



Kosmiczne otoczenie Ziemi

Krzysztof Kamiński

Metody wykrywania, pomiarów pozycji i charakteryzacji satelitów

Radar

Rodzaje radarów:

mono-statyczny
bi-statyczny
aktywny
pasywny

Typ sygnału:

ciągła fala monochromatyczna
modulacja częstotliwości
dyskretne pulsy

dopplerowski
pulsowo-dopplerowski

Rodzaje anten:

paraboliczny (talerzowy, zwierciadlany)
szyk fazowy (ang. phased array)
radar z syntetyczną aperturą (ang. SAR)

Równanie radaru = równanie zasięgu radiolokacyjnego

$$P_R = P_T \frac{G_T A_R RCS F^4}{(4\pi)^2 R_R^2 R_T^2 L^2}$$

P_R – moc odebrana (energia odebrana na jednostkę czasu)

P_T – moc nadawana (energia transmitowana na jednostkę czasu)

G_T – zysk (ang. gain) anteny nadawczej

$$G_T = \eta D$$

η – sprawność energetyczna (efektywność) anteny

D – kierunkowość anteny

G_T – zysk energetyczny (ang. gain) anteny nadawczej

$$G_T = \eta D$$

η – sprawność energetyczna (efektywność) anteny

$$\eta = \frac{E_{WY}}{E_{WE}}$$

Stosunek energii dostarczonej do anteny do energii wypromieniowanej w postaci fal el-mag.

Jedną z przyczyn sprawności mniejszej niż 100% jest niedopasowanie impedancji anteny do impedancji układu nadawczego i kabla antenowego. Powoduje to odbicie sygnału w stronę nadajnika zamiast jego wypromieniowanie. Fala odbita nakłada się z transmitowaną i powstaje fala stojąca.

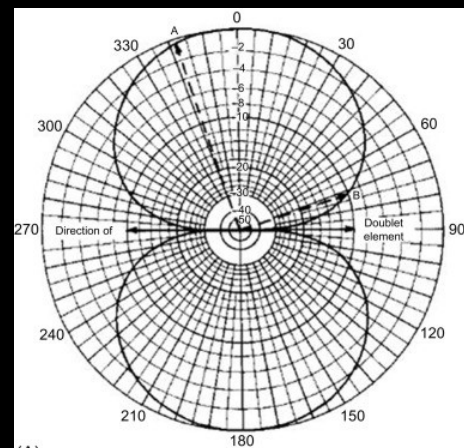
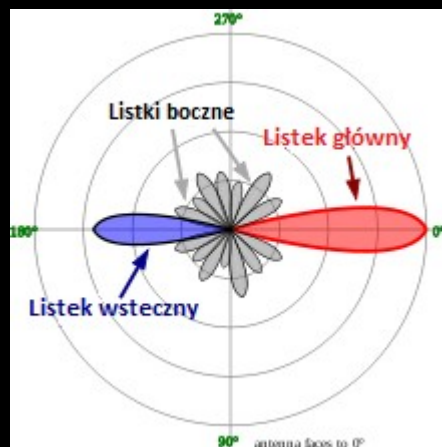
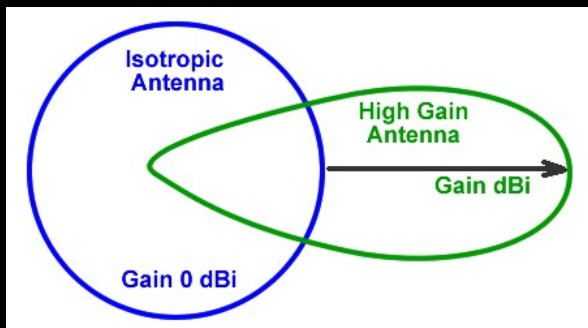
Zwykle podaje się to jako VSWR (ang. Voltage Standing Wave Ratio).

G_T – zysk energetyczny (ang. gain) anteny nadawczej

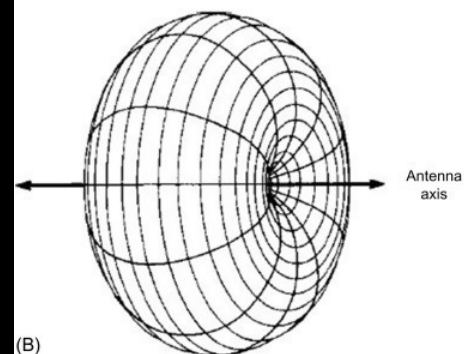
$$G_T = \eta D$$

D – zysk kierunkowy (kierunkowość) anteny

Jest to zdolność anteny do koncentrowania energii w wybranym kierunku.

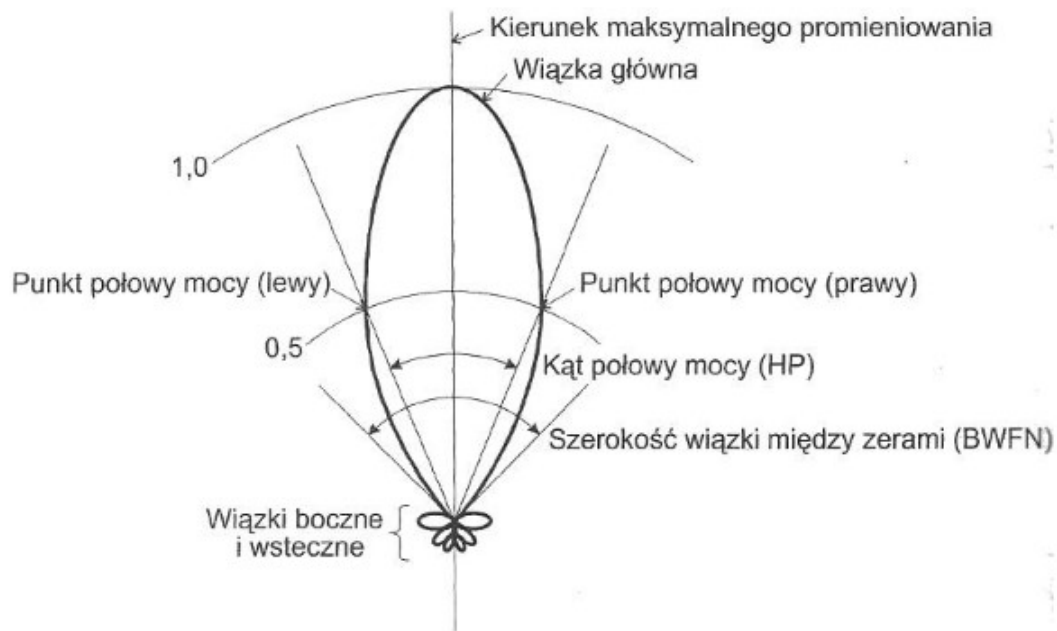


(A)



(B)

Charakterystyka kierunkowa anteny dipolowej.



G_T – zysk energetyczny (ang. gain) anteny nadawczej

$$G_T = \eta D$$

D – zysk kierunkowy (kierunkowość) anteny

$$D = 10 \log_{10} \frac{P}{P_{REF}}$$

P – moc sygnału badanego

P_{REF} – moc sygnału odniesienia

D – zysk kierunkowy (kierunkowość) anteny

$$D = 10 \log_{10} \frac{P}{P_{REF}}$$

Zysk G_T anteny zwykle wyraża się w dB.

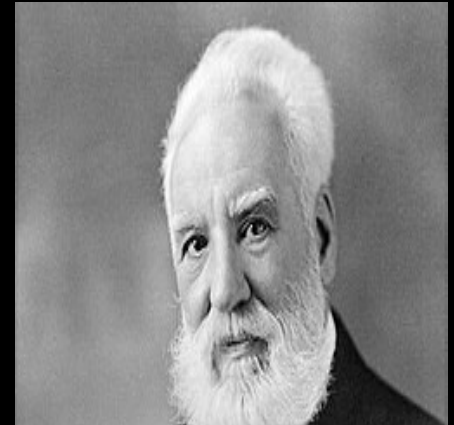
Zysk D kierunkowy względem anteny izotropowej wyraża się w dBi, a względem dipola półfalowego w dBd.

Definicja decybela:

$$P_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P}{P_{REF}}$$

$$10\text{dB} = 10:1$$

$$20\text{dB} = 100:1$$



Aleksander Graham Bell

G_T – zysk energetyczny (ang. gain) anteny nadawczej

$$G_T = \eta D$$

Zysk kierunkowy D dipola półfalowego: 2.15 dBi (3.3x)



Specyfikacja:

- Typ artykułu: antena WiFi
- Częstotliwość: 2,4G/5G
- Zysk: 6DBI
- Współczynnik fali stojącej: $\leq 1,5$
- Interfejs anteny: żeński otwór SMA
- Długość anteny: ok. 19 cm / 7,5 cala
- Długość przedłużacza: ok. 17 cm / 6,7 cala
- Interfejs kabla przedłużającego: IPEX4
- Dotyczy modelu: karta sieciowa z interfejsem NGFF M.2

Zysk kierunkowy D = 6 dBi:
7.8x w stosunku do anteny
izotropowej

Anteny paraboliczne
mogą mieć D > 30 dBi
ponad 1000x w stosunku
do anteny izotropowej

Równanie radaru = równanie zasięgu radiolokacyjnego

$$P_R = P_T \frac{G_T A_R RCS F^4}{(4\pi)^2 R_R^2 R_T^2 L^2}$$

A_R – powierzchnia (apertura) skuteczna anteny odbiorczej

$$A_R = G_R \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

G_R – zysk anteny odbiorczej
względem anteny izotropowej

λ - długość fali

Dla anten parabolicznych zbliżone
do powierzchni zwierciadła głównego,
choć zawsze nieco mniejsze.

$$A_{izo} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

apertura anteny izotropowej
z definicji o gainie 1.

$$P_R = p A_R$$

moc odbierana P_R
natężenie oświetlenia p w W/m^2
apertura skuteczna A_R w m^2

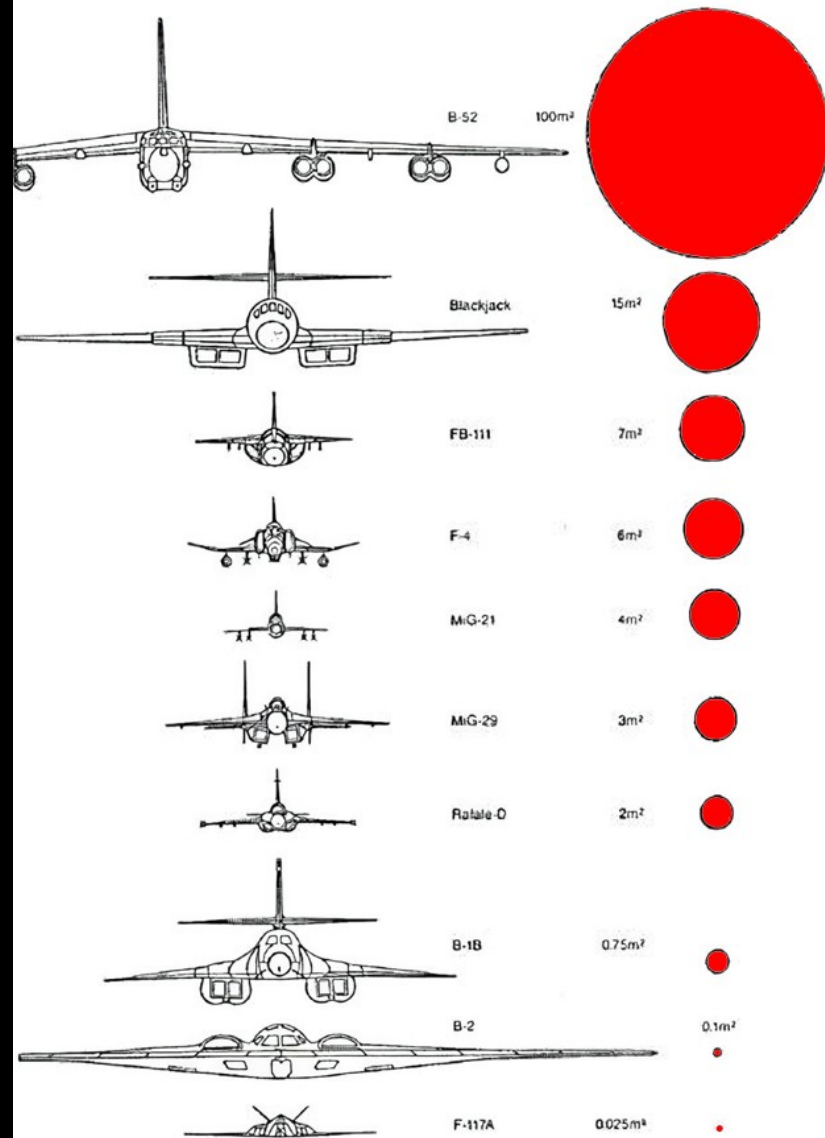
Równanie radaru = równanie zasięgu radiolokacyjnego

$$P_R = P_T \frac{G_T A_R RCS F^4}{(4\pi)^2 R_R^2 R_T^2 L^2}$$

RCS – skuteczna powierzchnia odbicia lub sygnatura radarowa ($= \sigma$)

Zależy od:

- rozmiaru obiektu,
- materiału z którego wykonana jest powierzchnia,
- rozmiaru obiektu względem długości fali,
- kąta padania,
- kąta odbicia,
- polaryzacji sygnału.



Równanie radaru = równanie zasięgu radiolokacyjnego

$$P_R = P_T \frac{G_T A_R RCS F^4}{(4\pi)^2 R_R^2 R_T^2 L^2}$$

R_R – odległość obiektu od odbiornika

R_T – odległość obiektu od nadajnika

L – współczynnik pochłaniania fal w ośrodku

Gdy $R_R = R_T$:

$$P_R \propto P_T \frac{1}{R^4}$$

Równanie radaru = równanie zasięgu radiolokacyjnego

$$P_R = P_T \frac{G_T A_R RCS F^4}{(4\pi)^2 R_R^2 R_T^2 L^2}$$

G_T zysk (ang. gain) anteny nadawczej = 30 dbi

$$A_R = 100 \text{ m}^2$$

$$RCS = 1 \text{ m}^2$$

$F = 1$ (czynnik propagacji fali w próżni, np. interferencji)

$$R_R = 1000 \text{ km}$$

$$R_T = 1000 \text{ km}$$

$$L = 1$$

$$P_R = P_T \frac{10^{-5}}{1.57 \cdot 10^{14}} = P_T \cdot 6 \cdot 10^{-20}$$

Szum termiczny odbiornika radiowego

$$P_n = k T B$$

k – stała Boltzmannna = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T – temperatura w Kelvinach

B – szerokość pasma w Hz

$$P_n = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 270 \cdot 1000000 = 3.7 \cdot 10^{-15} \text{ W}$$

$$P_T = 1 \text{ MW (GRAVES)}$$

$$P_R = 10^6 \cdot 6 \cdot 10^{-20} = 6 \cdot 10^{-14} \text{ W}$$

Radar GRAVES

(fr. grand réseau adapté à la veille spatiale)

Radar bistatyczny (nadajnik 364 km od odbiornika).

Radar dopplerowski (nadajnik wysyła falę ciągłą bez modulacji 24/7).

Nadajnik z czterema osobnymi szyskami fazowymi.

Pasmo VHS (143.050 MHz).

Operacyjny od 2006r (budowany 15 lat).



Radar GRAVES

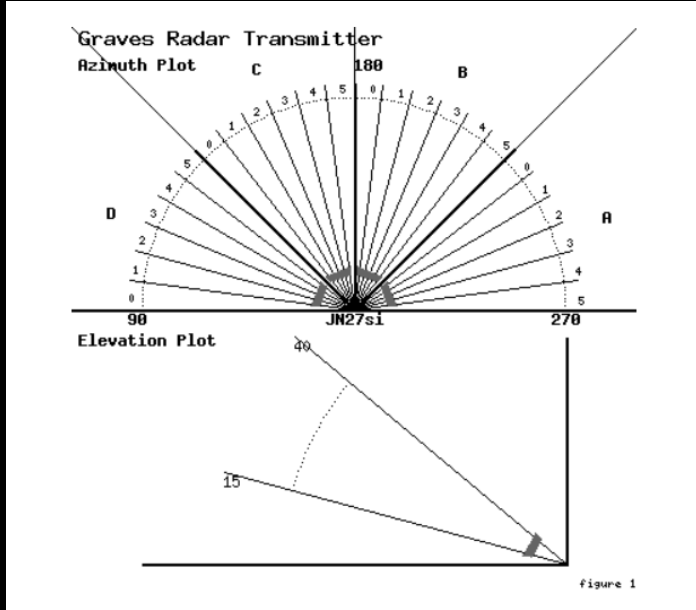
(fr. grand réseau adapté à la veille spatiale)



Odbiornik zawiera jeden szyk fazowy z 100 anten.
Gdy działają razem mogą dać szerokość wiązki odbiorczej ok 2 stopnie.

Radar GRAVES

(fr. grand réseau adapté à la veille spatiale)



Nadajnik oświetla azymuty od 90 do 270 stopni (w kierunku południowym), które są podzielone na sektory A,B,C,D po 45 stopni każdy. Każdy sektor przeskakuje co 7.5 stopnia w azymucie co 3.2s. W sumie wiązka omiata każdy punkt 4500 razy na dobę.

Szerokość pojedynczej wiązki:
25 stopni w pionie, 7.5 stopni w poziomie.
Nadawane są 4 takie wiązki na raz.

Radar GRAVES (fr. grand réseau adapté à la veille spatiale)

Założeniem był zasięg ok. 2500 km, co daje wysokość orbit ok 1000 km. Analizowano orbity geosynchroniczne i możliwość ich ciągłej obserwacji przy okresach 16, 15 i 14 obiegów na dobę.

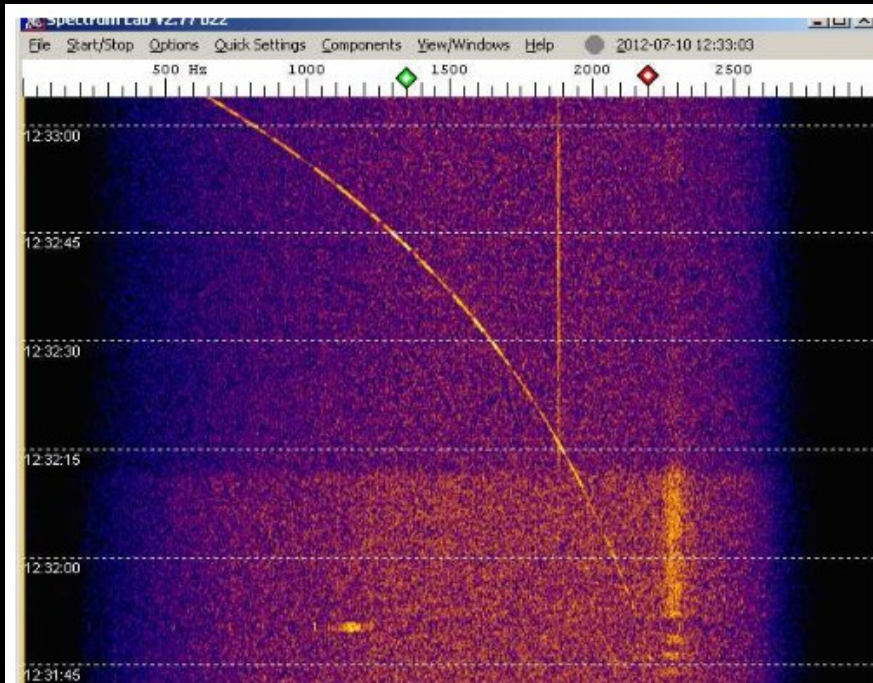
Częstotliwość 143.050 MHz oznacza długość fali 2.1m. Jest to kompromis, gdyż niższe częstotliwości są tańsze w emisji. Oznacza to możliwość wykrywania głównie dużych obiektów.

Radar wykonuje ok. 170 000 pomiarów – ok. 5500 łuków (ang. tracks) dziennie.

Radar GRAVES

(fr. grand réseau adapté à la veille spatiale)

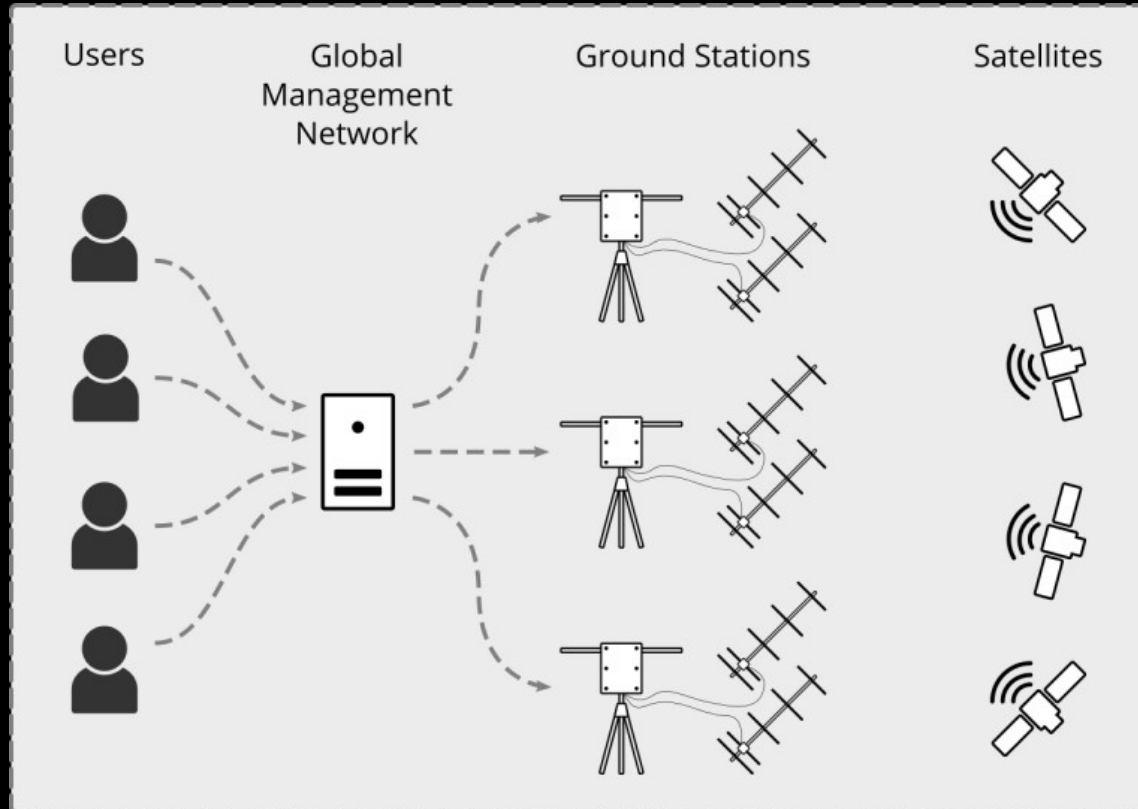
Miłośnicy radioamatorzy wykorzystują sygnał radaru GRAVES i za pomocą prostego sprzętu rejestrują odbicia od satelitów i samolotów.



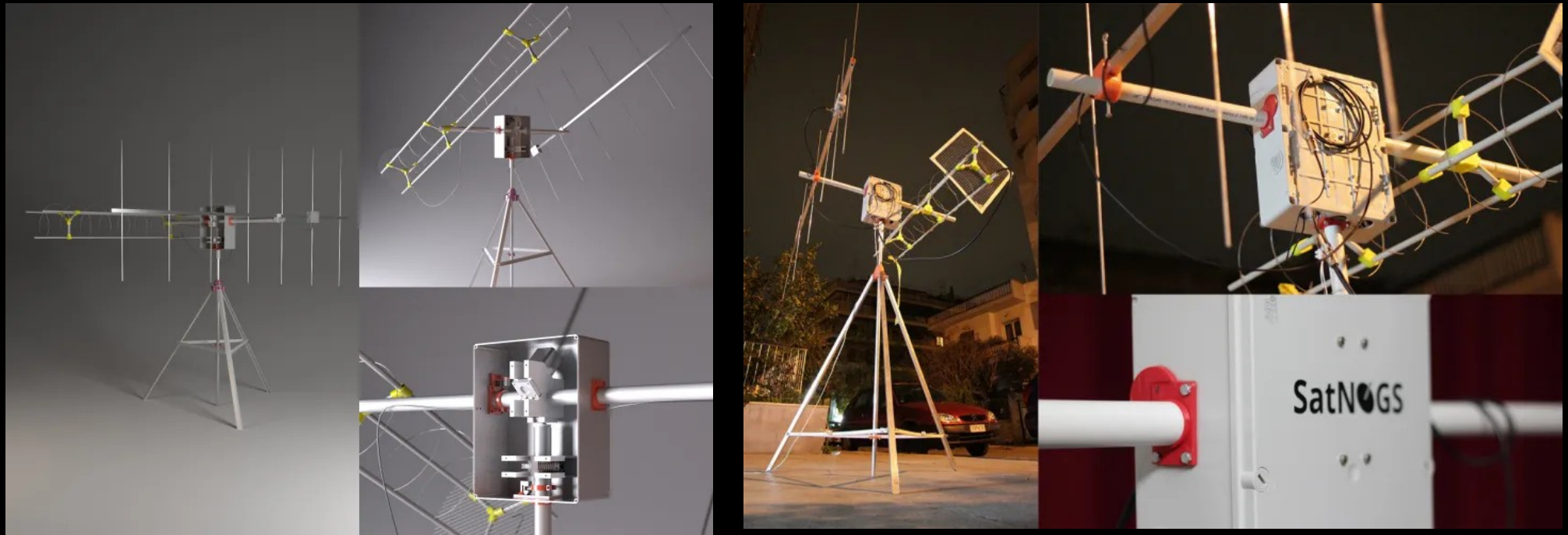
Obserwacje echa od ISS
za pomocą prostej anteny.

