

Satelitarne badania  
Ziemi i atmosfery  
3

# 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.

## Kolektor sensora optycznego

### Parametry techniczne/optyczne

średnica (mm)

ogniskowa (mm)

światłosiła (bezw.)

jakość szlifowania ( $\lambda$ )

zastosowane filtry (nm)

### Parametry użytkowe

rozdzielczość optyczna  
rozdzielczość z kamerą  
rozdzielczość na Ziemi

pole widzenia optyczne  
pole widzenia z kamerą  
pole widzenia na Ziemi

zakres widmowy

rozdzielczość samej optyki:

liniowa (lp/mm) – na obrazie – MTF, EE

kątowa (") – na obiekcie – kryterium Rayleigh'a

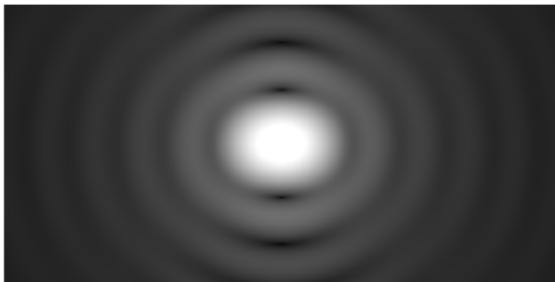
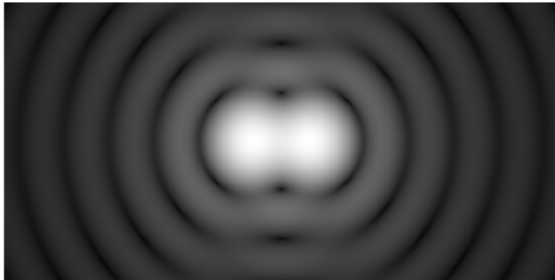
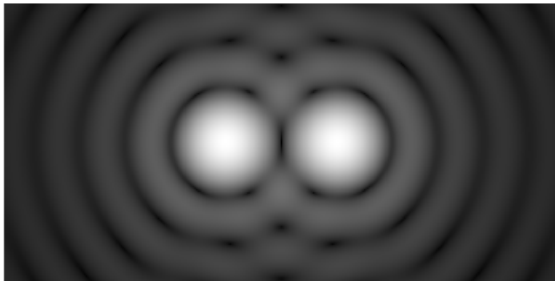
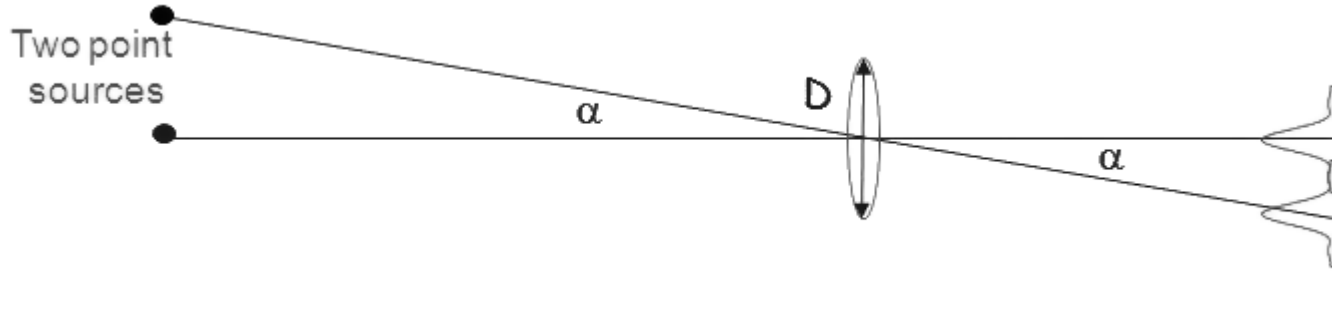
rozdzielczość z kamerą:

kątowa **skala obrazu** ("/pix) – na obrazie

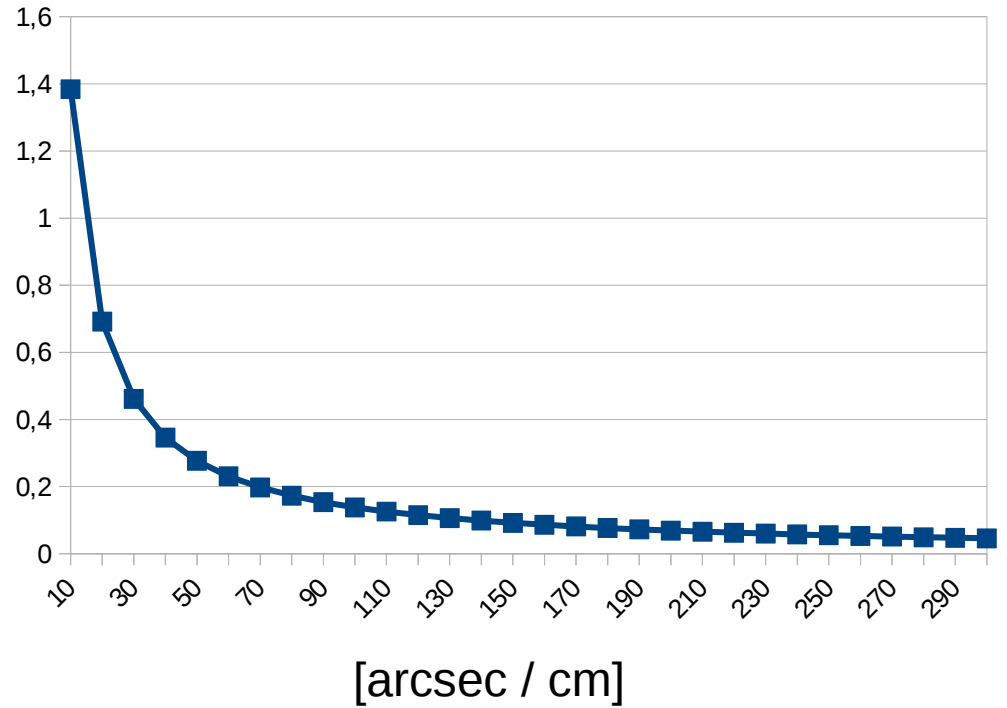
rozdzielczość na Ziemi:

liniowa (m) – na obiekcie

# Rozdzielczość kątowna teleskopu – limit Rayleigh'a

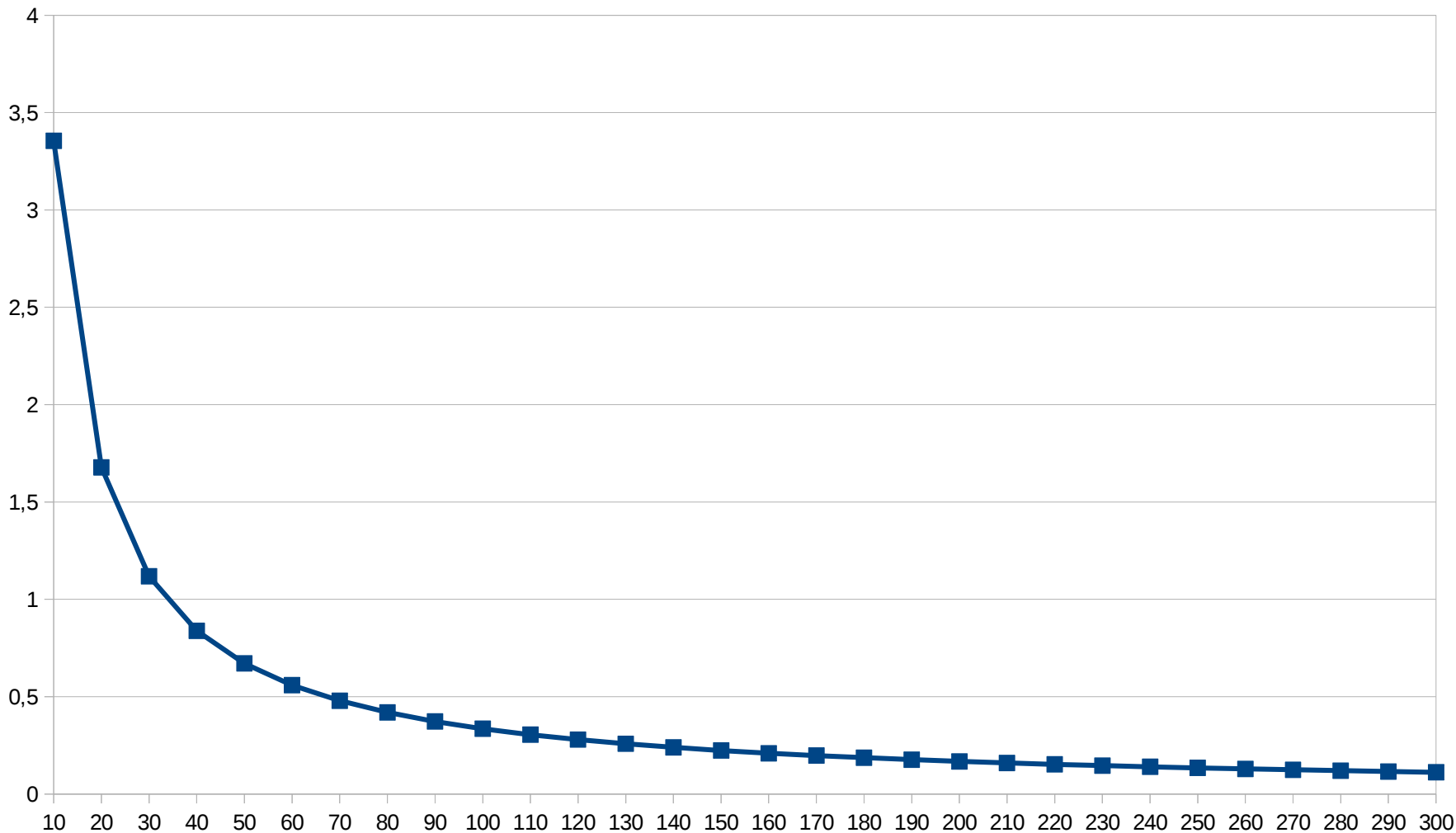


$$\Theta [rad] = 1.22 \frac{\lambda [m]}{D [m]}$$



# Rozdzielczość kątowna teleskopu a rozdzielczość liniowa na pow. Ziemi

$$l[m] = 1.22 \frac{\lambda[m] d[m]}{D[m] \cos \alpha}$$



[m/cm] wysokości satelity 500km przy prostopadłym kącie widzenia

# Kolektor sensora optycznego

Rozdzielczość układu optycznego a rozmiar piksela kamery

Orientacyjne rozmiary pojedynczego piksela:

Smartfon: ~1 mikron

DSLR: ~7 mikronów

CCD: 9-24 mikrony

Dla założonego poziomu kontrastu z funkcji MTF możemy odczytać rozdzielczość układu optycznego, np. 100 lp/mm.

Następnie należy dobrać taką kamerę dla której przypadną min. 2 piksele na każdą parę linii, czyli np. 5 mikronów.

