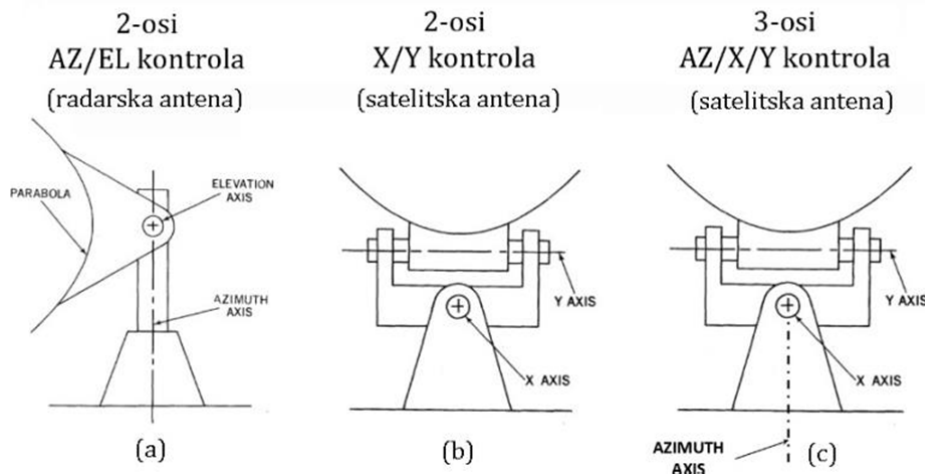


# Specifikacije satelitskog praćenja za FERSAT antenu u X-pojasu

Svrha FERSAT antene je da precizno prati satelite u niskoj zemaljskoj orbit (LEO) i da prima informacije u X-pojasu.

## §1. Tipovi kontrole

Rotator za antenu mora pratiti satelit sa greškom manjom od  $0.1^\circ$ . koriste se dva tipa rotatora: AZ/EL antena (slika @1a) i X/Y antena (slika @1b). U AZ/EL rotatoru praćenje se ostvaruje sa promjenom azimuta i elevacije, dok u X/Y anteni je X-os (osnovna os ili *primary axis*) fiksirana u odnosu na Zemlju, a Y-os montirana na X-rotator. Kut između X-osi i osi orbite se ovdje naziva kut  $\beta$ . Fotografije ovih dvaju pristupa su prikazane u slici @2. U literaturi se za X-Y rotator također pojavljuje termin: *Azimuth Over Elevation*, a za AZ/EL rotator *Elevation Over Azimuth*.



Slika @1: (a) AZ/EL antena sa dvije osi kontrole koja se pretežno koristi za radare (teleskopska kontrola), (b) X/Y sa dvije osi i (c) AZ/X/Y antena sa tri osi koje se koriste za praćenje satelita [2].