Projekt SatNOGS

Satellite Networked Open Ground Station
od 2004 roku
odbieranie sygnałów nadawanych przez satelity

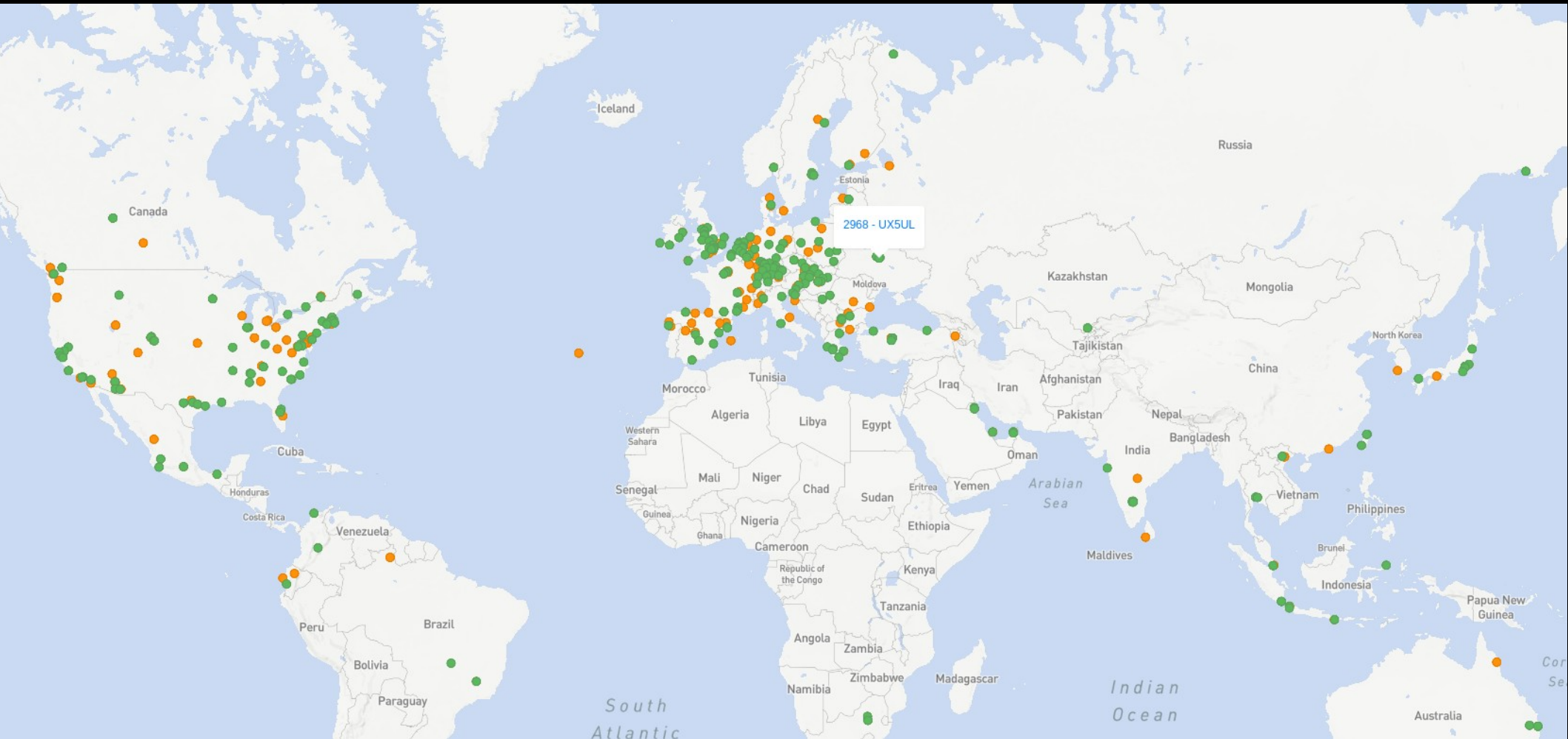


Projekt SatNOGS



Koszt takiej stacji to ok 500 USD.

Projekt SatNOGS



Projekt SatNOGS

SatNOGS DB

<https://db.satnogs.org/>

TIRA - Tracking & Imaging Radar

Rok oddania do użytku: 1970

Fraunhofer Institute for High Frequency Technology and Radar Techniques (FHR)

Średnica: 36m

System: Cassegrain

Typ: monostatyczny

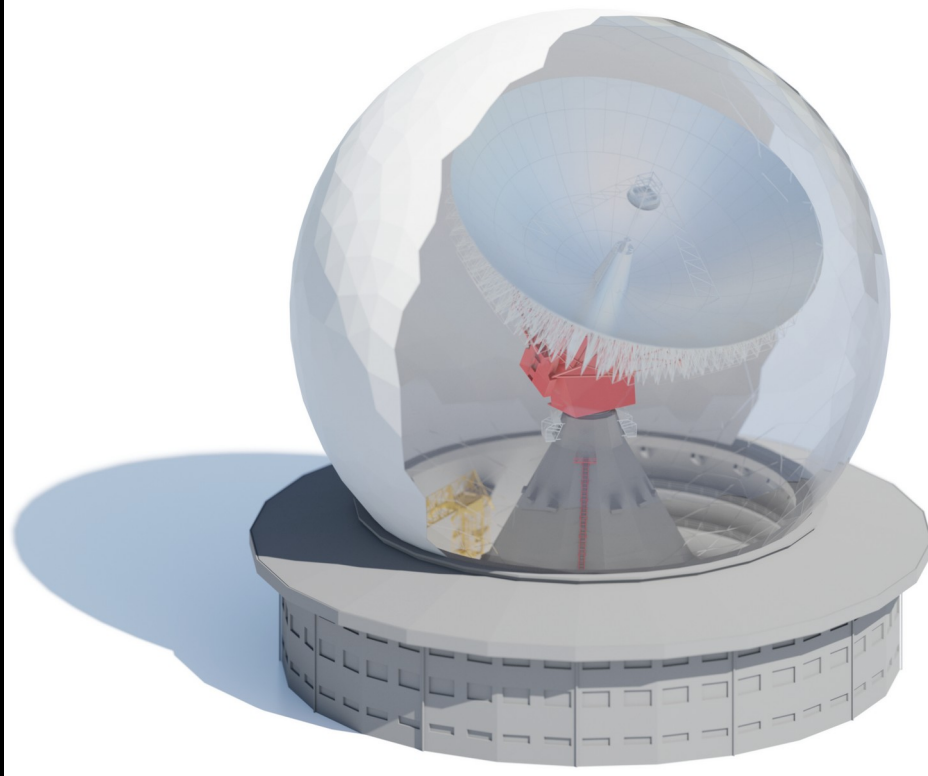
Pasmo: L (1.3 GHz) oraz Ku (16.7 GHz) → Ka (po modernizacji)

Kopuła: 48m

Tryby pracy: śledzenie i obrazowanie

Moc nadajnika: 1.5 MW

TIRA - Tracking & Imaging Radar



Masa anteny: 240 ton

Prędkość obrótu w azymucie: 24 st/s

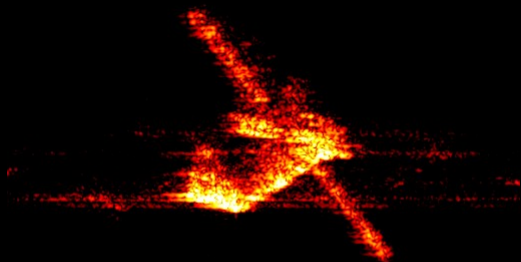
Cztery tuby w ognisku Cassegraina służą jako nadajnik i odbiornik. Różnice natężeń pomiędzy nimi pozwala korygować antenę.

Kopuła radarowa (ang. radome) zrobiona z materiału przezroczystego dla fal radiowych.

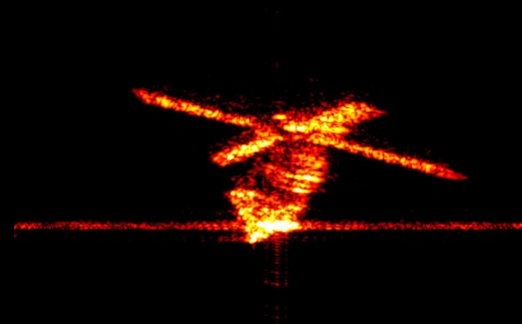
TIRA - Tracking & Imaging Radar



TIRA - Tracking & Imaging Radar



© Fraunhofer FHR



© Fraunhofer FHR

Pojazd ładunkowy ATV-3 w 2012r zobrazony przez radar TIRA

TIRA - Tracking & Imaging Radar

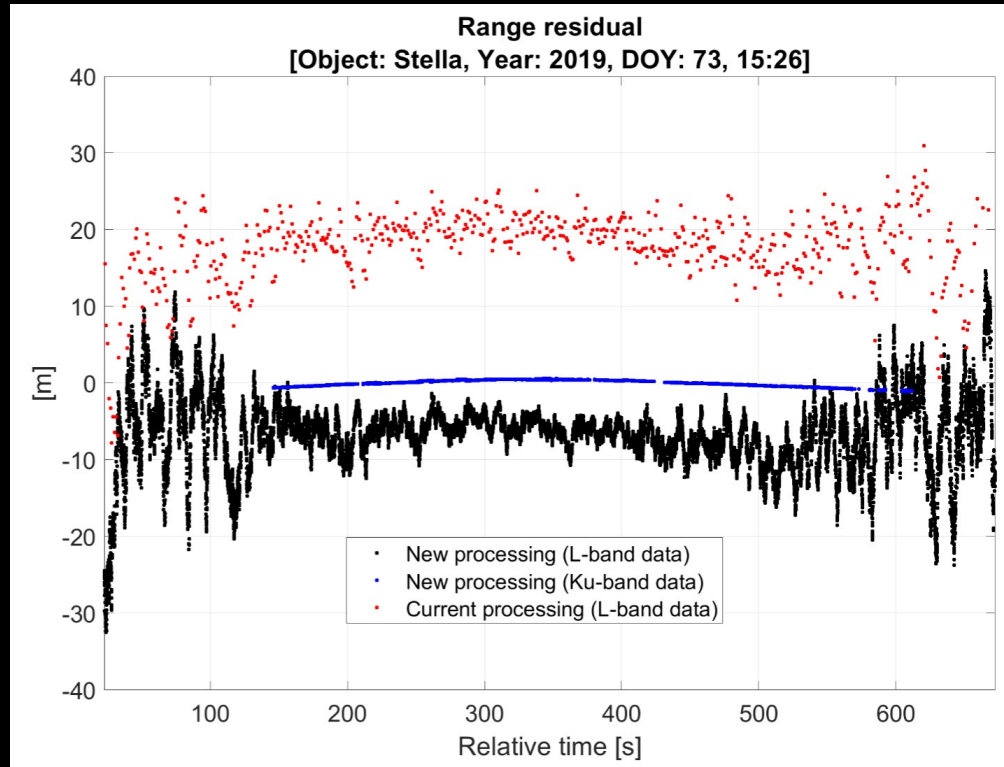
Możliwość detekcji obiektów o rozmiarach 2cm z odległości 1000km.

Przy współpracy z radioteleskopem 100m w Effelsbergu
próg detekcji osiąga 0.9cm.

Szerokość wiązki 0.45 stopnia (pasmo L) [$\theta = 1.22 \cdot 0.2306 / 34 = 0.47$ st]
oraz 0.035 stopnia (pasmo Ku) [$\theta = 1.22 \cdot 0.018 / 34 = 0.037$ st].

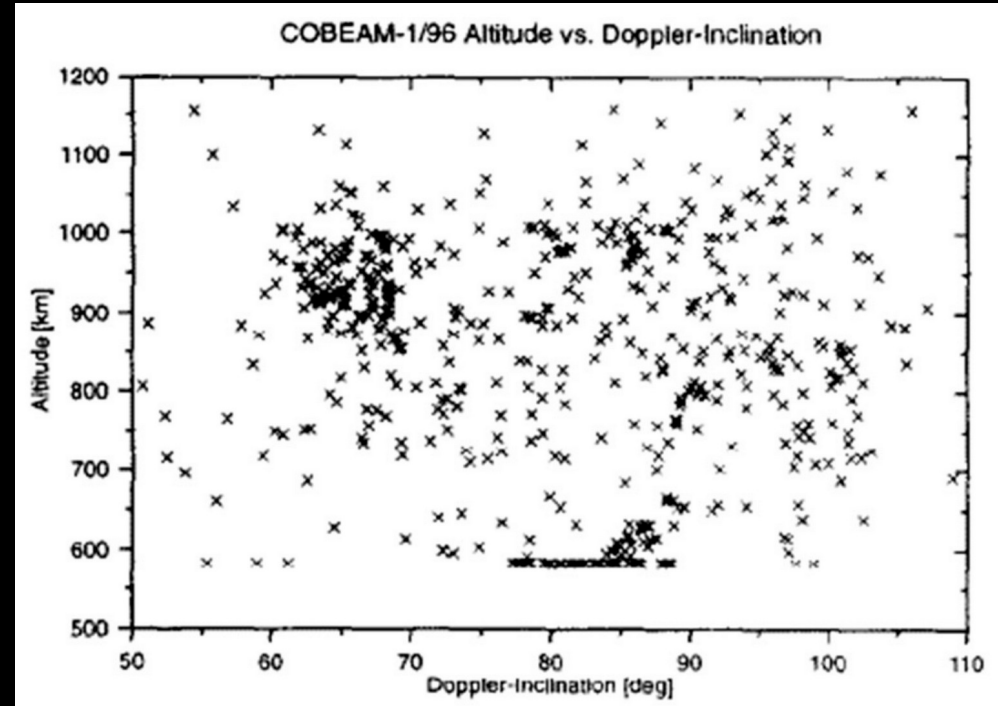
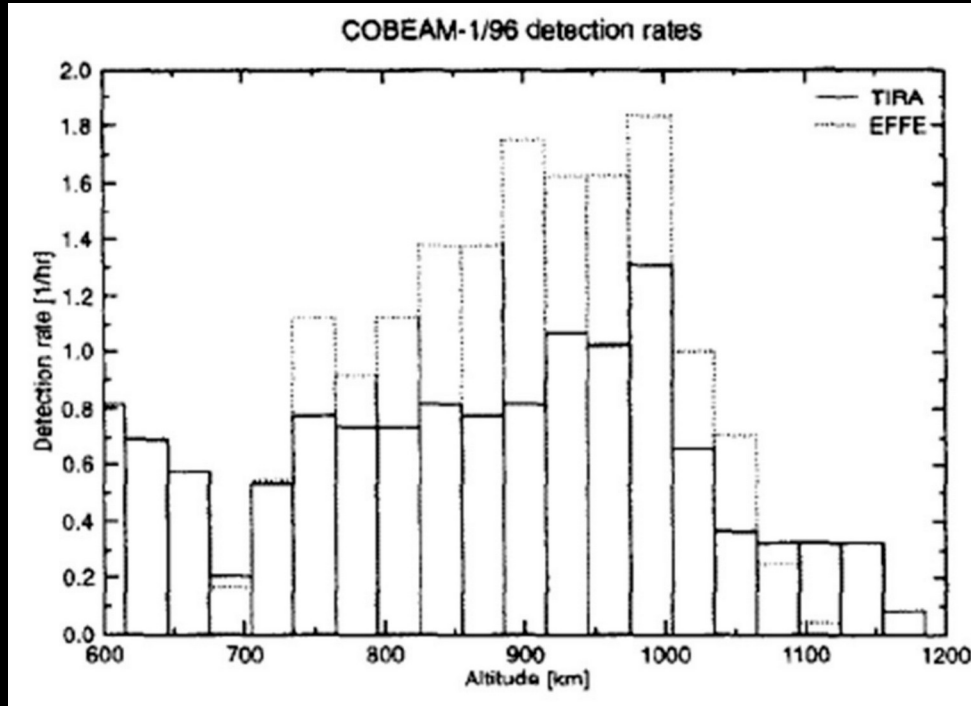
TIRA - Tracking & Imaging Radar

Nowy sposób analizy danych pozwala zmniejszyć rozrzut w residuach
(D. Cerutti-Maori, J. Rosebrock, C. Carloni, M. Budoni, I. Maouloud, and J. Klare 2021).

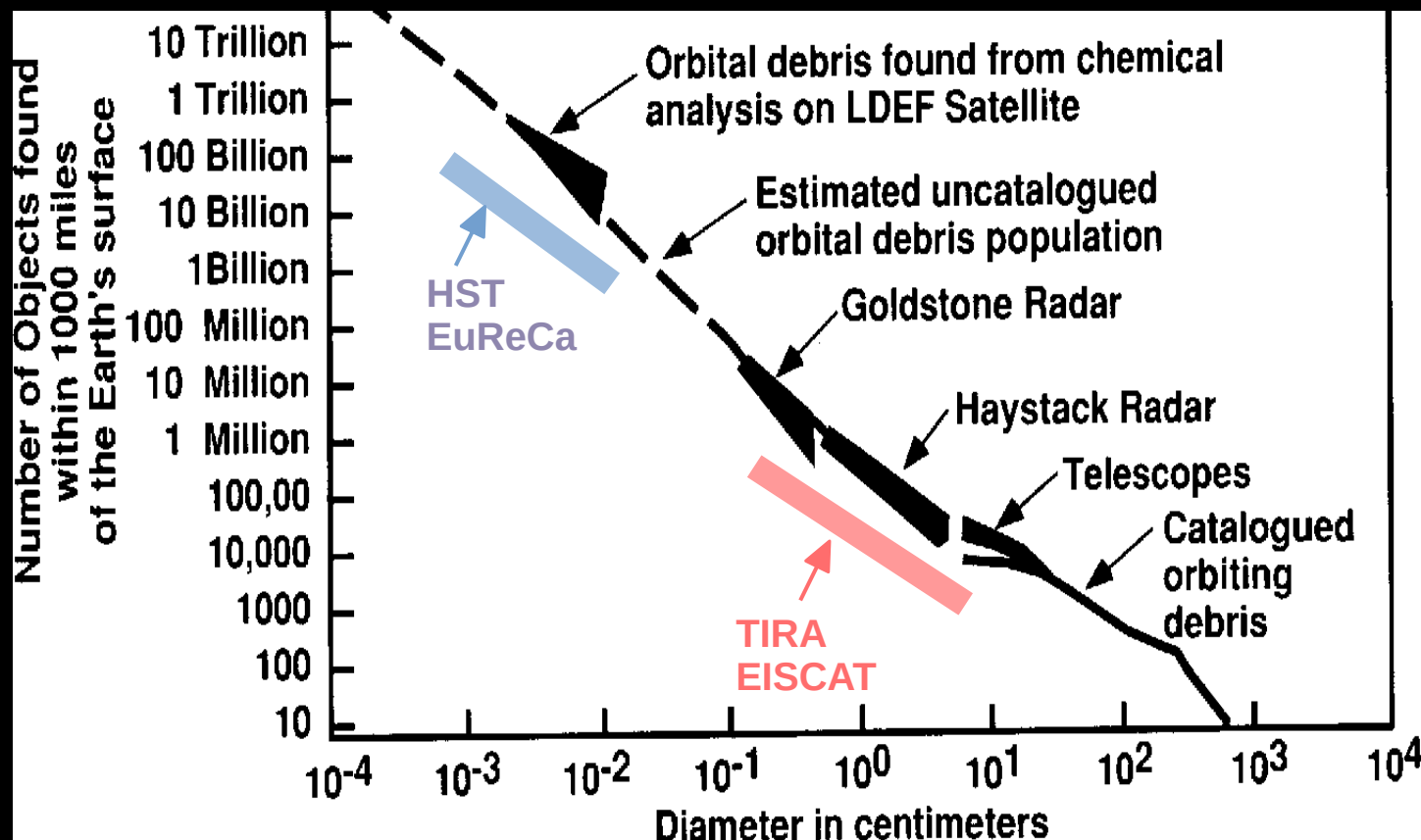


TIRA - Tracking & Imaging Radar

Eksperymenty typu wpatrywanie się (ang. beam-park experiment)



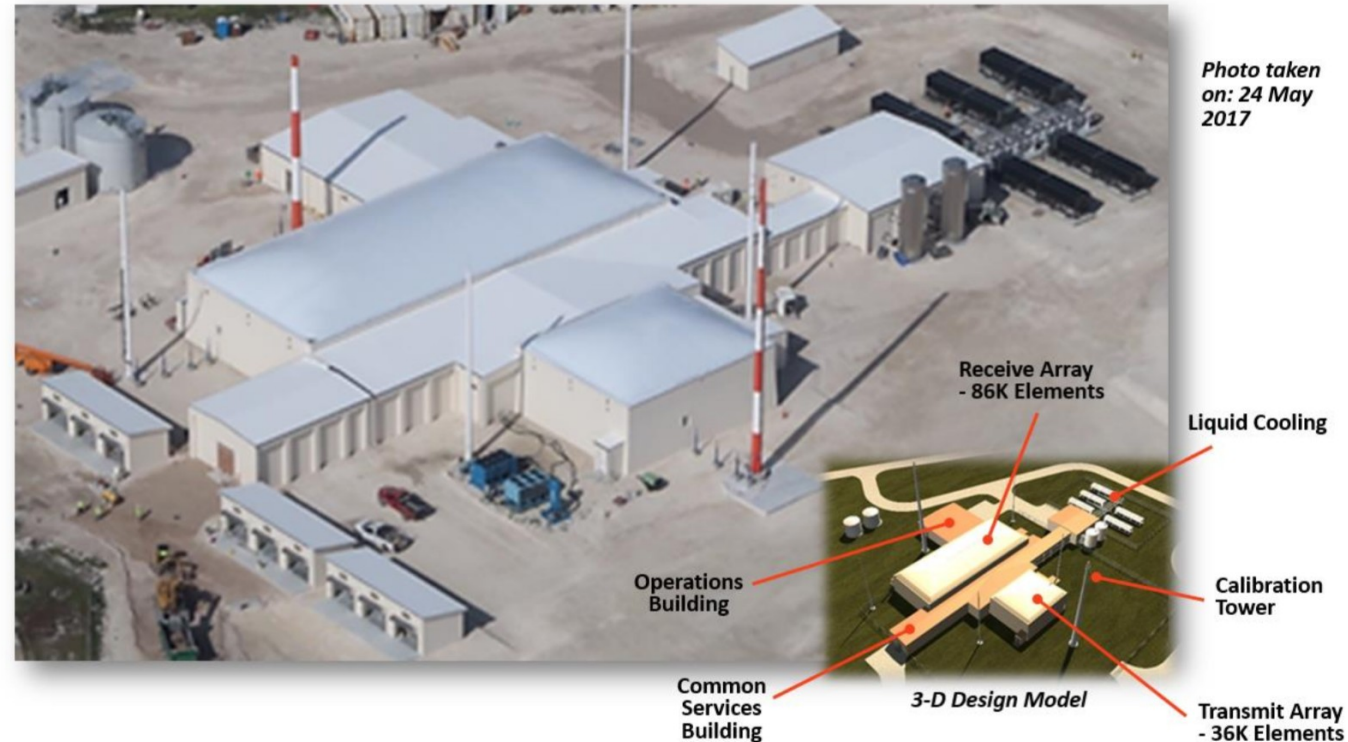
Przykładowe wyniki 24h kampani radaru TIRA i radioteleskopu EFFE w 1996r (499 detekcji).



Rozmiary i ilość obiektów (Portree & Loftus, 1999)

LDEF – Long Duration Exposure Facility, EuReCa – European Retrieval Carrier,
EISCAT – European Incoherent Scatter Radar

Space Fence



Moc nadajnika:
średnia: 0.81 MW
chwilowa: 2.69 MW

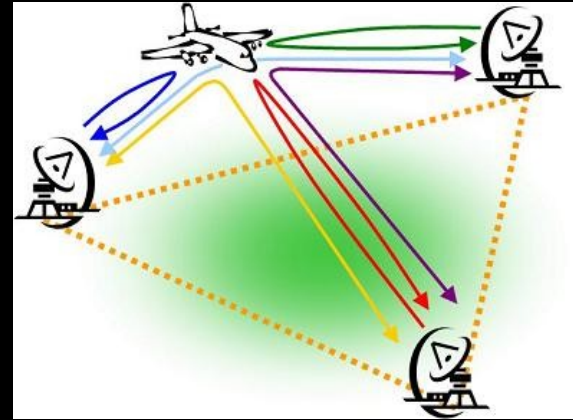
Typ:
szyk fazowy

Space Fence

Program rozpoczęty w 2005 przez USAF po wygaszeniu działania poprzedniego radaru w 2013.



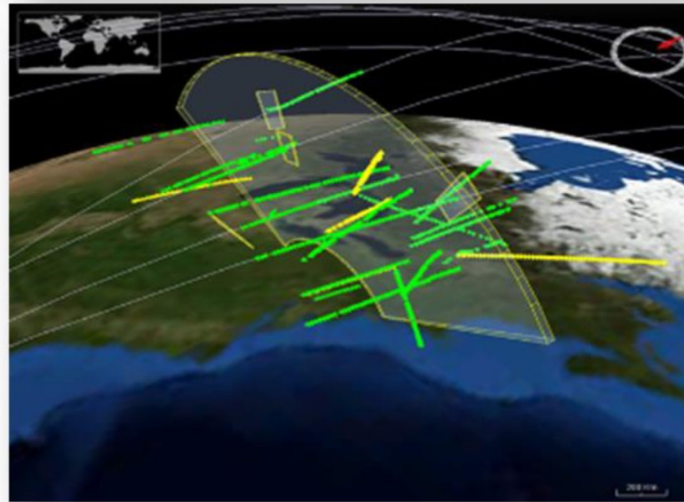
Część anteny w Teksasie (2001)



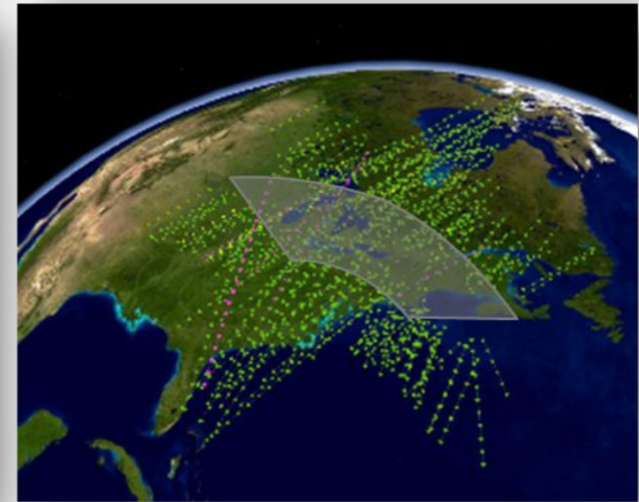
Radar multistatyczny

Space Fence

Testowy radar powstał na terenie USA, operacyjny od 2016



Flexible Coverage Demonstration



ITB Data Collection Example

Space Fence

Przewidywane zdolności detekcji radaru Space Fence

Table 2.1 Expected reference diameter D_{ref} of the new Space Fence based on literature

D_{ref}	h_{ref}	Source
2 cm – 9 cm	400 km	[8]
2 cm – 5 cm	-	[9]
5 cm	0 – 2000 km	[5]
1 cm (cued), 9.7 cm (un-cued)	-	[10]
1 cm	0 – 2000 km (LEO)	[11]

Space Fence

W 2014 roku pisano, że liczba obiektów w katalogu SATCAT wzrośnie do 100-200 tyś. obiektów i 1.5 mln pomiarów na dobę.