Kamera o pikselu 5 $\mu$ m zobaczy wszystkie detale (próbkiowanie optymalne)

Kamera o pikselu 1 $\mu$ m nie zobaczy żadnych więcej detali (nadpróbkiowanie)

kamera o pikselu 20 $\mu$ m nie zobaczy najmniejszych detali (niedoprobkiowanie)

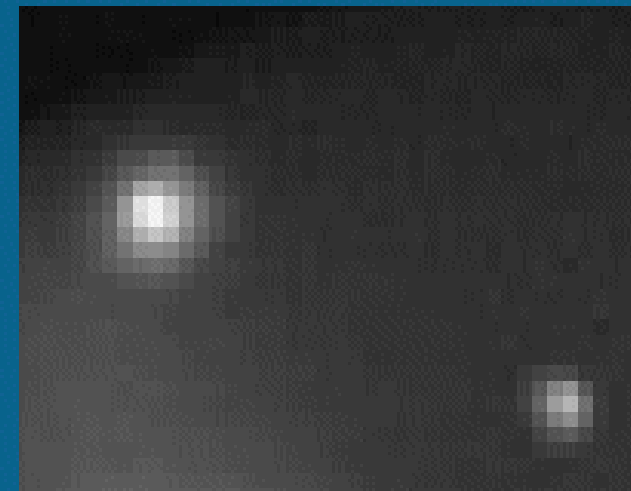
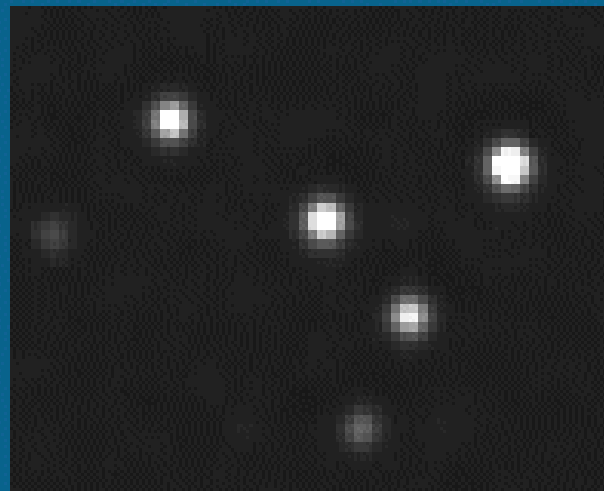
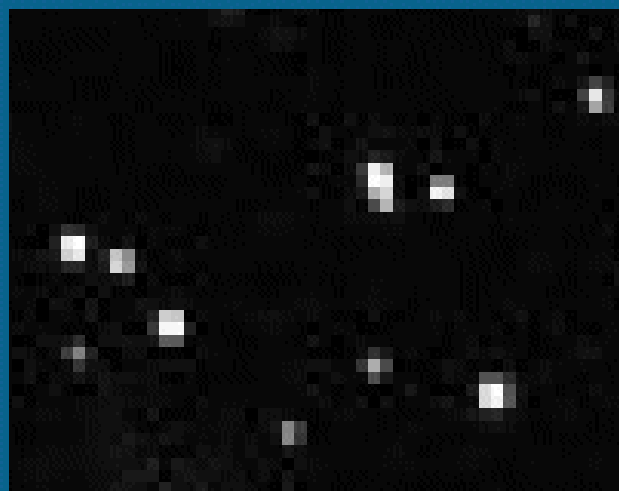
# Kolektor sensora optycznego

Rozdzielczość kątowna teleskopu a rozmiar piksela

Niedopróbkowanie  
**undersampling**

Próbkowanie prawidłowe  
**good sampling**

Nadpróbkowanie  
**oversampling**



A więc jeśli chcemy w pełni wykorzystać dobry jakościowo układ optyczny (czyli bez istotnych wad optycznych) to musimy stosować kamerę o odpowiednim rozmiarze piksela. Za optymalny uznaje się 2x mniejszy niż rozmiar PSF (dysku Airy).

$$0.335 N = pix [\mu m]$$

## Kolektor sensora optycznego

### Rozdzielczość kątowna teleskopu a rozmiar piksela kamery

$l$  – rozdzielczość liniowa teleskopu

$d$  – odległość od Ziemi

$pix$  – rozmiar piksela kamery

$f$  – ogniskowa

$\lambda$  – długość fali światła

$\alpha$  – odległość kątowna od nadiru

$D$  – średnica teleskopu

$N$  – światłosiła teleskopu

$$\frac{l}{d} = \frac{pix}{f}$$

$$l = 1.22 \frac{\lambda d}{D \cos \alpha}$$

$$\frac{l}{d} = 1.22 \frac{\lambda}{D \cos \alpha}$$

$$1.22 \frac{\lambda}{D \cos \alpha} = \frac{pix}{f}$$

$$1.22 N \frac{\lambda}{\cos \alpha} = pix \quad N - focal\ ratio$$

$$\lambda = 550 \quad \alpha = 0 \text{ deg}$$

$$0.671 N = pix [\mu m]$$

A więc optymalny rozmiar piksela kamery, czyli dostosowany do rozdzielczości optycznej, przy pominięciu wad optycznych i seeingu, zależy jedynie od światłosiły!



## Kolektor sensora optycznego

Na satelicie A sensor optyczny o ogniskowej  $f=500\text{mm}$

Na satelicie B sensor optyczny o ogniskowej  $f=1000\text{mm}$

Zakładamy, że jakość optyki jest idealna, stosowana jest ta sama kamera o dobrze dobranym pikselu, satelity są na identycznych orbitach kołowych.  
Jaka zmieni się:

A rozdzielczość kątowa optyki (w sekundach łuku)

B skala obrazu (w sekundach łuku na piksel)

C rozdzielczość na Ziemi (w metrach)

A – nie zmieni się

B – zmniejszy się 2x (nadpróbkiwanie)

C – nie zmieni się

Jest to trochę jak zoom cyfrowy – poziom detali nie wzrasta.

## Kolektor sensora optycznego

Na satelicie A sensor optyczny o średnicy  $d=100\text{mm}$

Na satelicie B sensor optyczny o średnicy  $d=200\text{mm}$

Zakładamy, że jakość optyki jest idealna, stosowana jest ta sama kamera o dobrze dobranym pikselu, satelity są na identycznych orbitach kołowych. Jaka zmieni się:

A rozdzielczość kątowa optyki (w sekundach łuku)

B skala obrazu (w sekundach łuku na piksel)

C rozdzielczość na Ziemi (w metrach)

A – wzrośnie 2x

B – nie zmieni się (niedopróbkowanie)

C – nie zmieni się

Tu poziom detali na obrazie wzrósł, ale kamera tego nie rejestruje, bo rozmiar obrazu pozostał ten sam.

## Kolektor sensora optycznego

Na satelicie A sensor optyczny  $d=100\text{mm}$   $f=500\text{mm}$

Na satelicie B sensor optyczny  $d=200\text{mm}$   $f=1000\text{mm}$

Zakładamy, że jakość optyki jest idealna, stosowana jest ta sama kamera o dobrze dobranym pikselu, satelity są na identycznych orbitach kołowych. Jaka zmieni się:

A rozdzielczość kątowa optyki (w sekundach łuku)

B skala obrazu (w sekundach łuku na piksel)

C rozdzielczość na Ziemi (w metrach)

A – wzrośnie 2x

B – zmniejszy się 2x (próbkiowanie optymalne)

C – wzrośnie 2x

Tu poziom detali na obrazie wzrósł i kamera to rejestruje, gdyż obraz się powiększył.

## Rozdzielczość kątowna teleskopu a seeing

Jaki jest typowy seeing?

Gdzie powstaje seeing?

Czy seeing rozmywa obrazy satelitarne Ziemi?

Eksperyment:)

$$\frac{l [km]}{d [km]} = \Theta [rad]$$

$$d = 10 km \quad \Theta = 4''$$

$$l = 4'' \cdot 10 km = 19.4 cm$$

# Kolektor sensora optycznego

Podsumowując:

**Rozdzielczość mówi nam o najmniejszych dostrzegalnych detalach.**

Jest ograniczona przez:

- *parametry układu optycznego (kolektora)*
- *wady optyczne układu optycznego (kolektora)*
- *atmosferę ziemską*
- *odległość od Ziemi*
- *rozmiar piksela kamery (detektora), jeśli jest niewłaściwie dobrany*

# Kolektor sensora optycznego

## Pole widzenia sensora satelitarnego

Pole widzenia:

- A. kątowe (optyczne) – wynikające z ograniczeń zastosowanego układu optycznego
- B. kątowe (kamery) – wynikające z rozmiaru detektora  
(detektor może nie wykorzystać całego pola widzenia teleskopu)
- C. liniowe – odpowiadające A i B na powierzchni Ziemi

# Kolektor sensora optycznego

## Pole widzenia sensora satelitarnego

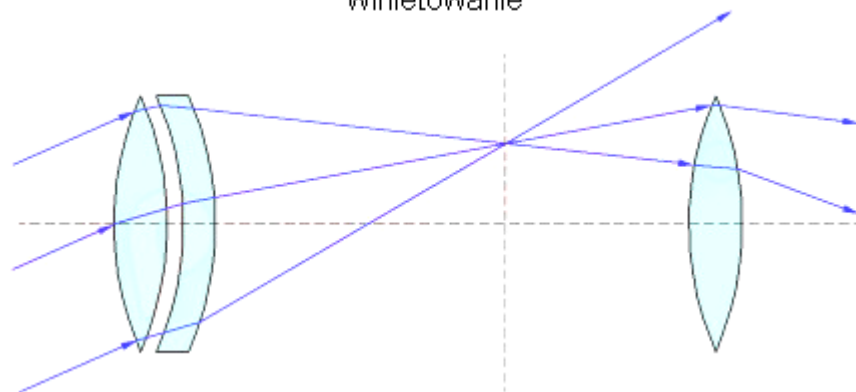
A. kątowe – wynikające z ograniczeń zastosowanego układu optycznego

Limitem pola widzenia układu optycznego są:

1. pozaosiowe wady optyczne – które sprawiają, że jakość obrazu spada wraz z odległością od osi optycznej
2. winietowanie – które sprawia, że natężenie światła spada wraz z odległością od osi optycznej

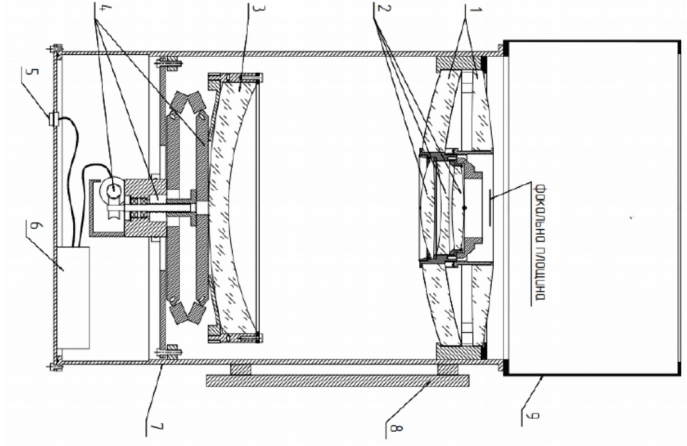
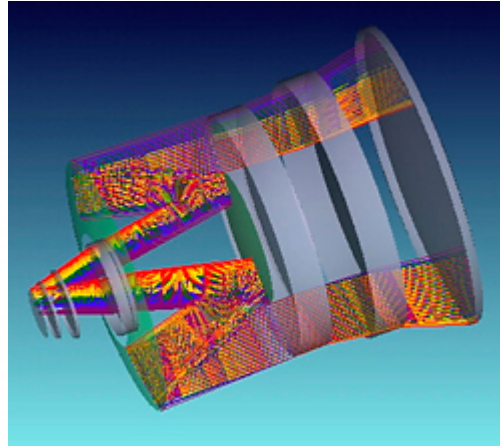
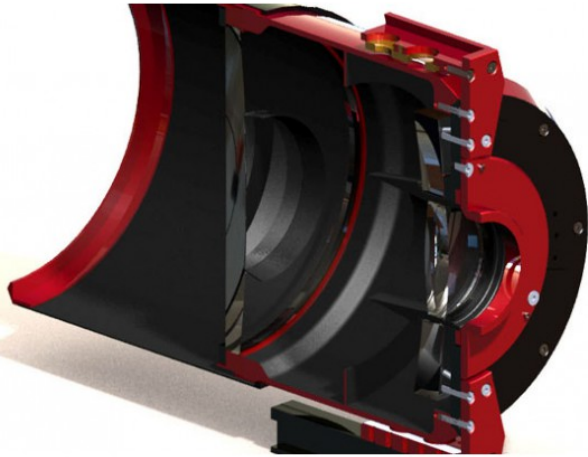
Generalnie im większe chcemy pole widzenia (przy zachowaniu dobrej jakości obrazu), tym krótszą potrzebujemy ogniskową, a to oznacza skomplikowany i drogi układ optyczny.

winiotowanie





## Przykłady teleskopów o ekstremalnie dużym polu widzenia



Officina Stellare Veloce  
 $d = 200\text{mm}$   
 $f = 480\text{mm}$   
światłosiła 2.4

