

Satelitarne badania
Ziemi i atmosfery
2

Obserwacje satelitarne prowadzone są przy użyciu następujących technik:

A. Sensory aktywne

- lidar: pomiar światła rozproszonego lub odbitego, pomiar czasu
- radar mikrofalowy: pomiar mikrofal rozproszonych lub odbitych, pomiar czasu

np. laser altimeter, lidar, radar, scatterometer, sounder

B. Sensory pasywne

- akcelerometr: kierunkowy i obrotowy
- radiometr: pomiar natężenia światła w wybranym paśmie
- spektrometr: pomiar rozkładu natężenia światła

np. hyperspectral radiometer, imaging radiometer, sounder, spectrometer, spectroradiometer

Najczęściej stosowane zakresy widmowe:

- optyczny,
- podczerwony,
- termiczny podczerwony,
- mikrofalowy

Sensor optyczny

Montaż:

Urządzenie zapewniające prawidłową orientację sensora na cel.

Kolektor:

Urządzenie gromadzące fale elektromagnetyczne na detektorze, posiada kilka funkcji:

- wyselekcjonować fale z danego kierunku
- odseparować wybrane fale od innych
- zebrać fale z jak największej powierzchni zbiorczej
- utworzyć obraz optyczny na detektorze

Analizator analogowy:

Urządzenie pozwalające na selekcję częstotliwości lub polaryzacji, np. filtr optyczny lub polaryzator

Detektor:

Urządzenie przetwarzające fale elektromagnetyczne na sygnały elektryczne oraz dalej na sygnały cyfrowe.

Analizator cyfrowy:

Program komputerowy dokonujący analizy danych offline np. selekcji częstotliwości, pomiar różnych parametrów.

Montaż sensora optycznego

Czujnik(i) pozycji i orientacji w przestrzeni, pozwalający określić aktualne bezwzględne usytuowanie i skierowanie podstawy montażu (np. satelity) względem fizycznego układu odniesienia (np. układu równikowego geocentrycznego).

Jak to jest w przypadku teleskopu astronomicznego?

Interesuje nas poznanie wektora położenia „nieruchomej” podstawy sensora, która w przypadku satelitów cały czas się przemieszcza: x , y , z . Dodatkowo chcemy poznać orientację nieruchomej podstawy sensora, czyli np. wektor kierunku głównej osi satelity: a_x , a_y , a_z .

Zwykle nie interesuje nas prędkość ruchu satelity – dlaczego?

Efekt aberracji

Maksymalna prędkość ruchu satelity względem Ziemi wynosi 8 km/s

Oznacza to, że obserwowany kierunek światła odchyła się od emitowanego kierunku światła o mały kąt:

$8 / 300000$ radianów

czyli

5.5 sekundy łuku

A jest to najgorszy możliwy przypadek.

Podsumowując: efekt aberracji wydaje się znikomo mały.

Montaż sensora optycznego

Wyznaczanie pozycji satelity w przestrzeni:

- odbiorniki GNSS
- efemerydy orbitalne
- pomiary naziemne

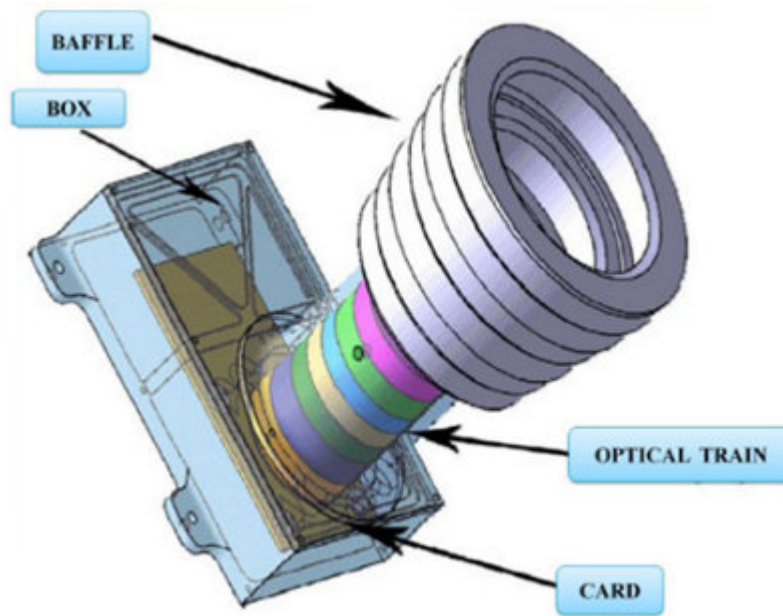
Wyznaczanie orientacji (kierunku) satelity:

pomiary bezwzględne:

- podczerwony czujnik horyzontu Ziemi;
- kompas żyroskopowy (gyrocompass);
- orientacja względem jasnych źródeł światła (np. Słońca, Ziemi, Księżyca);
- orientacja względem gwiazd (**star tracker**);
- magnetometr (pole magnetyczne Ziemi);

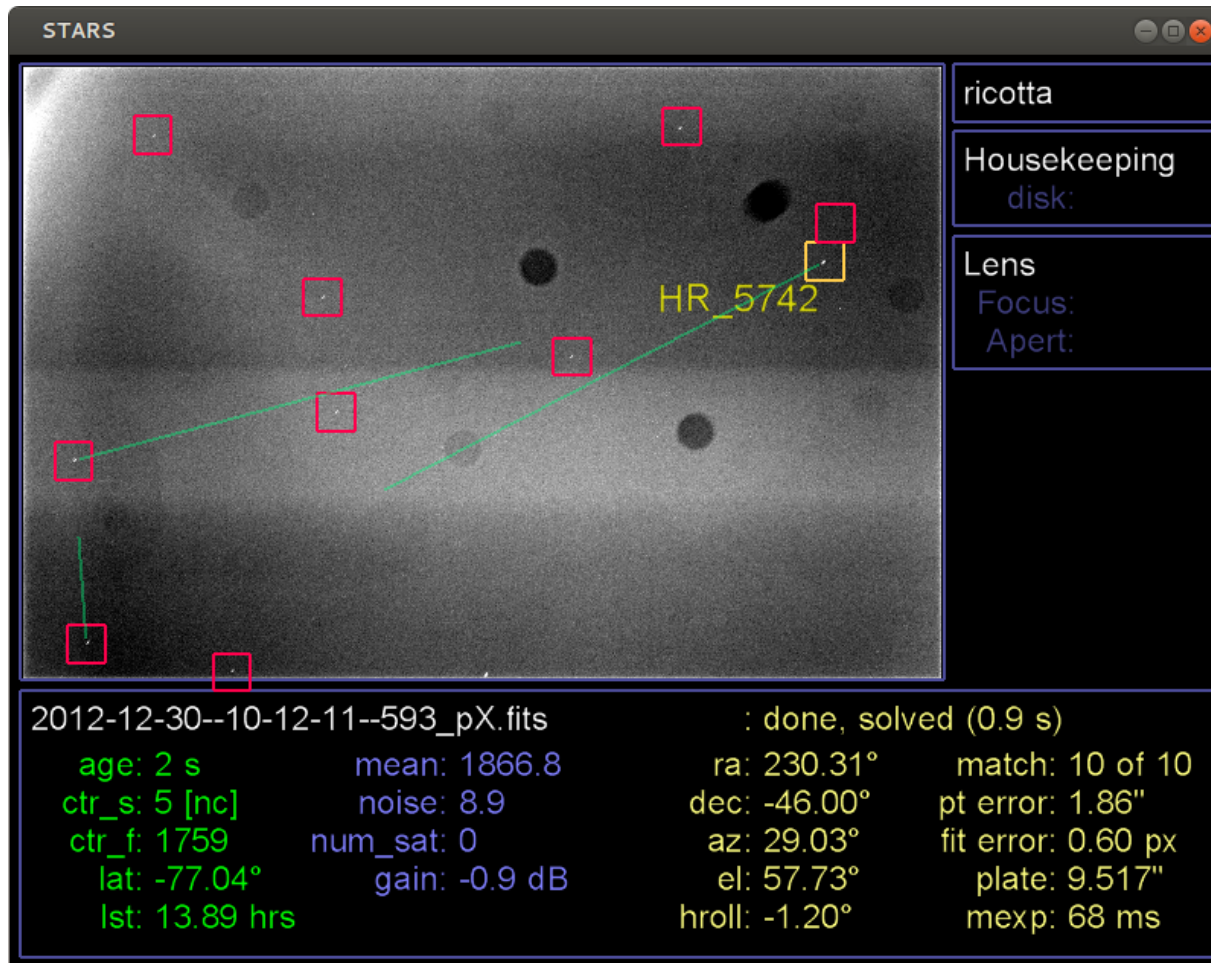
pomiary względne i przyrostowe:

- żyroskopy;
- IMU (inertial measurement unit);



Star tracker, ESA

star tracker



Program do automatycznej identyfikacji i śledzenia gwiazd wykorzystywany podczas misji balonowej.

www.astrometry.net

Montaż sensora optycznego

Stabilizacja obrotu satelity (np. po starcie):

Yo-yo de-spin – podwójne jo-jo wyrzucane w przeciwnych kierunkach

yo-yo

Yo-weight – pojedyncza masa na sznurku wyrzucana w jedną stronę
np. by spowodować koziółkowanie (tumbling)
ostatniego stopnia rakiety

Zdarzały się przypadki gdy po rozłączeniu ostatniego stopnia rakiety od ładunku (satelity) efekt odrzutu związany z odgazowywaniem resztek paliwa rozpędził raketę na tyle, że uderzyła w satelitę.

Montaż sensora optycznego

Aktywna stabilizacja satelity:

silniki korekcyjne – wada: wymagają paliwa

koła reakcyjne – wada: ulegają wysyceniu

żyroskopy CMG

(control moment gyroscope) – wada: skomplikowane i wadliwe

żagle słoneczne – wada: mało wydajne

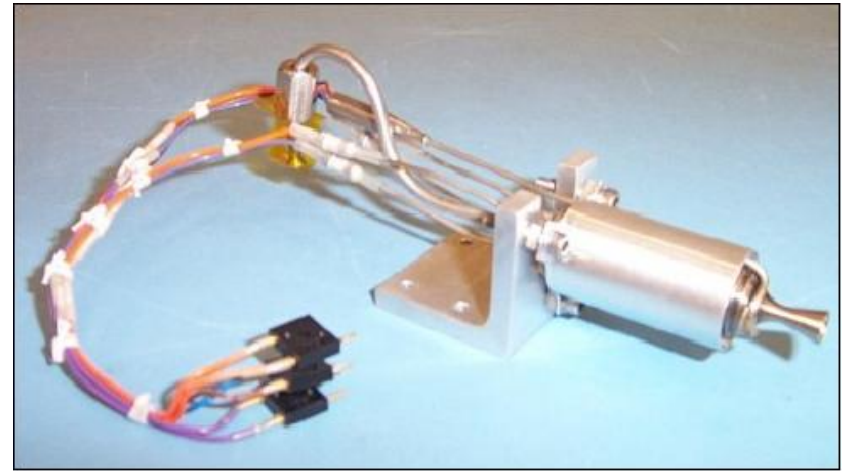
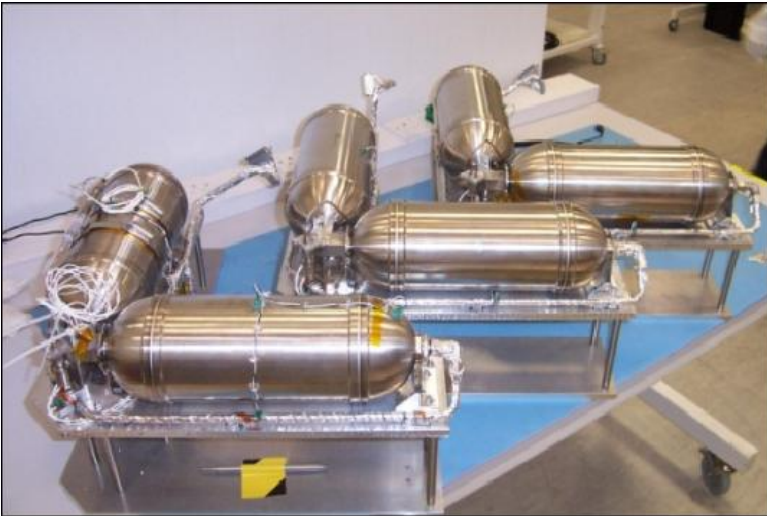
elektromagnesy – wada: mało wydajne

Pasywna stabilizacja satelity:

gradient pola grawitacyjnego – wada: skomplikowane zachowanie linek

magnesy stałe – wada: oscylacje satelity

Montaż sensora optycznego



Zbiorniki z butanem (2 atm), dysza silnika korekcyjnego z elektrozaworem.