W 2020 roku ogłoszono operacyjność i podano, że liczba śledzonych obiektów wzrośnie 2x.

Koszt zbudowania radaru to 1.5 mld USD, a utrzymania to 6 mln USD. Budowniczy to Lockheed Martin.

Wady i zalety radarów

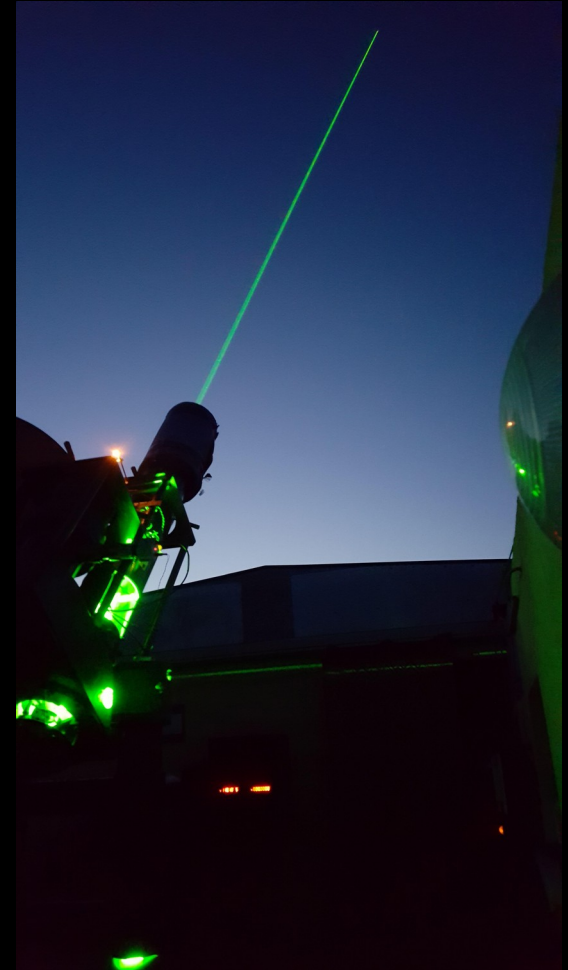
Zalety:

- niemal kompletna niezależność od pory dnia, pogody i cienia Ziemi
- możliwość obserwacji od kilku stopni nad horyzontem

Wady:

- pomiar odległości z dokładnością 10-300m
- pomiar pozycji z dokładnością nie lepszą niż ok 0.1 stopnia
- ograniczony zasięg
- wysokie koszty

Laser

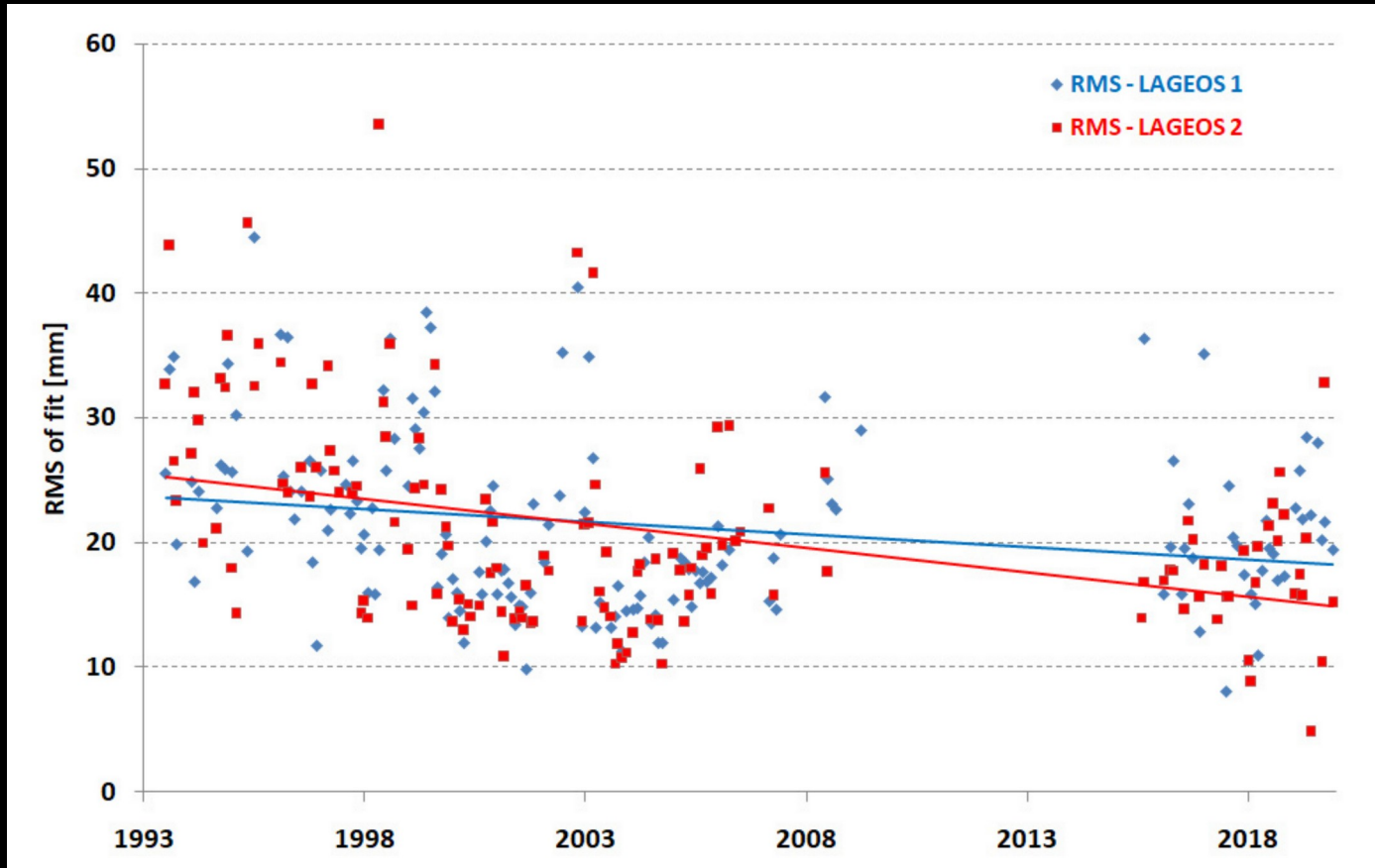


Laser



Dwa lasery w Borowcu – ten o większej mocy pozwala obserwować największe śmieci kosmiczne.

Laser



Borowiec SLR station—RMS of the fit of satellites LAGEOS-1 and LAGEOS-2 (monthly points).

Laser

Wady i zalety stacji laserowych

Zalety:

- bezkonkurencyjna dokładność pomiaru odległości
- możliwość obserwacji w cieniu ziemi
- Możliwość obserwacji dziennych
- niski koszt odbłyśników laserowych

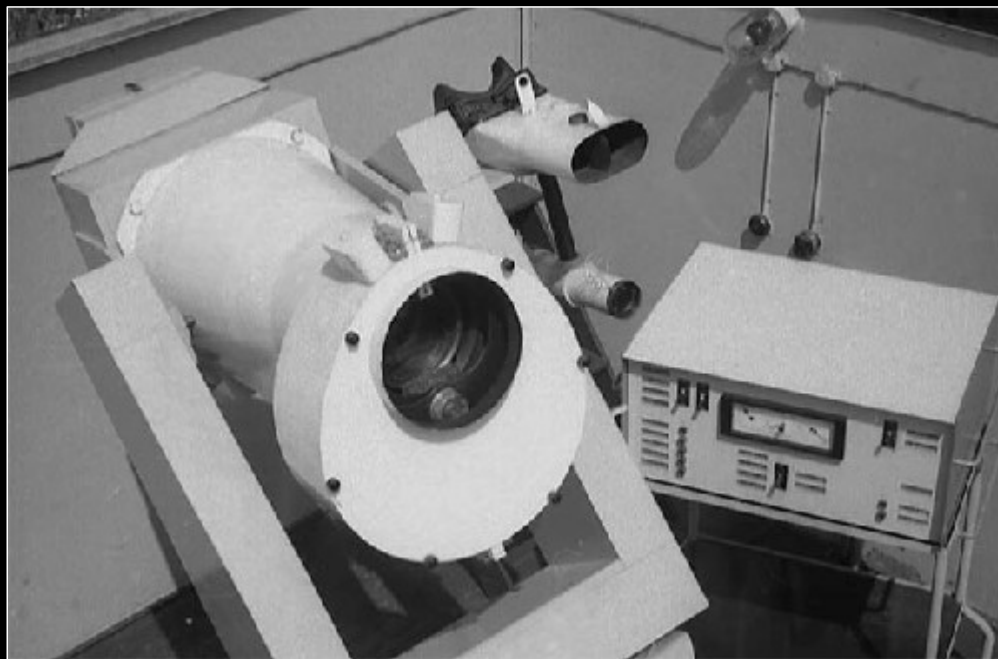
Wady:

- znikoma liczba obiektów ma odbłyśniki
- obserwacje obiektów bez odbłyśników bardzo trudne
- obserwacje dzienne ograniczone do niewielkiej liczby obiektów
- brak pomiarów pozycji na sferze niebieskiej

Optyka



PO-1
(~1962r)



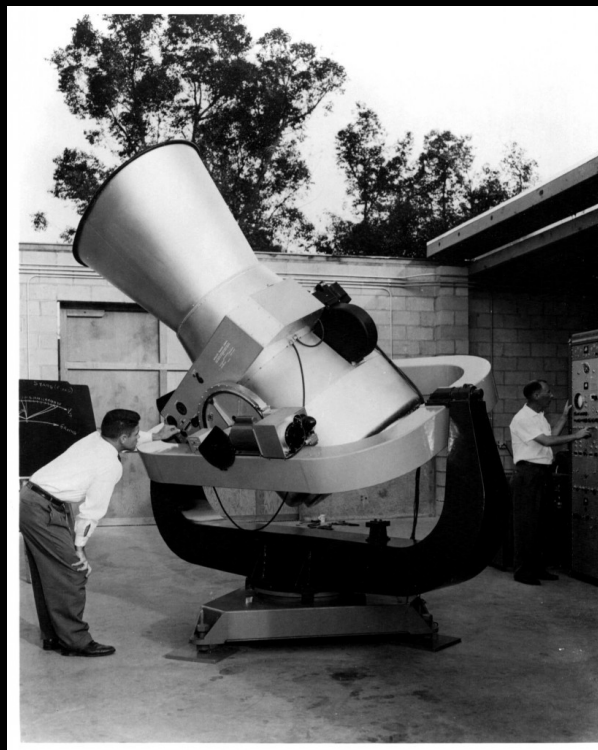
PO-2
(~1971r)

Optyka



Kamera SBG

Optyka



Kamera Baker-Nunn
Trzyosiowy montaż horyzontalny

Optyka

Kamera Baker-Nunn

Zbudowane do obserwacji Sputnika-1 i późniejszych satelitów
(wyznaczanie geopotencjału i atmosfery ziemskiej)
w ramach International Geophysical Year 1957 satellite tracking project.

Docelowo 12 stacji.

Dokładność pomiaru ok 2 sekundy łuku.

Możliwość wyznaczenia pozycji teleskopu ± 10 m
(10x lepiej niż innymi ówczesnymi metodami).

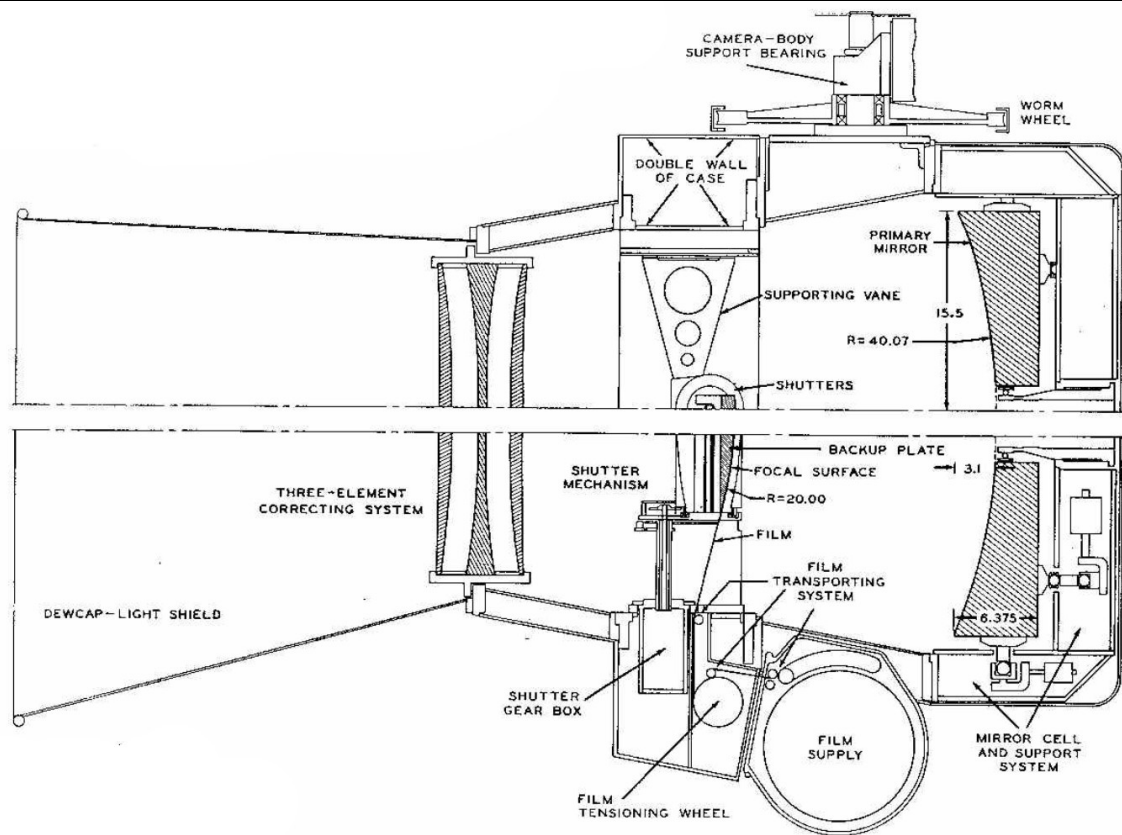
Optyka

Lustro główne 30" f/0.75,
płyta korekcyjna 20",
4 wewnętrzne powierzchnie
korektora są asferyczne.

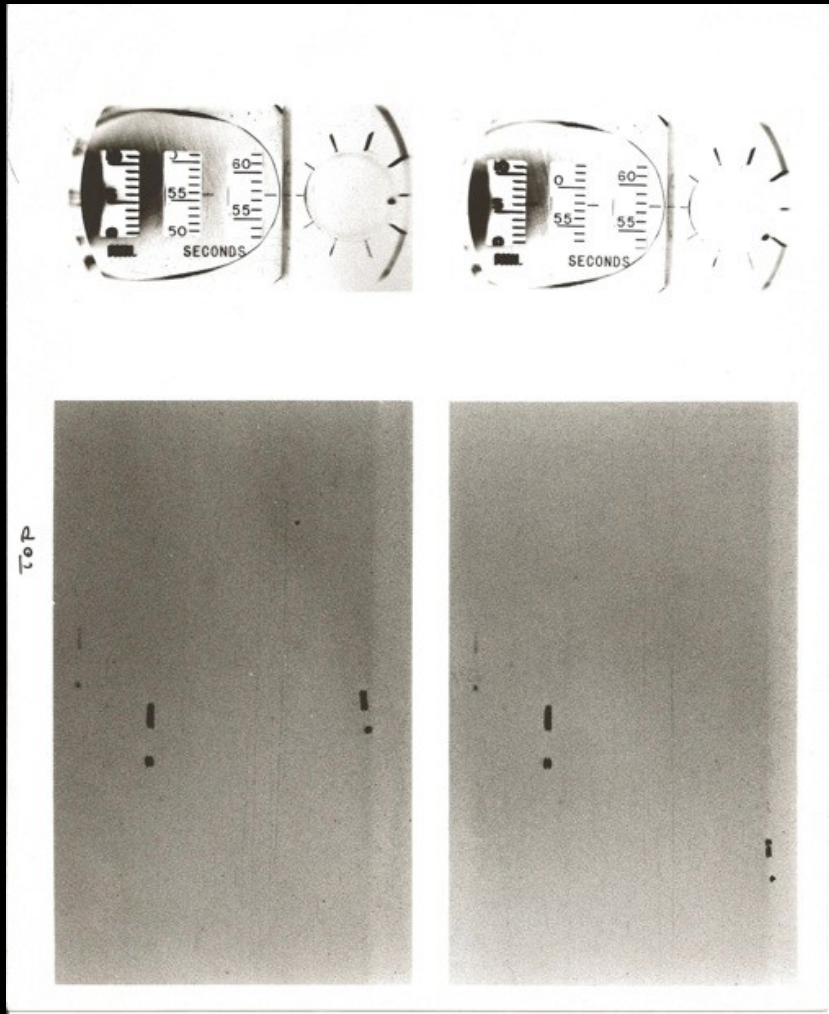
Klisza 55 x 250 mm
Pole 5 x 30 stopni.

Rejestracja czasu
z dokładnością
0.001s
dzięki obrotowym
migawkom
i radiozegarowi.

Two cross sections of the Baker-Nunn satellite-tracking camera, showing the film-transport and shutter mechanism. The two halves are at right angles to each other, and all dimensions are in inches. The double-walled camera case is in sections (right to left), one holding the mirror, the next the support trunnions, the next the focal surface and film-transport system, and the last the three-element Schmidt correcting plate.



Optyka

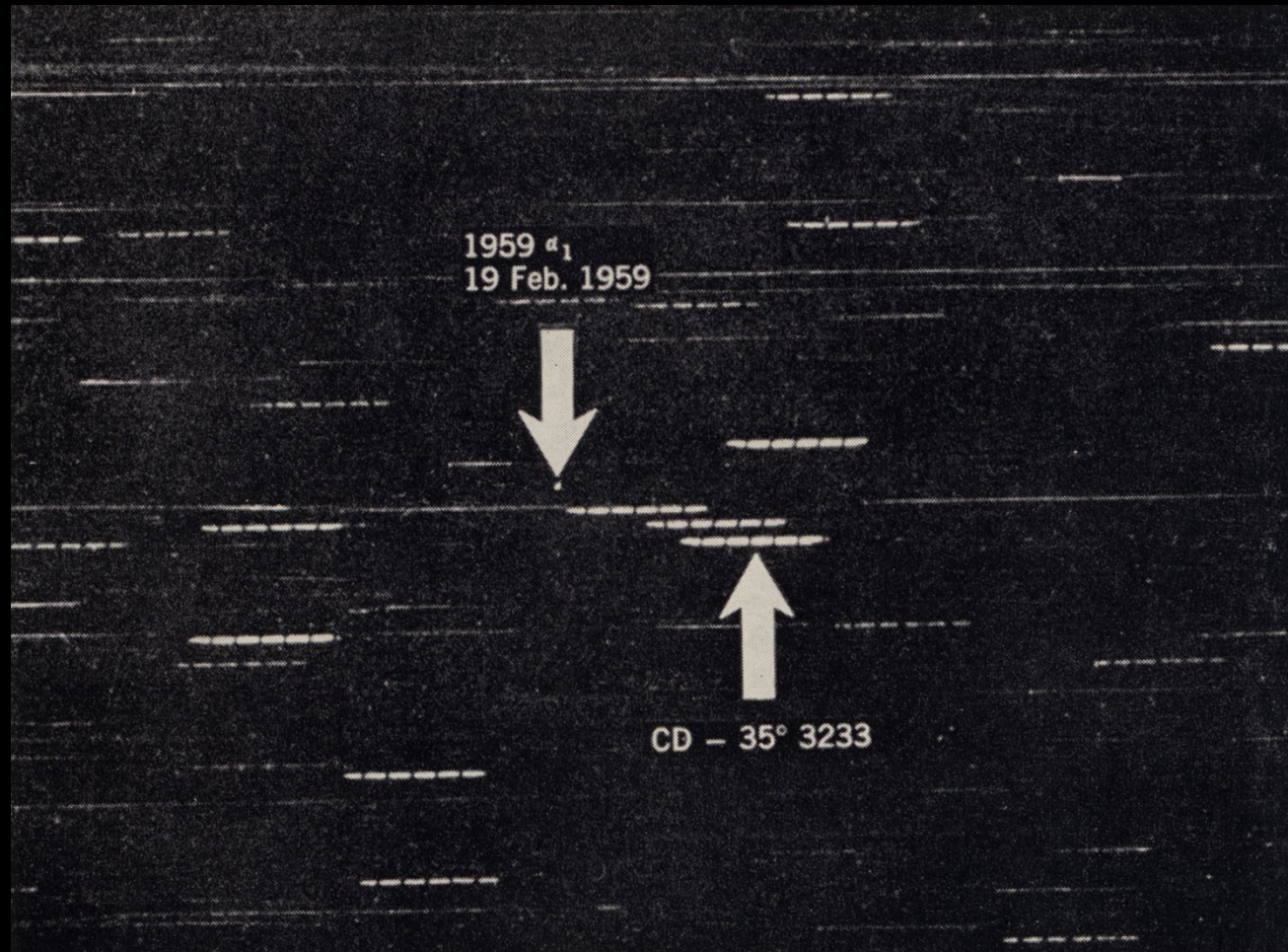


Pierwsze zdjęcia Sputnika-1
wykonane 17.10.1957r

Widać 2 gwiazdy i satelitę.

Obraz punktowy do pomiaru pozycji
obraz rozciągnięty do pomiaru prędkości(?).

Optyka



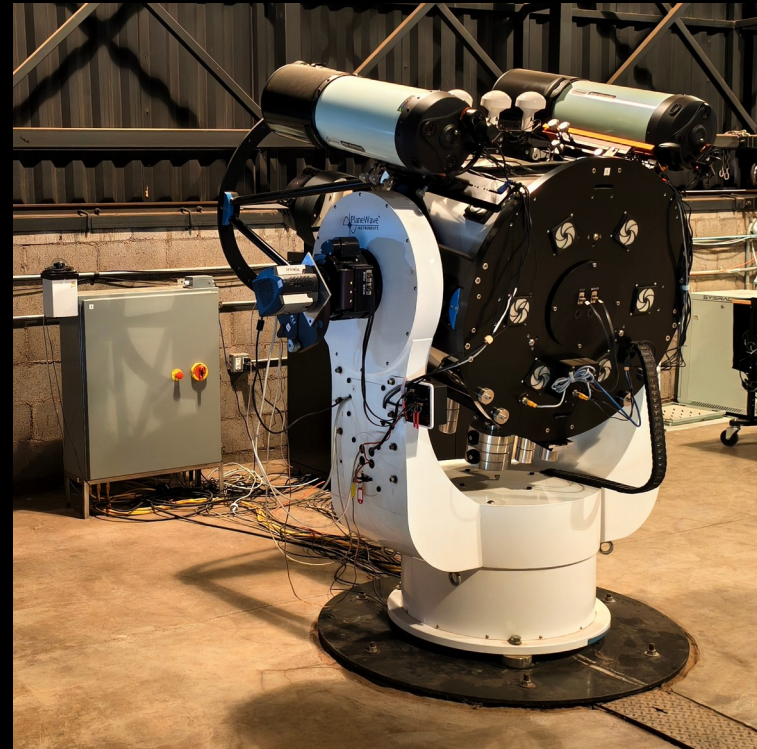
Zdjęcie z kamery Baker-Nunn w Australii (1959).