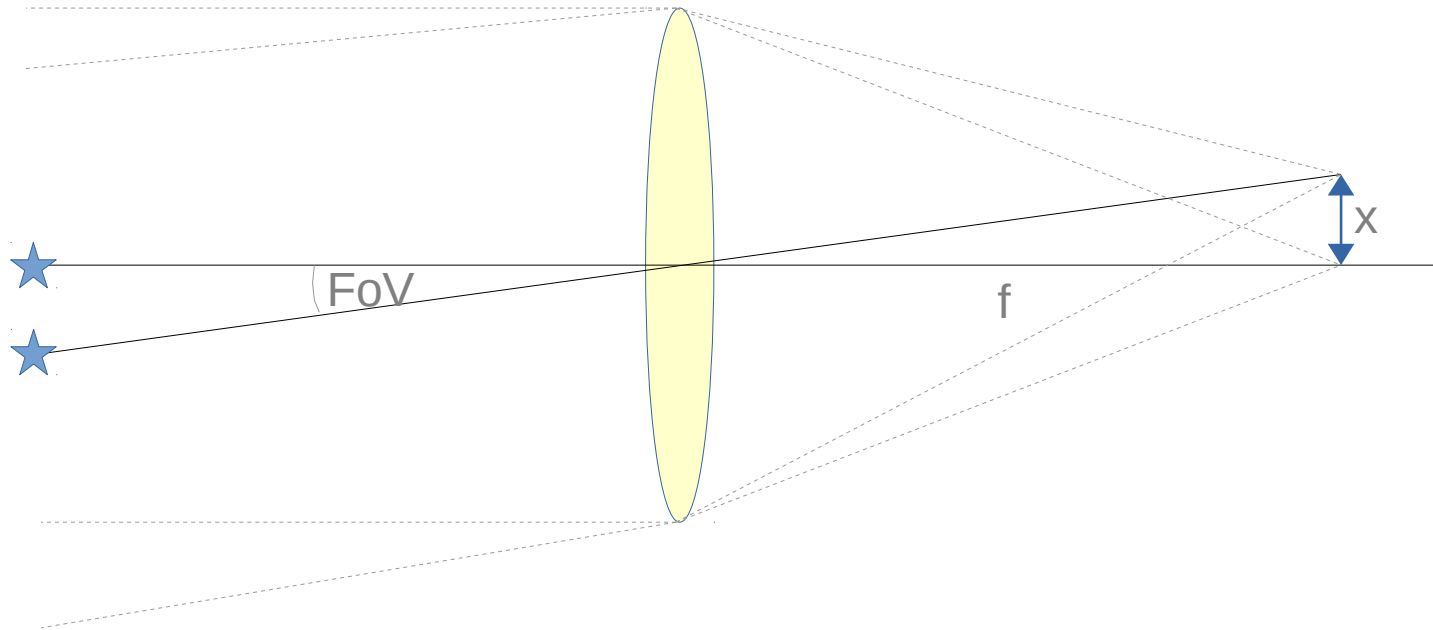
TEC 300  
 $d = 300\text{mm}$   
 $f = 432\text{mm}$   
światłosiła 1.44

Об'єктив АФР-М300  
 $d = 300\text{mm}$   
 $f = 300\text{mm}$   
światłosiła 1.0

# Kolektor sensora optycznego

Pole widzenia sensora satelitarnego

B. kątowe – wynikające z zastosowanej kamery



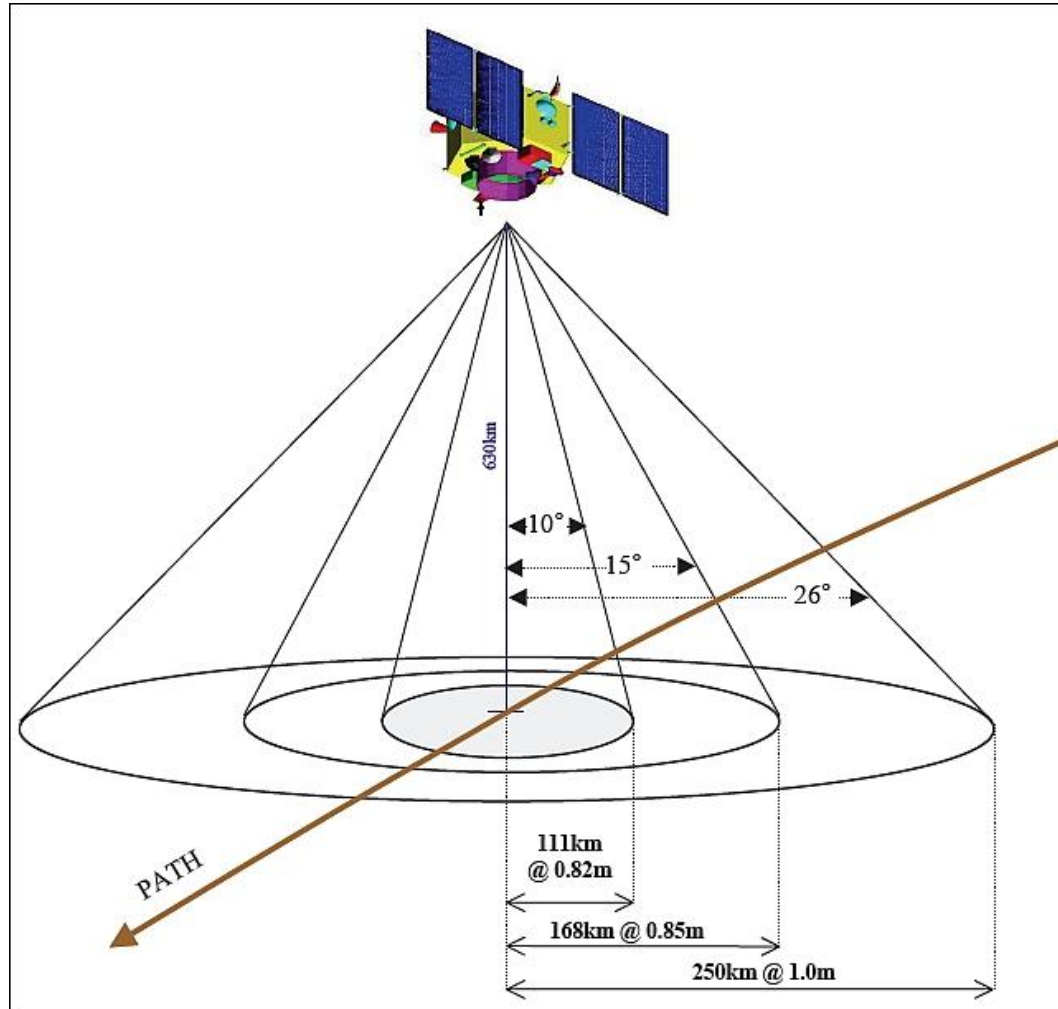
$$FoV = \text{atan}\left(\frac{x}{f}\right)$$

x – rozmiar detektora (matrycy światłoczułej) w kamerze

# Kolektor sensora optycznego

Pole widzenia sensora satelitarnego

C. liniowe – na powierzchni Ziemi



## Kolektor sensora optycznego

Pole widzenia sensora satelitarnego

C. liniowe – na powierzchni Ziemi

Dla satelitów obserwujących niewielkie obszary na Ziemi obowiązuje ten sam wzór jak przy rozdzielczości liniowej:

$$l[m] = 1.22 \frac{\lambda[m] d[m]}{D[m] \cos \alpha}$$

Dla szerszych pól widzenia trzeba uwzględnić krzywiznę Ziemi.  
Limitem jest **horyzont satelity**