Montaż sensora optycznego

Ustawienie sensora na wybrany kierunek

Obrót całego satelity – więcej energii ale mniejsza komplikacja

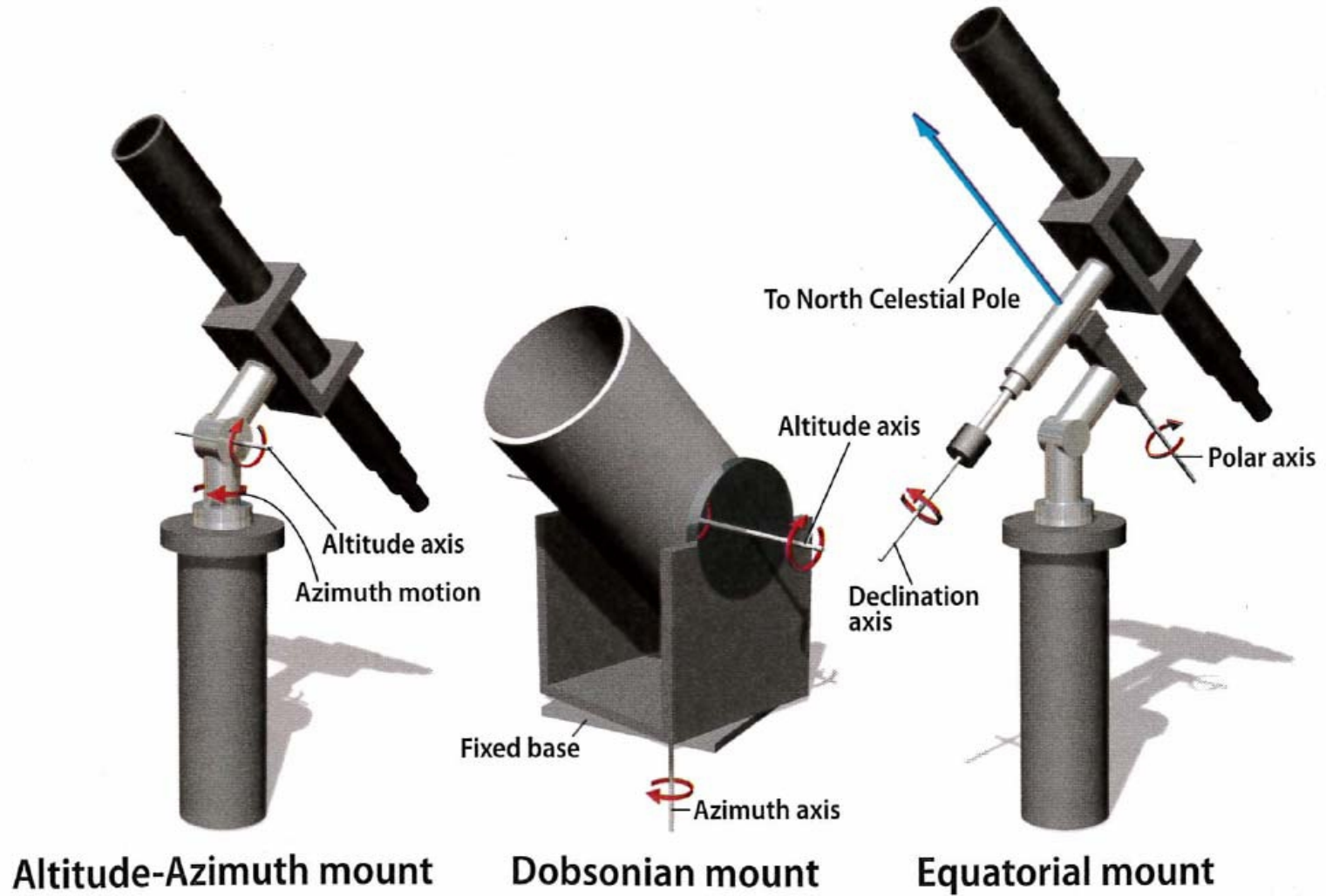
Obrót wybranego modułu – mniej energii ale większa komplikacja

Czujnik pozycji sensora

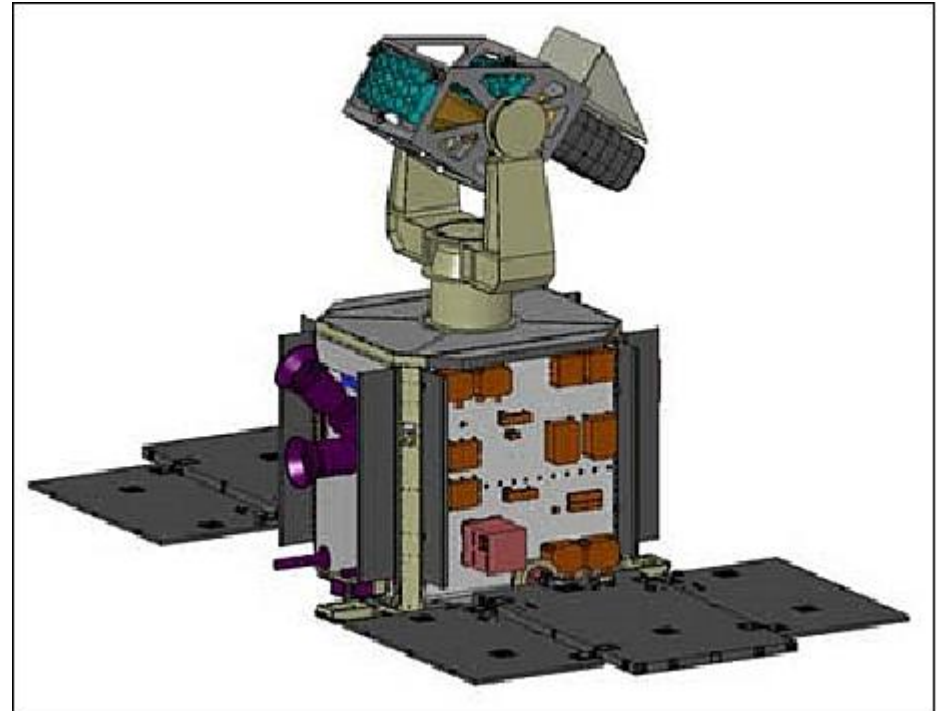
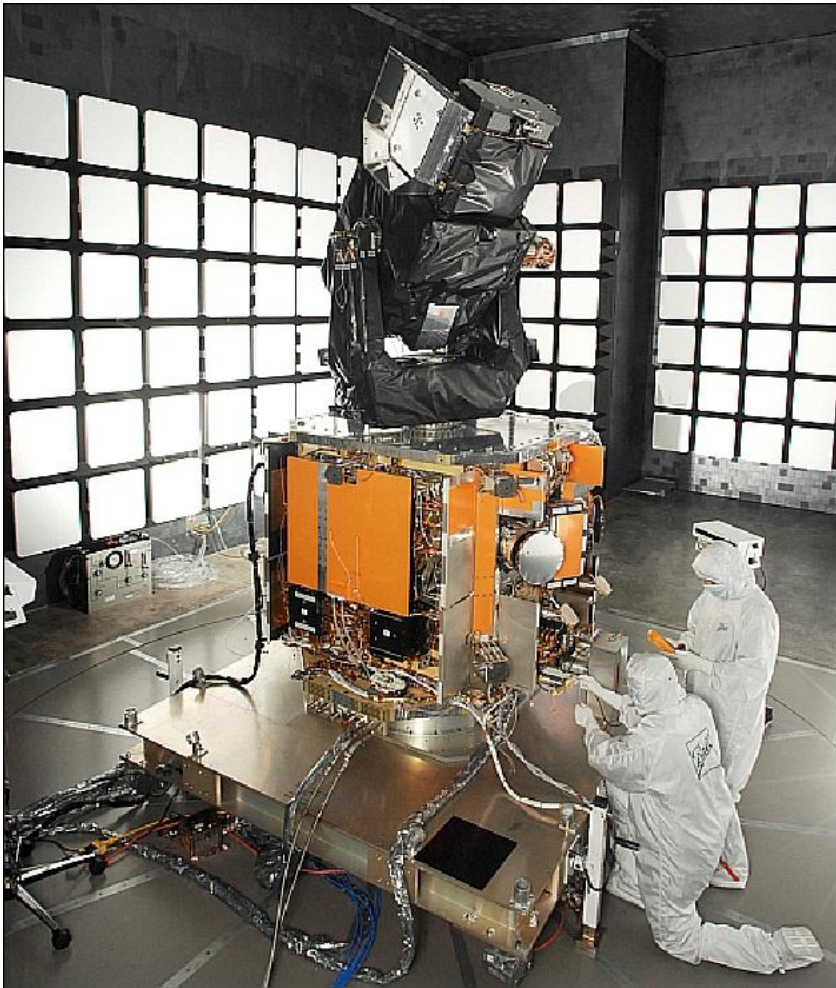
Obrót całego satelity – ten sam co dla satelity

Obrót wybranego modułu – dodatkowy czujnik kąta
(orientacji modułu względem satelity)

Montaż sensora optycznego



Montaż sensora optycznego

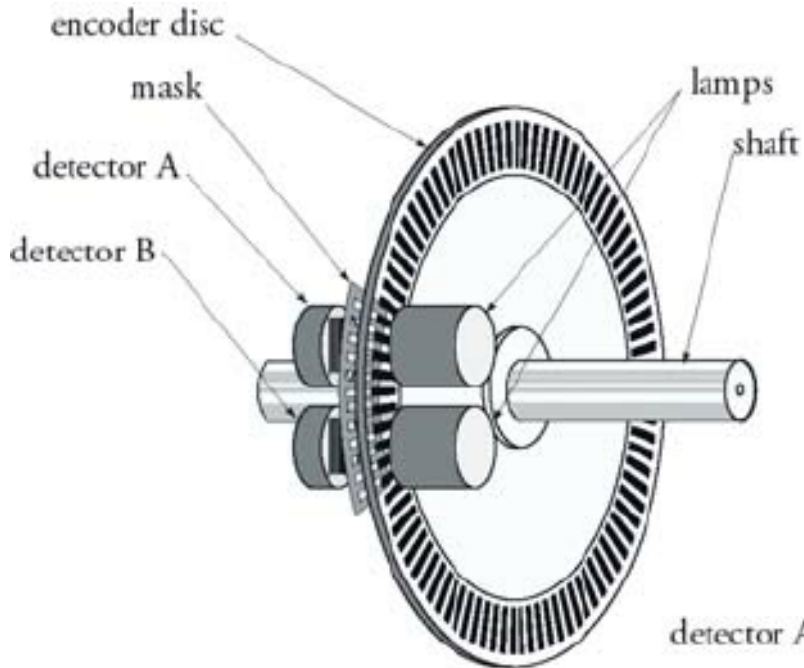


Space-Based Space Surveillance System-1, USAF, Boeing (start: 2010)

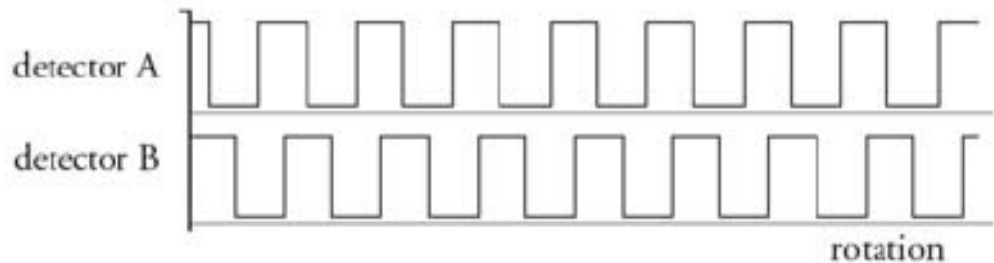
Montaż sensora optycznego

Czujniki kąta (enkodery):

względne / bezwzględne dotykowe / bezdotykowe optyczne / magnetyczne



Disc shown against mask, rotated slightly between each picture. Light intensity changes for each detector can be seen.