Optyka

Współczesne Poznańskie Teleskopy Satelitarne



PST1



RBT (PST2)

Optyka

Poznańskie Teleskopy Satelitarne



PST3

Optyka

Poznańskie Teleskopy Satelitarne

filmy w katalogu w04

Optyka

Jasność sztucznego satelity w odległości od słońca takiej jak Ziemia

$$m = m_s + 5.0 \log_{10}(r) - 2.5 \log_{10}(A \rho F(\phi))$$

m_s – obserwowana jasność Słońca w mag w wybranym filtrze ($V=-26.7$)

r – odległość satelita-observator w m

A – powierzchnia przekroju poprzecznego satelity w m^2

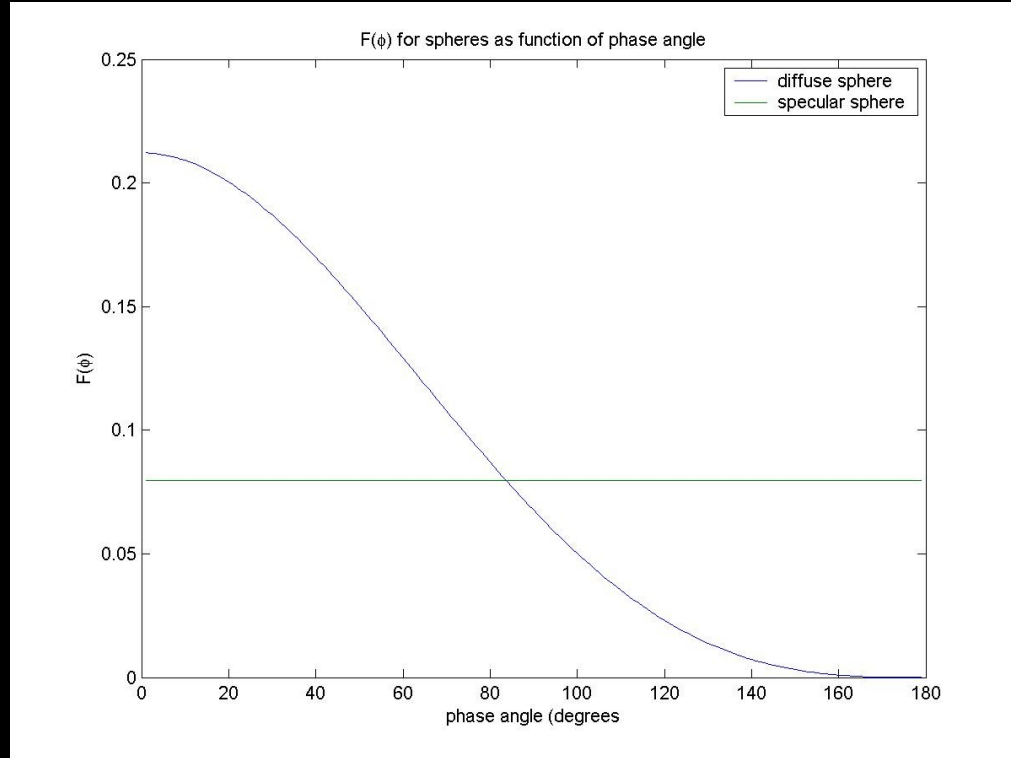
ρ – albedo (od 0.0 do 1.0)

F – funkcja fazowa (od 0.0 do 1.0)

ϕ – kąt fazowy

Optyka

$$m_V = m_{Sun} + 5.0 \log_{10}(r) - 2.5 \log_{10}(A \rho F(\phi))$$



Funkcja fazowa:

Sfera lustrzana:

$$F = 1/(4\pi) = 0.08$$

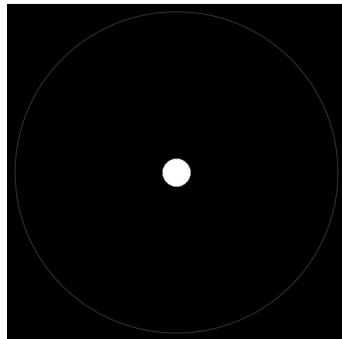
Sfera Lambertowa:

$$F = (2/(3\pi^2)) [(\pi - \theta) \cos(\theta) + \sin(\theta)]$$

Optyka

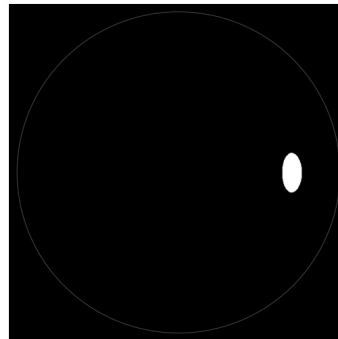
Powierzchnia lustrzana — idealne lustro, Słońce o średnicy $0,5^\circ$

Kąt fazowy 0° (pełnia)



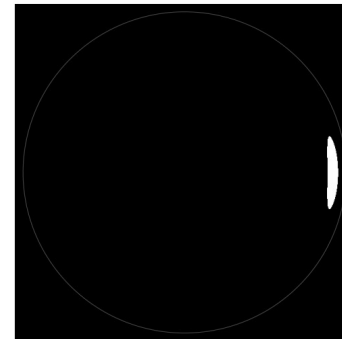
jasność całkowita: $+0.00$ mag
maks. jasność pow.: -3.57 mag/arcsec²

Kąt fazowy 90° (kwadra)



jasność całkowita: $+0.00$ mag
maks. jasność pow.: -3.57 mag/arcsec²

Kąt fazowy 135°

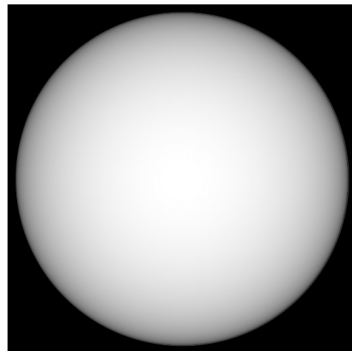


jasność całkowita: $+0.00$ mag
maks. jasność pow.: -3.57 mag/arcsec²

*Odblask powiększony $\times 40$ dla widoczności (rzeczywista średnica $\approx 0,22''$ na tarczy $100''$). Jasność powierzchniowa i całkowita NIEZALEŻNE od fazy ($\Phi(\alpha)=1$).
Kulka o średnicy kątowej $100''$, oświetlona Słońcem. Punkt zerowy magnitudo = jasność całkowita w pełni.*

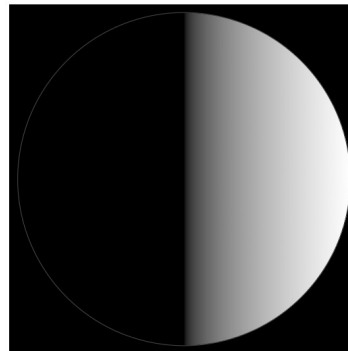
Powierzchnia Lamberta

Kąt fazowy 0° (pełnia)



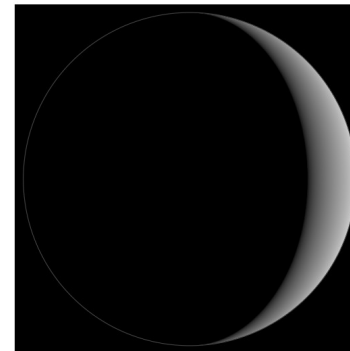
jasność całkowita: -0.00 mag
maks. jasność pow.: 9.29 mag/arcsec²

Kąt fazowy 90° (kwadra)



jasność całkowita: $+1.24$ mag
maks. jasność pow.: 9.31 mag/arcsec²

Kąt fazowy 135°



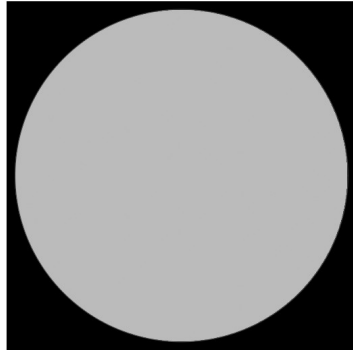
jasność całkowita: $+3.29$ mag
maks. jasność pow.: 9.83 mag/arcsec²

Kulka o średnicy kątowej $100''$, oświetlona Słońcem. Punkt zerowy magnitudo = jasność całkowita w pełni dla danego prawa. Skala szarości wspólna dla wszystkich obrazów.

Optyka

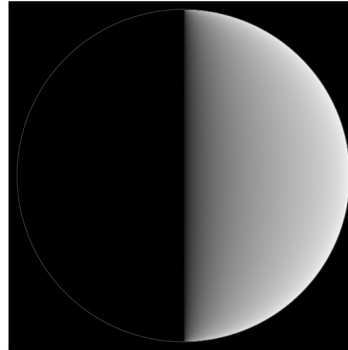
Prawo Lommela-Seeligera (regolit)

Kąt fazowy 0° (pełnia)



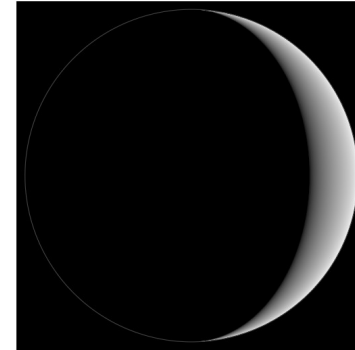
jasność całkowita: -0.00 mag
maks. jasność pow.: 9.73 mag/arcsec²

Kąt fazowy 90° (kwadra)



jasność całkowita: $+1.06$ mag
maks. jasność pow.: 9.11 mag/arcsec²

Kąt fazowy 135°



jasność całkowita: $+2.49$ mag
maks. jasność pow.: 9.18 mag/arcsec²

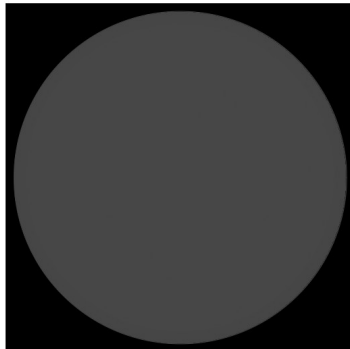
Kulka o średnicy kątowej $100''$, oświetlona Słońcem. Punkt zerowy magnitudy = jasność całkowita w pełni dla danego prawa. Skala szarości wspólna dla wszystkich obrazów.

To jest model bliski zachowaniu obiektów naturalnych ale nadal izotropowy. Dobry dla ciemnych powierzchni (pojedyncze rozpraszanie), kiepski dla jasnych.

Optyka

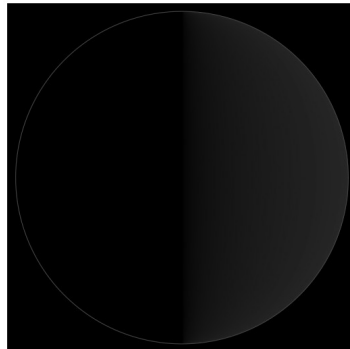
Model Hapke (regolit, efekt opozycji)

Kąt fazowy 0° (pełnia)



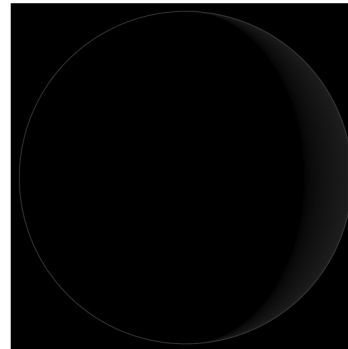
jasność całkowita: -0.00 mag
maks. jasność pow.: 9.72 mag/arcsec²

Kąt fazowy 90° (kwadra)



jasność całkowita: +3.05 mag
maks. jasność pow.: 11.14 mag/arcsec²

Kąt fazowy 135°



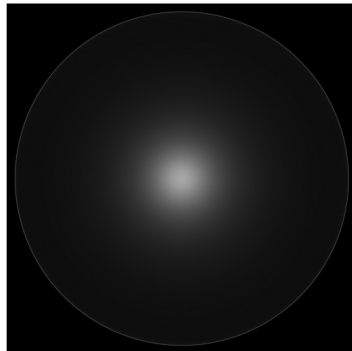
jasność całkowita: +5.02 mag
maks. jasność pow.: 11.71 mag/arcsec²

Kulka o średnicy kątowej 100", oświetlona Słońcem. Punkt zerowy magnitudo = jasność całkowita w pełni dla danego prawa. Skala szarości wspólna dla obu obrazów.

Hapke:
powierzchnia
chropowata,
efekt opozycji,
rozpraszanie
wielokrotne.

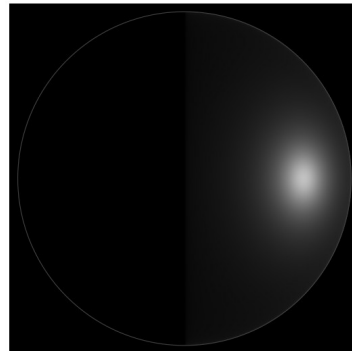
BRDF Cooka-Torrance (panel metaliczny, GGX)

Kąt fazowy 0° (pełnia)



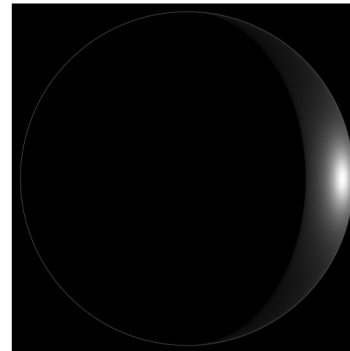
jasność całkowita: -0.00 mag
maks. jasność pow.: 6.12 mag/arcsec²

Kąt fazowy 90° (kwadra)



jasność całkowita: +0.09 mag
maks. jasność pow.: 5.76 mag/arcsec²

Kąt fazowy 135°

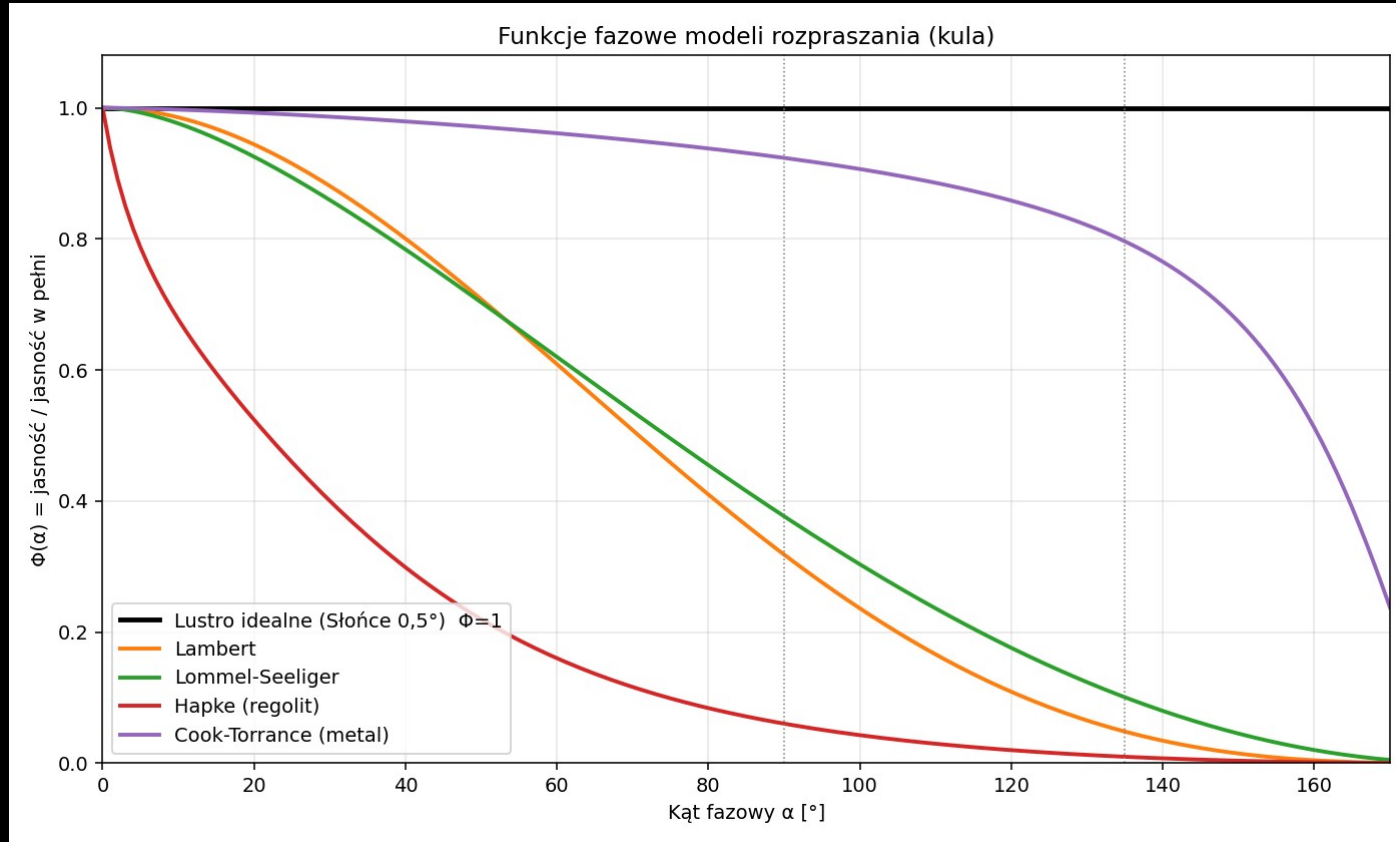


jasność całkowita: +0.25 mag
maks. jasność pow.: 5.11 mag/arcsec²

Kulka o średnicy kątowej 100", oświetlona Słońcem. Punkt zerowy magnitudo = jasność całkowita w pełni dla danego prawa. Skala szarości wspólna dla obu obrazów.

Cook-Torrance:
mikroskopowe
lusterka nierówno
ustawione.

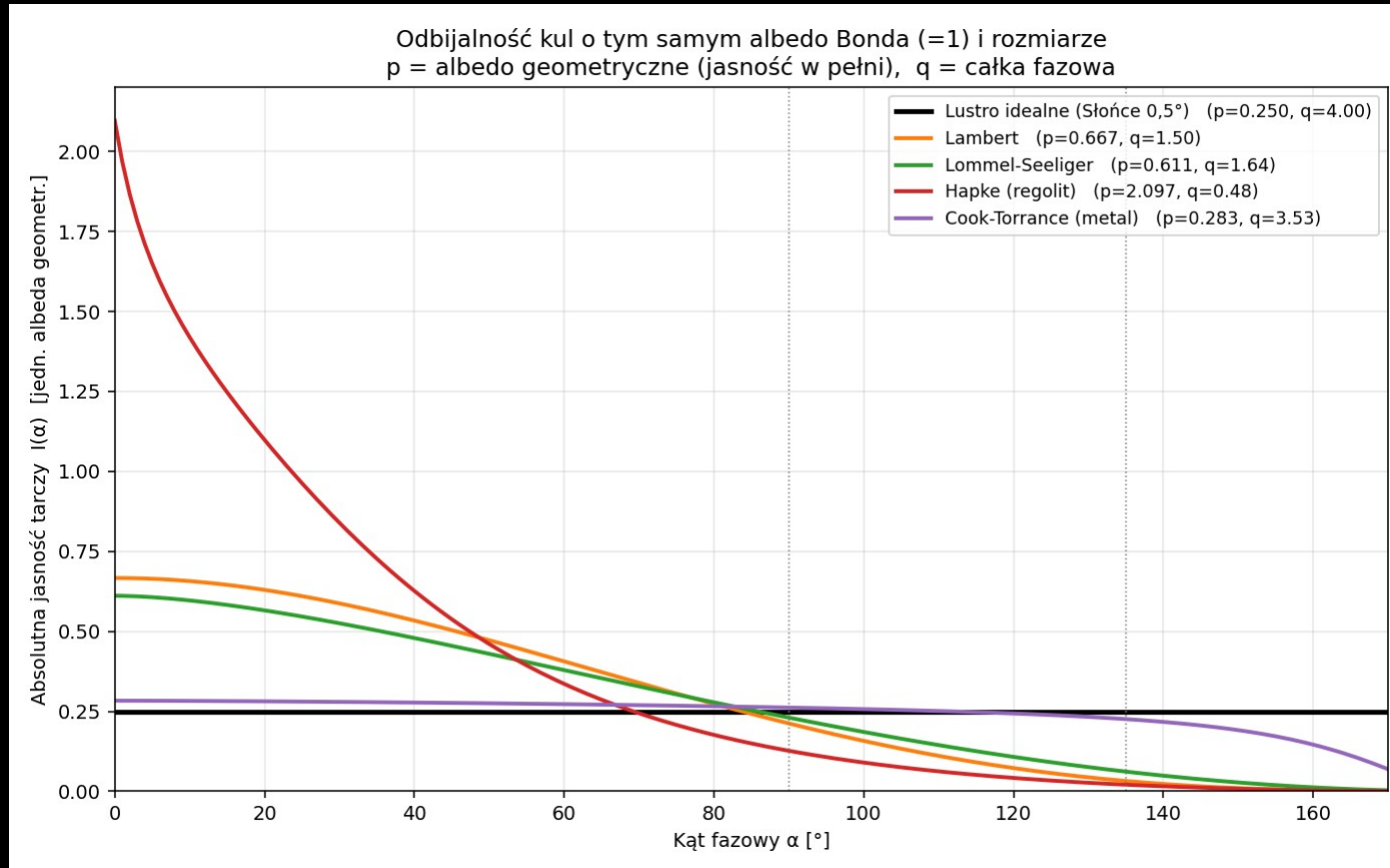
Optyka



Analityczne wzory na funkcję fazową dla kul istnieją tylko dla niektórych modeli.

Znormalizowana funkcja fazowa.

Optyka



To samo albedo Bonda, czyli albedo całkowite - całkowane po całej sferze.

Skąd wziąć rozmiar sztucznych satelitów?

Rozmiary RCS:

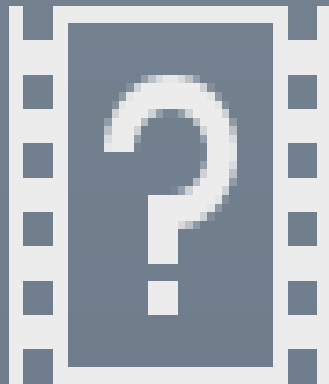
Space-Track: large / medium/ small

Rozmiary fizyczne:

ESA DISCOS

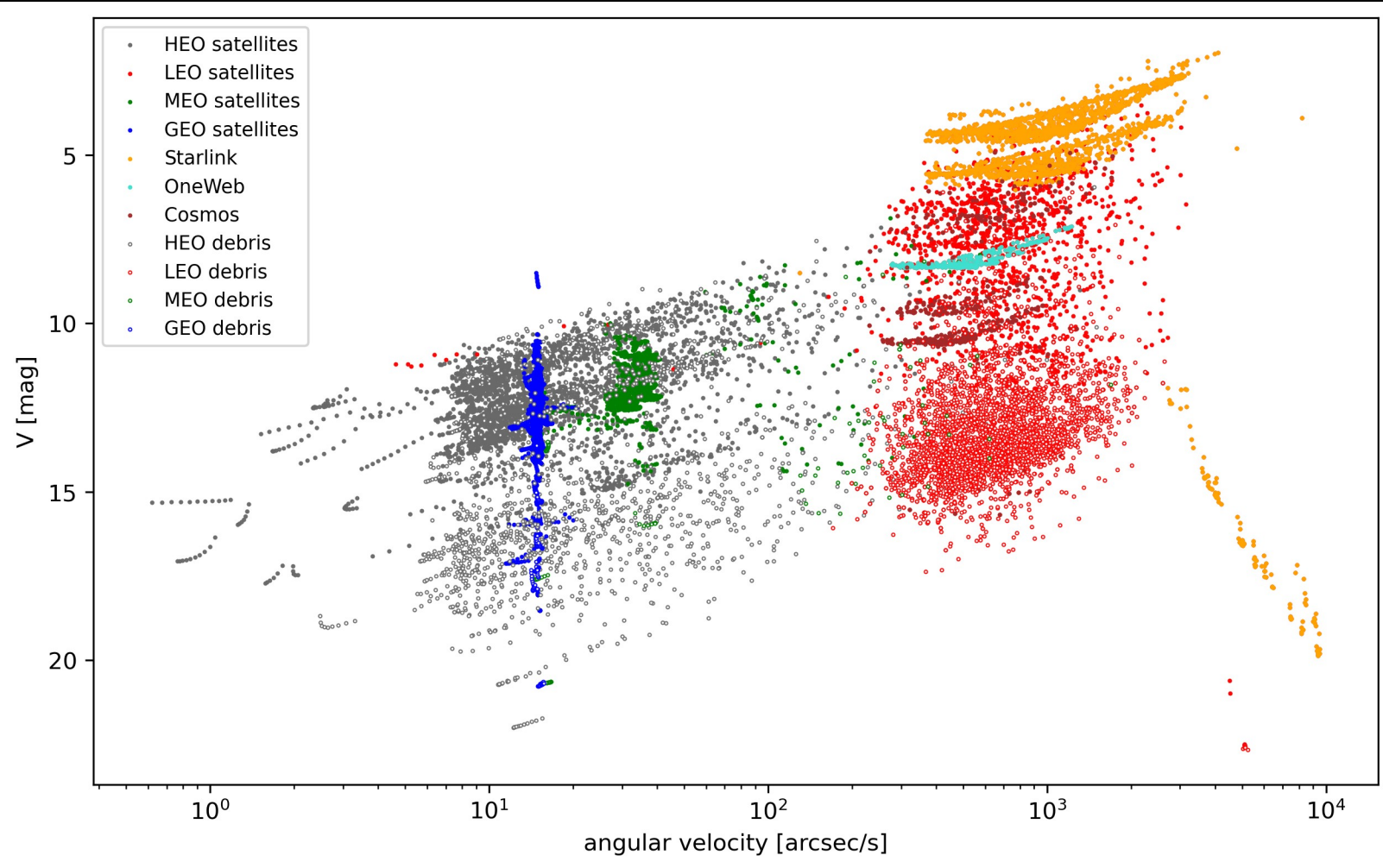
<https://discosweb.esoc.esa.int>

Optyka



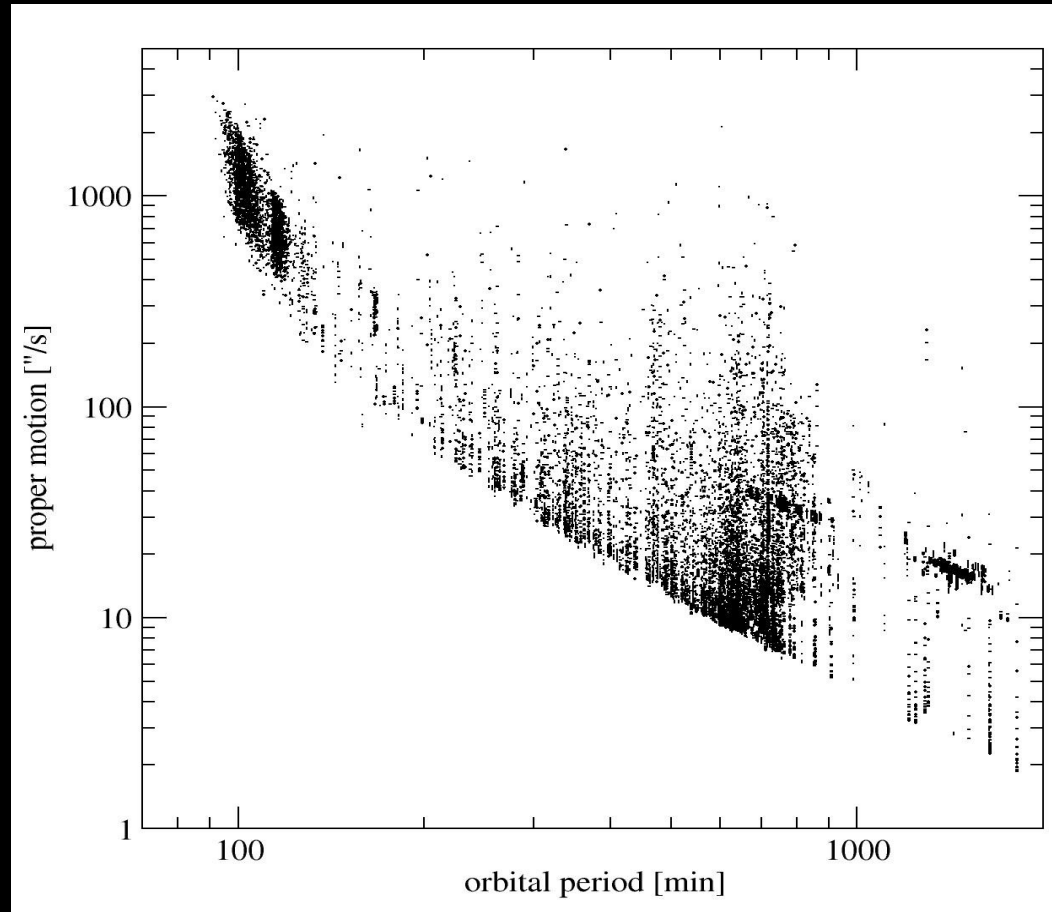
Zmiana pozycji satelitów w ciągu nocy na niebie.