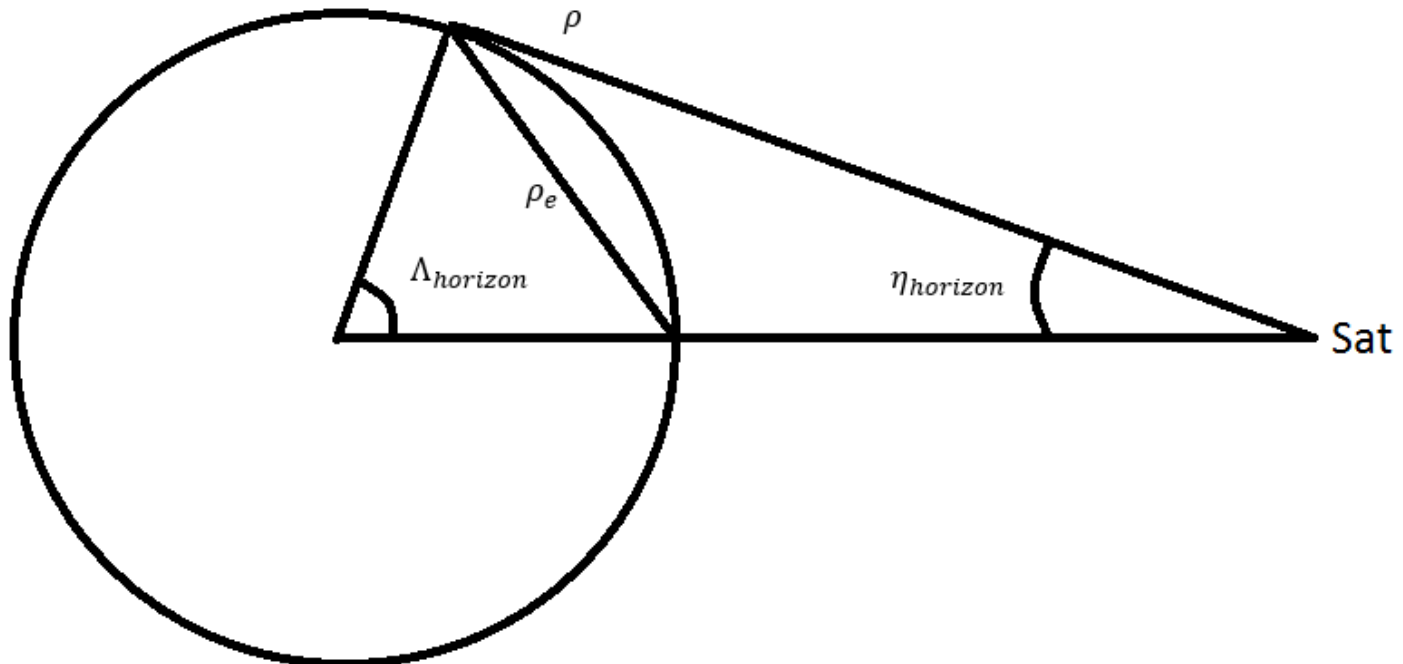
# Kolektor sensora optycznego

Pole widzenia sensora satelitarnego

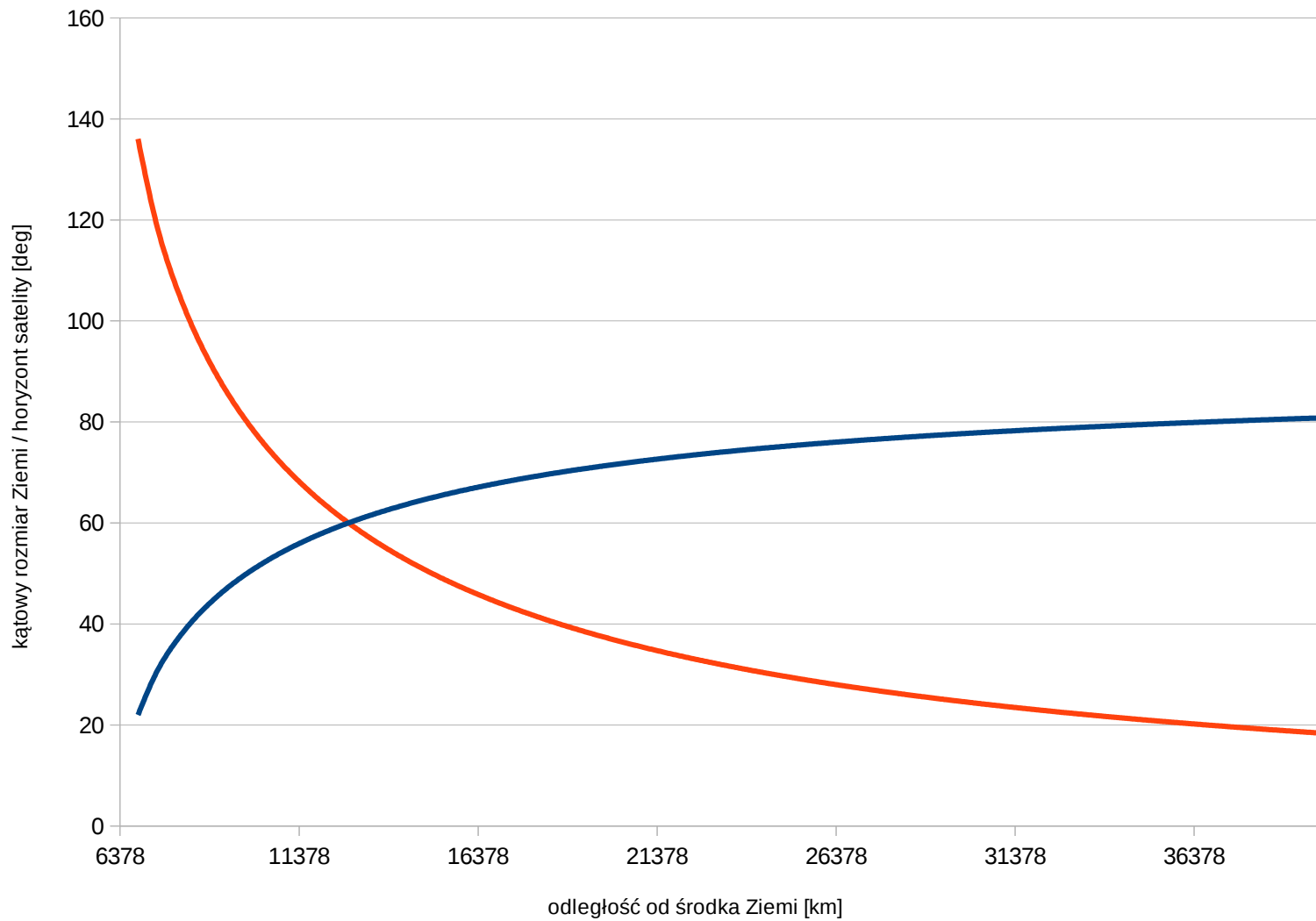
C. liniowe – na powierzchni Ziemi

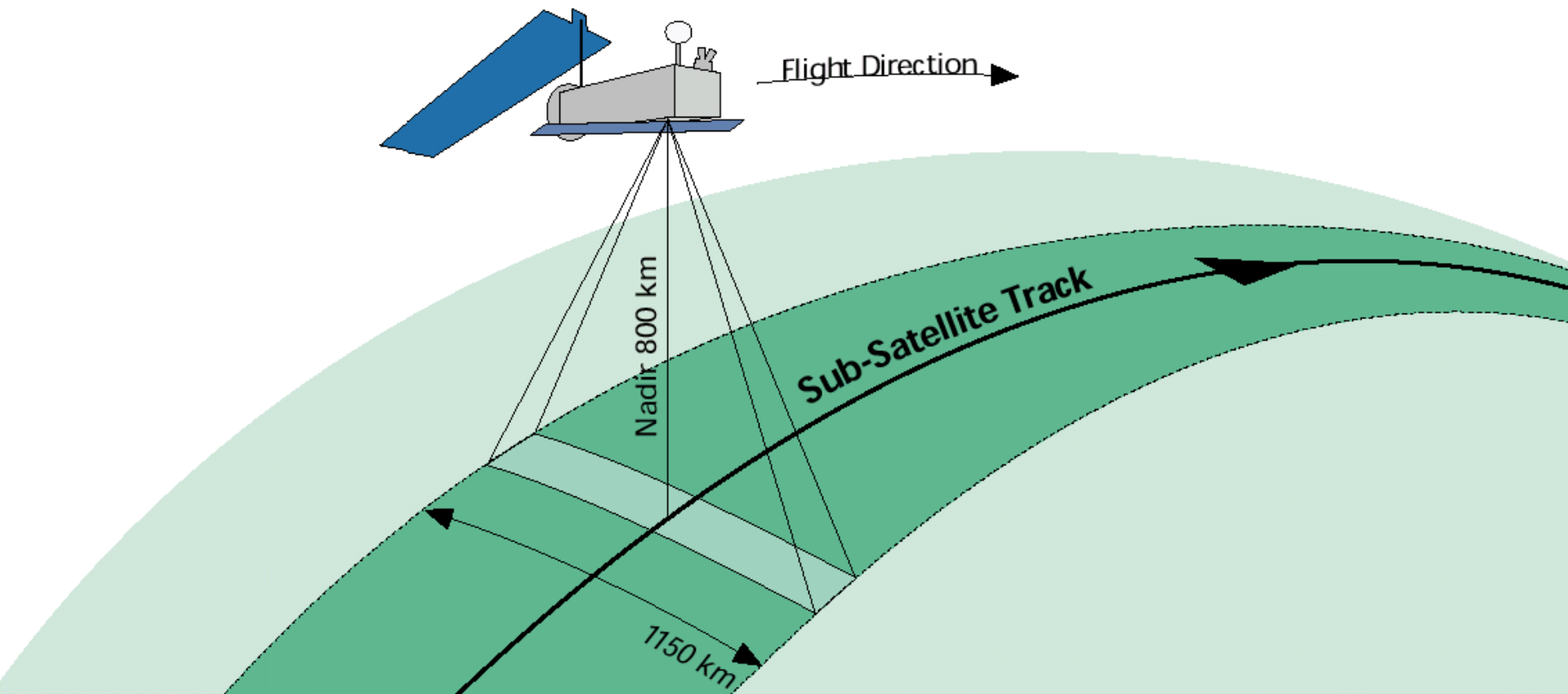
Horyzont satelity:

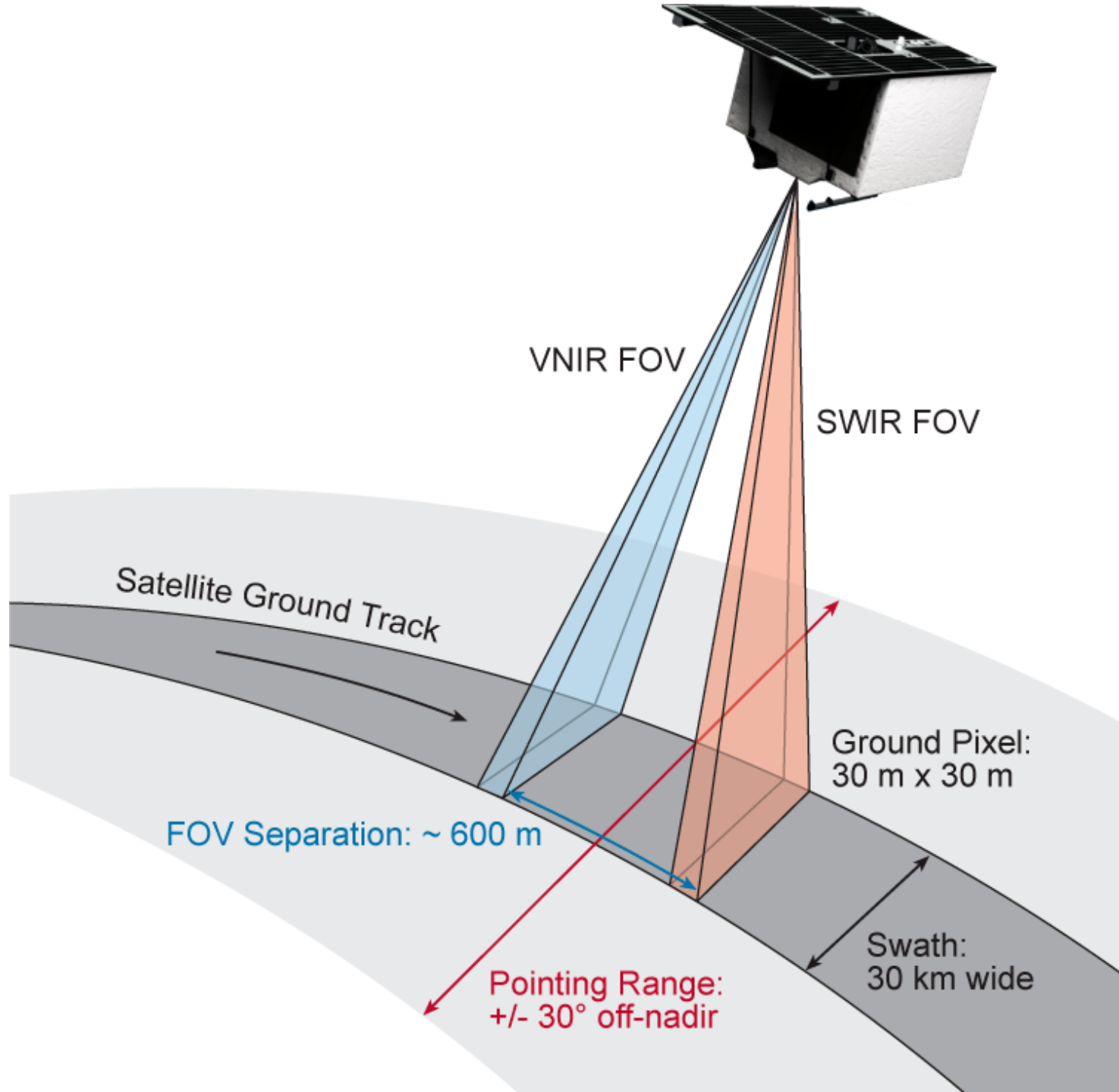
$$\eta_{hor} = a \sin \left( \frac{R_{Ziemi}}{R_{sat}} \right) \quad \lambda_{hor} = a \cos \left( \frac{R_{Ziemi}}{R_{sat}} \right)$$



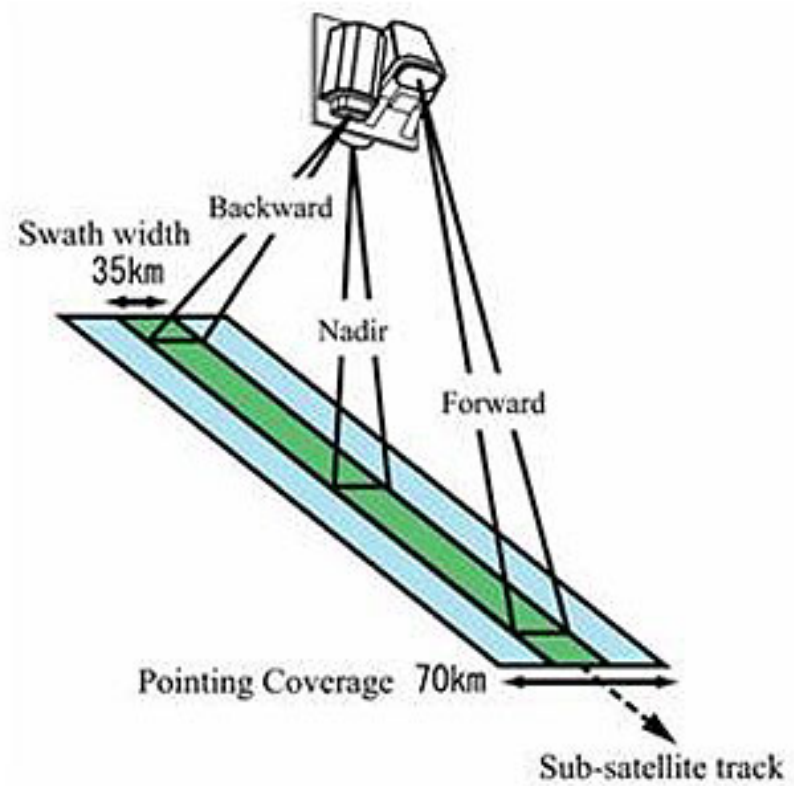
# Kątowy rozmiar Ziemi i horyzont satelity