Montaż sensora optycznego

Dokładność współczesnych czujników kąta jest tak wysoka, że można przyjąć iż obrót modułu względem satelity jest znany perfekcyjnie i nie wnosi on żadnych błędów do ostatecznej orientacji sensora.

Montaż sensora optycznego

Dokładność określania współrzędnych geograficznych na zdjęciach satelitarnych?

A. Przyjmijmy dokładność orientacji satelity: 5-50''

B. Przyjmijmy dokładność pozycji satelity na orbicie: 10-500m

Przy obserwacji w nadirze dokładność pozycji satelity przekłada się bezpośrednio na dokładność pozycji na Ziemi.

Natomiast dokładność znajomości orientacji satelity wiąże się z jego wysokością prostym wzorem:

$$\Delta l = h \cdot \operatorname{tg}(\Delta \alpha)$$

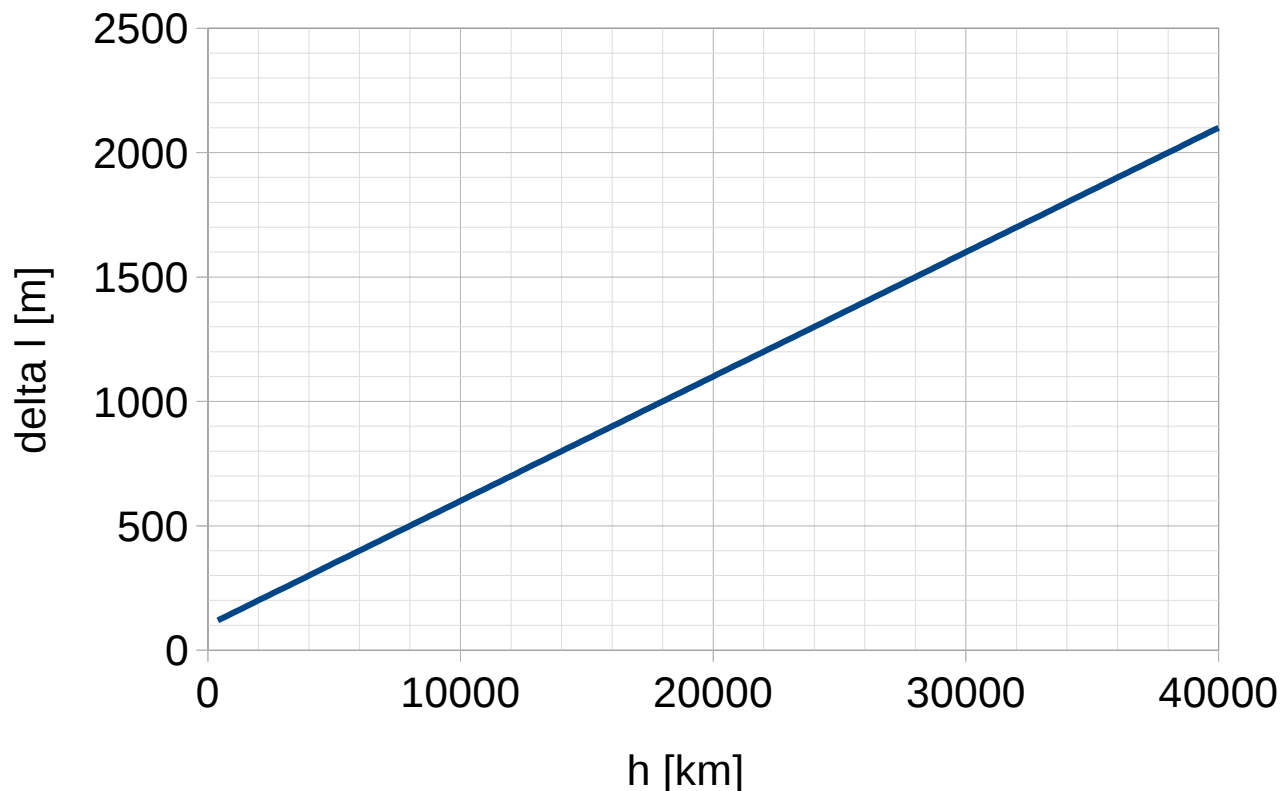
$$\Delta l = h \cdot \Delta \alpha + \Delta x$$

$$\Delta l = h \cdot 10'' + 100 \text{ m}$$

$$\Delta l = h \cdot 5 \cdot 10^{-5} + 100 \text{ m}$$

Montaż sensora optycznego

Dokładność określania pozycji na Ziemi



A więc dla orbit niskich dominuje błąd określenia pozycji na orbicie, a dla orbit wysokich dominuje błąd określenia orientacji satelity.

Sensor optyczny

Montaż:

Urządzenie zapewniające prawidłową orientację sensora na cel.

Kolektor:

Urządzenie gromadzące fale elektromagnetyczne na detektorze, posiada kilka funkcji:

- wyselekcjonować fale z danego kierunku
- odseparować wybrane fale od innych
- zebrać fale z jak największej powierzchni
- utworzyć obraz optyczny na detektorze

Analizator analogowy:

Urządzenie pozwalające na selekcję częstotliwości lub polaryzacji, np. filtr optyczny lub polaryzator

Detektor:

Urządzenie przetwarzające fale elektromagnetyczne na sygnały elektryczne oraz dalej na sygnały cyfrowe.

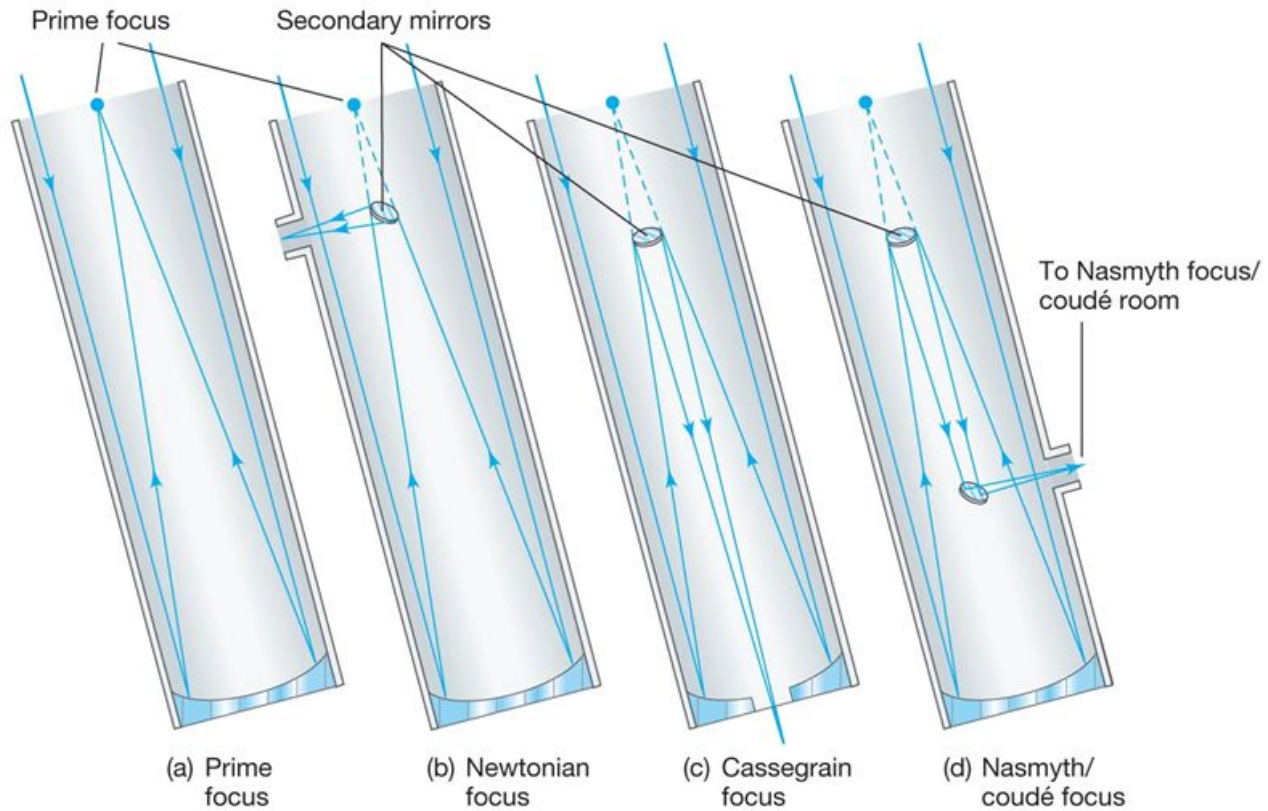
Analizator cyfrowy:

Program komputerowy dokonujący analizy danych offline np. selekcji częstotliwości, pomiar różnych parametrów.

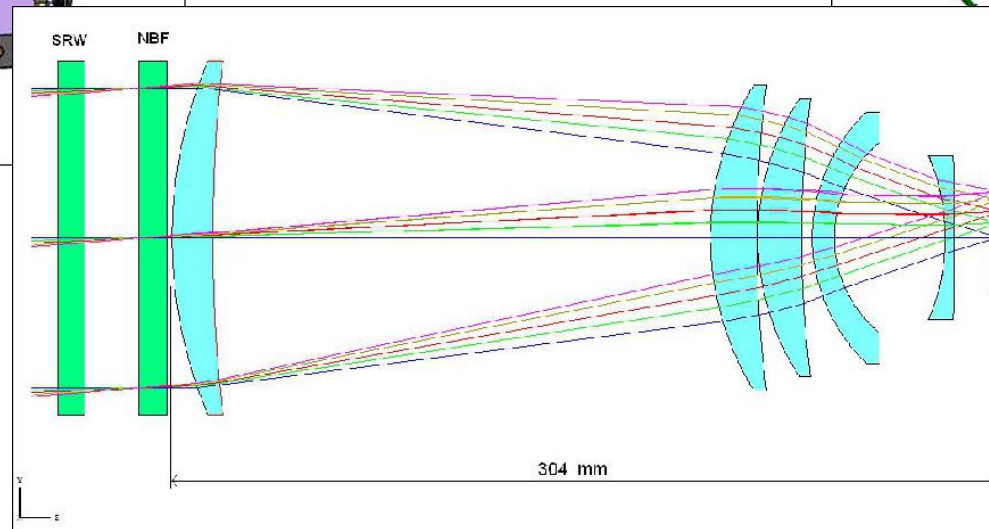
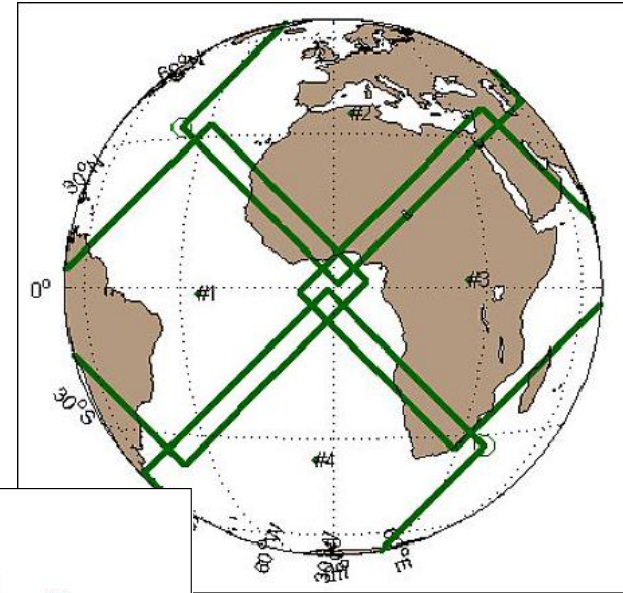
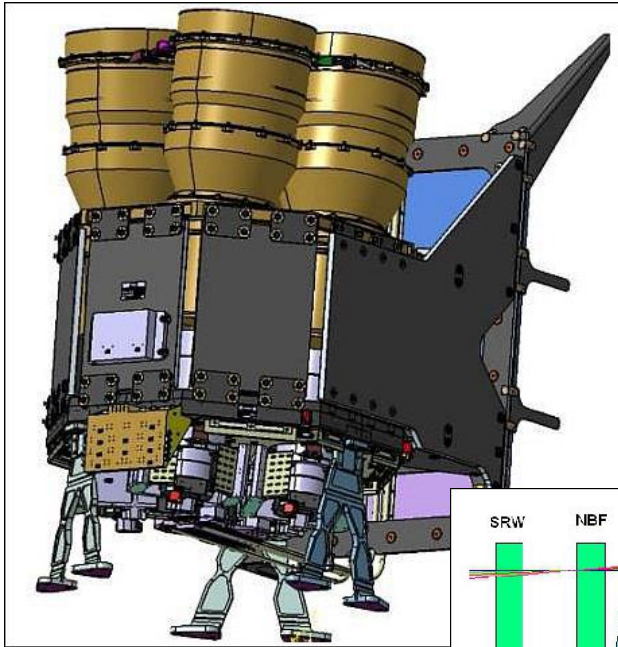
Kolektor sensora optycznego