Optyka



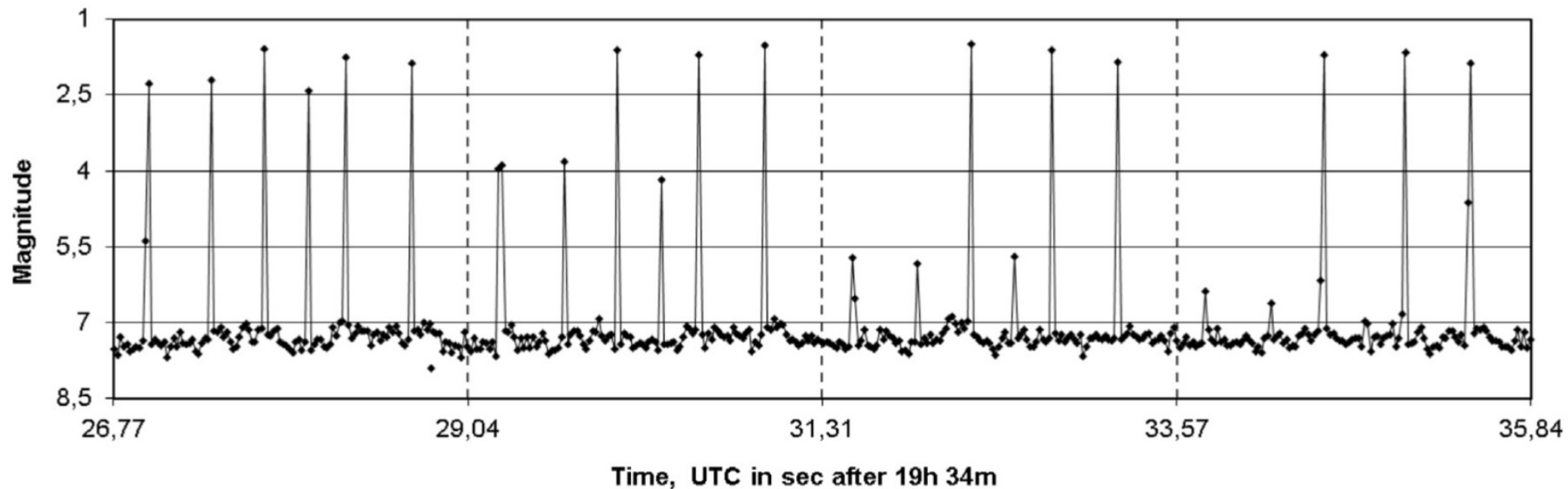
Jasności obserwowane w ciągu 1 nocy z Polski (2026).

Optyka



Obserwowane prędkości kątowe satelitów.

Optyka

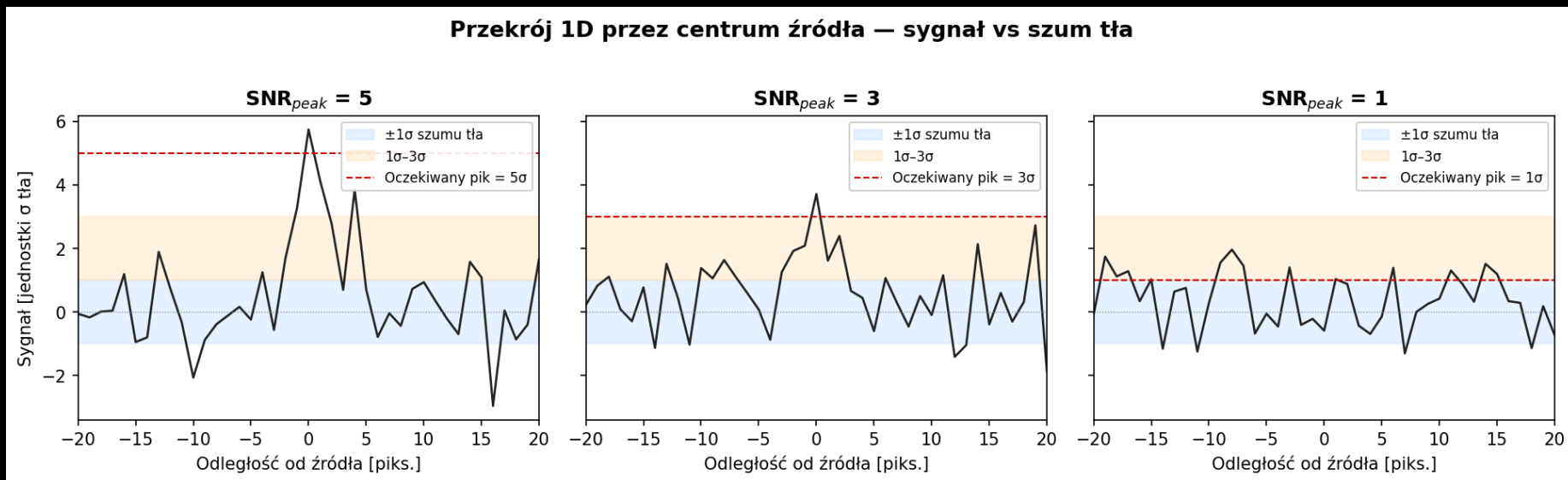


Zmiany jasności satelity Ajisai (Koshkin 2017).

Optyka

Zasięg teleskopu optycznego

Aby określić jak słabe mozeby obserwować obiekty punktowe należy najpierw ustalić próg detekcji, czyli stosunek sygnału do szumu. Jest to nieco arbitralny parametr, podobnie jak poziom ufności w pomiarach na pracowni fizycznej. Zwykle między 3 a 5.



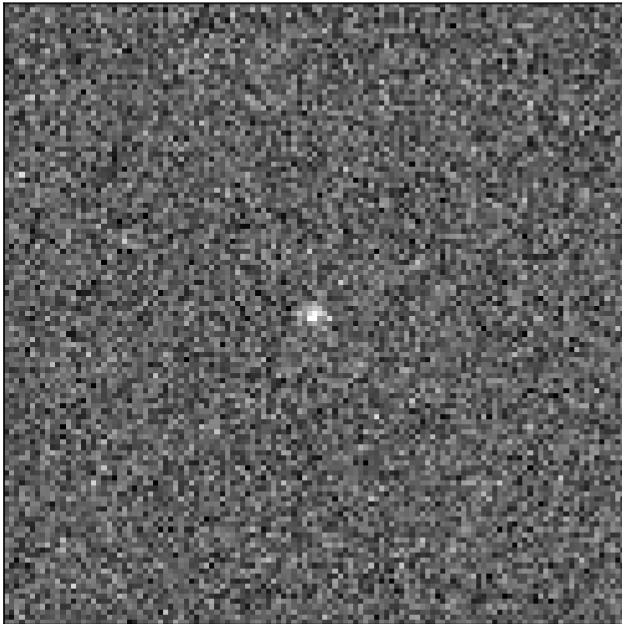
FWHM = 3.5 piksela, PSF = Gauss, SNR na piksel.

Optyka

Zasięg teleskopu optycznego

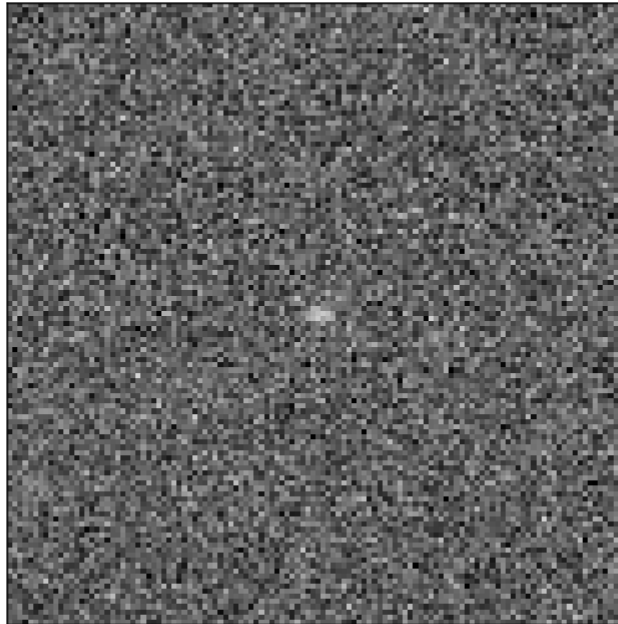
Poziomy SNR na piksel dla nierozdzielonego źródła astronomicznego

$\text{SNR}_{\text{peak}} = 5$ — Solidna detekcja



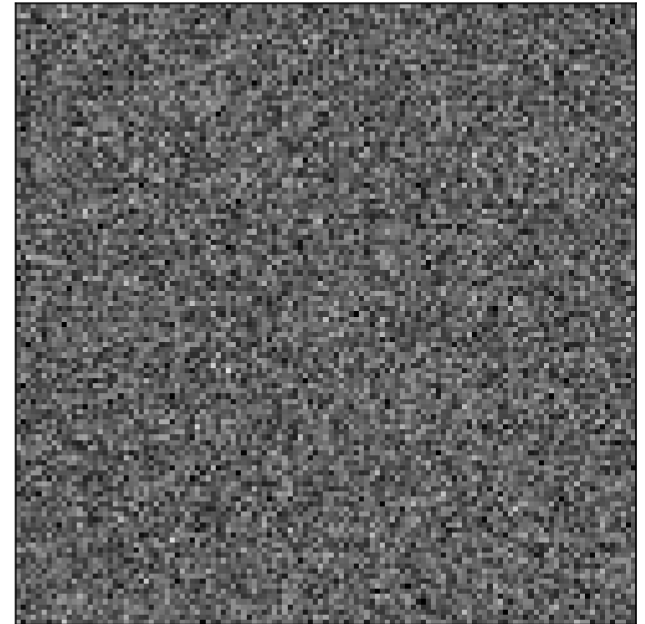
Źródło jasno widoczne nad tłem. Pik znacząco powyżej fluktuacji szumu.

$\text{SNR}_{\text{peak}} = 3$ — Marginalna detekcja



Źródło widoczne, ale porównywalne z najjaśniejszymi pikami szumu — niepewne.

$\text{SNR}_{\text{peak}} = 1$ — Brak detekcji



Źródło zlewa się z tłem. Pik nieodróżnialny od losowych fluktuacji szumu.

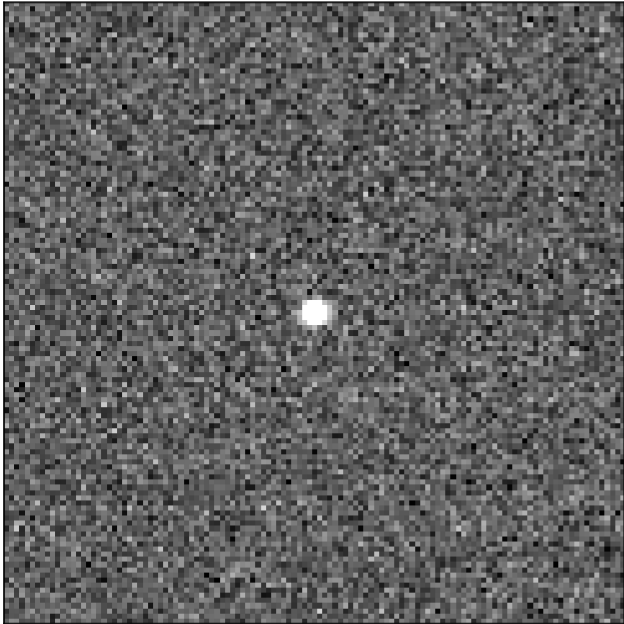
Źródło w centrum każdego panelu. PSF Gaussa, FWHM = 3.5 piks. Obraz 121×121 piks., skala szarości: $[-3\sigma, 5\sigma]$.

Optyka

Zasięg teleskopu optycznego

Obiekt punktowy o tym samym całkowitym strumieniu, ale różnej prędkości ruchu

$\text{SNR}_{\text{peak}} = 20$ — Obiekt stacjonarny



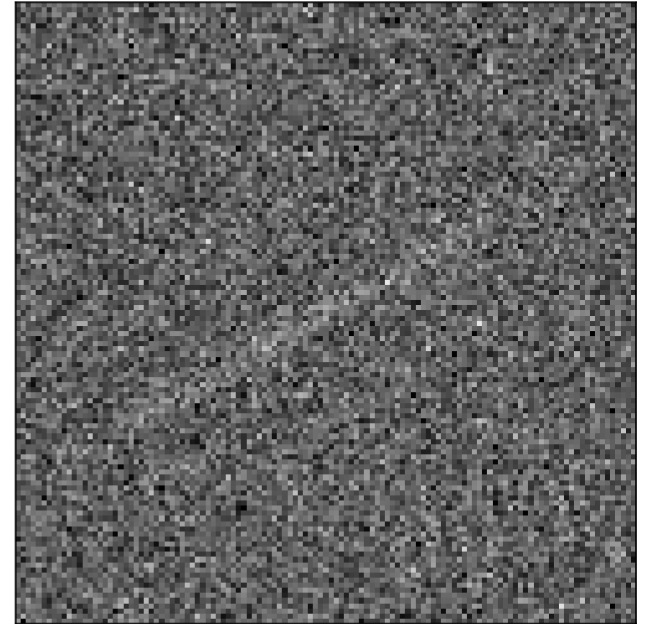
Cały strumień skupiony w PSF.
Pik łatwo widoczny nad tłem.

$\text{SNR}_{\text{peak}} = 5$ — Wolny ruch



Strumień rozłożony na smugę ~ 15 piks.
Peak SNR spada, ale smuga
widoczna jako wydłużony kształt.

$\text{SNR}_{\text{peak}} = 1$ — Szybki ruch



Strumień rozłożony na smugę ~ 75 piks.
Peak SNR $\approx$ szum tła,
ale integrated SNR nadal wysokie.

Całkowity strumień zachowany. PSF Gaussa, FWHM = 3.5 piks. Obraz 121x121 piks., skala szarości: $[-3\sigma, 5\sigma]$ — pik stacjonarnego źródła nasycony.

Optyka

Zasięg teleskopu optycznego – obraz punktowy

W przybliżeniu:

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{S+N+9}} \geq 5$$

N – sygnał na piksel od nieba

S – sygnał na od obiektu w centralnym pikselu PSF

9 – stała zawierająca szacunkowe szумы kamery

Przyjąłem szum odczytu kamery 3e/pix, odbijalność zwierciadeł 90% (zabrudzenie), QE kamery 50% w wybranym filtrze, transmisja filtra 90% względem ideału (zabrudzenie). Zakładam seeing 1 arcsec FWHM i skalę obrazu 2 pix / FWHM.

Optyka

Zasięg teleskopu optycznego – obraz punktowy

N – sygnał na piksel od nieba (liczba elektronów)

$$N = 1.03 \cdot t \cdot D^2 \cdot C_1 / 10^{(mag_{tlo}/2.5)}$$

t - czas ekspozycji w s

D - średnica teleskopu w m

mag_{tlo} - jasność tła nieba w filtrze w mag/arcsec²

C_1 - strumień fotonów dla tła nieba 0 mag w danym filtrze (na sekundę, na m²)

W czystym filtrze można oszacować $C_1 = 3.0 \cdot 10^{10}$ photons/s/m²

Optyka

Zasięg teleskopu optycznego – obraz punktowy

S - sygnał na od obiektu w centralnym pikselu PSF

$$S = 0.041 \cdot t \cdot D^2 \cdot C_2 / 10^{(mag_{obj}/2.5)}$$

t - czas ekspozycji w s

D - średnica teleskopu w m

mag_{obj} - jasność obiektu w filtrze w mag

C₂ - strumień fotonów dla obiektu 0 mag w danym filtrze (na sekundę, na m²)

Dla satelity można przyjąć, że w czystym filtrze mamy $C_2 = 5.0 \cdot 10^{10}$ photons/s/m². Współczynnik jest inny bo widmo satelity różni się od widma nieba.

Optyka

Zasięg teleskopu optycznego – obraz punktowy

Przykładowo:

$$\text{mag}_{\text{tlo}} = 16.0 \text{ (pełnia Księżyca)}$$

$$\text{mag}_{\text{obj}} = 17.0$$

$$t = 10\text{s (np. składamy 10 zdjęć po 1s)}$$

$$D = 1\text{m}$$

$$N = 123015 \text{ e}^-$$

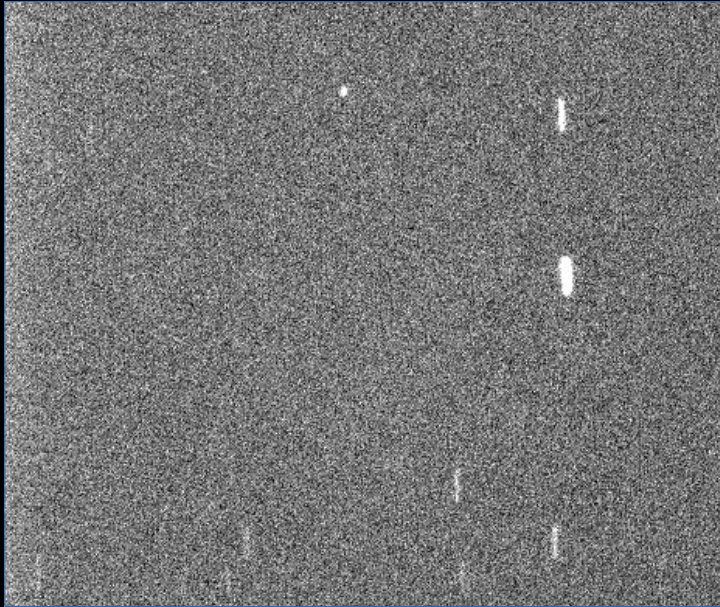
$$S = 3249 \text{ e}^-$$

$$\text{SNR} = 9.14$$

$$\text{SNR} = 40.8 \text{ dla } \text{mag}_{\text{tlo}} = 20.0 \text{ (bez Księżyca)}$$

Optyka

Zasięg teleskopu optycznego – obraz punktowy

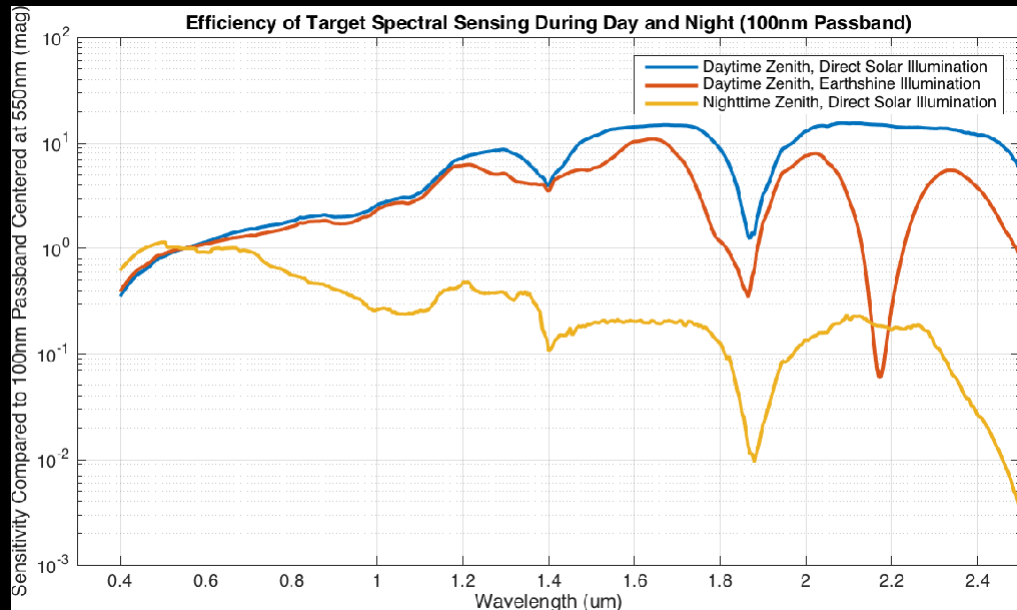


Lageos
odległość: ~9000km
rozmiar: 0.6m
prędkość: 200"/s
jasność: ~13mag
czas naśw.: 0.1s

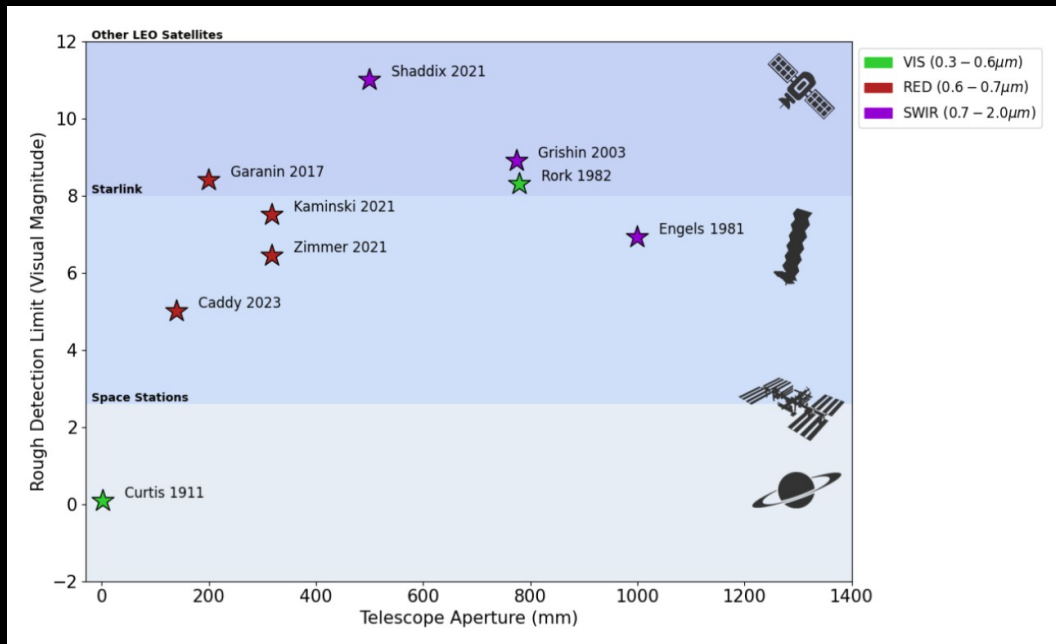


Popacs
kulka o średnicy 10cm
w odległości 1450km
czas naśw.: 0.05s

Zasięg teleskopu optycznego – podczerwień

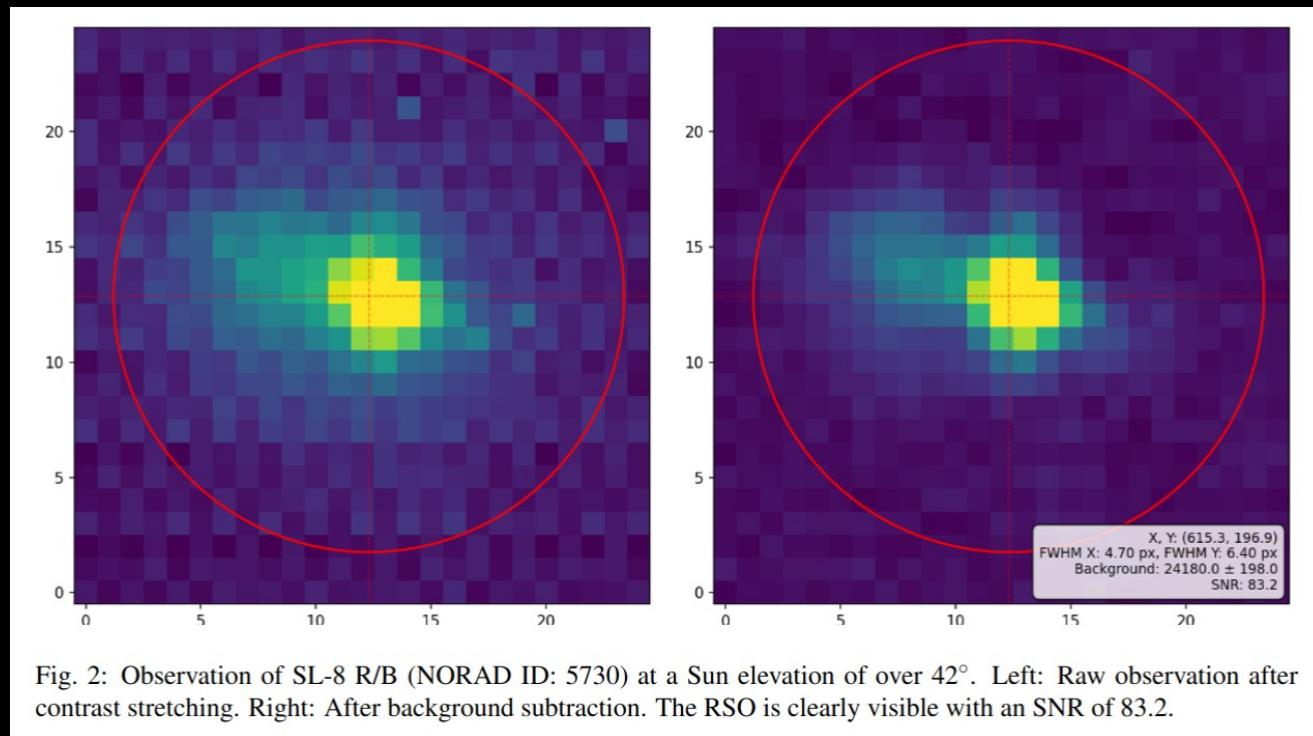


Szacowana czułość detekcji
(Shaddix 2019).
Zakładając odpowiednie widmo.