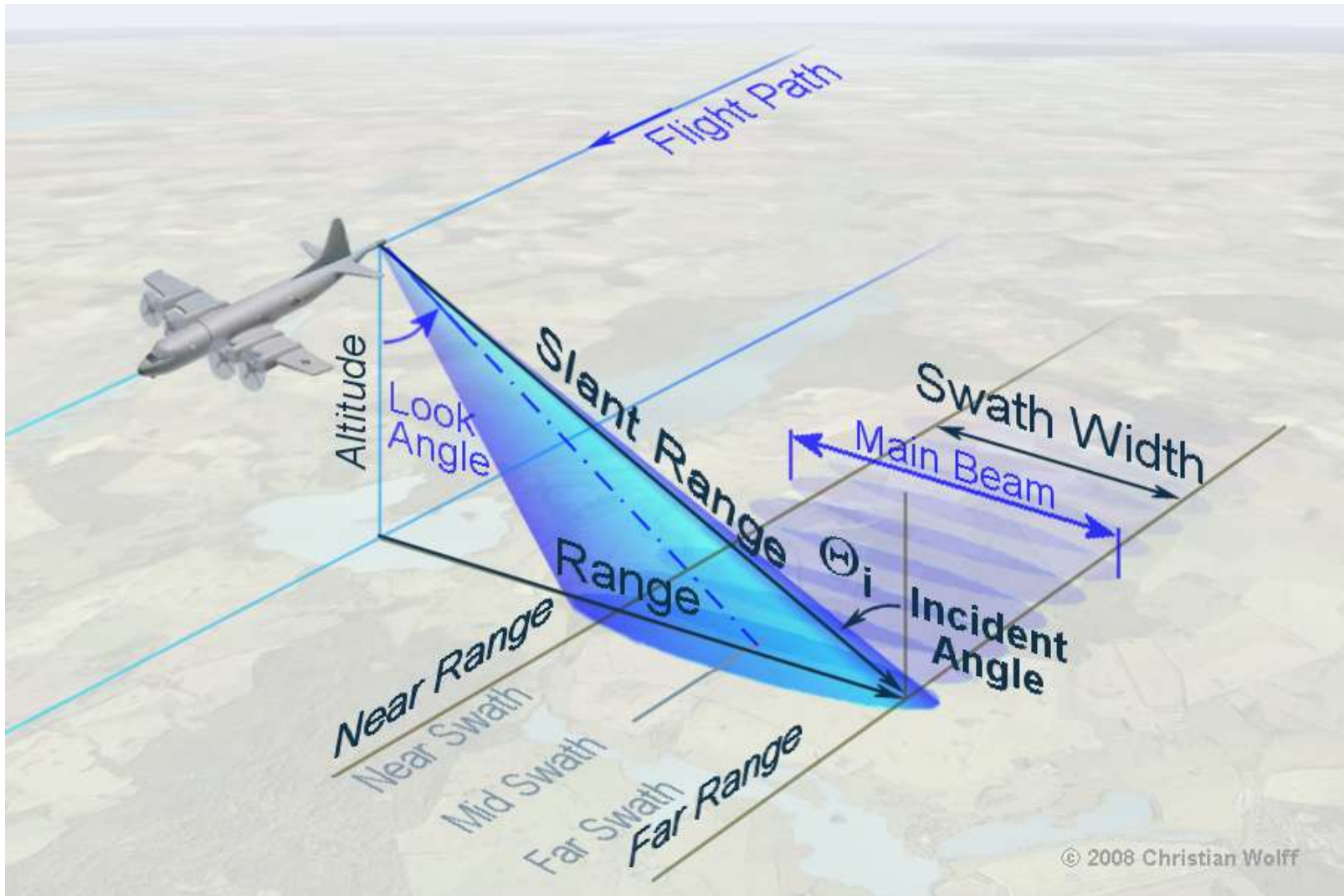




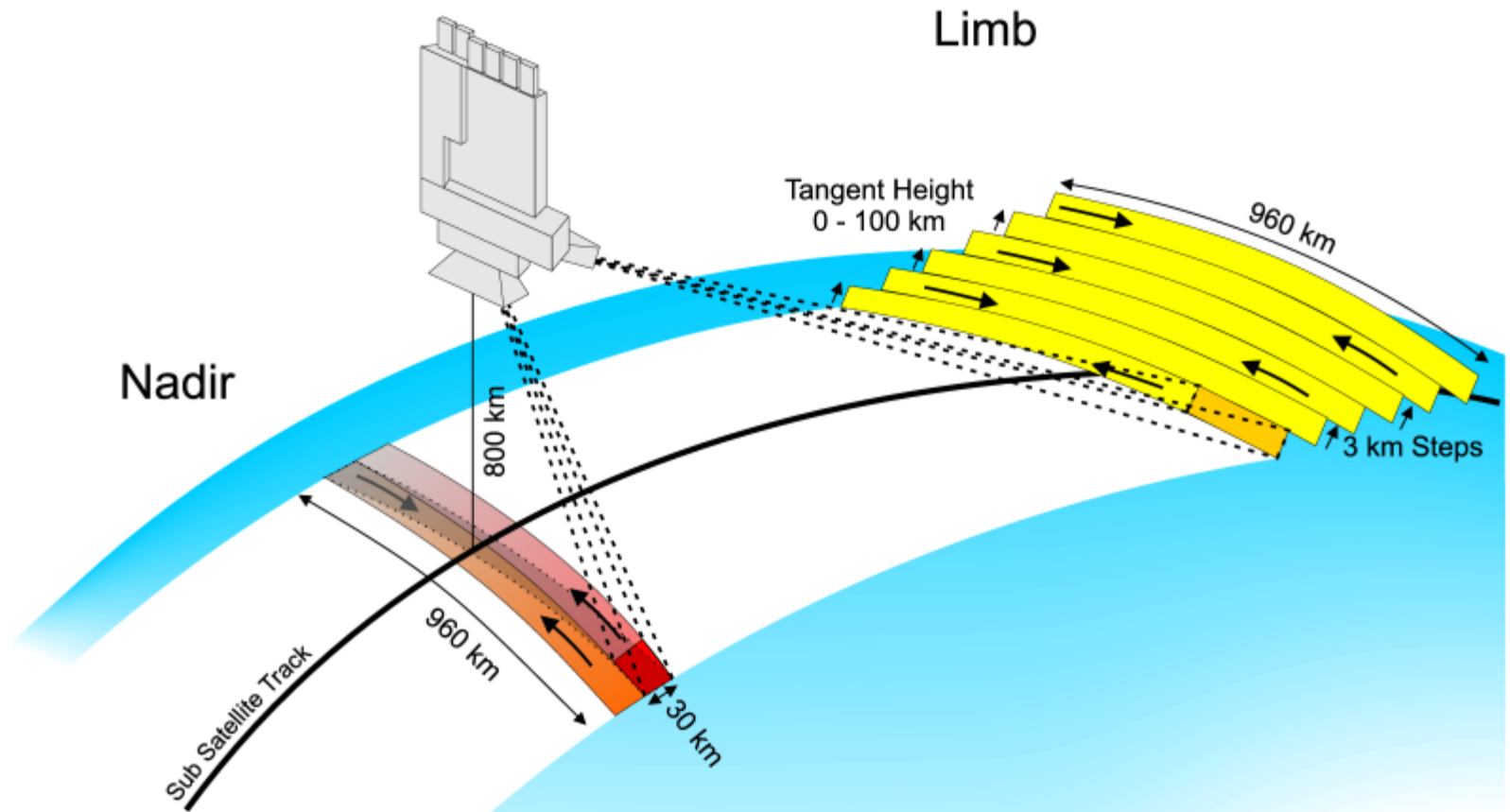






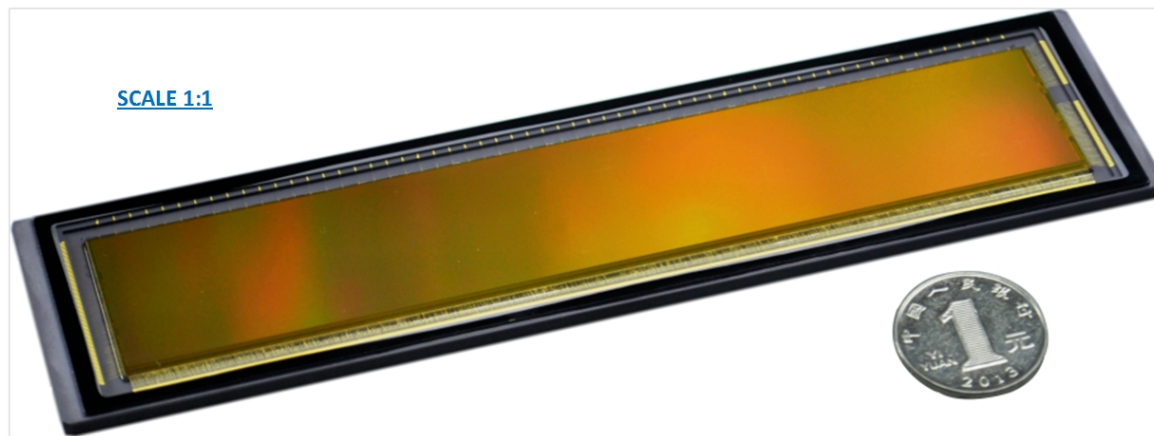


# Nadir & limb viewing mode



## Pole widzenia sensora satelitarnego

Maksymalna rozdzielczość przy danej szerokości pasa i ilości pikseli:



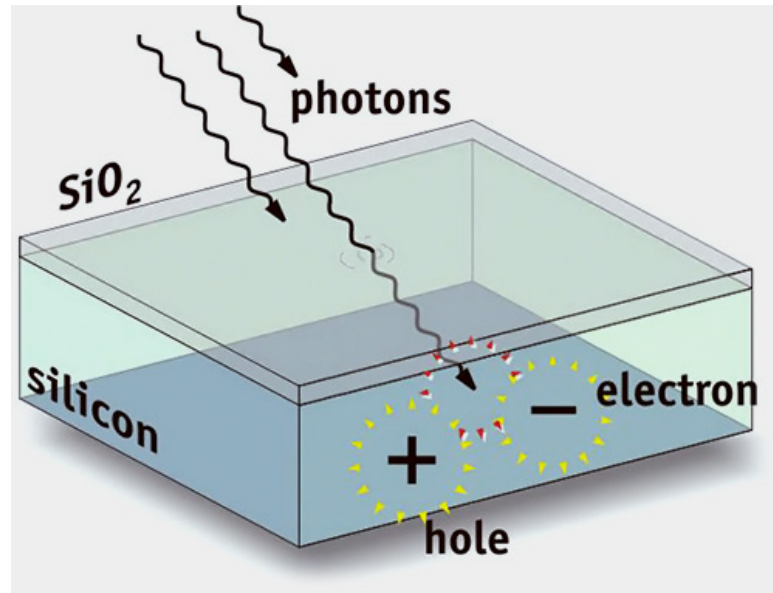
Przykład detektora firmy Gpixel: GMAX3005  
150 Mpx, 30000 x 5000, 165 x 27.5mm

## Detektory optyczne

Podstawowe parametry detektorów optycznych:

1. rozmiar piksela
2. liczba pikseli (rozmiar matrycy)
3. typ sensora (na następnym slajdzie)
4. szumy sensora
5. czułość sensora
6. szybkość odczytu

## Detektory optyczne



CCD

CMOS/CIS

EMCCS

sCMOS

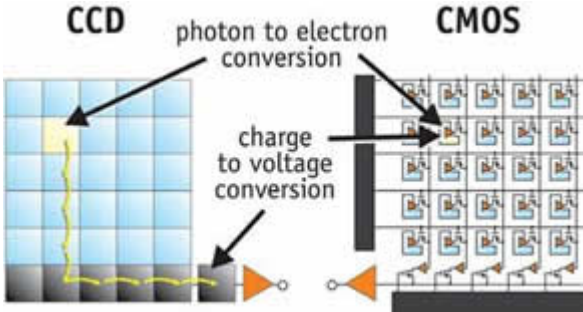
EBS

- Charge-Coupled Device
- Complementary Metal–Oxide–sSemiconductor
- Electron Multiplying CCD
- Scientific CMOS
- Event-Based Sensor