Rodzaje układów optycznych:

- soczewkowe
- zwierciadlane
- kata-dioptryki (mieszane)



Kolektor sensora optycznego



Układ optyczny przyszłego satelity ESA/EUMETSAT: Meteosat Third Generation Lightning Imager – kamera do fotografowania błyskawic
 $d=110\text{mm}$, $f=191\text{mm}$, $\text{FoV}=5^\circ$, zakres= $777.15\text{-}777.75\text{nm}$, temperatura pracy= $15\text{-}40\text{ }^\circ\text{C}$

Kolektor sensora optycznego

W skład kolektora optycznego wchodzi:

- elementy optyczne lustrzane lub soczewkowe
- mocowanie elementów optycznych
- układ ogniskujący/kolimujący

Specyfika warunków kosmicznych:

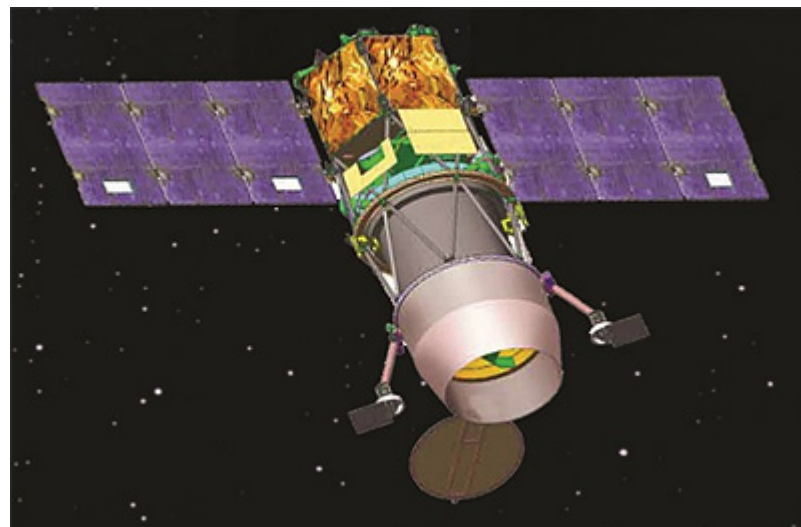
1. Próżnia – ryzyko odgazowywania materiałów
2. Nieważkość – mniejsze wymagania sztywnościowe (ale start!)
3. TemperatURY – duże odkształcenia termiczne

Kolektor sensora optycznego

Elementy optyczne są bardzo podobne do teleskopów/obiektywów używanych na powierzchni Ziemi z kilkoma zastrzeżeniami:

1. Nie może być zamkniętych szczelnie komór wypełnionych gazem, jak w niektórych obiektywach.
2. Trzeba unikać używania materiałów, które ulegają odgazowywaniu, takich jak kleje, smary, niektóre powłoki antyodblaskowe itp. oraz odgazować wszystkie użyte elementy.
3. Trzeba zwiększyć odporność na zmiany temperatury np. poprzez użycie materiałów o niskiej rozszerzalności cieplnej takich jak: szkło kwarcowe, inwar (Fe+Ni), włókno węglowe, zerodur, sitall
4. Trzeba wzmocnić konstrukcję by wytrzymała przeciążenia i drgania podczas startu rakiety.
5. Trzeba przewidzieć ryzyko spojrzenia w Słońce (dotyczy też detektora).
6. Trzeba się zabezpieczyć przed światłem bocznym (przesłony).

Włoski satelita szpiegowski OPTSAT-3000



Średnica teleskopu 70cm, rozdzielczość 0.5m,
szerokość pokrytego 1 zdjęciem obszaru 15km.

Kolektor sensora optycznego

Podstawowe parametry techniczne/optyczne:

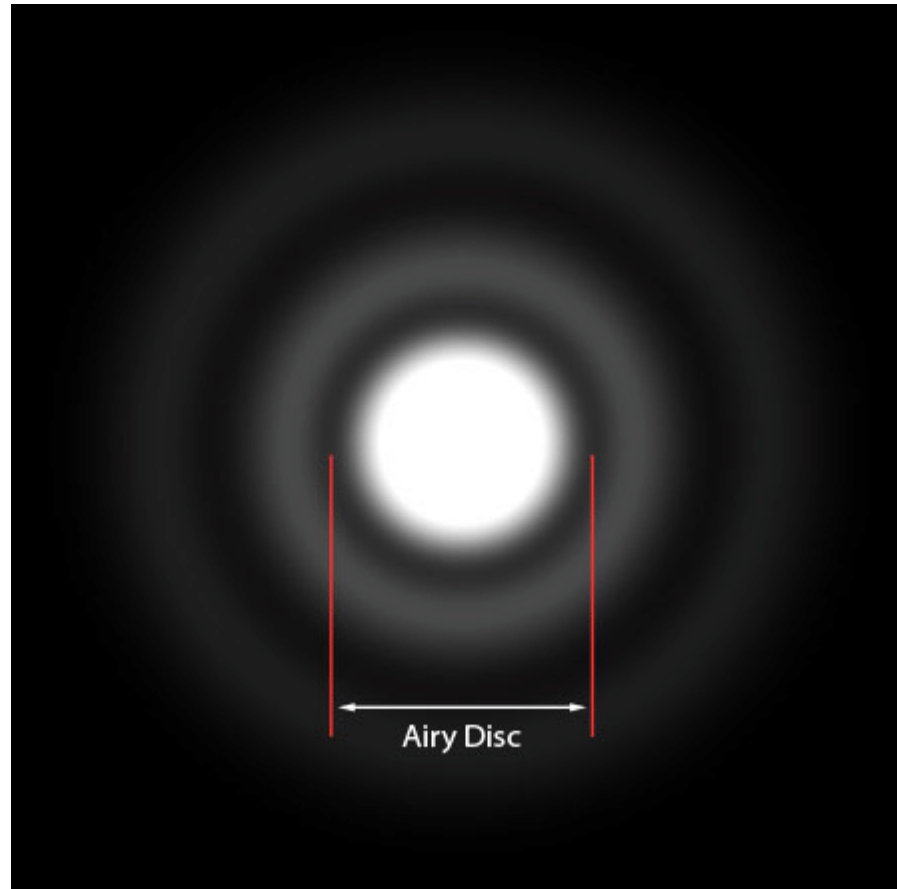
1. apertura – powierzchnia zbierająca (średnica efektywna obiektywu)
2. ogniskowa efektywna całego układu optycznego (lub światłosiła)
3. rozmiar obrazu o wysokim stopniu skorygowania (np. w mm)
4. jakość obrazu na osi optycznej i poza nią:

spot diagrams – cyfrowa symulacja obrazu w teleskopie

enclosed energy – ułamek energii zawarty w okręgu

MTF – funkcja transferu modulacji

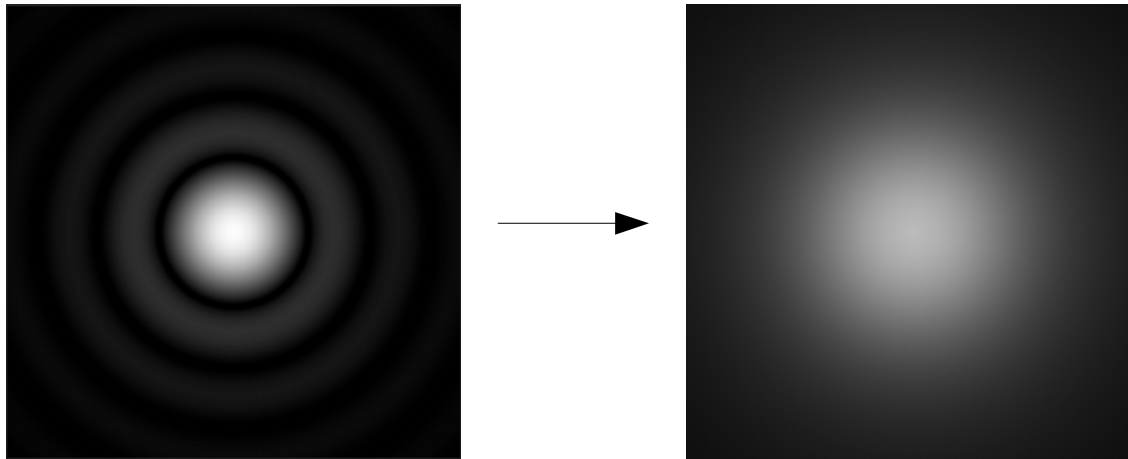
Kolektor sensora optycznego



W idealnej optyce obraz punktowego źródła światła jest obrazem czysto dyfrakcyjnym.

Kolektor sensora optycznego

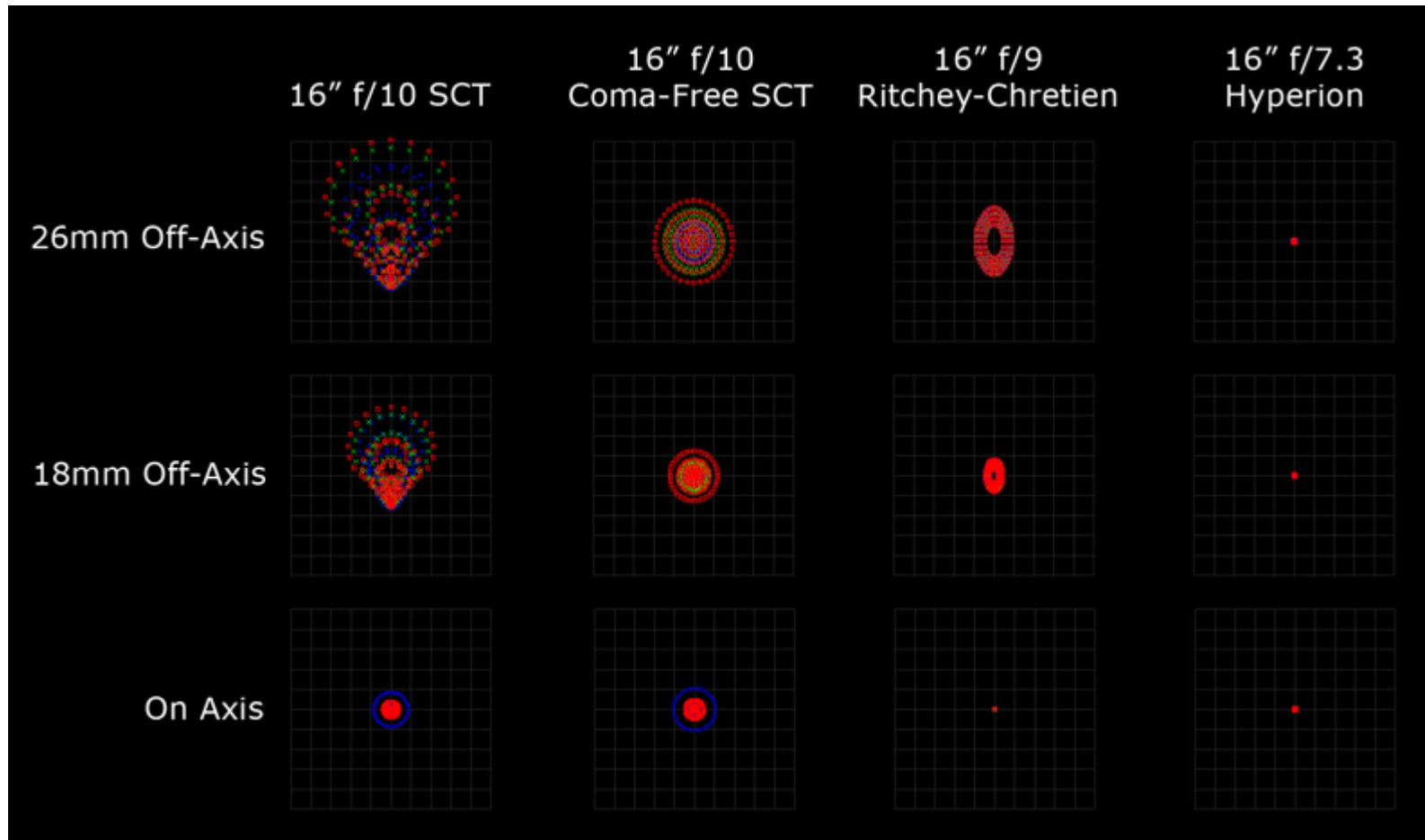
W realnej optyce występują liczne wady optyczne (jakie?)
i obraz jest gorszy od idealnego,
tzn. światło pochodzące od punktowego źródła
jest rozmazane na większej powierzchni i bardziej nieregularnie.