Zasięg dziennych obserwacji
w zakresie zielonym, czerwonym i NIR
(Caddy 2024).

Zasięg teleskopu optycznego – podczerwień



Teleskop CDK700
Kamera InGaAs Ninox 1280
QE > 90% (0.6-1.7 mikrona)
piksel 10 mikronów
skala piksela 0.5 "/pix

filtr long-pass >1.1 mikrona

czas naśw. 30 ms

pole przekroju SL-8 R/B
od 4.5 do 11.0 m²

(Waldman I in. 2025)

Ten satelita ma jasność widzialną ok. $V \sim 5.8$ mag
(a jaką ma podczerwoną nie jest jasne).

Optyka

Zasięg teleskopu optycznego – podczerwień

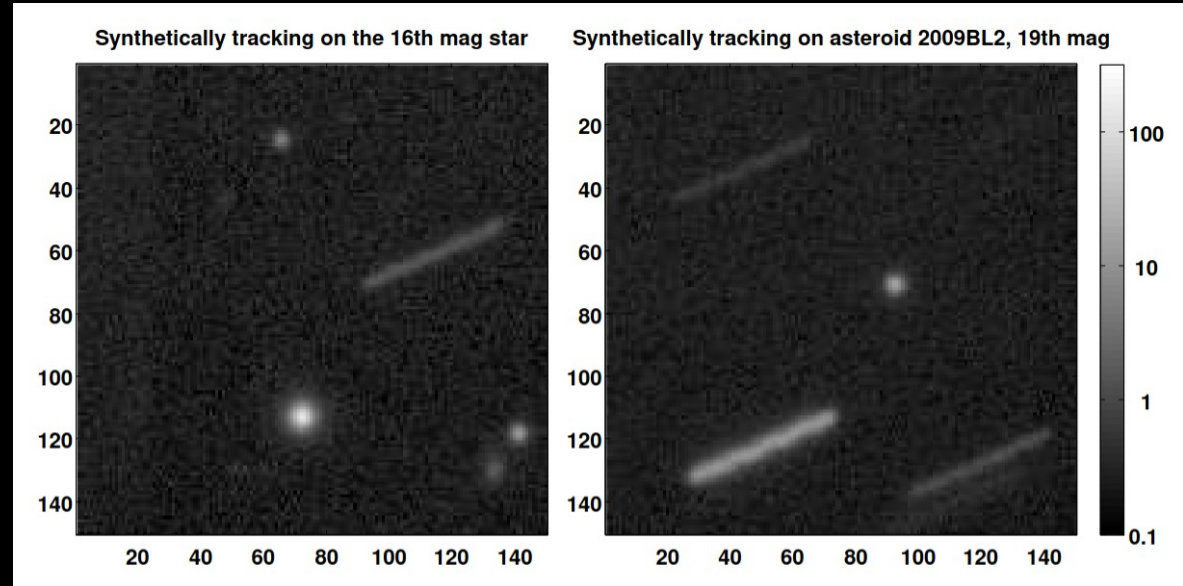
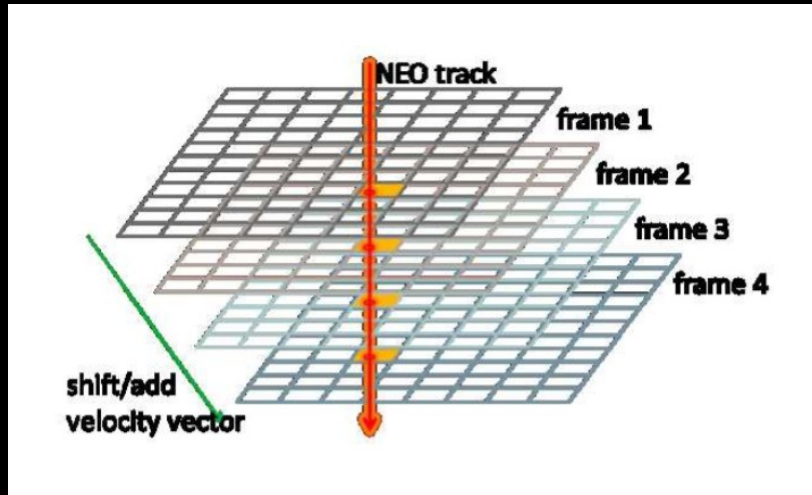
Podczerwień względem światła widzialnego:

Tło nieba w bliskiej podczerwieni jest niższe (brak rozpraszania Rayleigha).
Odbijalność obiektu jest podobna lub wyższa (nawet 10x).

Strumień fotonów ze Słońca jest niższy.
Szumy kamer podczerwonych są wyższe.
Optyka i kamery są droższe.

Śledzenie syntetyczne

Detection of a faint fast-moving near-earth asteroid using the synthetic tracking technique (Zhai I in., 2014)



960 ramek, czas naświetlania 0.5s każda

Śledzenie syntetyczne

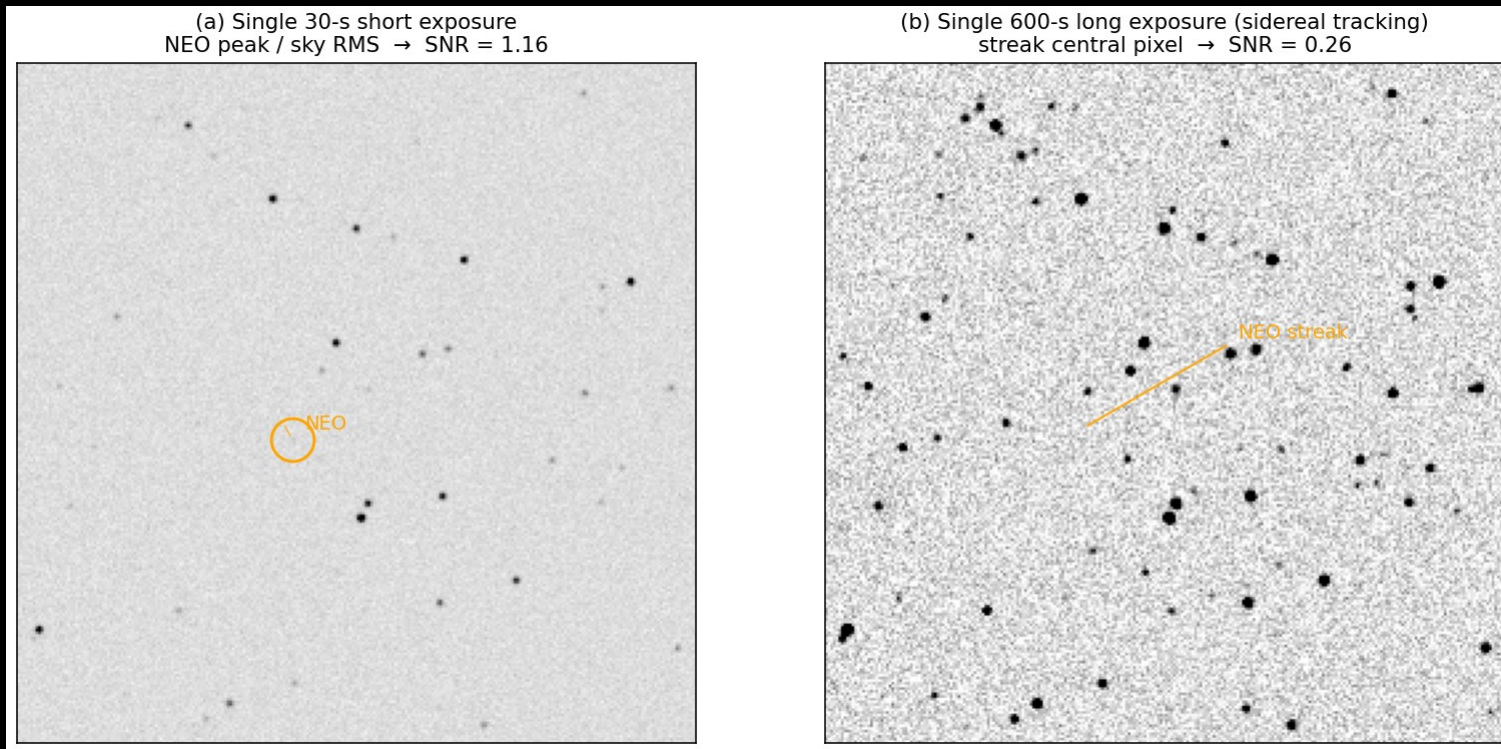
Dwa warianty:

- A. śledzenie znanego obiektu (synthetic tracking),
- B. poszukiwanie nieznanego obiektu (synthetic survey)

Założenia dla NEO:

- krótki czas ekspozycji rzędu 30s nie rozmywa obrazu;
- ruch względem gwiazd powolny (obiekt nie ucieka z pola widzenia);
- ruch względem gwiazd liniowy w czasie;

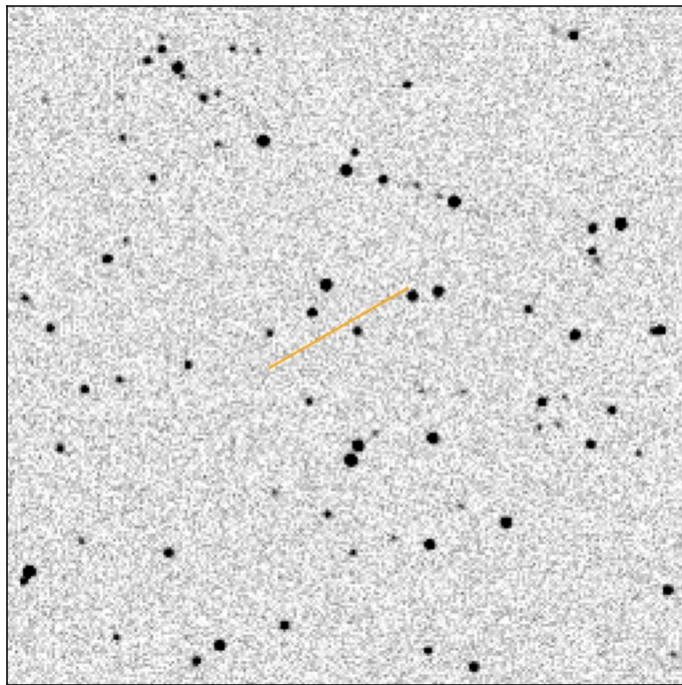
Śledzenie syntetyczne



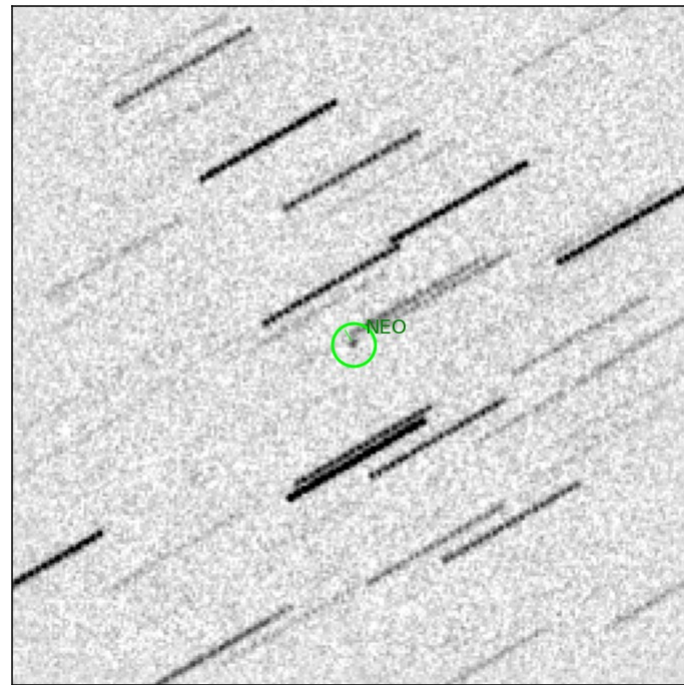
Symulacja: 1m teleskop, $V=22.0$ NEO, $6.0''/s$, $20 \times 30s$

Śledzenie syntetyczne

(c) Stack of 20 frames, SIDEREAL rate (no shift)
streak central pixel $\rightarrow$ SNR = 0.19



(d) SYNTHETIC TRACKING — 20 frames shifted along NEO vector
NEO peak / sky RMS $\rightarrow$ SNR = 7.22



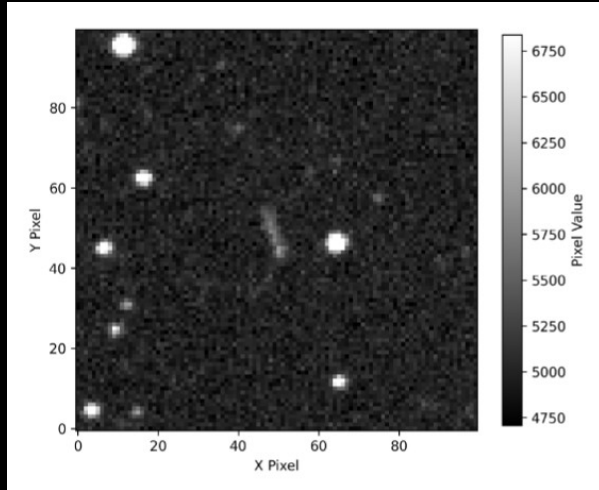
Symulacja: 1m teleskop, $V=22.0$ NEO, $6.0''/s$, 20 x 30s

Śledzenie syntetyczne

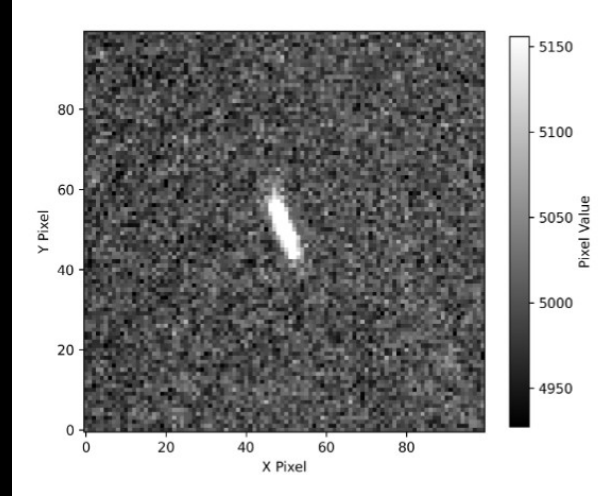
Specyfika śledzenia syntetycznego dla satelitów:

- ślady mogą być kreskami;
- ruch może być lekko nieliniowy;
- ruch może być bardzo szybki;
- ruch może być w szerokim zakresie prędkości kątowych;

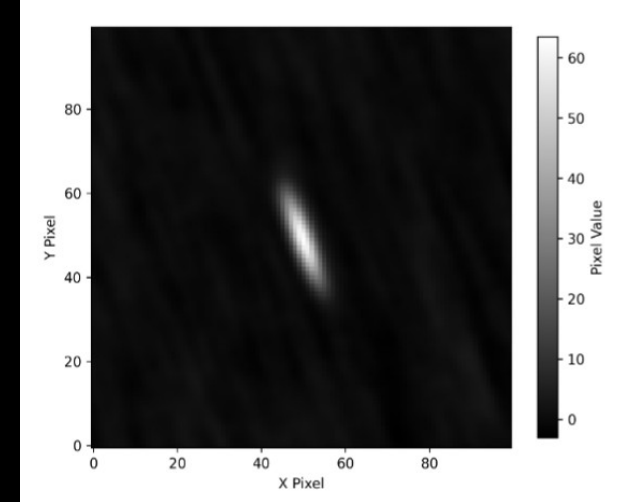
Śledzenie syntetyczne



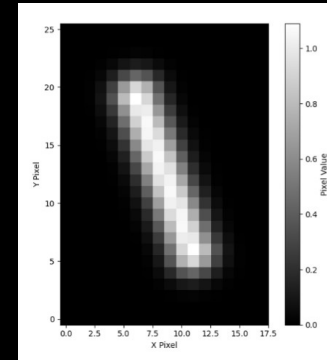
Pojedyncze zdjęcie satelity, czas naśw. 4s.



Złożone zdjęcie satelity (medianowo).



Wynik korelacji.



Profil korelacji.

Optyka

Strategia obserwacji

Śledzenie obiektu (ang. tracking):

- konieczna znajomość orbity (zwykle TLE)
- obrazy gwiazd rozciągnięte
- lepszy zasięg dla śledzonego obiektu
- większe ryzyko zlania obrazu z gwiazdami

Szukanie obiektu (ang. survey):

- konieczność wycelowania w sensowne miejsce
- obrazy satelitów rozciągnięte
- lepszy zasięg dla gwiazd
- konieczność dobrania czasu ekspozycji

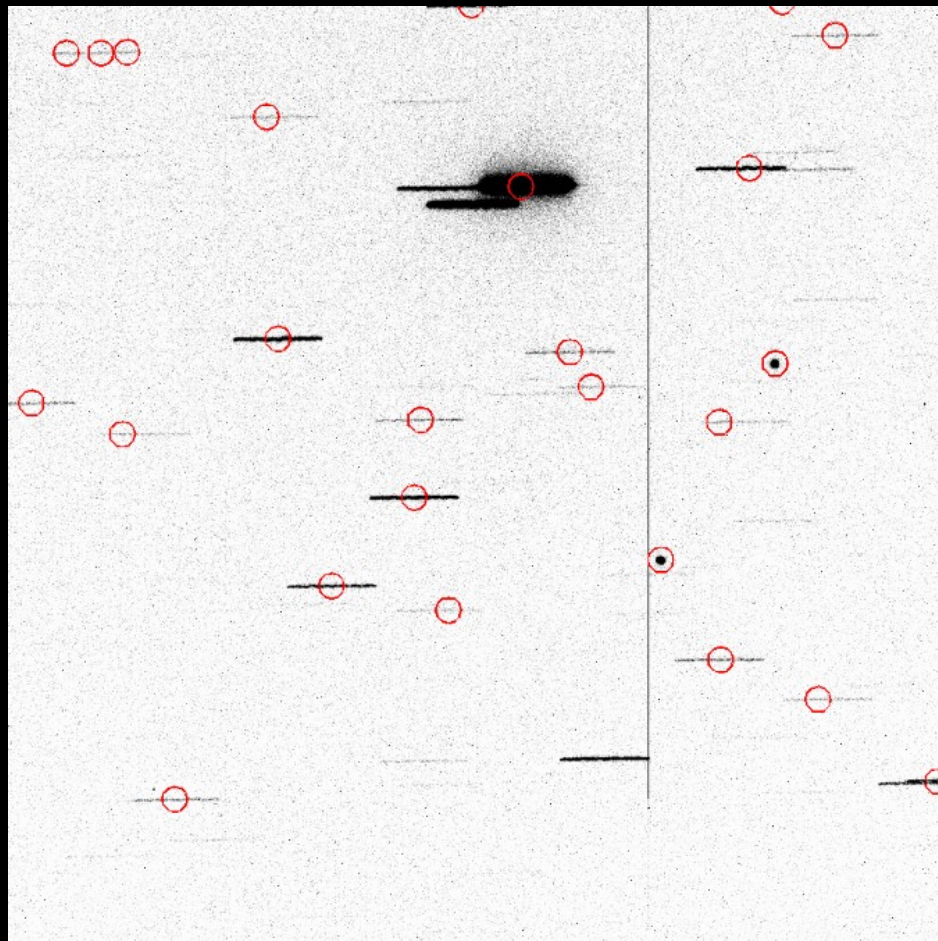
Przypadki szczególne: pas GEO, fragmentacje, obiekty zagubione.

Optyka

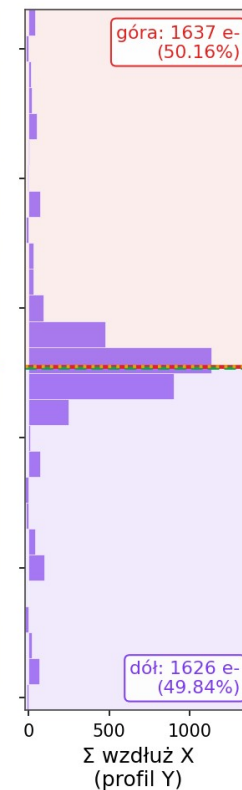
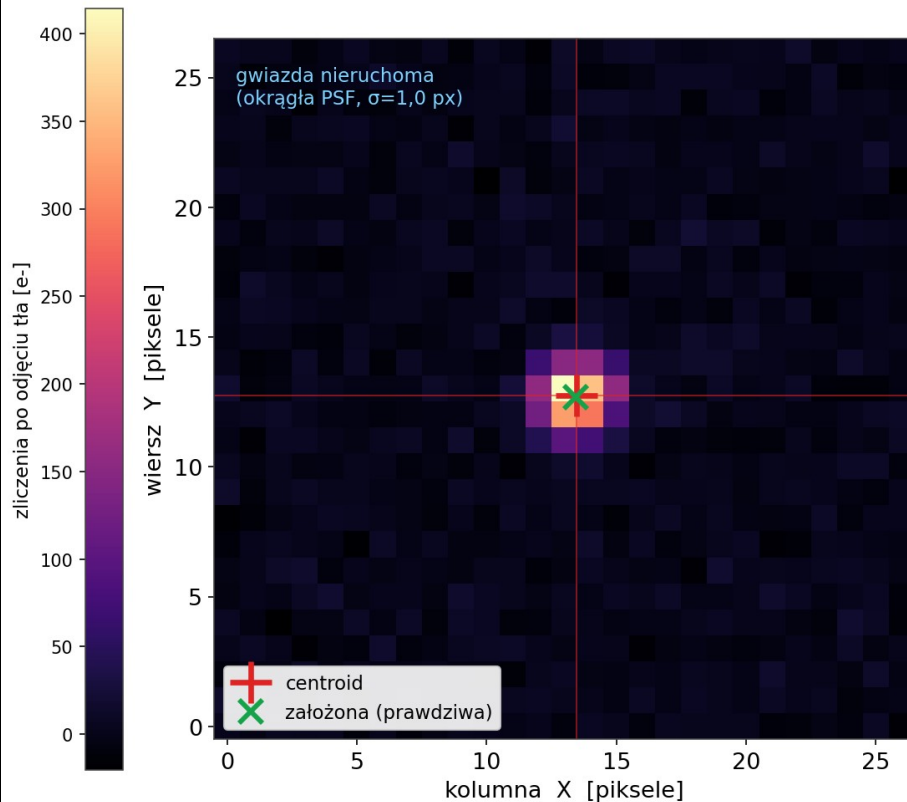
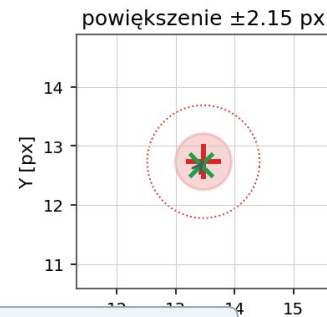
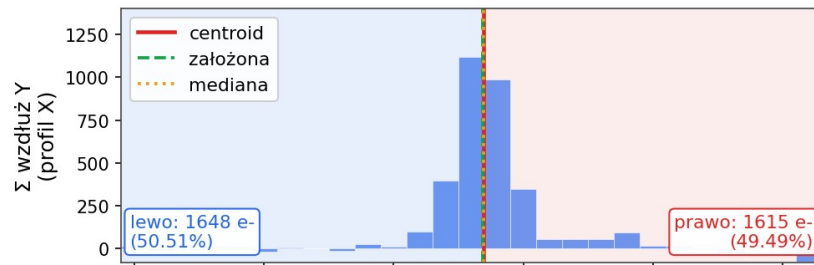
Astrometria satelitów

1. Wykrywanie obiektów na zdjęciu:

- wypłaszczenie tła;
- określanie progu detekcji;
- grupowanie pikseli;
- wyznaczenie centroidu;
- wyznaczenie jasności, kształtu itp.