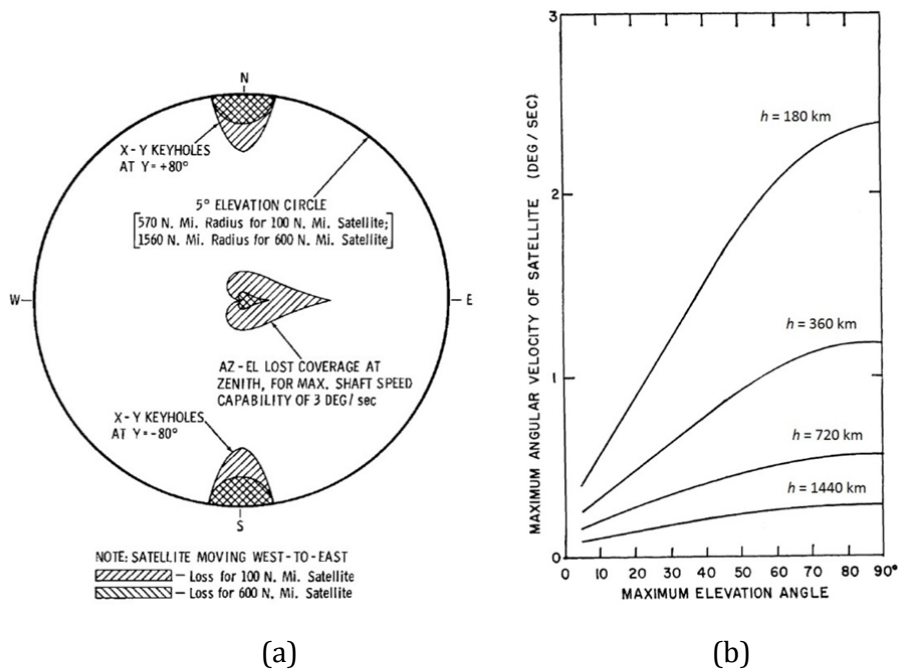
## §2. Vidljivost

AZ/EL antena može vidjeti svaku točku na nebu, ali zbog konačne brzine mehaničkog sustava nije us stanju pratiti objekte koji putuju i prolaze kroz zenit. Naime ako satelit prelijeće točno kroz zenit pod nekim određenim azimutom  $\phi$ , antena će ga pratiti pri fiksnom  $\phi$ , dok se ne približi zenitu kad se azimut  $\phi$  mora promijeniti za  $180^\circ$  da bi neprekidno pratio satelit. Što je trag satelita bliži zemaljskoj stanici (elevacija bliža  $90^\circ$ ), to se azimut mora mijenjati brže pri prolasku satelita kroz najvišu točku na nebu i shodno s time se antena mora brže okrenuti. Rotator antene ima konačnu brzinu promjene kuta i zbog toga postoji jedan dio neba oko zenita u kojem antena ne može precizno pratiti satelit. Ovaj dio neba zove se *keyhole* ili *silent cone*. i njegova veličina i oblik određena je najvećom kutnom brzinom kojom se motori na rotatoru mogu kretati. Za danu brzinu satelita, prostorni kut nedostupnog segmenta ovisi o maksimalnoj brzini

rotatora. Ovaj problem je analiziran već prije 60 godina [2] i ilustriran u slici @3a. AZ-EL antene se najčešće koriste za radar.

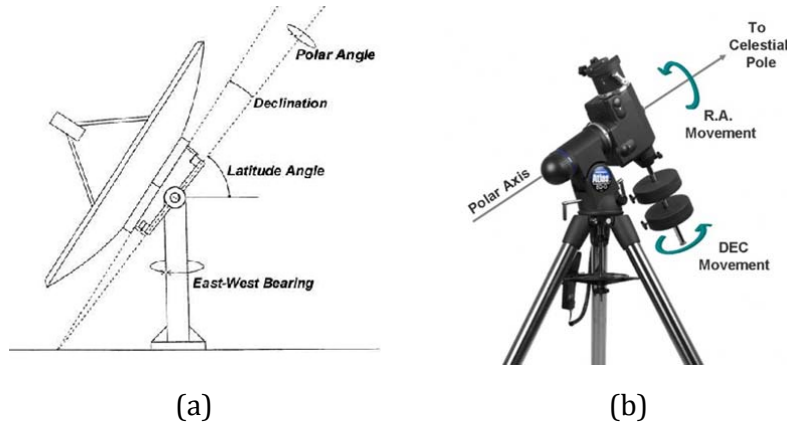


Slika @2: (a) Primjer motorizirane AZ/EL kontrole i (b) primjer motorizirane X/Y kontrole.



Slika @3: (a) nedostupna područja na nebu za AZ-EL i X-Y antene za brzinu rotatora 3°/s [2] i (b) maksimalna kutna brzina potrebna za praćenje LEO satelita.

Za praćenje satelita u niskoj orbiti, najčešće se koriste X/Y rotatori. Antene sa ovim tipom kontrole imaju pristup području neba u kojem se nalaze putujući sateliti, ali također imaju *silent cone* koji se nalazi u smjeri primarne osi. Ako je primarna os usmjerena prema horizontu (paralelna sa površinom Zemlje), *silent cone* će biti nisko na nebu gdje se LEO sateliti rijetko mogu pratiti zbog povećanog šuma.



Slika @4: (a) Polarni rotator (*polar mount*) koji se koristi za geostacionarne satelite [4] i (b) equatorialni rotator (*equatorial mount*) koji se koristi za teleskope i kamere pri promatranju neba – osnovna os je paralelna sa osi rotacije Zemlje.