Realny rozkład światła w obrazie danego układu optycznego,
utworzonego dla idealnego, punktowego źródła światła
nazywamy **PSF – Point Spread Function**
czyli rozkładu natężenia punktu.

Kolektor sensora optycznego

Spot diagram

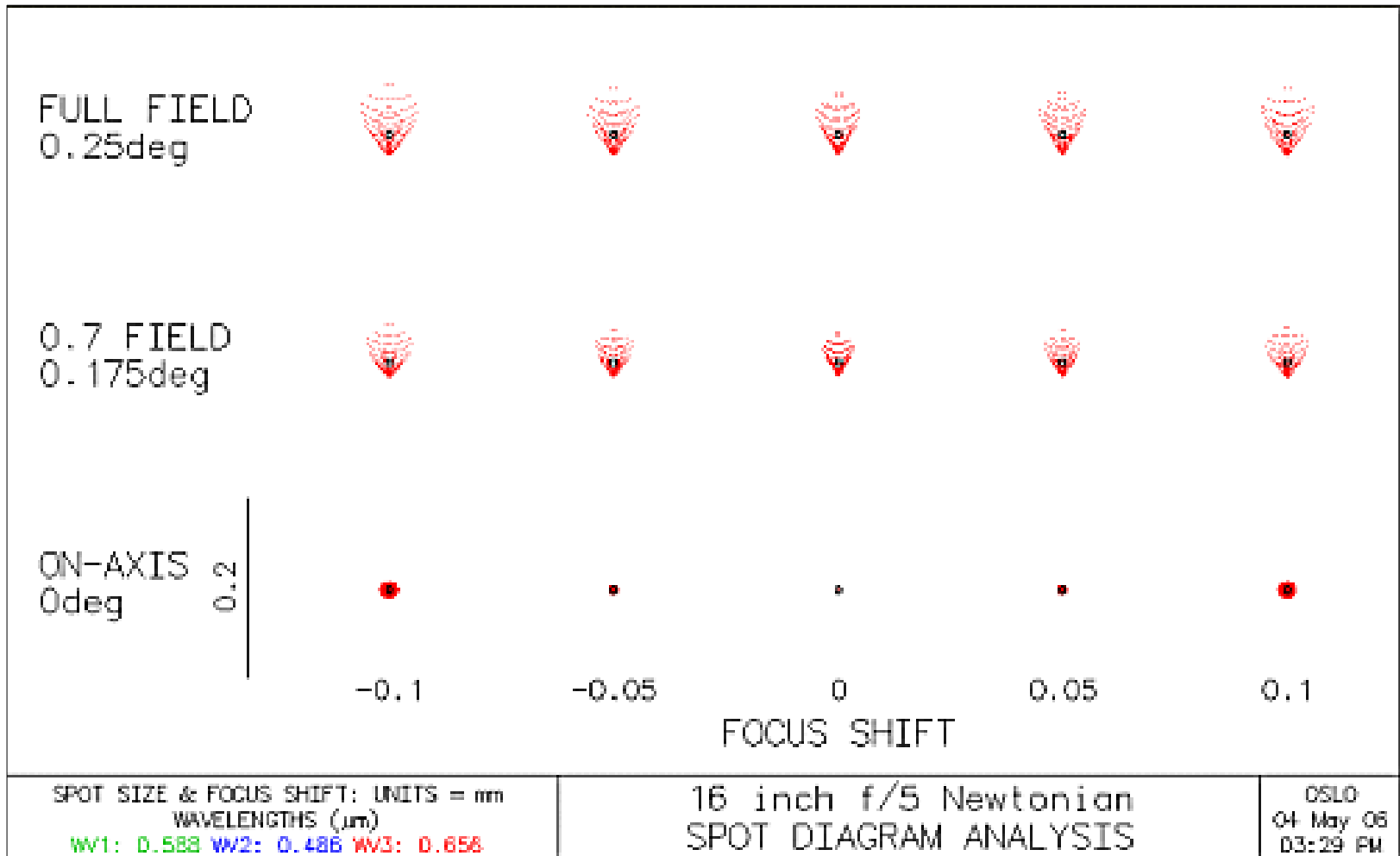


Porównanie różnych typów teleskopów.

Spot diagram – symulowany PSF danego układu optycznego.
Obliczony jest zwykle dla kilkuset próbnymi promieni świetlnych.

Kolektor sensora optycznego

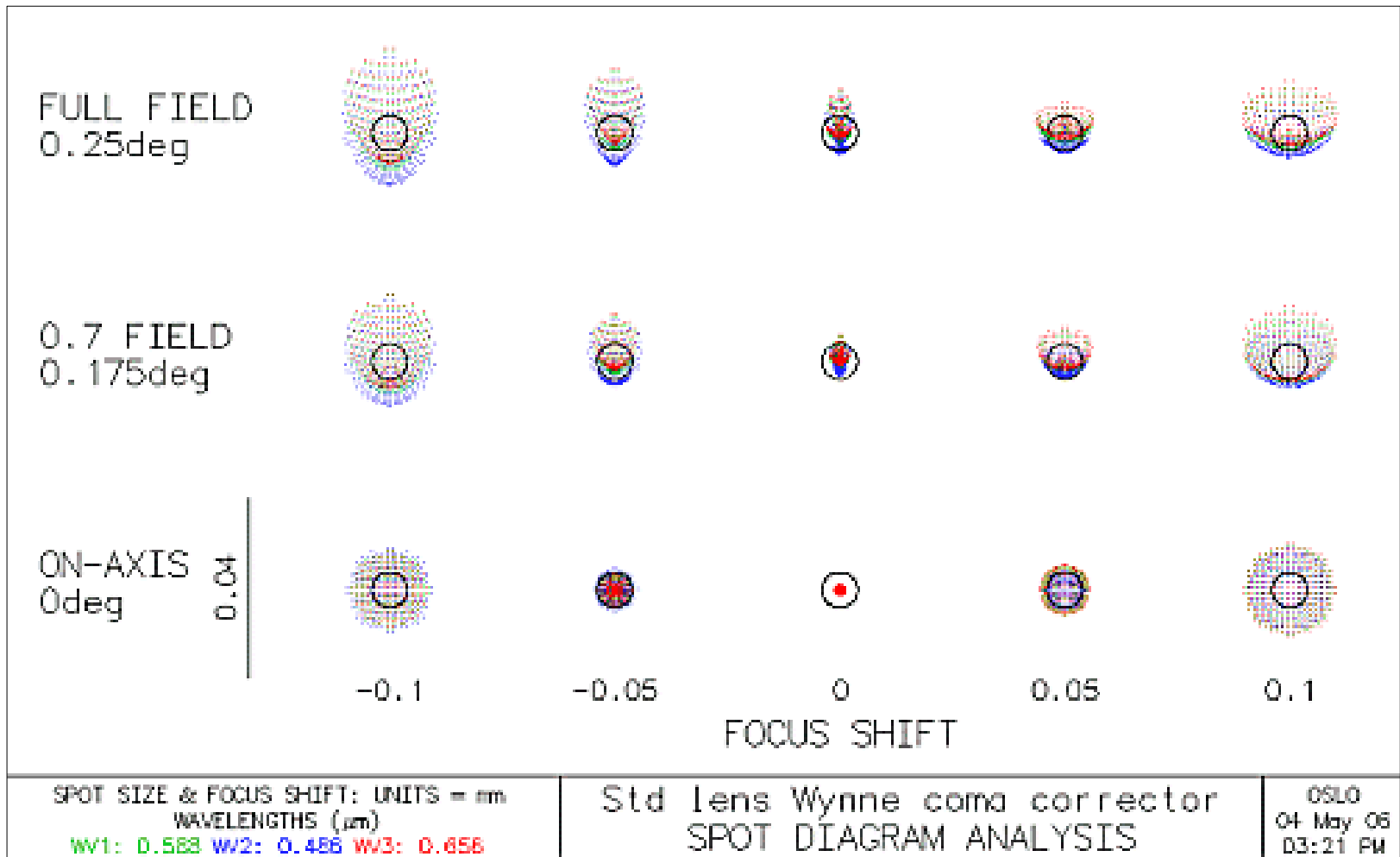
Spot diagram



Krótkoogniskowy teleskop Newtona.

Kolektor sensora optycznego

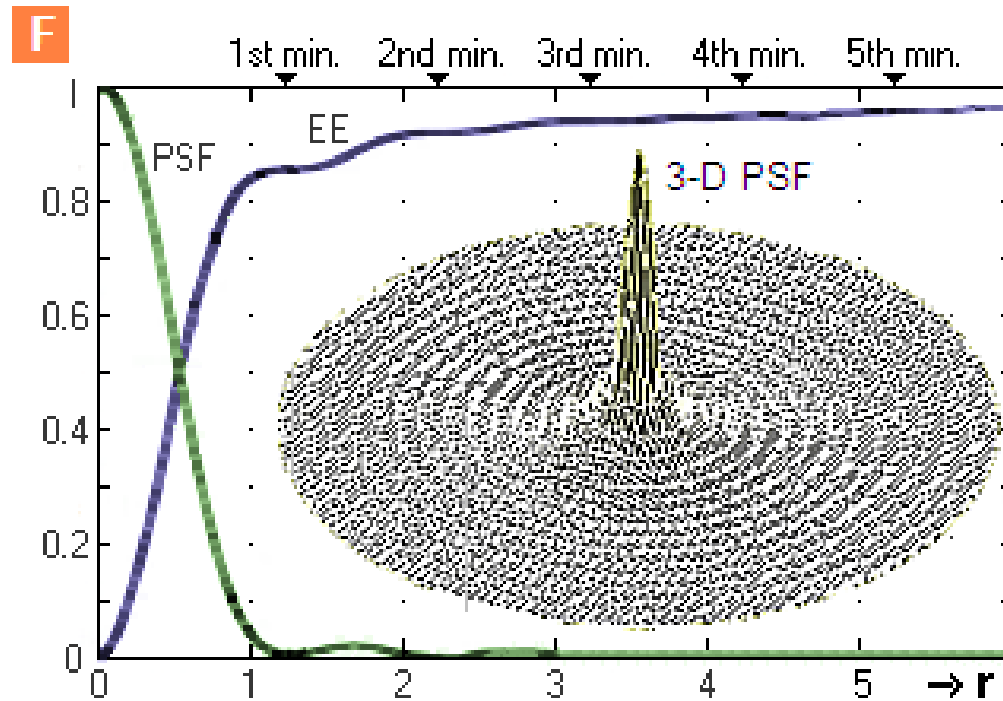
Spot diagram



Krótkoogniskowy teleskop Newtona z korektorem komy.