Centroid gwiazdy nieruchomej (okrągła PSF, ten sam SNR/piksel co smuga) — mniej fotonów, większy błąd

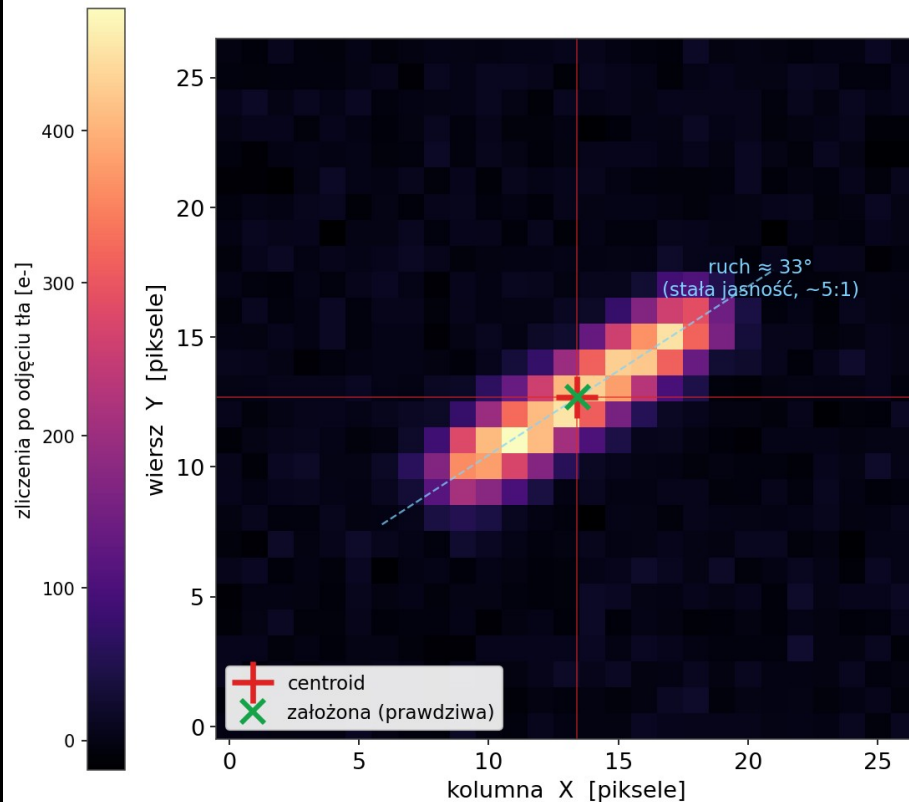
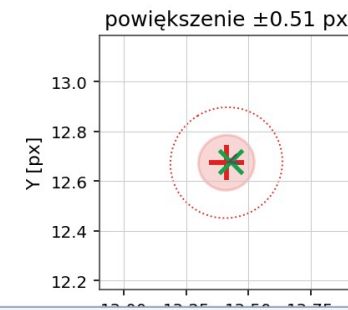
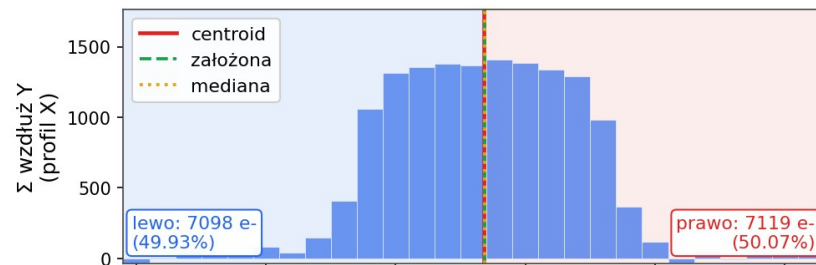


Wyniki centroidu
(gwiazda nieruchoma, okrągła PSF)
ZAŁOŻONA: (13.430, 12.680) px
 $x_c = 13.472 \pm 0.477$ px
 $y_c = 12.733 \pm 0.478$ px
 $\Delta x = +0.042$ px (0.09σ)
 $\Delta y = +0.053$ px (0.11σ)
Peak SNR $\approx 19/\text{px}$, $F = 3263$ e-

Porównanie ze smugą (ten sam SNR/piksel)
Fotony: 3263 vs 14217 e- $\rightarrow \approx 4\times$ mniej
Błąd: ~ 0.48 px vs ~ 0.11 px $\rightarrow \approx 4\times$ gorszy (ta sama apertura). Skupione światło = mniej fotonów. Cieńsze apertura PSF $\rightarrow \sim 0,1$ px.

Test mediany
Oś X: lewo 50.5% | prawo 49.5%, $|x_c - \text{med}| = 0.015$ px
Oś Y: dół 49.8% | góra 50.2%, $|y_c - \text{med}| = 0.005$ px
 $\Rightarrow$ symetryczna PSF: centroid $\approx$ mediana

Centroid skośnej smugi o stałej jasności (ślad gwiazdy, ~5:1, SNR ≈20/piksel) — dokładność subpikselowa



Wyniki centroidu

ZAŁOŻONA: (13.430, 12.680) px
 $x_c = 13.412 \pm 0.113$ px
 $y_c = 12.674 \pm 0.111$ px
 $\Delta x = -0.018$ px (-0.16 σ)
 $\Delta y = -0.006$ px (-0.05 σ)
 ślad $\approx 33^\circ$, ~5:1, stała jasność
 Peak SNR ≈ 21 /px, F = 14217 e-
 elipsa (powiększ.) = błąd $\pm 1\sigma/\pm 2\sigma$ ($\approx$ izotrop.)

Test mediany

Oś X: lewo 49.9% | prawo 50.1%
 mediana x=13.42, $|x_c - \text{med}| = 0.008$ px
 Oś Y: dół 50.1% | góra 49.9%
 mediana y=12.67, $|y_c - \text{med}| = 0.004$ px
 $\Rightarrow$ symetryczny ślad: centroid $\approx$ mediana

Optyka

Astrometria satelitów

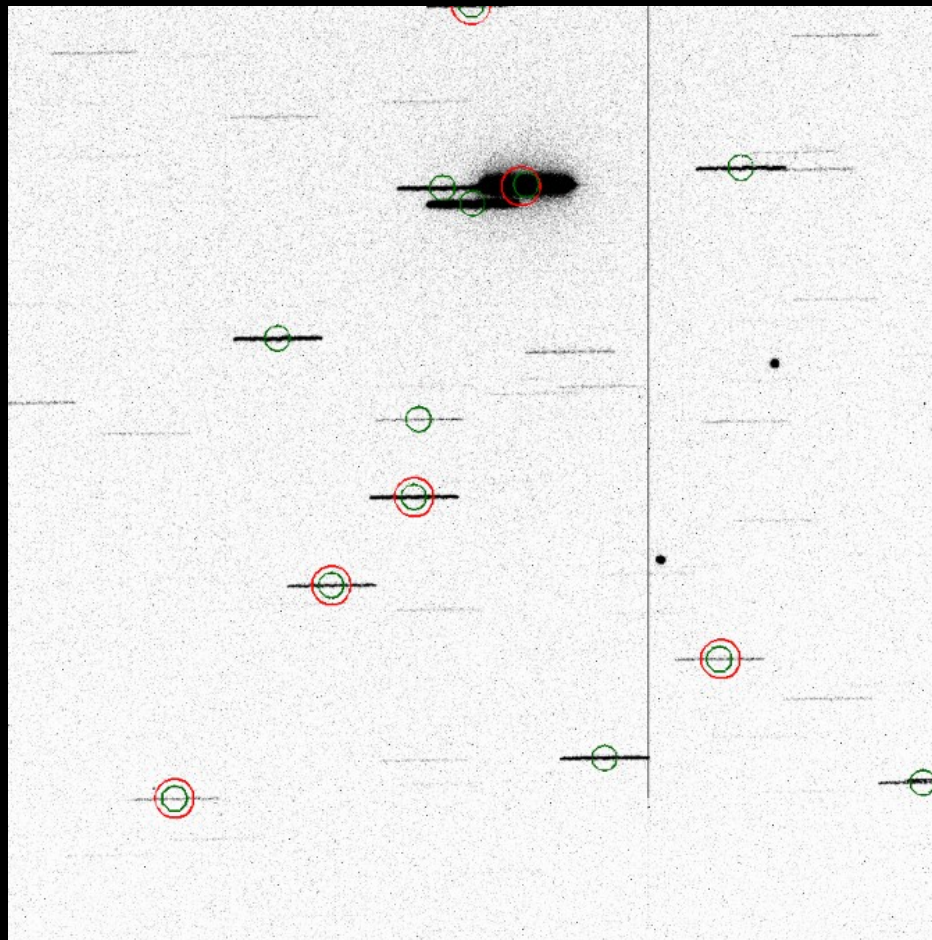
2. Identyfikacja gwiazd z katalogu
- określenie RA, Dec dla co najmniej
3 gwiazd odniesienia

3. Wyznaczenie transformacji
astrometrycznej
 $f(x,y) = (RA, Dec)$

Liniowa – 3 gwiazdy

Kwadratowa – 6 gwiazd

Sześcienna – 12 gwiazd



Optyka

Astrometria satelitów

Astrometria - transformacja liniowa

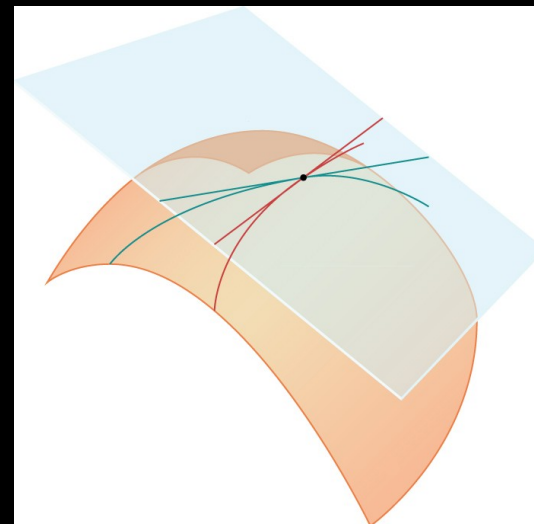
$$X = ax + bx + c$$

$$Y = dy + ey + f$$

Współrzędne na obrazie (pikselowe): x, y

Współrzędne standardowe (rzutowanie płaszczyzny na sferę): X, Y

X jest wzdłuż RA, Y jest wzdłuż Dec



$$X = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_o)}{\cos \delta_o \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_o) + \sin \delta_o \sin \delta}$$

$$Y = \frac{\cos \delta_o \sin \delta - \cos \delta \sin \delta_o \cos(\alpha - \alpha_o)}{\sin \delta_o \sin \delta + \cos \delta_o \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_o)}$$

Optyka

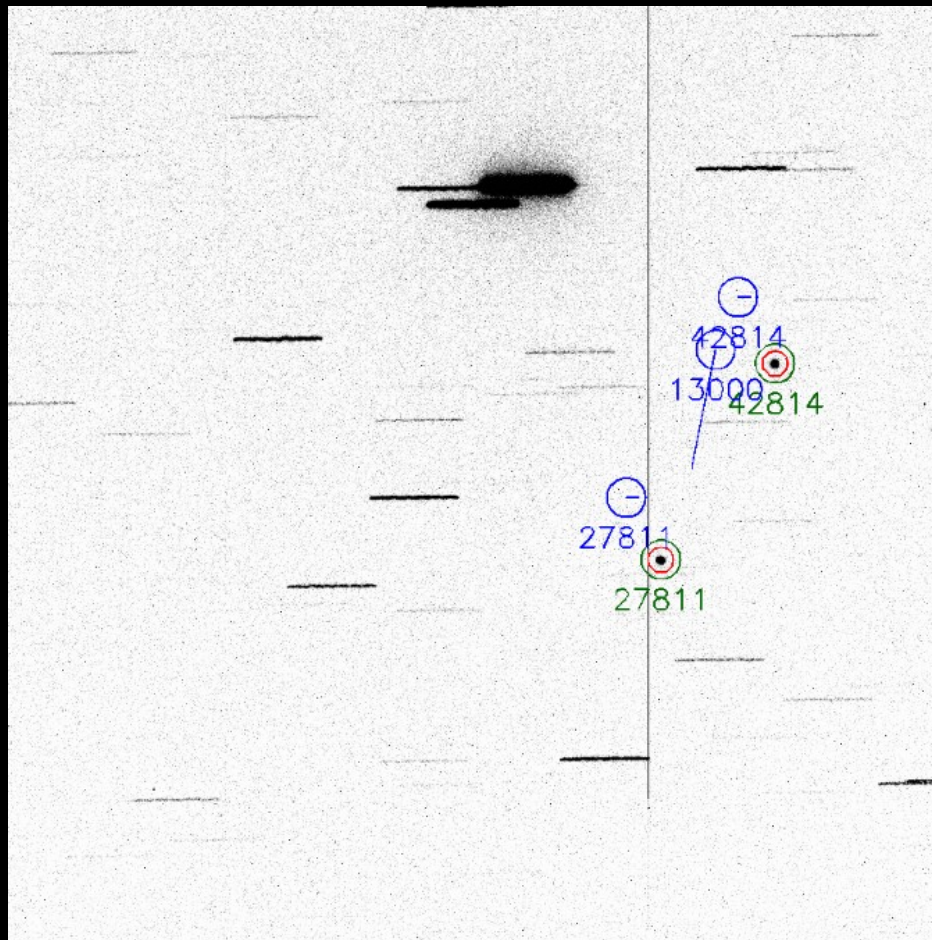
Astrometria satelitów

4. Wykrycie obiektów ruchomych lub stacjonarnych

- detekcja mimo zlewania z gwiazdami i zmiany jasności
- tolerancje na dryf obiektu

5. Identyfikacja satelity z katalogiem

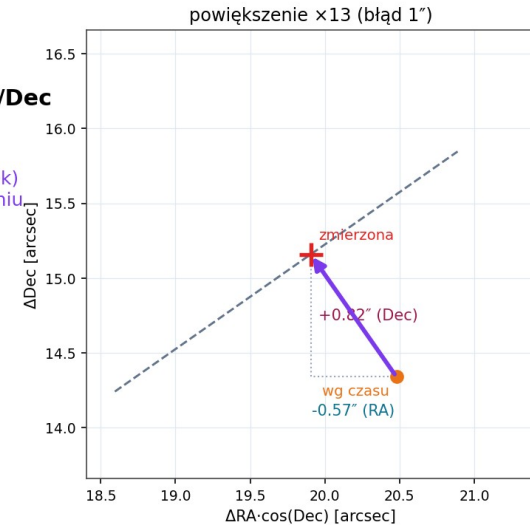
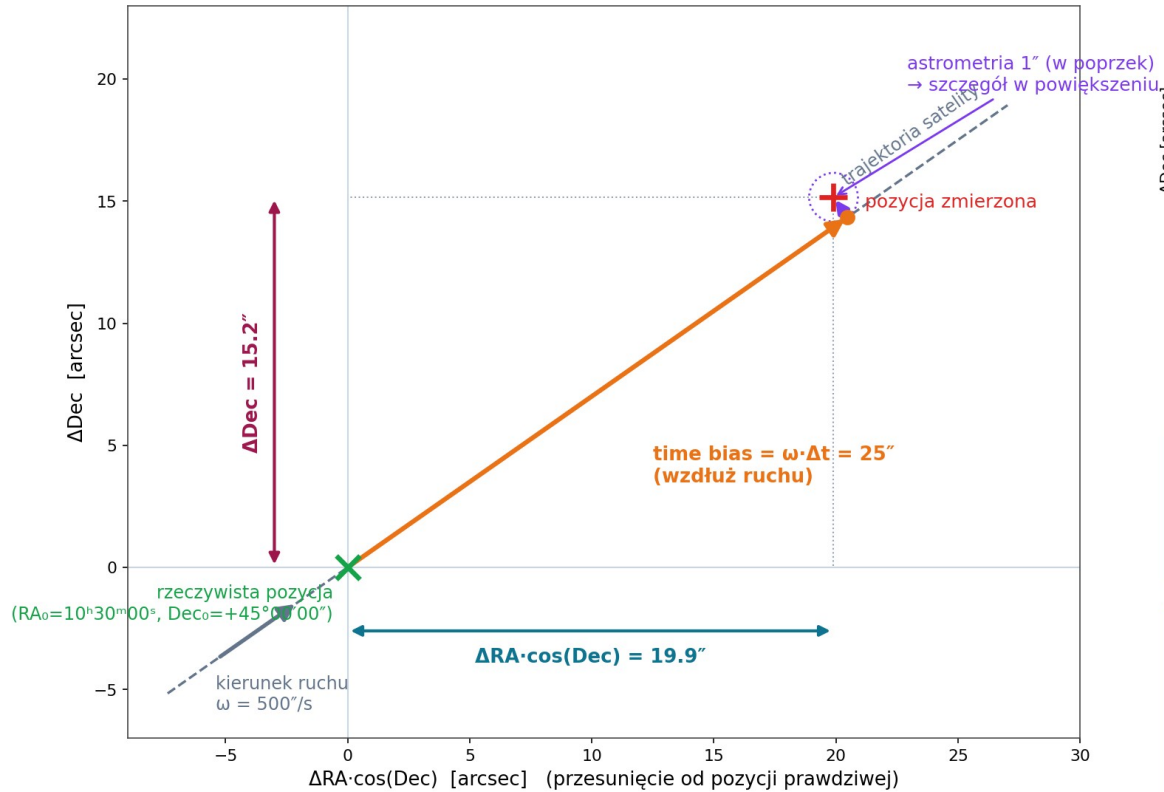
- pozycja na 1 zdjęciu nie wystarcza
- pas GEO
- niepewności pozycji z TLE



Optyka

Time bias

Time bias (wzdłuż ruchu) vs błąd astrometryczny (w poprzek) — mieszanie w residua RA/Dec



Parametry

$\omega = 500''/s$, $\Delta t = 0,05$ s
 $\Rightarrow$ time bias = $25''$ (wzdłuż ruchu)
 $\sigma_{astro} = 1''$ (w poprzek ruchu)
 kierunek ruchu: 35° do RA ($PA=55^\circ$)
 — ani wzdłuż RA, ani wzdłuż Dec

Residua są wymieszane

$\Delta RA \cdot \cos(Dec) = 19.91''$
 $= 20.48''$ (time) + $(-0.57'')$ (astro)
 $\Delta Dec = 15.16''$
 $= 14.34''$ (time) + $0.82''$ (astro)
 $\Rightarrow$ oba błędy wnoszą wkład do RA i Dec;
 rozdzielenie wymaga obrotu do osi
 wzdłuż/w poprzek ruchu.
 $(\Delta RA = \Delta RA \cos Dec / \cos 45^\circ = 28.2'' \text{ w RA})$

Optyka

NEXTA - New EXposure Timing Analyser

Optyka

MCAT (Meter Class Autonomous Telescope)

Jeden z najnowszych teleskopów NASA/AFRL (ukończony w 2015r).
Zlokalizowany na Wyspie Wniebowstąpienia (Ocean Atlantycki).

- 1.3m f/4 R-C z korektorem pola
- montaż: alt-alt (podwójna podkowa)
- kamera CCD 4k x 4k (pole 41'x41')
- prędkość ruchu do ok 4°/s

Typowa dokładność
astrometrii
na poziomie 0.2"
(zależy od SNR).

Height (km)	Rate (deg/s)	Exp (s)	Bin Factor	Plate Scale (")	Readout Time (s) (Rate Mhz)	Total Time per Frame (s)	Track Cover (%)	Data (MB) 90°Arc
200-500	2.23-0.87	0.15-0.39	8	4.76	0.228 (1.5)	0.378-0.62	40-63	56-34
500-1000	0.87-0.42	0.39-0.81	4	2.38	0.359 (1.5)	0.75-1.17	52-69	113-73
1000-2000	0.42-0.2	0.81-1.72	2	1.19	0.883 (1.5)	1.7-2.6	48-66	200-130
			8	4.76	0.84 (0.1)	1.6-2.6	49-67	13-8
2000-5000	0.2-0.07	1.72-5.0	2	1.19	0.883 (1.5)	2.6-5.9	66-85	130-57
			8	4.76	0.84 (0.1)	2.6-5.9	67-86	8.3-3.6
5000-GEO	0.068-0	5+	1	0.68	3.0 (1.5)	8.0	63+	170+
GEO (nom)	0	5	2	1.19	10.67 (0.1)	15.68+	100	~40

Optyka

MCAT (Meter Class Autonomous Telescope)



Optyka

Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) System

Optyczny komponent systemu śledzenia Sił Kosmicznych USA
Space Surveillance Network (SSN).

Powstał w latach 80-tych.

Śledzi ok 2500 obiektów na wysokościach ok. 10000 – 45000 km.

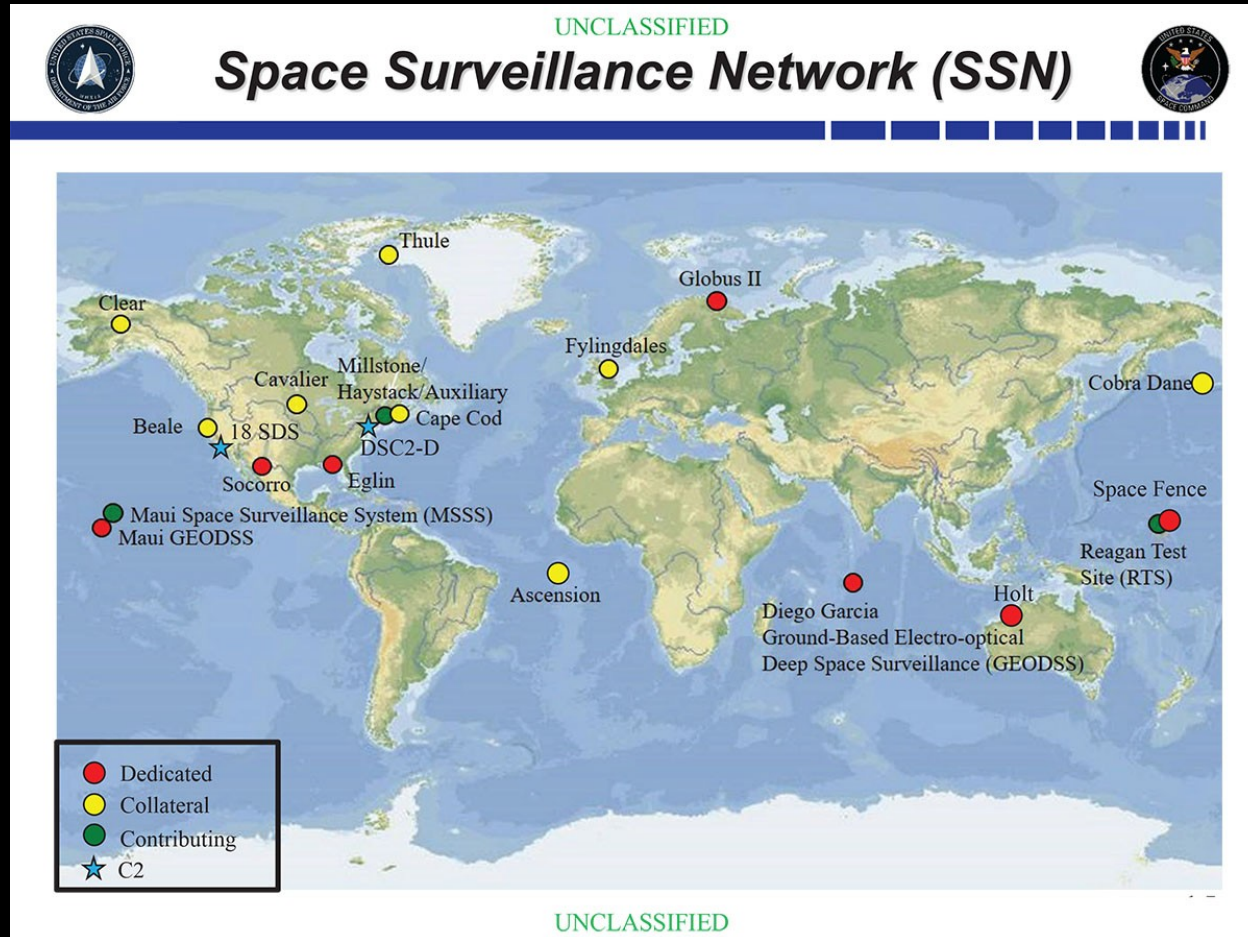
Operuje głównie teleskopami optycznymi klasy 1m.

Trzy główne lokalizacje po 3 teleskopy 1m f/2.15 R-C lub 38cm każda:

Socorro w Nowym Meksyku (na poligonie White Sands),
Diego Garcia na Brytyjskim Terytorium Oceanu Indyjskiego,
Mt. Haleakala na wyspie Maui (Hawaje).

Historycznie/okresowo działały też stanowiska w Hiszpanii (Morón) i Korei Południowej.

Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) System

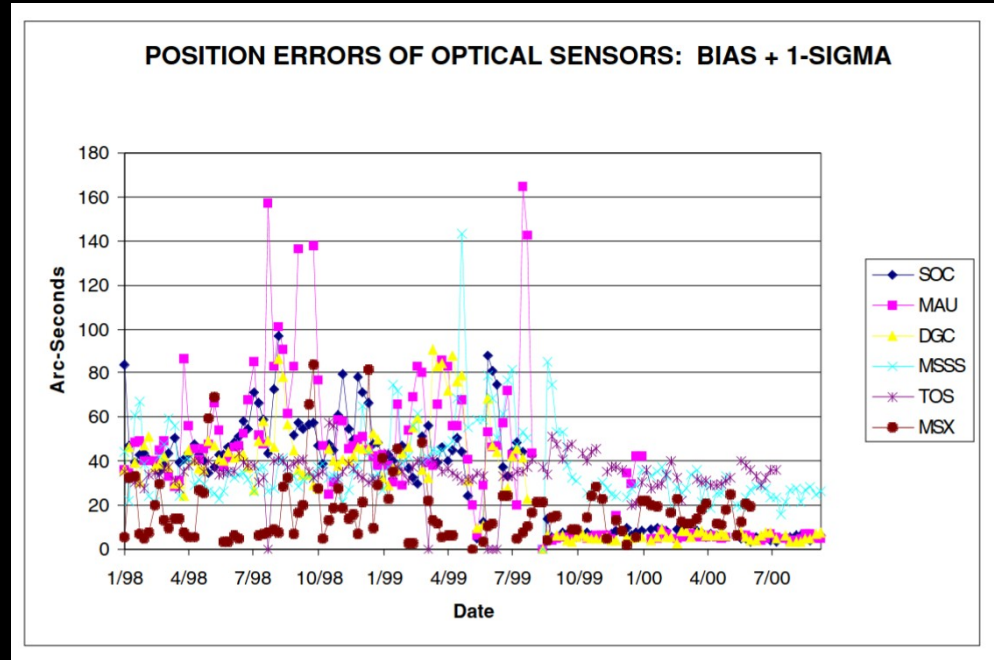


Mapa
z 2022r

Optyka

Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) System

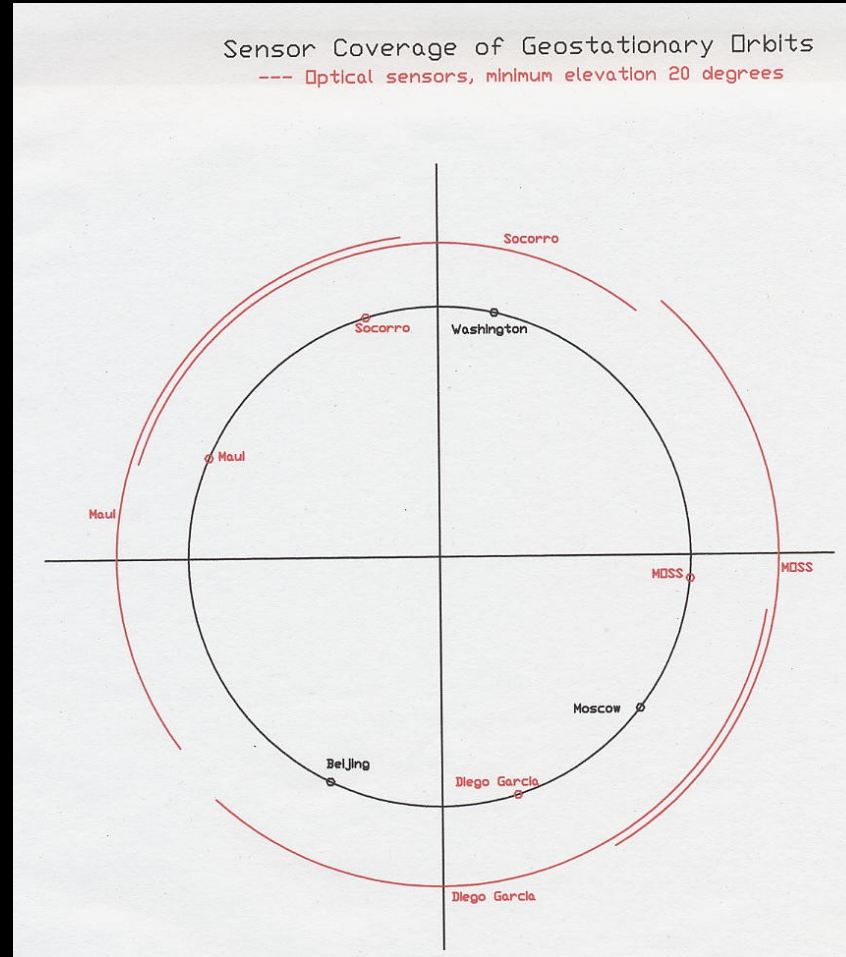
Dopiero w latach 2003-2005 zmodernizowano teleskopy GEODSS do kamer CCD.