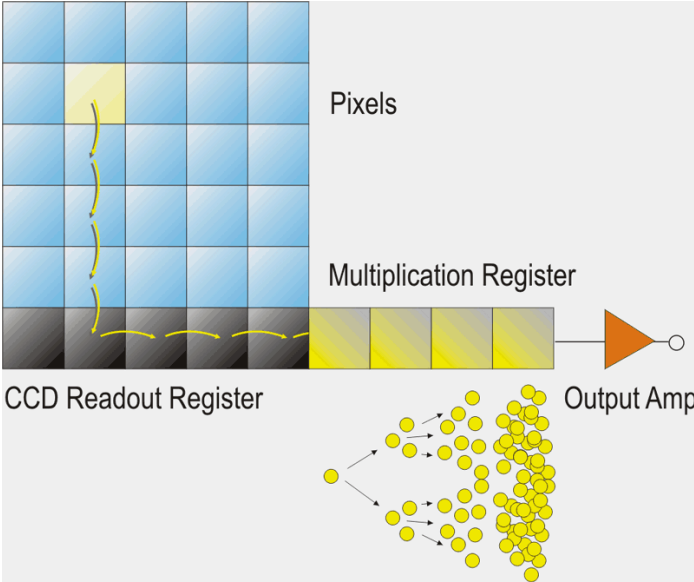
front-side

back-side

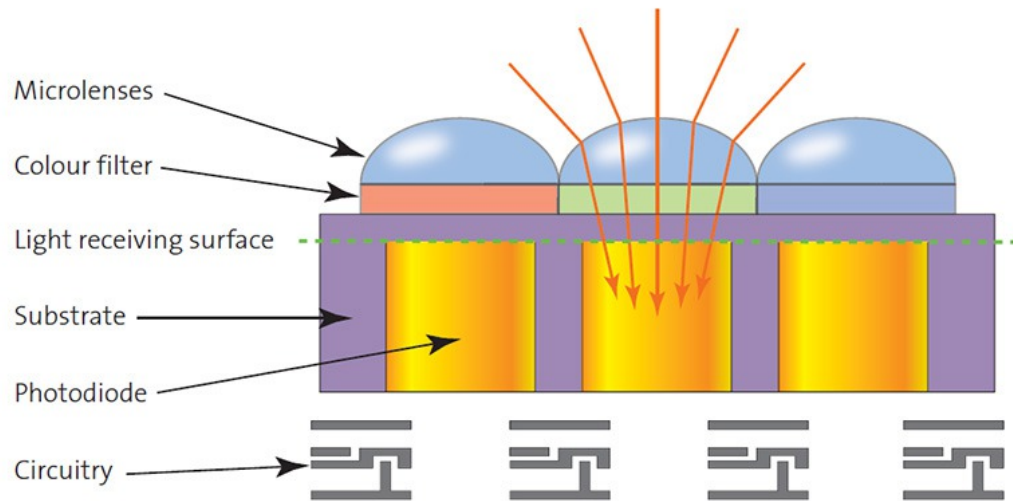
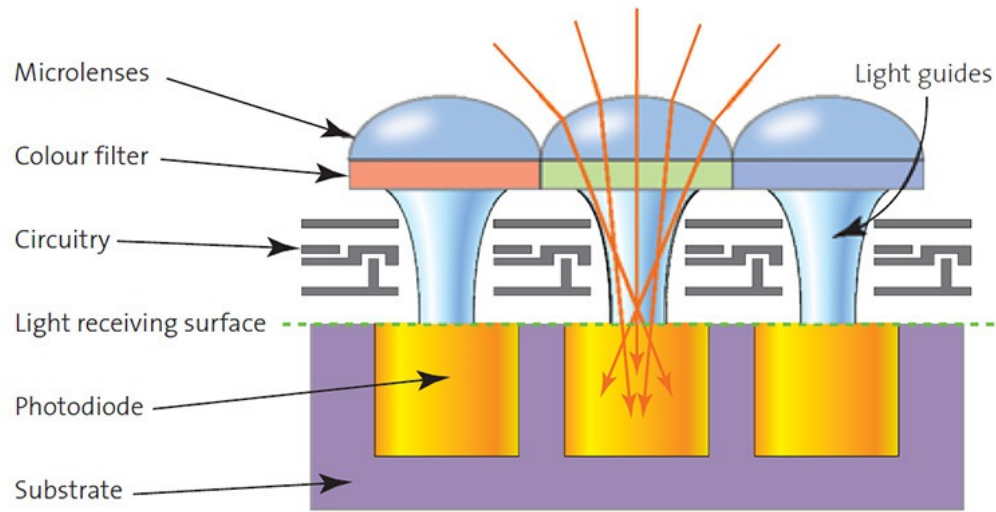
# Detektory optyczne



## EMCCD

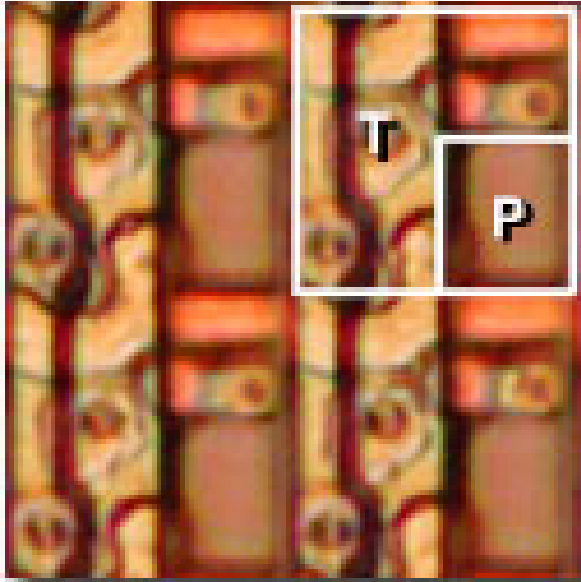
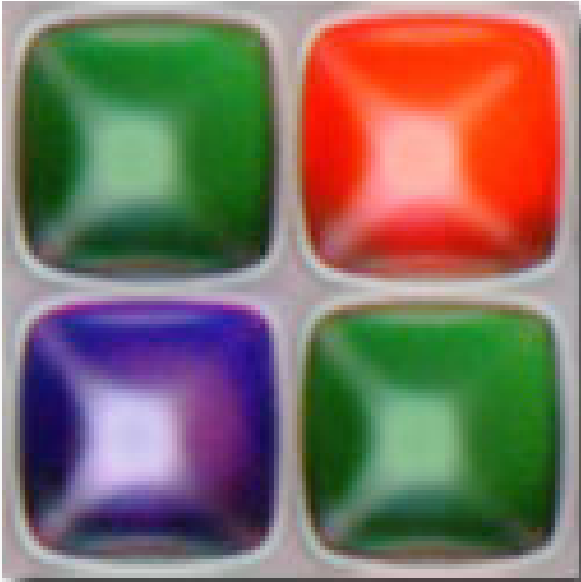
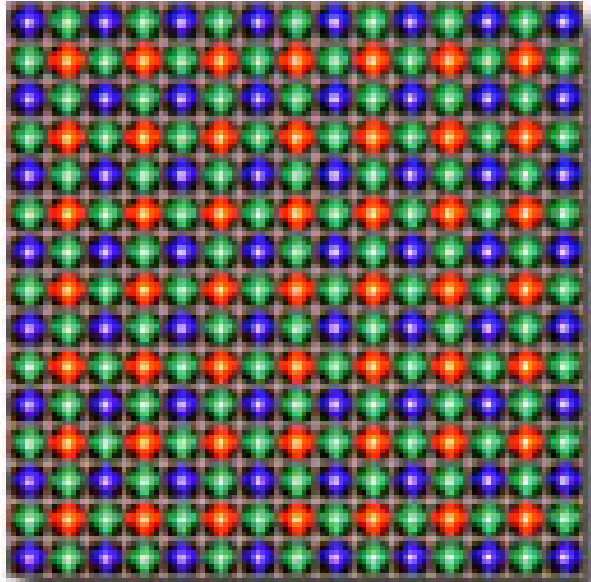


# Oświetlenie od przodu i tyłu (z mikrosoczewkami)





# Bayer Color Filter Mosaic Array and Underlying Photodiodes



## Detektory optyczne

Migawka:

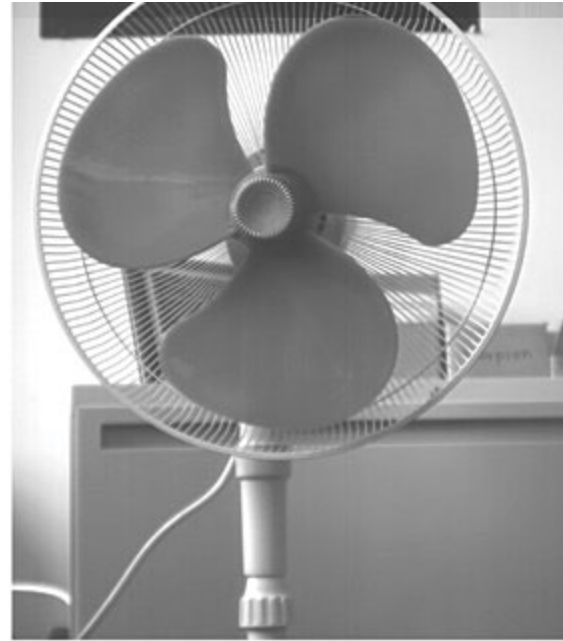
A. mechaniczna

B. elektroniczna typu rolling-shutter

C. elektroniczna typu global-shutter



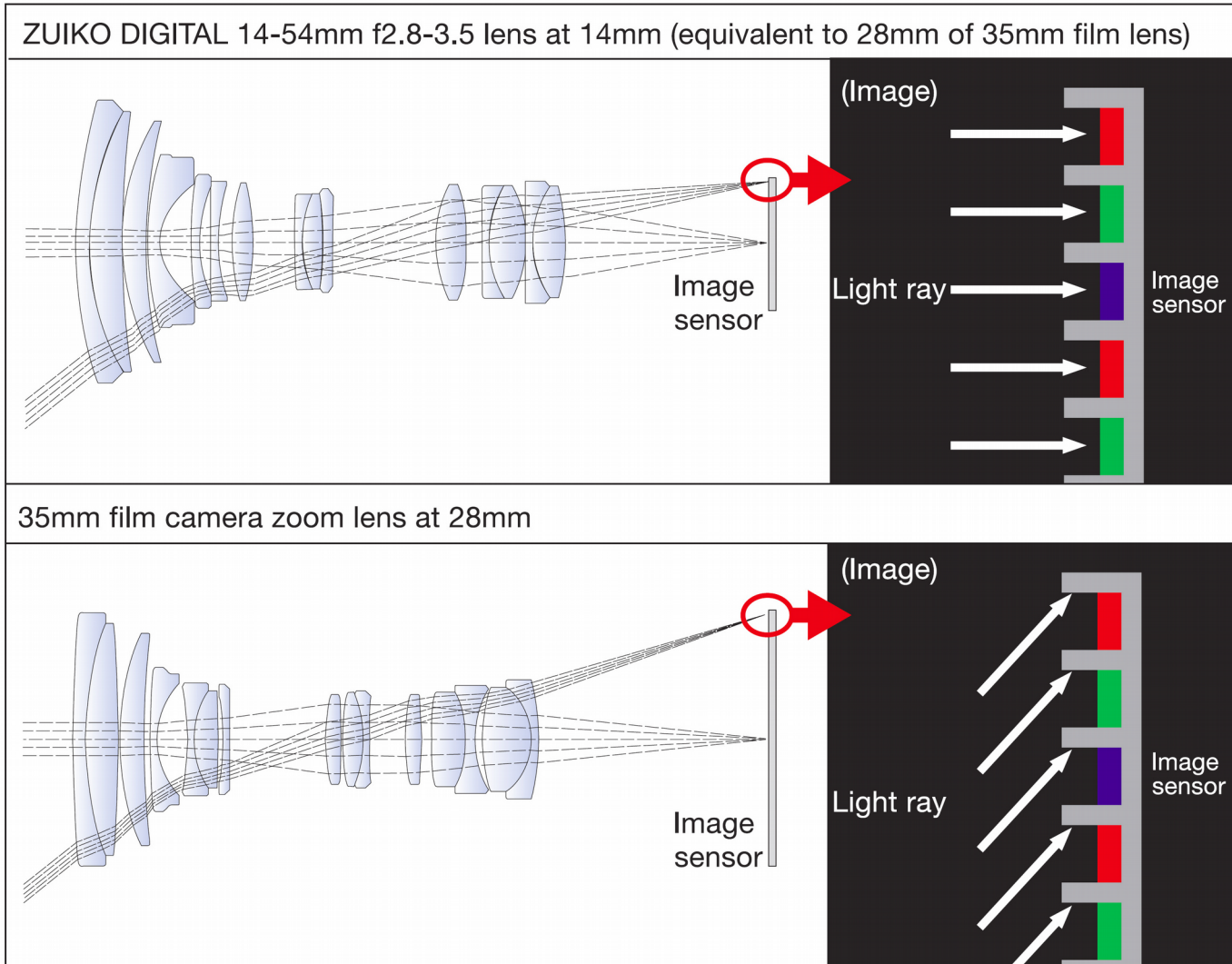
Rolling Shutter



Global Shutter

# Kolektor sensora optycznego

## Telecentryczny układ optyczny



## **Szumy – czułość – szybkość odczytu**

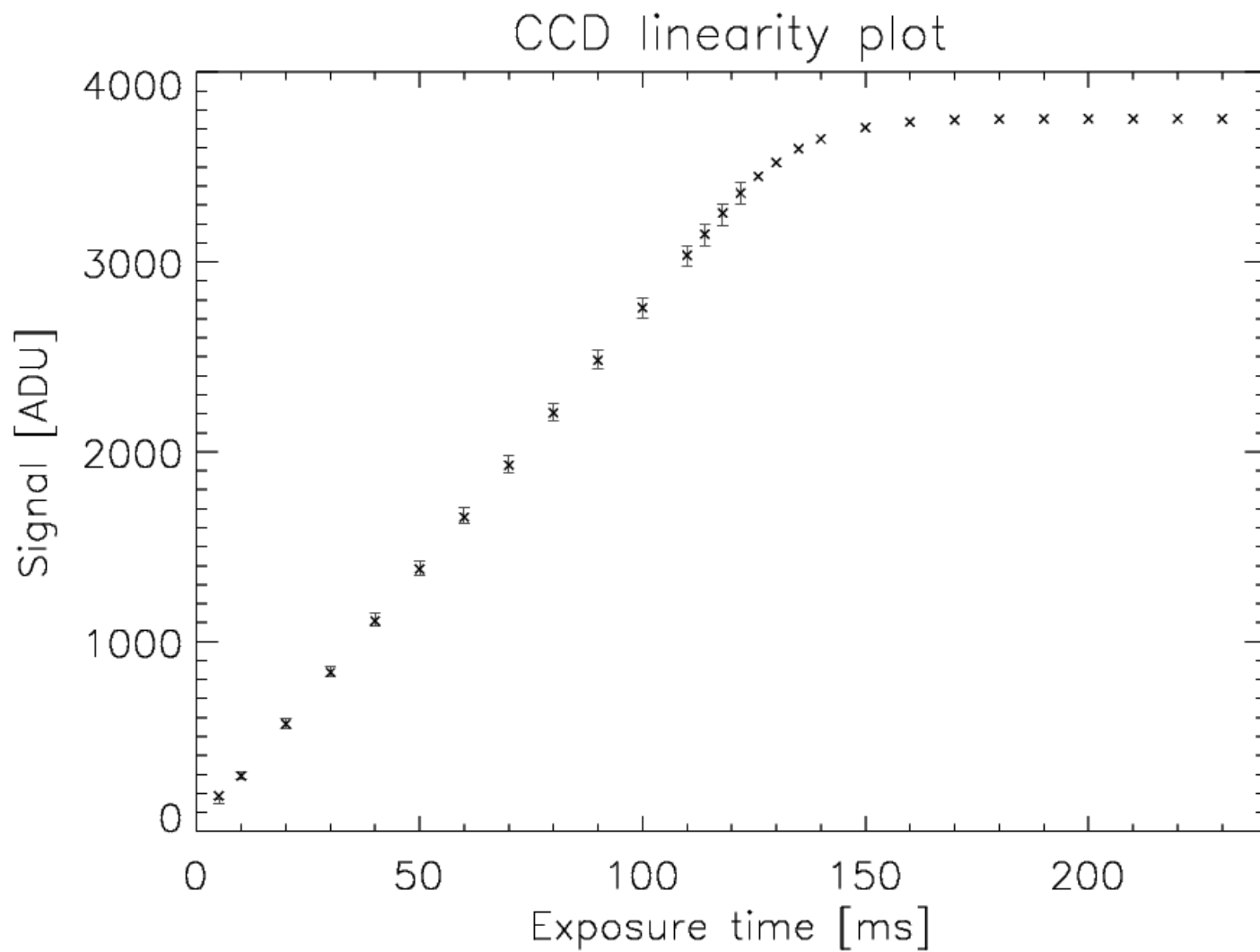
Ostatecznym celem detektora jest wierne zarejestrowanie obrazu optycznego (liniowość), przy jak najlepszym stosunku sygnału do szumu (SNR).

### **Liniowość detektora**

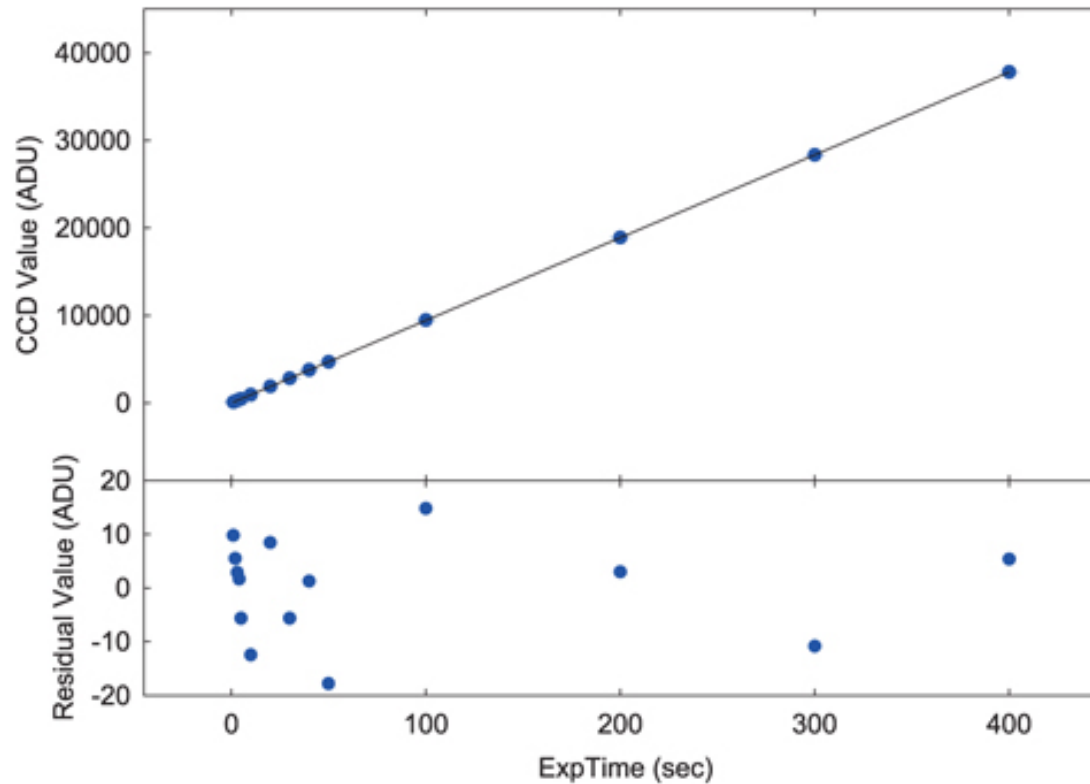
W idealnym detektorze zarejestrowany sygnał jest dokładnie proporcjonalny do natężenia światła (ilości fotonów) padających na każdy piksel.

W realnych detektorach występują odchylenia, które są jednym z parametrów danej matrycy CCD/CMOS.

## Szumy – czułość – szybkość odczytu



## Szumy – czułość – szybkość odczytu



(Nie)liniowość mierzy się za pomocą maksymalnego WZGLĘDNEGO odchylenia od idealnej linii w wybranym zakresie czułości.

## **Szumy – czułość – szybkość odczytu**

**Stosunek sygnału do szumu =  $S/N = SNR$**

Sygnał – ilość fotonów zarejestrowanych w pikselu kamery,  
zarówno od obiektu jak i wszystkich innych źródeł światła

Sygnał = (ilość e na sekundę) \* (czas naświetlania)

Szum – całkowita niepewność ilości fotonów

Szum = suma wszystkich źródeł przypadkowych błędów pomiaru,  
z pominięciem błędów systematycznych

## Szumy – czułość – szybkość odczytu

**Stosunek sygnału do szumu = S/N = SNR**

Stosunek sygnału do szumu jest miarą jakości pomiaru natężenia światła w danym pikselu kamery.

Przykładowe wartości

1-3 – obiekt ledwo dostrzegalny

10-20 – obiekt wyraźny, ale np. pomiary jasności i pozycji są kiepskie

100-200 – pomiar „doskonały”

$S/N = 2 \rightarrow \pm 50\%$

$S/N = 20 \rightarrow \pm 5\%$

$S/N = 200 \rightarrow \pm 0.5\%$



## **Szumy – czułość – szybkość odczytu**

**Stosunek sygnału do szumu =  $S/N = SNR$**

Źródła szumu w kamerach CCD/CMOS

Szum Poissona = szum fotonowy = ang. shot noise

$$N = \sqrt{S}$$

Pochodzi zarówno od fotonów obiektu i od prądu ciemnego.

Szum odczytu = ang. readout noise

$$N = RON$$

Pochodzi zarówno od fotonów obiektu, tła i prądu ciemnego.

## **Szumy – czułość – szybkość odczytu**

**Stosunek sygnału do szumu = S/N = SNR**

Ostateczny S/N = (sygnał od obiektu) / (wszystkie szumy od wszystkich sygnałów)

Gdy fotonów od obiektu jest niewiele dominujący jest szum odczytu, który jest stały dla danej kamery.

Zwiększenie czasu naświetlania 2x zwiększa S/N 2x.

Gdy fotonów od obiektu jest wiele dominujący jest szum fotonowy, który zależy od czasu naświetlania.

Zwiększenie czasu naświetlania 2x zwiększa S/N  $\sqrt{2}$  razy.



Prędkość odczytu obrazu z kamery a szum odczytu.

Najszybsza prędkość odczytu: jeden piksel – jeden odczyt.  
Oznacza też największy szum odczytu.

Mniejsza prędkość odczytu: jeden piksel – wiele odczytów.  
Oznacza możliwość uśrednienia wyników i mniejszy szum odczytu.

przykład z kamerą Andor

## Maksymalny czas naświetlania zdjęcia satelitarnego

$$t [s] = \frac{l [km]}{v [km/s]}$$

$$v [km/s] = \sqrt{\frac{GM}{a [km]}}$$

$$GM = 398600.4418 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$$

$$t = l \sqrt{\frac{a}{GM}}$$

$$l = 1.22 \frac{\lambda d}{D \cos \alpha}$$

$$\lambda = 550 \quad \alpha = 0 \text{ deg}$$

$$l [km] = 6.71 \cdot 10^{-5} \frac{d [km]}{D [cm]}$$

$$t = 6.71 \cdot 10^{-5} \frac{a}{D} \sqrt{\frac{a}{GM}}$$

$$t = 1.06 \cdot 10^{-7} D^{-1} a^{\frac{3}{2}}$$

Czy w tych obliczeniach jest coś nie tak?

Nie uwzględniamy obrotu Ziemi – na szczęście jest dość wolny.

Ile fotonów wpadnie do kamery CCD na piksel?

Żarówka 100W produkuje  $\sim 10^{20}$  fotonów na sekundę.