Kolektor sensora optycznego

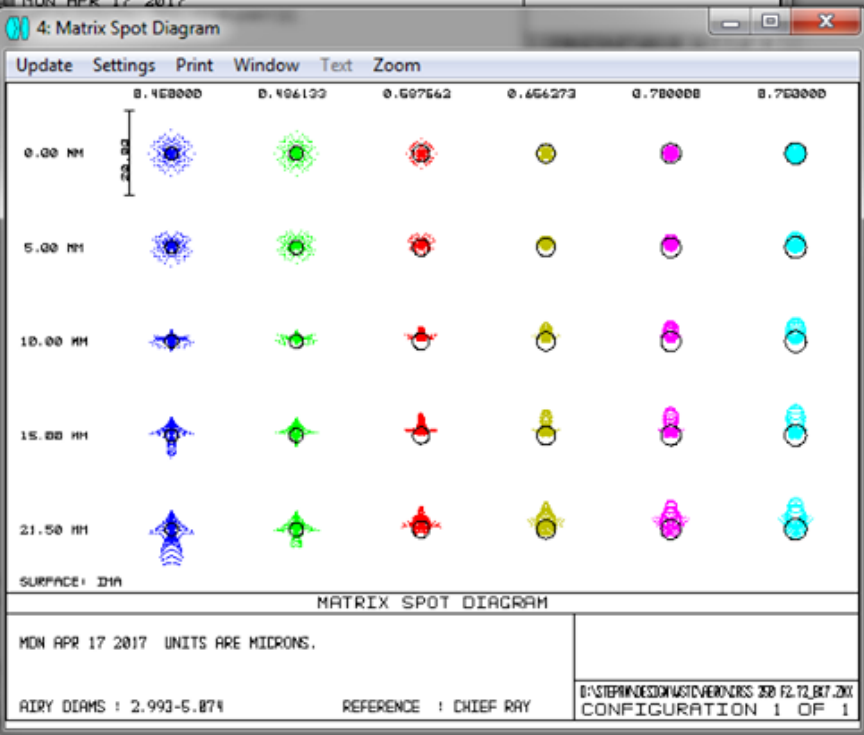
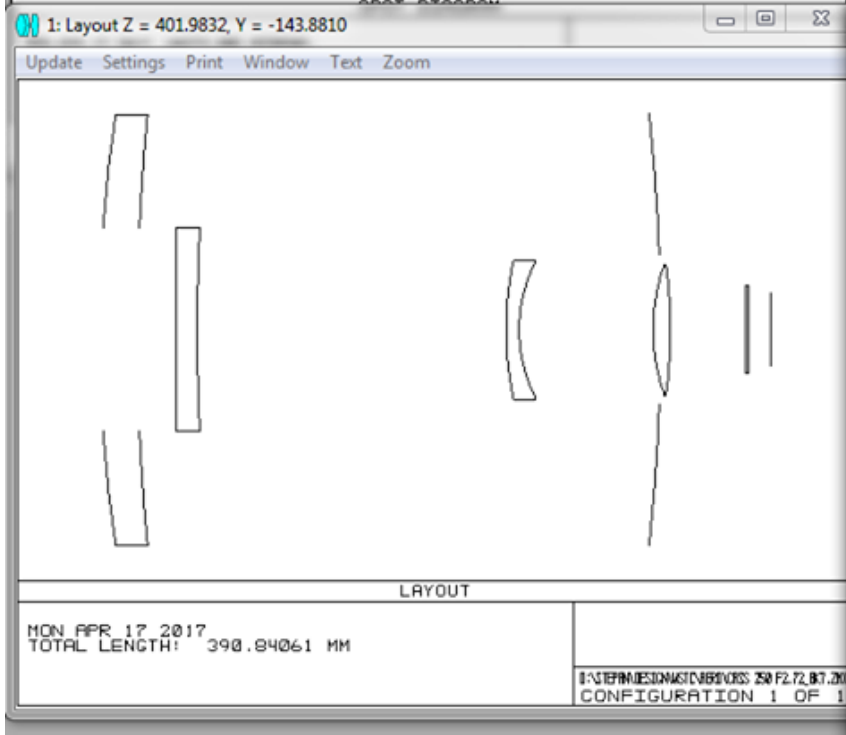
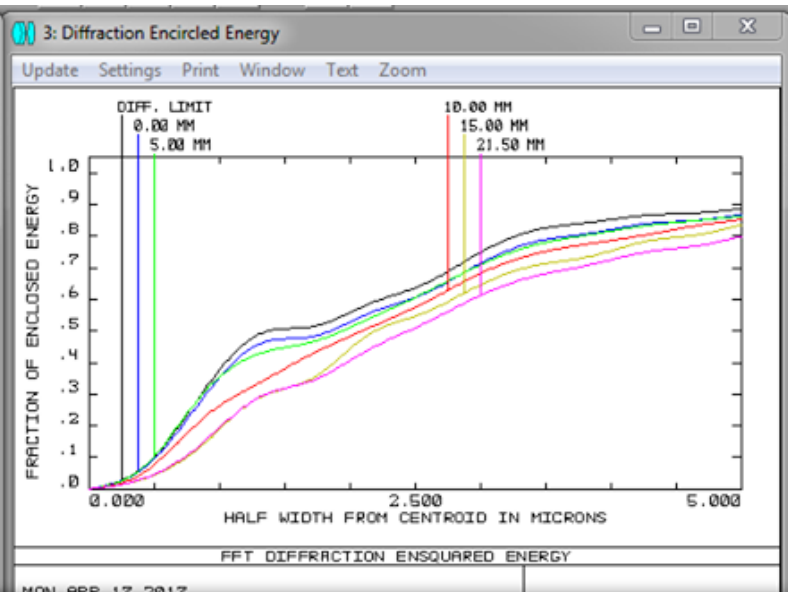
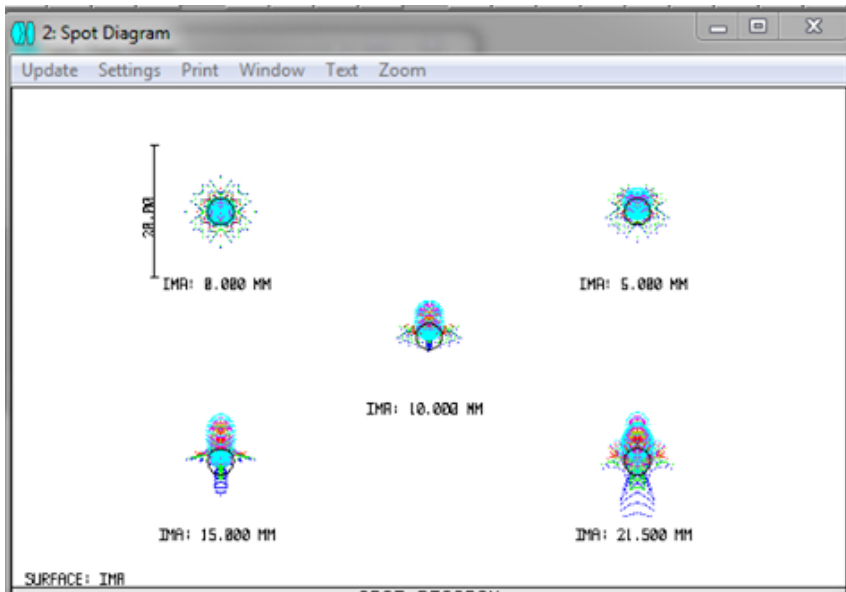
Fraction of enclosed energy (encircled energy)



Ułamek energii zawarty na obrazie z kamery w obszarze o danym promieniu.

lub odwrotnie

Promień obszaru w którym zawarty jest wybrany ułamek energii (np. 90%).



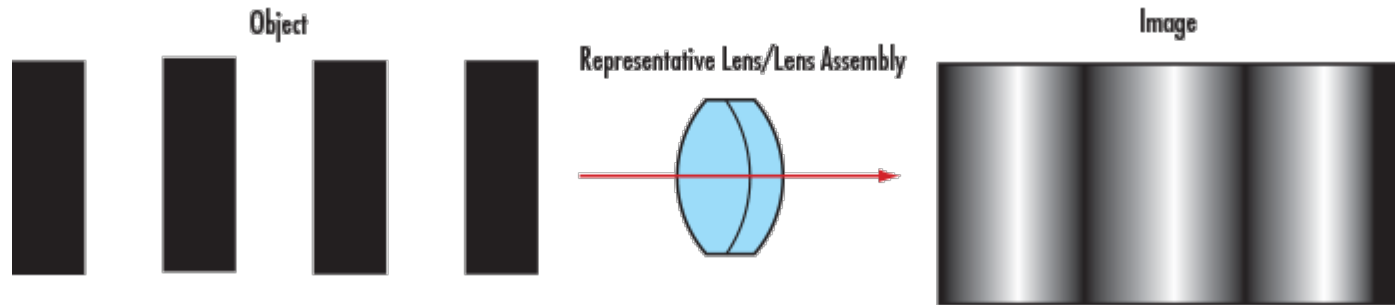
Schemat teleskopu Sonnenberg z Ukrainy

Kolektor sensora optycznego

Modulation Transfer Function

MTF jest funkcją opisującą zbiorczo rozdzielczość i kontrast obrazu.

Rozdzielczość

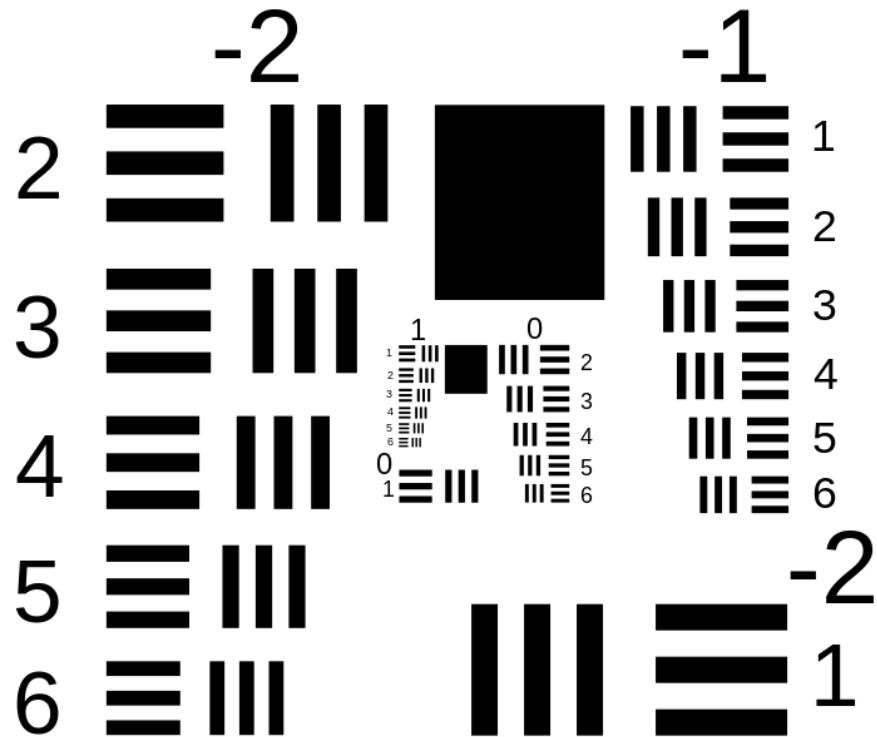


Przykład układu optycznego pracującego na granicy zdolności rozdzielczej.

W astronomii określa się jako minimalną odległość pomiędzy dwiema gwiazdami, które jeszcze da się rozróżnić w teleskopie (definicja przybliżona).

W optyce używa się parametru maksymalnej gęstości par (naprzemiennych, czarno-białych) linii na milimetr (lp/mm), które są jeszcze widoczne na obrazie.