Dokładność astrometrii przed montażem CCD
i liczeniem pozycji względem gwiazd (aktualnie 2"?)

Optyka

Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) System



Optyka

6ROADS

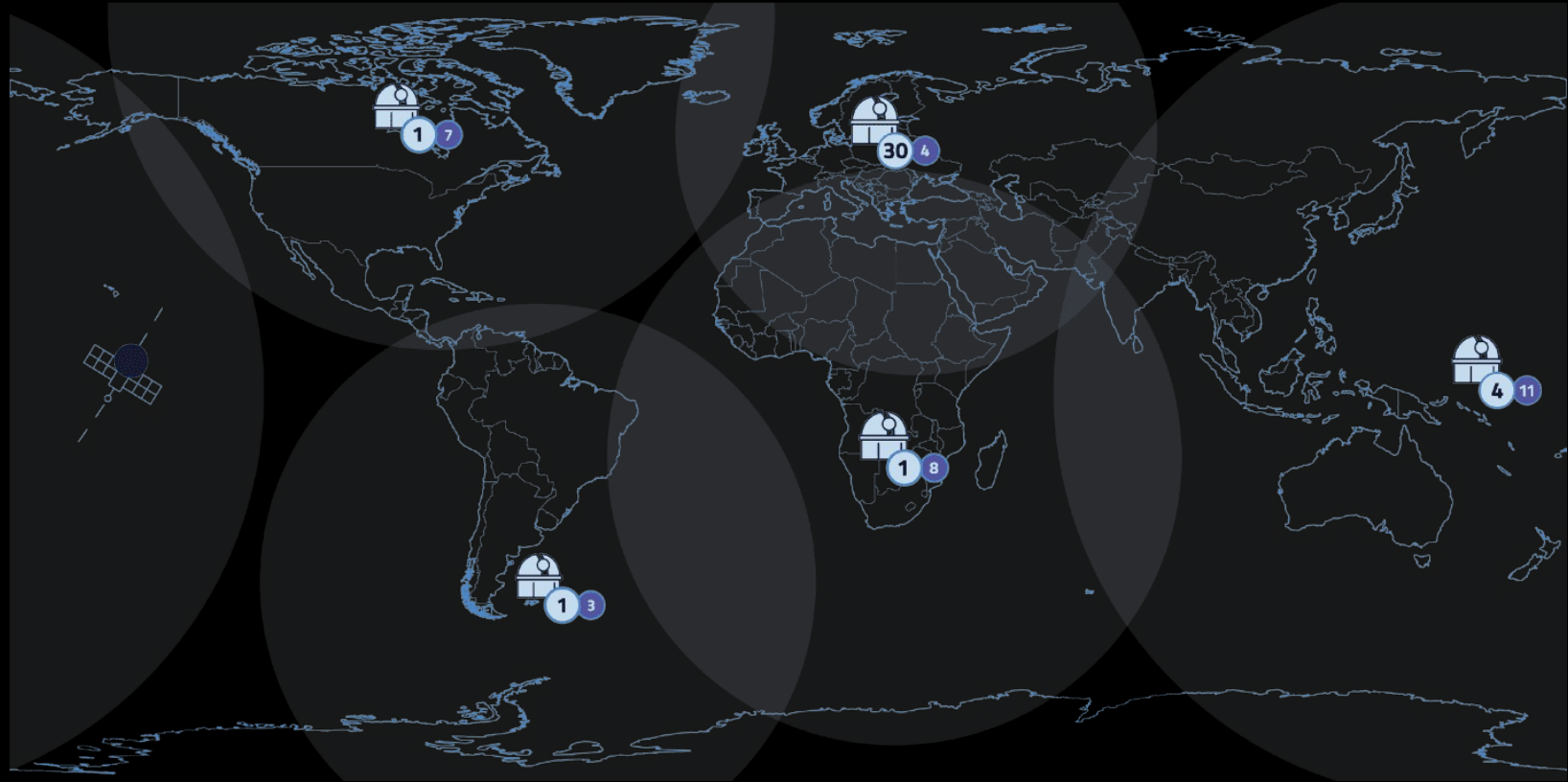
Legend

-  Scientific Agreement
-  ESA owned/funded
-  6ROADS Southern Hemisphere
-  6ROADS Asia
-  LCO
-  Flyeye #1



Optyka

Sybilla Technologies



Optyka

Sieć POLON + Optical Fence

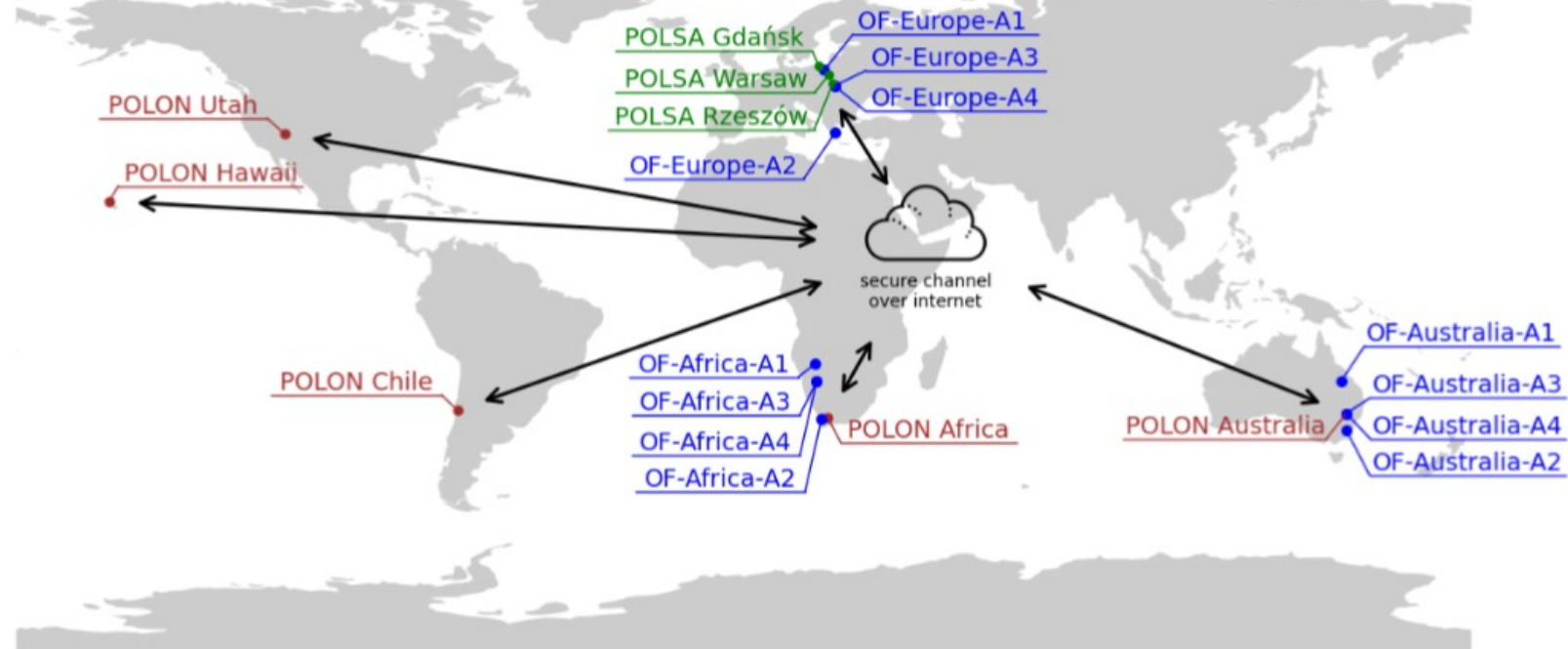


Figure 2: Augmented POLON geospatial localization

Optyka

Optical Fence

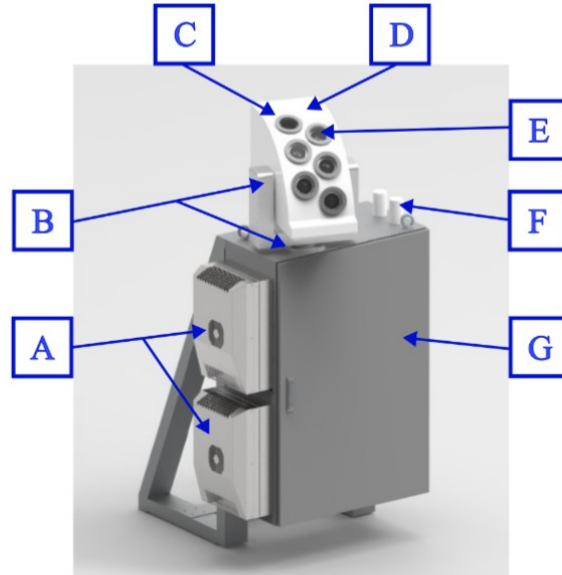


Figure 3: OF station configuration. A: Thermoelectric Cooling/Heating Unit, B: Positioning arm, C: Rolling cover (inside optical housing), D: Optical Housing, E: Cameras, F: Temperature and Pressure sensors, G: Control & Processing Unit.

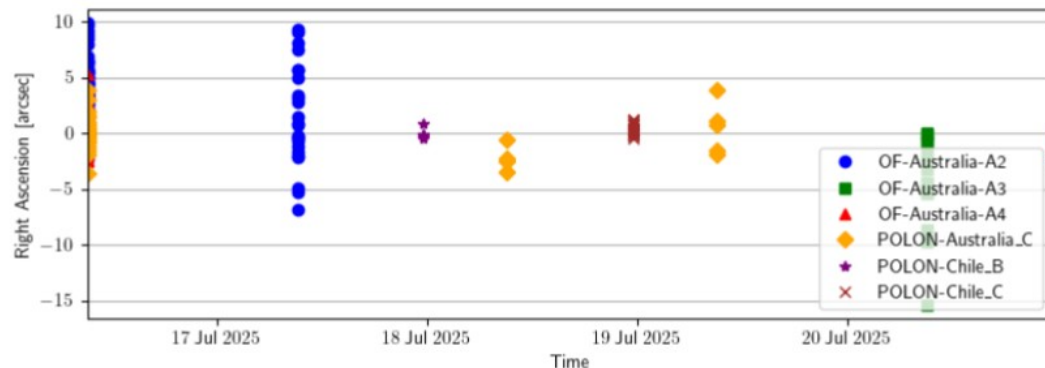
Table 3: Primary optical components

Component	Specification
Camera	FLIR BFS-U3-200S6M progressive scan CMOS - Sony IMX183 chip 12-bit ADC 9.9 arcsec/px pixelscale (without binning) pixel size: $2.4\mu m \times 2.4\mu m$ frame rate: 18 FPS
Lens	50 mm f/0.85
Aperture filter	BK7 AR, transmission $\geq 95\%$ in 400-1000 nm wavelength range
Industrialist PC	onLogic HX500

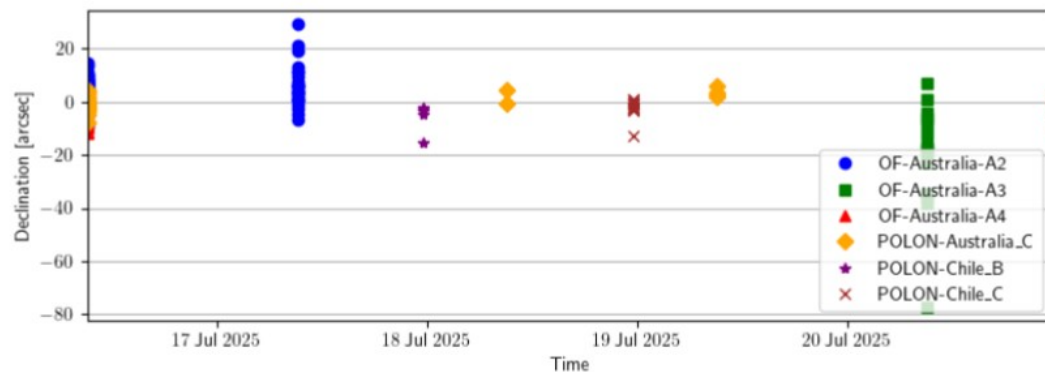
Pole widzenia: 60x15 deg
Czas exp: 0.2s
Zasięg: 9.5 mag (10.7 z 2x2)

Optyka

Optical Fence



(a) Right ascension



(b) Declination

Table 5: AZT calibration over scenario period

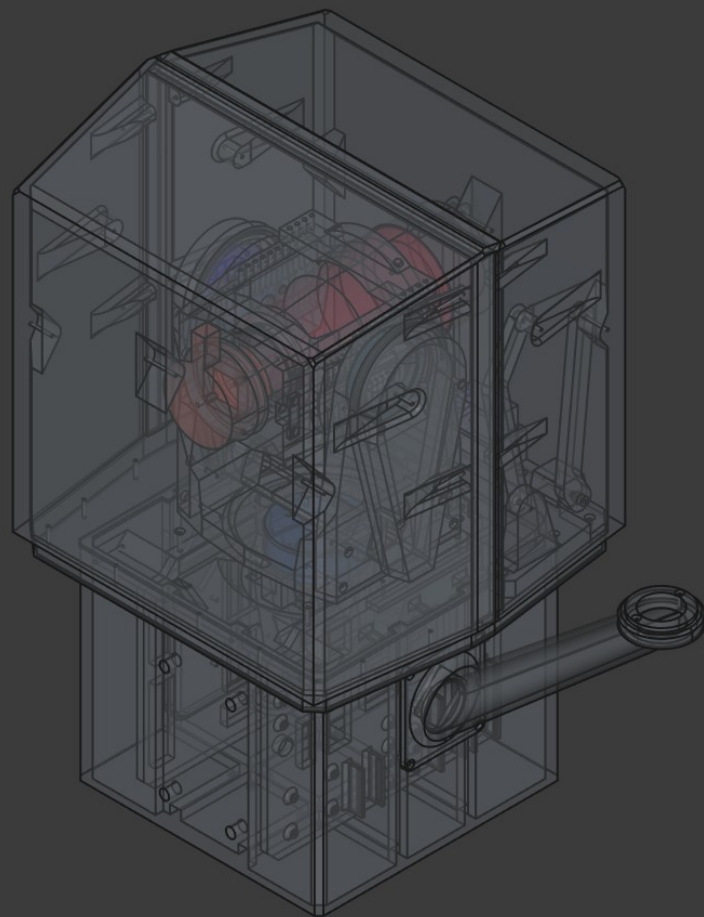
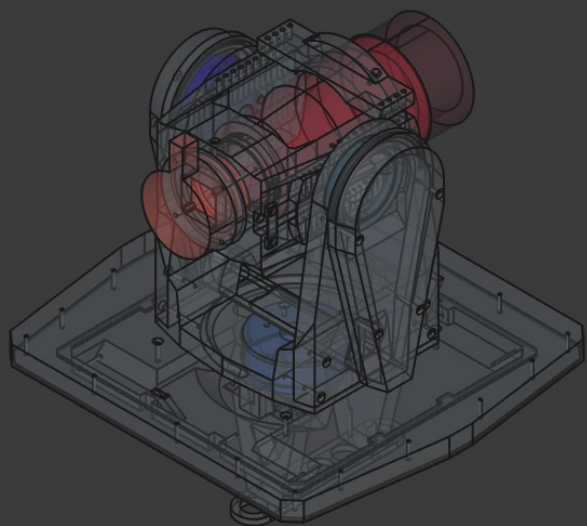
Telescope	RMS in RA [arcsec]	RMS in DEC [arcsec]
PL_POLON-Australia_C	1.09	1.43
PL_POLON-Chile_B	1.24	1.28
PL_POLON-Chile_C	1.11	1.18

Optical Fence mierzy typowo 60 pozycji przelatującego satelity. Dokładność nie jest podana, z rysunku można szacować na ok 5-10".

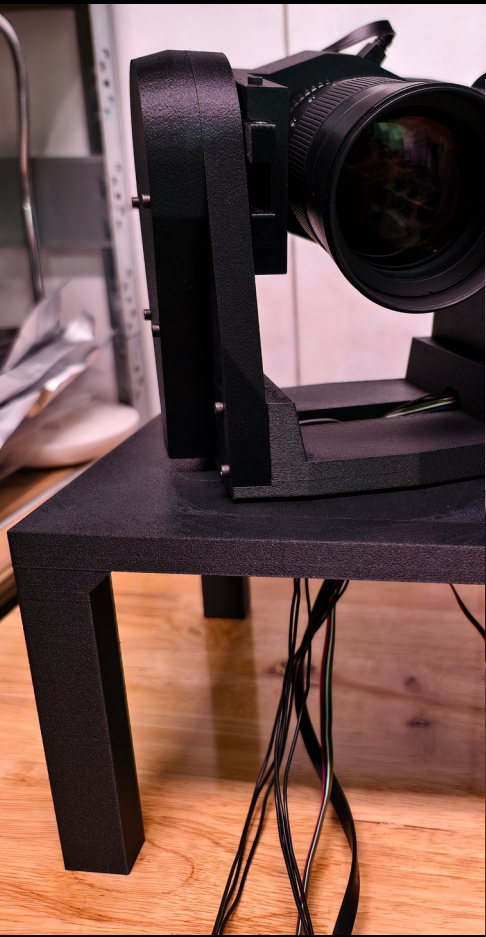
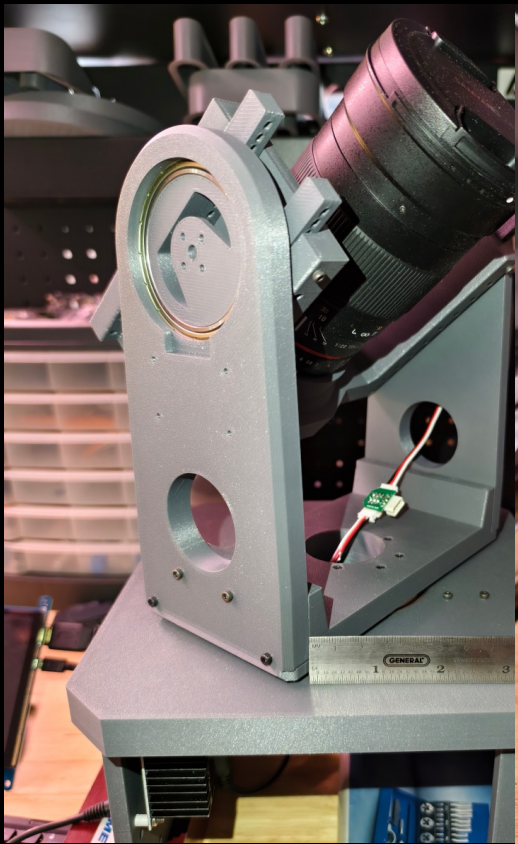
Optyka

Nano Observatory

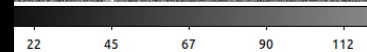




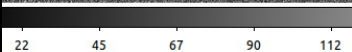
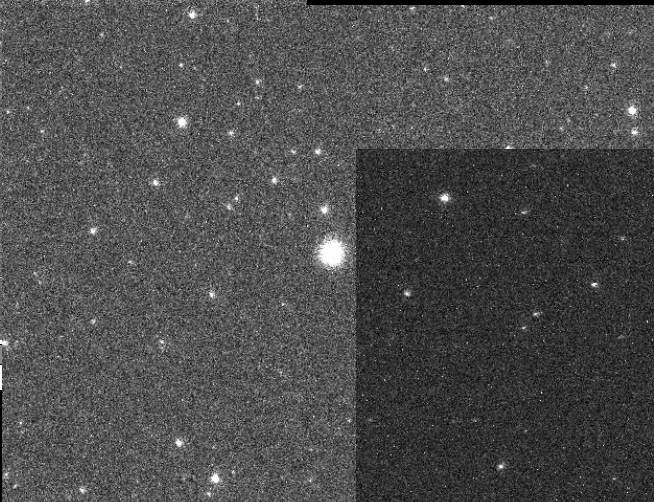




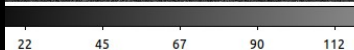




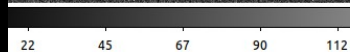
85/1.2



85/1.4



135/2.8

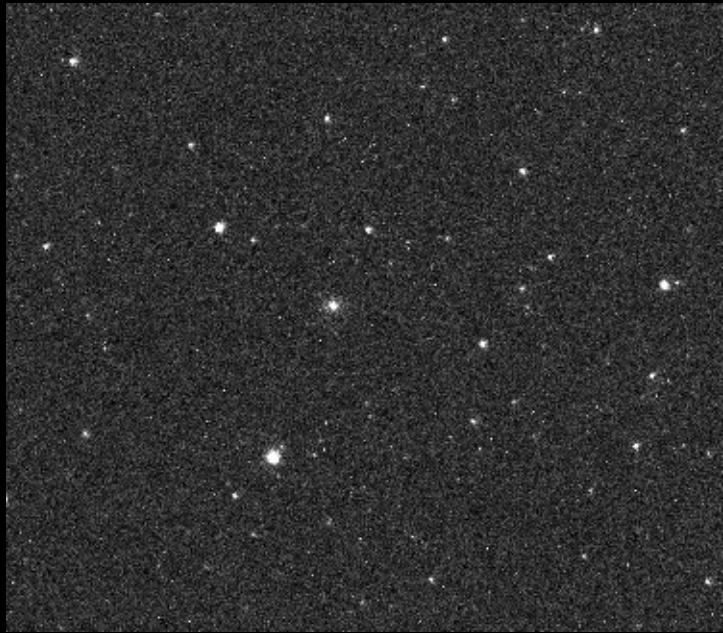


135/2.0

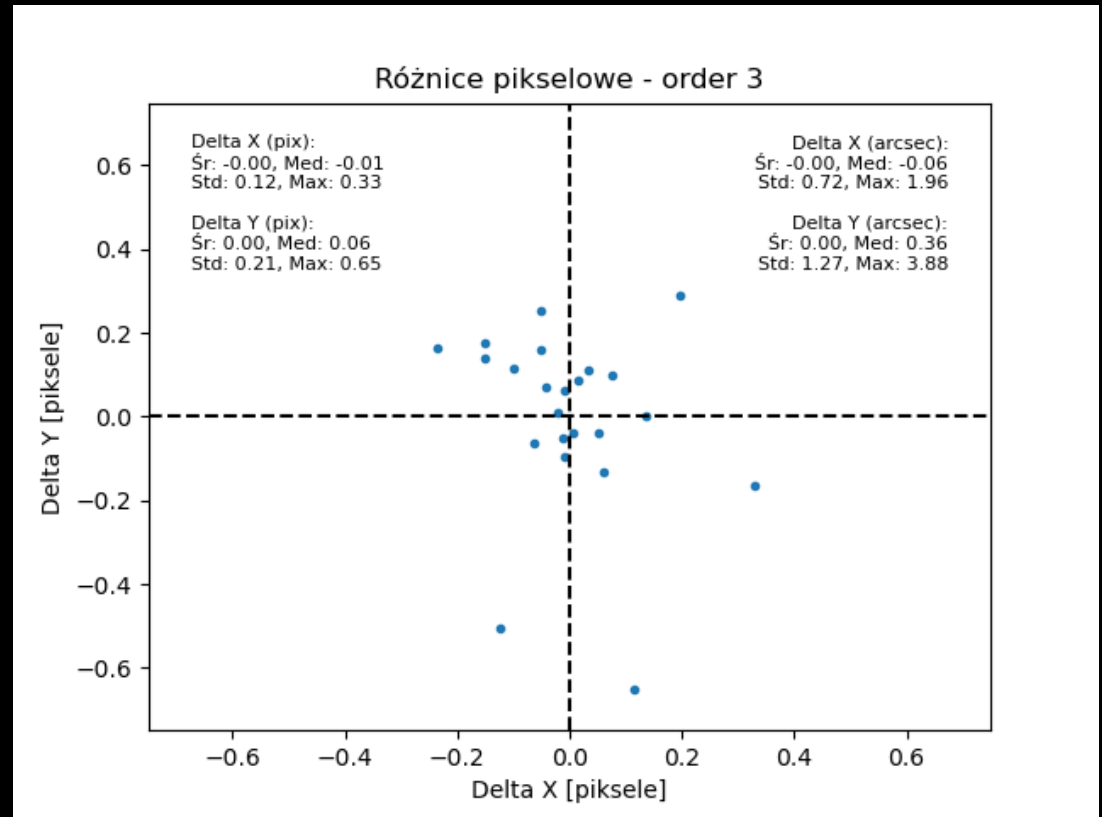


300/6.3

Nano observatory – first light



Example image
with 135mm lens



Errors for individual stars (5.9 arcsec/pix)

Initial assesment of astrometric accuracy on stars
with pixel scale from 5 to 14 arcsec/pix:
typical errors from 0.8 to 4 arcsec (depending on lens and camera)

