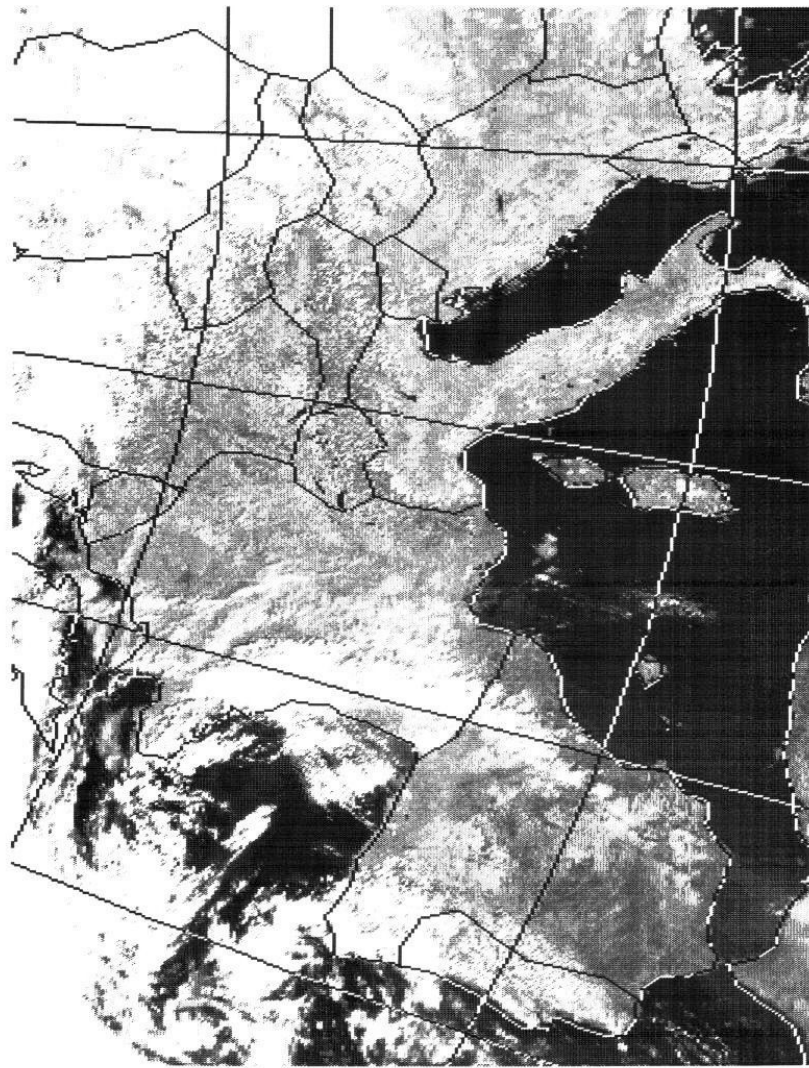
Matjaž Vidmar je bil rojen 16.2.1959 v Ajdovščini. Diplomiral je leta 1980, magistriral leta 1983 ter uspešno zagovarjal svojo doktorsko disertacijo leta 1992, vse iz elektrotehnike na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo Univerze v Ljubljani, kjer je zaposlen kot asistent. V šolskem letu 1988/89 je dobil Fullbrightovo štipendijo in razen študija na University of Colorado delal tudi na National Institute of Standards and Technology na razvoju sprejemnikov prenos časa in sinhronizacijo atomskih ur preko satelita. Že za časa dodiplomskega študija se je aktivno ukvarjal z razvojem satelitske sprejemne tehnike, za časa študija v ZDA pa je za organizacijo AMSAT-NA razvil oddajnike z visokim izkoristkom, ki so bili kasneje vgrajeni na umetne satelite, kateri danes uspešno delujejo v vesolju. Trenutno sodeluje z univerzo v Marburgu (Nemčija) pri razvoju komunikacijske in navigacijske opreme za satelit 'AMSAT-Phase-3D'. Je avtor preko 160 publikacij iz področja elektronike, mikrovalovne in digitalne tehnike ter sprejema satelitskih signalov.



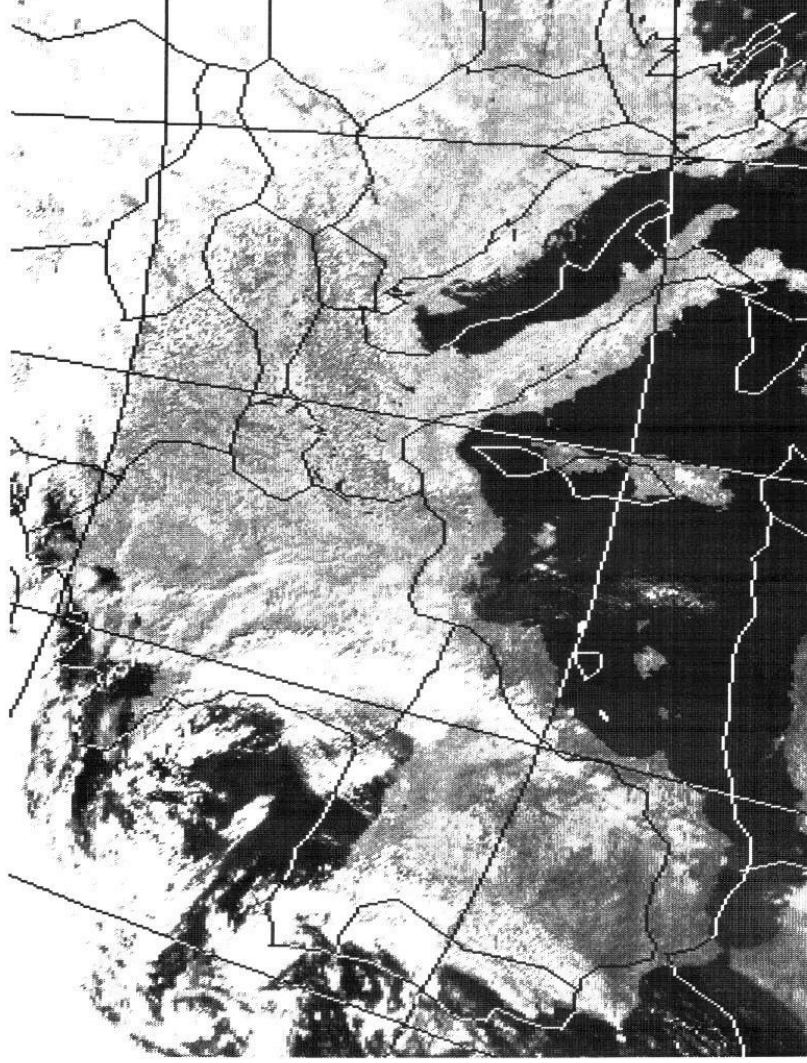
Slika 1 - Geometrija satelit/sprejemnik



Slika 2 - Merjenje Dopplerjevega pomika na bitni hitrosti



Slika 3 - Pravilno sprejeta slika s satelita NOAA-13



Slika 4 - Ista slika z napako 20s v podatkih o tirnici