Kolektor sensora optycznego

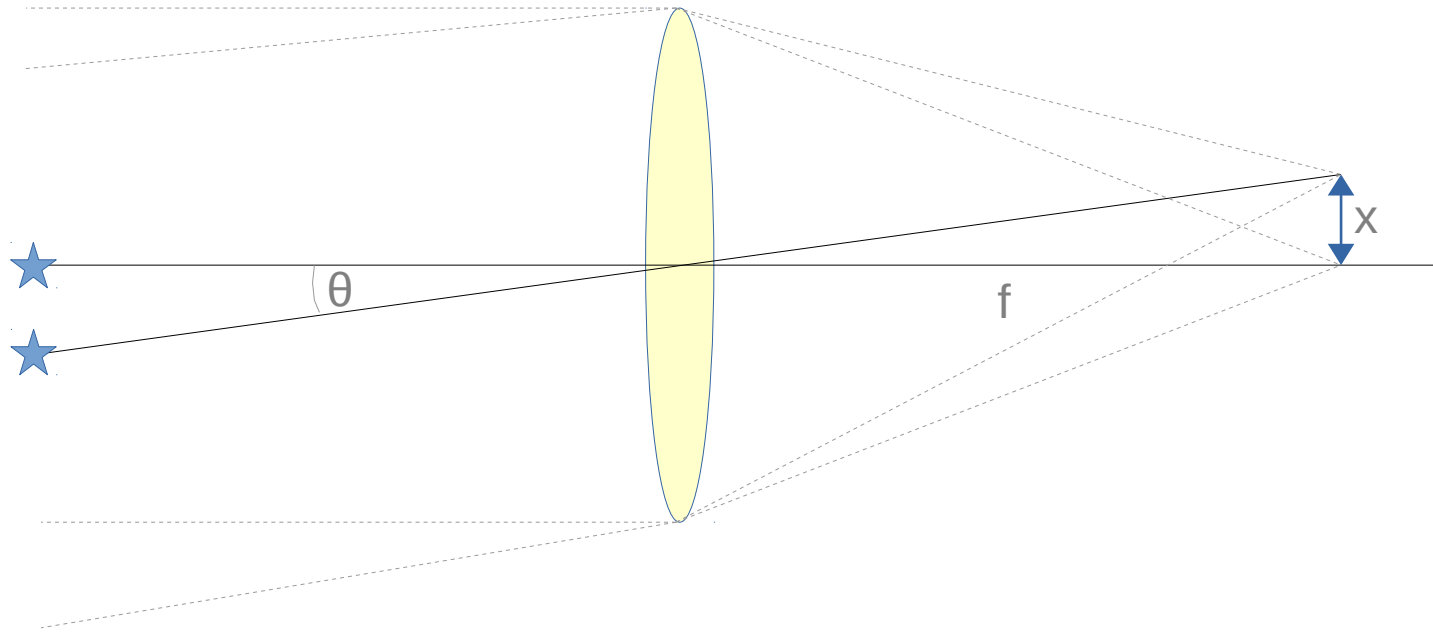


USAF-1951

Laboratoryjny test rozdzielczości układu optycznego opracowany na potrzeby sił powietrznych USA.

Kolektor sensora optycznego

Rozdzielczość **kątowa** a rozdzielczość **liniowa**



$$\Theta [rad] = \frac{x}{f} = \frac{(1/l_{mm})}{f}$$

Kolektor sensora optycznego

Modulation Transfer Function

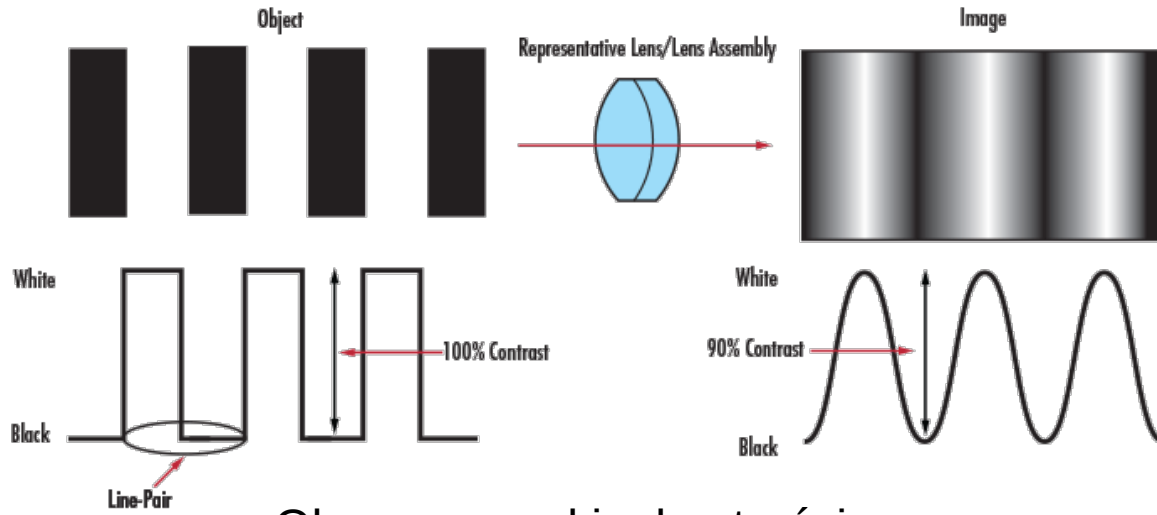
Kontrast / modulacja

Kontrast opisuje jaka jest amplituda natężenia w testowanym obrazie.

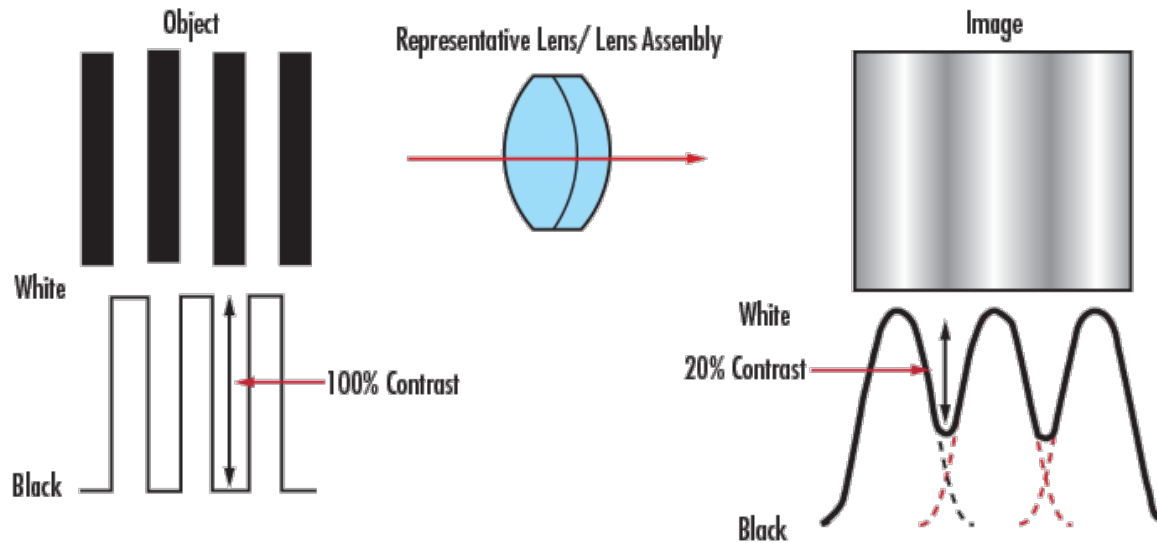
$$\text{kontrast} [\%] = \left(\frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \right) \cdot 100$$

Dla opisu układu optycznego istotna jest odpowiedź na pytanie:
jaki kontrast ma obraz gdy rejestrujemy obiekt o kontraście 100%?

Kolektor sensora optycznego



Obraz o wysokim kontraście.



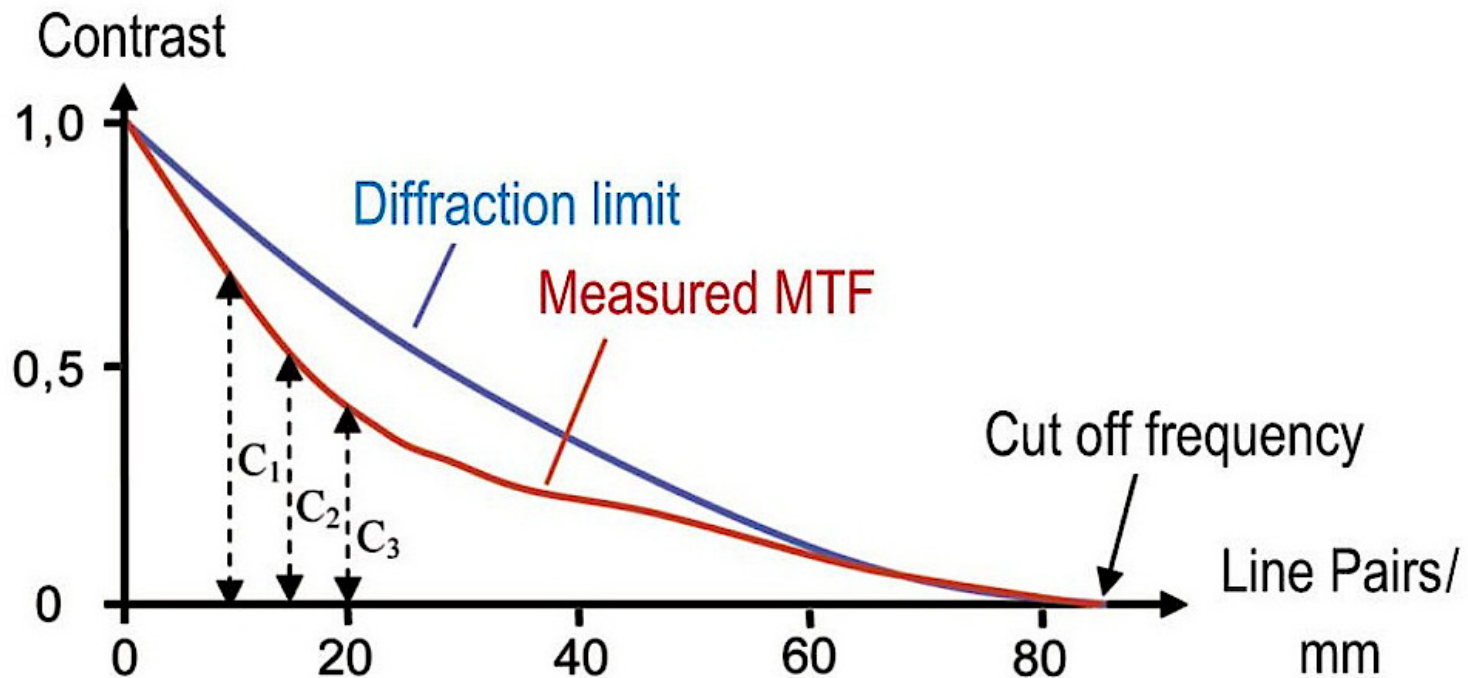
Obraz o tej samej rozdzielczości, ale o niższym kontraście.

Kolektor sensora optycznego

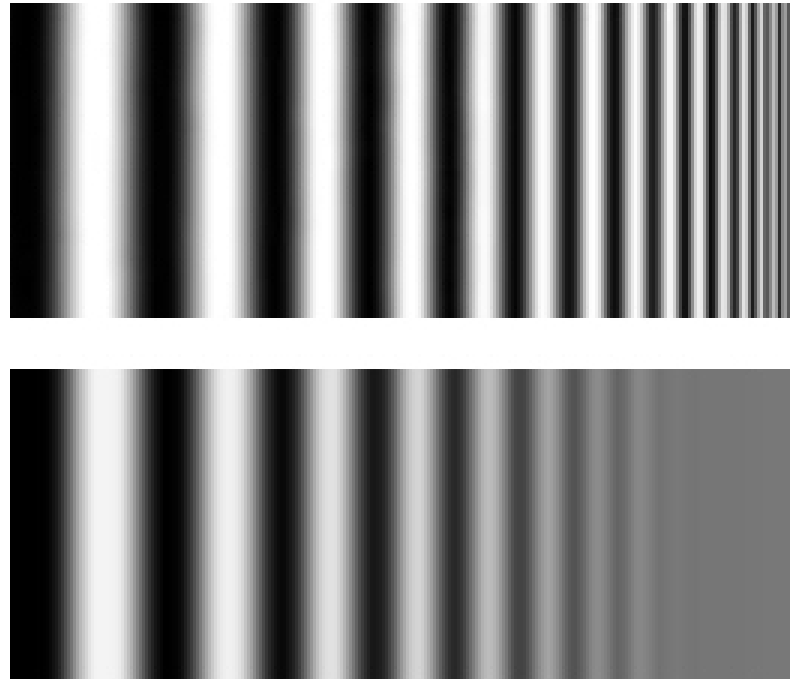
Modulation Transfer Function

Funkcja Transferu Modulacji

MTF to funkcja opisująca zależność kontrastu (modulacji) od rozdzielczości. Jest to najpowszechniej używana charakterystyka systemów optycznych od pojedynczych soczewek do skomplikowanych wielo-elementowych układów.