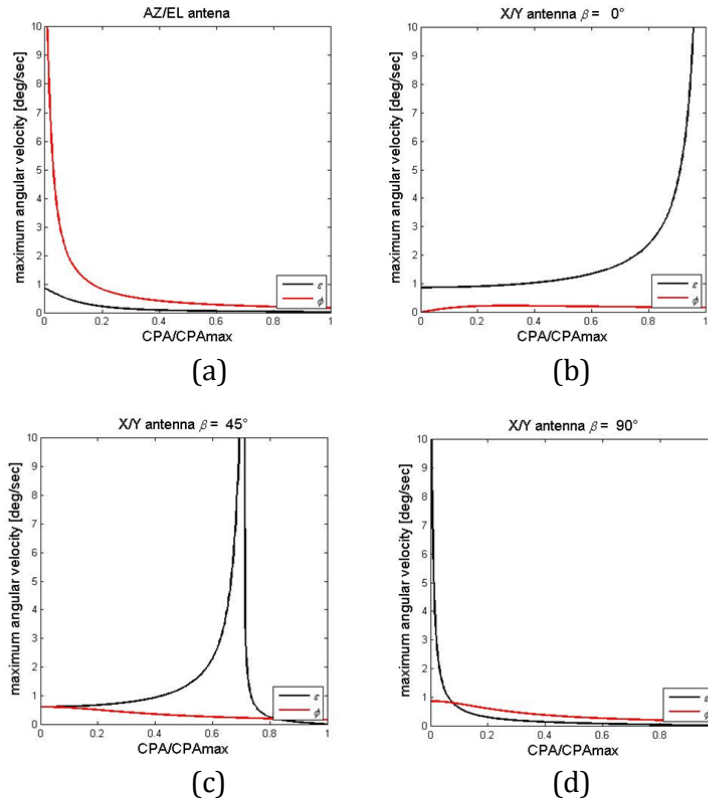
Uz ove osnovne arhitekture rotatora, koriste se polarni rotator prikazan u slici 4(a) i koristi se za primanje signala sa različitih geostacionarnih satelit. Teleskopski rotator ili ekvatorialni rotator prikazan na Slici 4(b) je u suštini X/Y rotator sa osnovnom osi usmjerenoj prema nebeskom sjevernom polu (paralelan sa osi rotacije Zemlje) pa je za praćenje nebeskih tijela dovoljno rotirati jednu os. Rotator X/Y/AZ, prikazan u Slici 1(c) rotator u kojem je uz osi X i Y dodana kontrola azimuta da bi se *silent cone* mogao pomaknuti proizvoljno i smanjila maksimalna kutna brzina kojom se motori moraju kretati za praćenje LEO satelita posebice kad su sateliti nisko na nebu. Teoretski, X/Y/AZ rotator nema *silent cone* i dostupno mu je cijelo nebo za praćenje satelita.

### §3. Analiza kretanja rotatora

Ako pretpostavimo kružnu orbitu LEO satelita i relativno jednostavno može se napisati program koji računa kuteve koji trebaju biti postavljeni na rotatoru da se antena prati takav satelit. Za prolazak kroz zenit, maksimalna kutna brzina kojom se LEO prati raste sa visinom. Slika @3(b) prikazuje da u cijelom području interesa (visine veće od 200 km) i evidentno je da je dovoljna kutna brzina antenskog rotatora  $3^\circ/\text{s}$ . Međutim, ovo je apsolutna kutna brzina gledana sa Zemlje prema satelitu koja ne uzima u obzir kako je praćenje realizirano. Iz ove kutne brzine mora se proračunati kutna brzina pojedinog motora na rotatoru i koje mogu biti mnogo veće ovisno o tome da li satelit prolazi blizu ili je u *silent cone*.

Usporedba maksimalnih kutnih brzina potrebnih sa rotatorima AZ/EL i X/Y ( $\beta = 0^\circ, 45^\circ$  i  $90^\circ$ ) u ovisnosti o udaljenosti orbite od zemaljske stanice prikazana je u slikama @5. Udaljenost zemaljske stanice od orbite izražena je sa Closest Point of Approach

(CPA) koji ovisi o orbiti i za svaku visinu satelita visinu ima različitu maksimalnu vrijednost CPAm<sub>ax</sub>. Slika @5 je napravljena za  $h = 500$  km. Graf pokazuje maksimalnu kutnu brzinu koju motori na rotatoru moraju ostvariti da bi se pratio satelit na elevaciji većoj od  $\varepsilon_{\min} = 0^\circ$ . Vidi se da su zahtjevi na kutnu brzinu AZ/EL antenu najveći u zenitu, a za X/Y antenu u smjeru osnovne osi (x osi) kao što je već objašnjeno u publikaciji [2].