Kolektor sensora optycznego



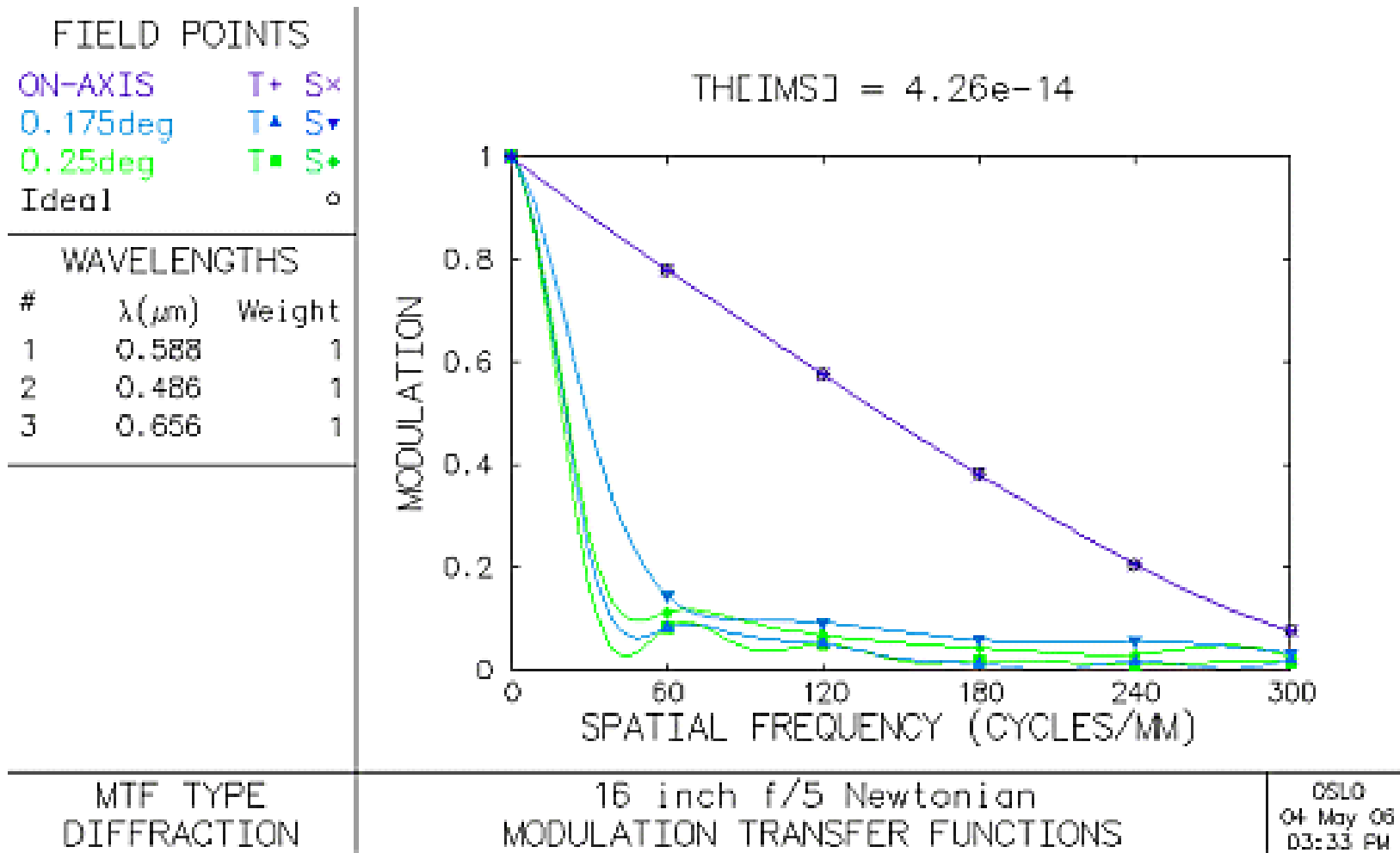
U góry tablica wzorcowa fotografowana przez badany układ optyczny

Na dole obraz tej tablicy w detektorze:

- po lewej stronie obraz jest niemal bezbłędny – minimalny spadek kontrastu
- po prawej stronie kontrast wyraźnie maleje, aż do zera

Kolektor sensora optycznego

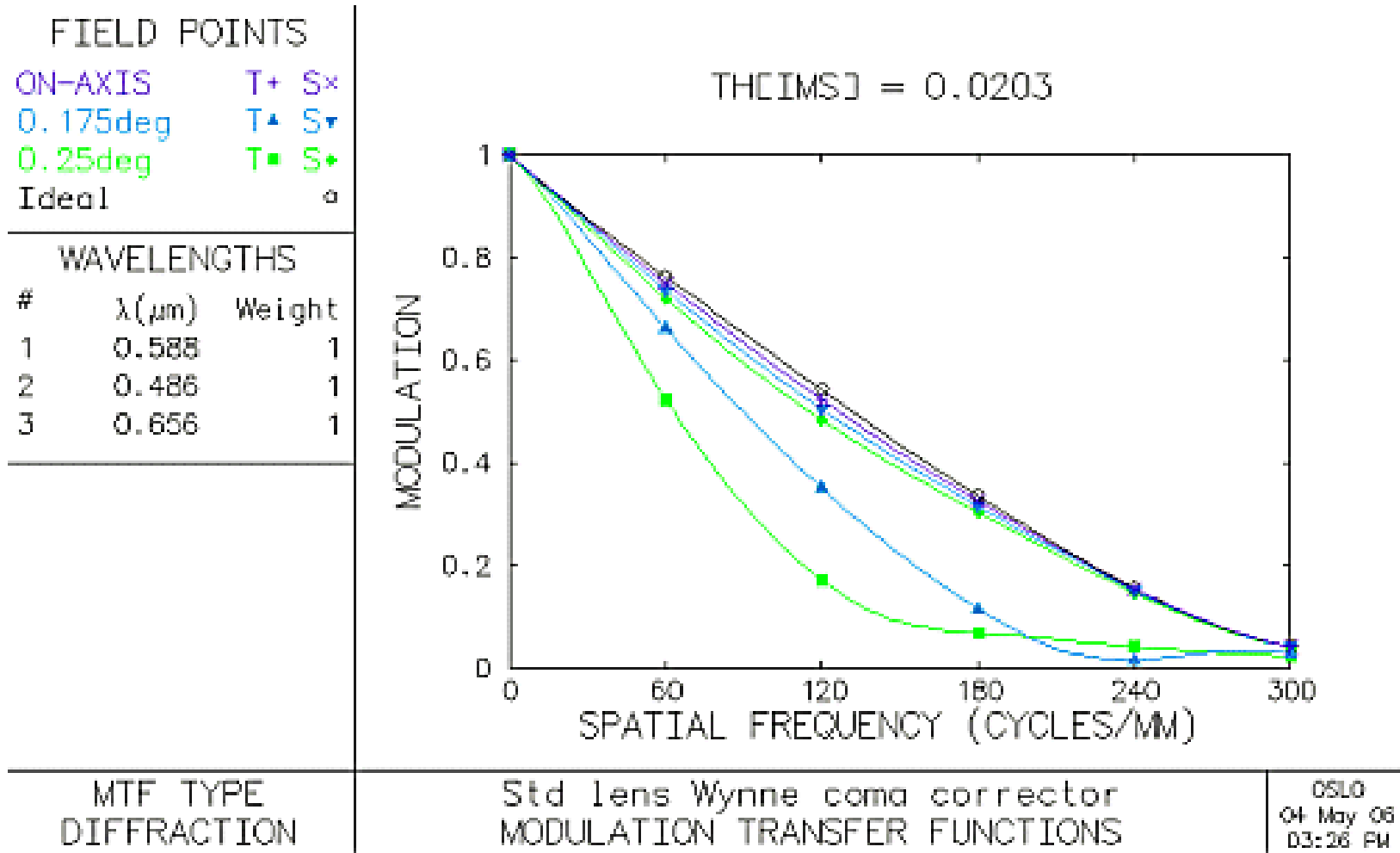
Modulation Transfer Function



Przykład funkcji MTF dla klasycznego teleskopu Newtona.

Kolektor sensora optycznego

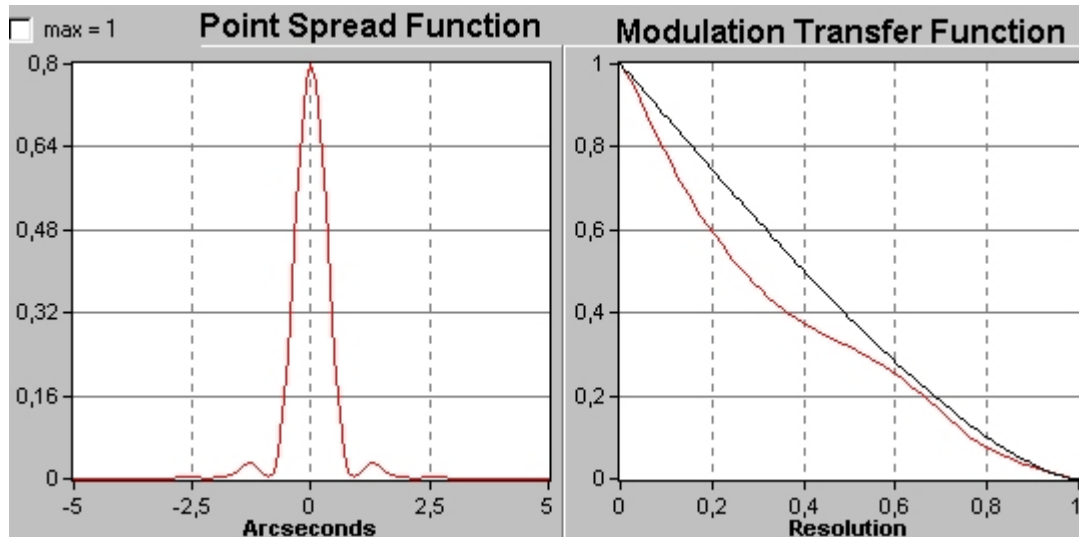
Modulation Transfer Function



Przykład funkcji MTF dla klasycznego teleskopu z korektorem komy.

Modulation Transfer Function

MTF jest transformatą Fouriera funkcji PSF!



Fourier Relationship between MTF and PSF

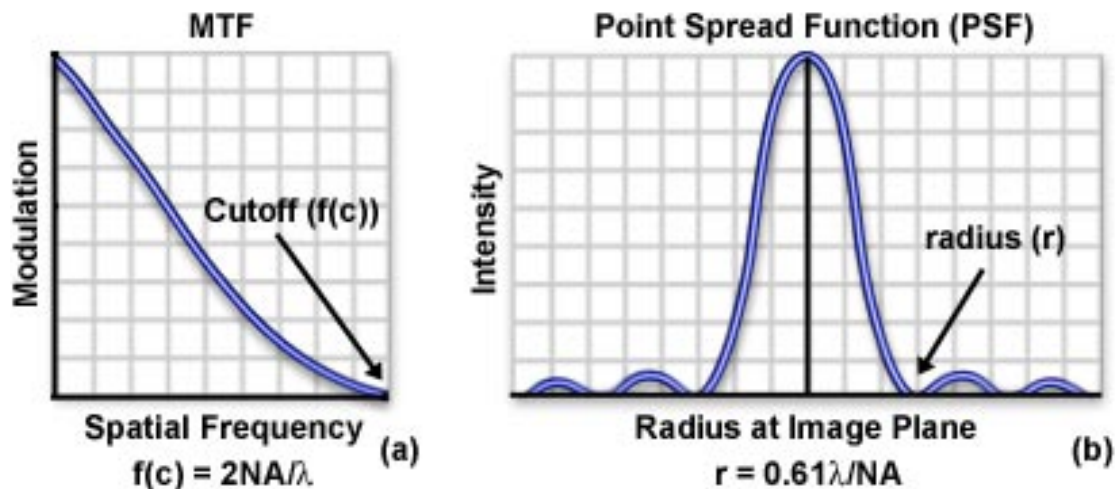


Figure 1

Kolektor sensora optycznego

Modulation Transfer Function

MTF mówi nam o rozdzielczości od strony obrazu w teleskopie!

Dlatego wartości podaje się w **lp/mm**, bo są mierzone na detektorze CCD.

Klasycznie w astronomii mówi się o rozdzielczości od strony obiektu na niebie!

Dlatego wartości podaje się w **sekundach łuku** ("), bo są mierzone na niebie.