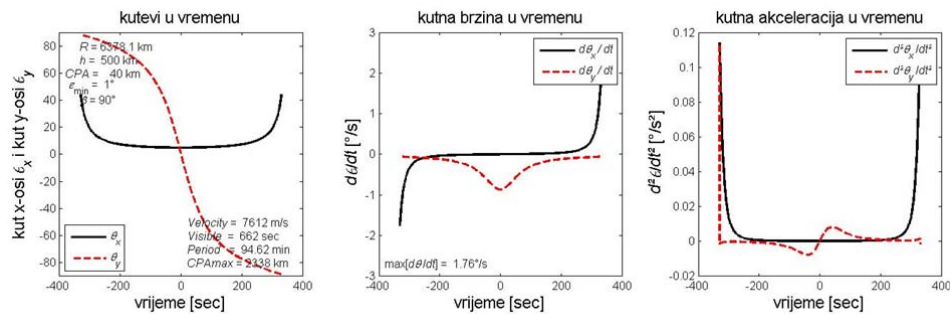
Slika @5: Silent-cone područja za AZ-EL i X-Y antene u ovisnosti od udaljeni od zemaljske stanice do CPA (closest point of approach). Za ovaj proračun  $\varepsilon_{\min} = 0$  i  $h = 500$  km.

Silent cone postoji i u X/Y rotator i pitanje koje se postavlja je koja je orijentacija osnovnu os X/Y antene optimalna? Iz rezultata na Slici @5 može se nazrijeti da bi šteta bila najmanja ako je  $\beta = 90^\circ$ , to jest, da je osnovna os okomita na os orbite (Slika 5(d)). Budući da se SSO orbite skoro polarne, to znači da osnovnu os treba usmjeriti u sjeru sjever-jug.

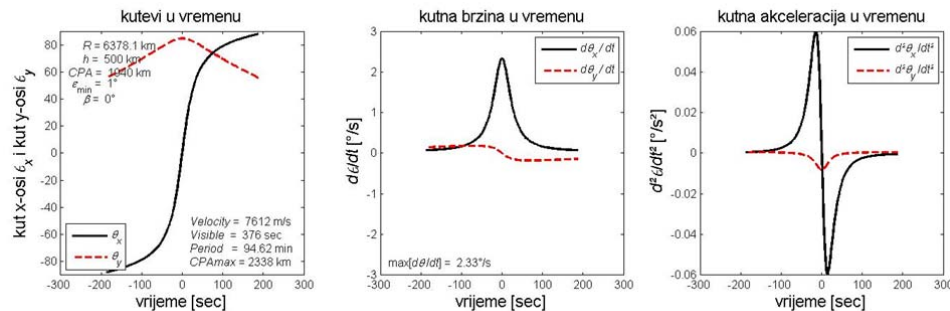
Detalniji uvid u ovu prednost može se dobiti ako izračunamo brzine potrebne da se prati satelit ako je minimalna elevacija  $\varepsilon_{\min} = 1$ , na primjer. Rezultati su prikazani na slikama @6 i @7 i u oba slučaja se vidi da je silent cone određen primarnom osi i da kutna brzina motora raste kad se približavamo toj osi. Satelit koji prolazi blizu zenita zahtjevat će brže kretanje osnovne osi tijekom pojavljivanja i zalaska na horizontu (mala elevacija) ako je primarna os orijentirana sjever-jug ( $\beta = 0$ ) (Slika @6). Ista orijentacija osnovne osi neće imati nikakvih problem kad se satelit pojavljuje daleko blizu horizonta na istoku ili zapadu. S druge strane, ako je osnovna osi usmjerena istok-zapad ( $\beta = 0$ ) za

polarne orbite silent cone će spriječiti praćenje satelita koji je nisko iznad horizonta na istoku ili zapadu.

U oba slučaja problemi sa praćenjem se pojavljuju tek kad su sateliti nad horizontom pa vjerojatno i nije toliko bitno u kojem smjeru je osnovna os antene orijentirana iako se također vidi da su zahtjevi manji kad je  $\beta = 90^\circ$ . U literaturi se spominje sjever-jug orijentacija za osnovnu os kada se radi o *earth tracking*, a istok-zapad kad radi o promatranju svemira [3].



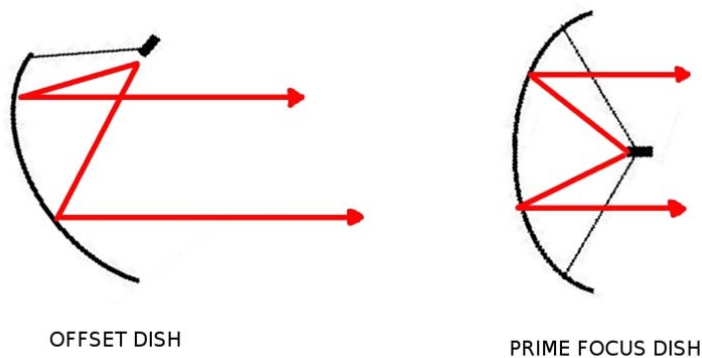
Slika @6: Proračun kretanja antene potrebnog za praćenje satelita koji prolazi vrlo blizu zenita (trag satelita je 40 km od zemaljske stanice), a primarna os je okomita na os orbite. Kutna brzina osnovne osi raste kad je satelit blizu horizonta.



Slika @7: Proračun kretanja antene potrebnog za praćenje satelita koji prolazi nisko nad horizontom (trag satelita je 1940 km od zemaljske stanice) a primarna os je paralelna sa osi orbite. Kutna brzina osnovne osi raste kad je satelit blizu horizonta.

#### §4. Orijehtacija VIKING antene

Antena VIKING prikazana na slici @8 nije sferična već eliptična: termin je *prime focus offset*. Offset angle je kut koji opisuje koliko je os simetrije antene pomaknuta od osi paralelno s kojom antena najoblje prima valove. Uobičajeni kutevi su  $22^\circ$  do  $35^\circ$  što znači da bi antena uhvatila horizontalan snop (od satelita sa horizonta) mora biti postavljena na  $\pm 44^\circ$  do  $\pm 70^\circ$ . Ovo nema direktnu vezu za kontrolnim algoritmom za pokrtanje antene, ali ima veze s time kako će se antena montirati.



Slika @8: Dva tipa prime-focus antena: "PRIME FOCUS" i "OFFSET".

- [1] A. J. Rolinski, D. J. Carlson, R. J. Coates, "The X-Y Antenna Mount for Data Acquisition from Satellites", *Proc. IRE on Space Electronics and Telemetry*, pp. 159-163, June 1962.
- [2] C. H. Looney, Jr., D. J. Carlson, "Coverage diagrams for X-Y and Elevation-over-Azimuth Antenna Mounts", *NASA Technical Note D-2963*, August 1965.
- [3] [http://www.carnarvonspace.com/wiki/index.php?title=Tracking\\_Antenna\\_Mounts](http://www.carnarvonspace.com/wiki/index.php?title=Tracking_Antenna_Mounts)
- [4] M. Richaria, *Satellite Communications Systems*, MacMillan, 1995.



Slika @9: Tanjur anetne za projekt FERSAT. Dijametar je 2.4 metra.



Slika @10 – Lokacija na krovu zgrade C na FER-u u Zagrebu (na mjestu gromobrana koji će biti pomaknut prema rubu zgrade).

	Diameter	Pointing accuracy	Angular velocity	Angular accel.	Wind (oper.)	Wind (survival)
COMTECH Micro Deployable X/Y	1.4 m	< 0.1°	4°/s	10°/s <sup>2</sup>	56 km/hr	96 km/hr
CGC Type 1 X/Y Tracking	2.4 m	< 0.1°	4°/s	10°/s <sup>2</sup>	90 km/hr	200 km/hr
VIKING SATCOM	2.4 m				80 km/hr	200 km/hr
ANTESKY	3.7 m				72 km/hr	200 km/h

Tablica ©1: Usporedba specifikacija komercijalnih X/Y antena