Słońce produkuje  $\sim 10^{45}$  fotonów na sekundę.

Ile fotonów trafi na pojedynczy piksel satelity LEO o maksymalnej możliwej rozdzielczości obrazu?

Założenia:

$$a_z = 1.5 \cdot 10^8 \text{ km}$$

$$a_{sat} = 500 \text{ km}$$

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

$$\alpha = 0$$

$$\lambda = 550 \text{ nm}$$

Ile fotonów wpadnie do kamery CCD na 1 piksel?

Rozdzielczość maksymalna satelity:

$$l = 1.22 \frac{\lambda a}{D \cos \alpha}$$

$$l = 33 \text{ cm}$$

Ilość fotonów padających na fragment Ziemi o średnicy  $l$ :

$$n_z = 10^{45} \frac{l^2}{4 a_z^2}$$

$$n_z = 1.2 \cdot 10^{21} \text{ ph/s}$$

Ile fotonów wpadnie do kamery CCD na 1 piksel?

Ilość fotonów padających na obiektyw:

$$n_{ob} = 1.2 \cdot 10^{21} \frac{0.25 D^2}{2 a^2}$$

$$n_{ob} = 6 \cdot 10^8 \text{ ph/s}$$

Ilość fotonów padających na piksel podczas jednej ekspozycji:

$$n_{pix} = 6 \cdot 10^8 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{4}$$

$$n_{pix} = 300 \text{ ph/exp}$$

Czego nie uwzględniliśmy?

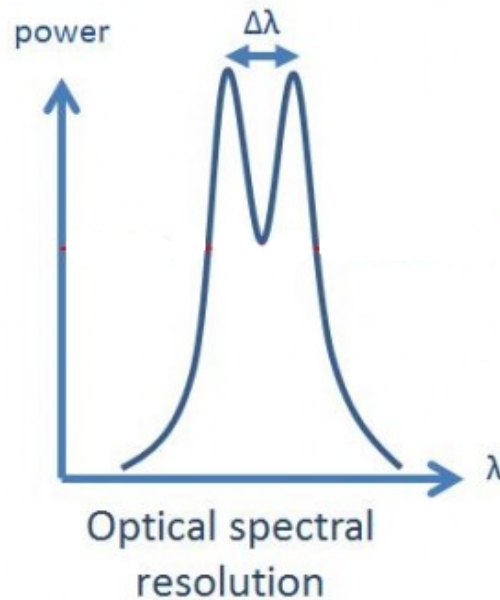
Jaki będzie S/N dla typowej kamery?

Jakie wnioski z tego wypływają dla zdjęć: nocnych, w filtrach wąskopasmowych, w innych niż optyczny zakresach?



## Rozdzielczość widmowa

Rozdzielczość widmowa  $\Delta\lambda$  – najmniejsza różnica w długości fali, przy której spektrograf jest w stanie odróżnić dwie sąsiednie linie widmowe.

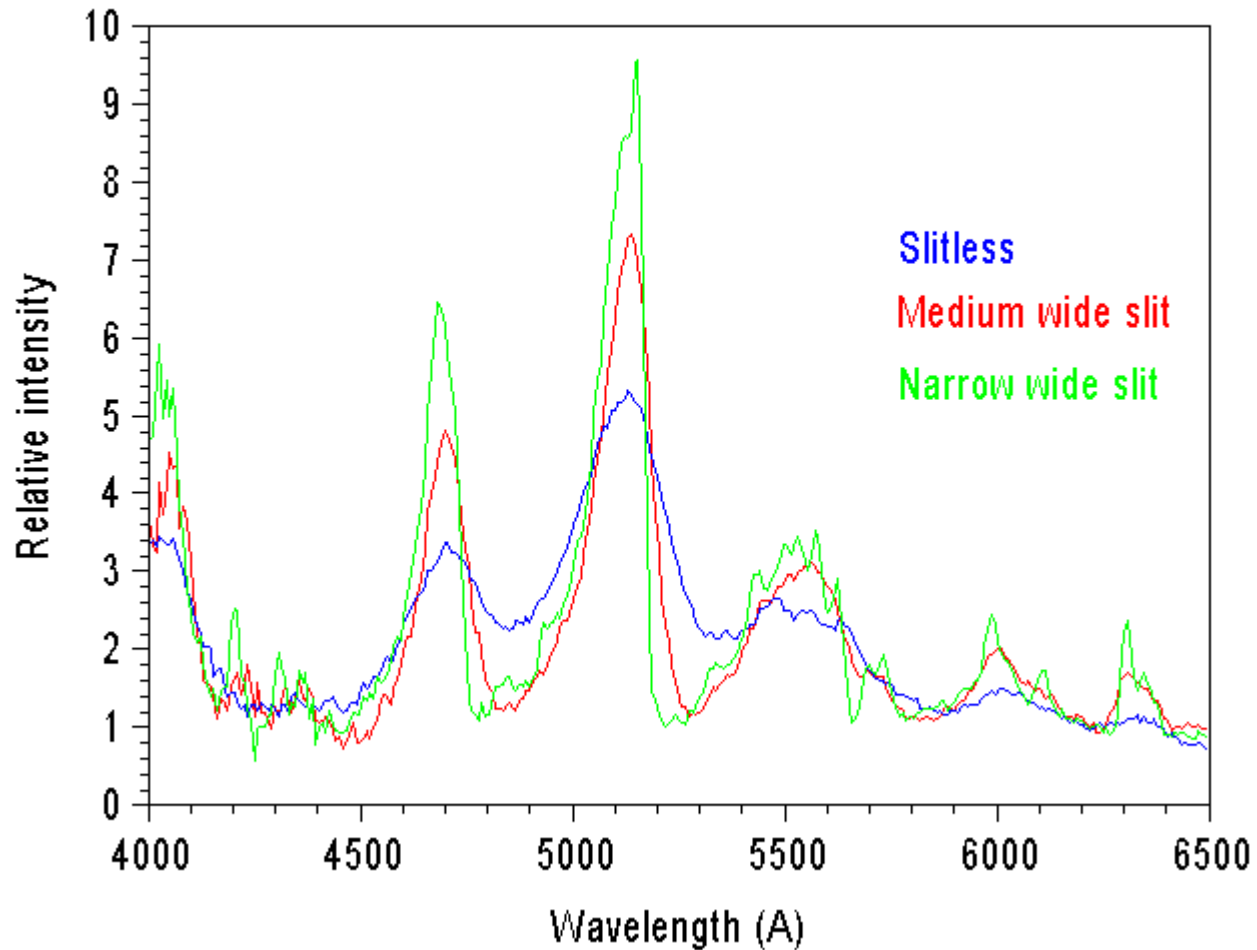


Moc rozdzielcza R:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

# Rozdzielczość widmowa

C/2001 A2 (LINEAR) - July 2001  
FSQ-106 + Spectr'aude (8 Å/pixel)



Przykłady widm tego samego obiektu o różnej rozdzielczości.

## Rozdzielczość radiometryczna

Obserwacje w jednym zakresie: 8-bit, 12-bit, 16-bit

Obserwacje multi-spektralne i hiper-spektralne:  
nawet 200 zakresów widma naraz!

Mamy więc następującą ilość bitów informacji zarejestrowanych na każdym zdjęciu:

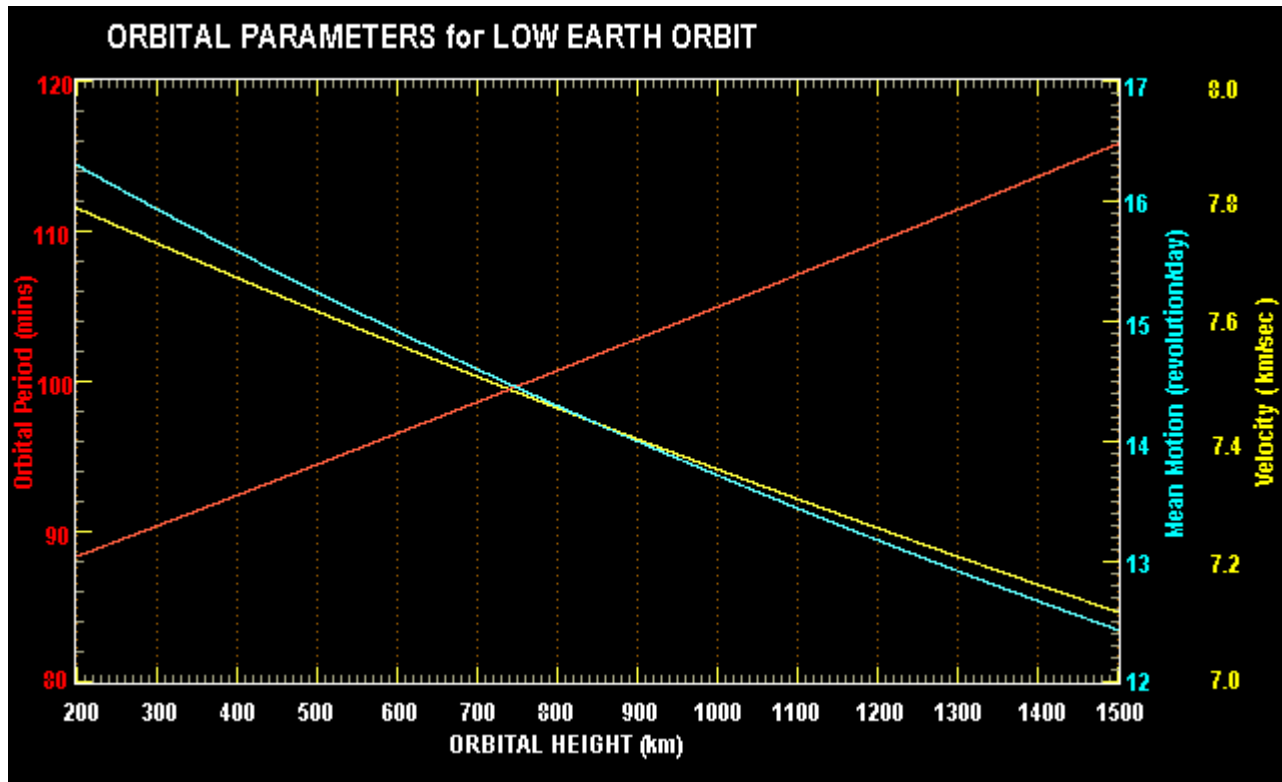
$$n = \text{x-size} * \text{y-size} * \text{bit/pix} * \text{n-bands}$$

# Rozdzielczość czasowa

Okres orbitalny satelity wynosi:

$$\mu n^2 = a^3$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad \mu = GM_Z = 398600.4415 \text{ km}^3/\text{s}^2$$



## Rozdzielczość czasowa

Po jednym pełnym okresie obiegu satelita znajduje się w tym samym punkcie orbity, ale Ziemia się obróci więc nastąpi przesunięcie punktu pod-satelitarnego o kąt:

$$\Delta \lambda = 2 \pi \frac{T_{sat}}{T_{Ziemia}} = \frac{4 \pi^2}{T_{Ziemia}} \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$$

$$\mu = 398600.4415 \text{ km}^3 / \text{s}^2$$

Odpowiada to liniowemu przesunięciu na kuli ziemskiej o wartości:

$$\Delta \lambda R_z \cos(\phi)$$

Dla okresu obiegu 90 min otrzymujemy na równiku:

$$\Delta \lambda = 0.3927 \text{ rad} = 22.5^\circ$$

$$2502 \text{ km}$$

## Rozdzielczość czasowa

Niezwykle korzystne jest takie zaprojektowanie orbity, by sztuczny satelita regularnie powracał co pewien czas dokładnie nad to samo miejsce.

Orbity takie muszą spełnić kilka sprzecznych warunków:

1. Być dostatecznie wysokie by atmosfera nie spowodowała spadku.
2. Być dostatecznie niskie by widzieć jak najmniejsze detale.
3. Posiadać jak najkrótszy okres powrotu (ang. revisit time).
4. Pokrywać jak największy obszar na Ziemi.
5. Obserwować zawsze w podobnych warunkach oświetleniowych, najlepiej takich samych w każdym punkcie globu.

## Rozdzielczość czasowa

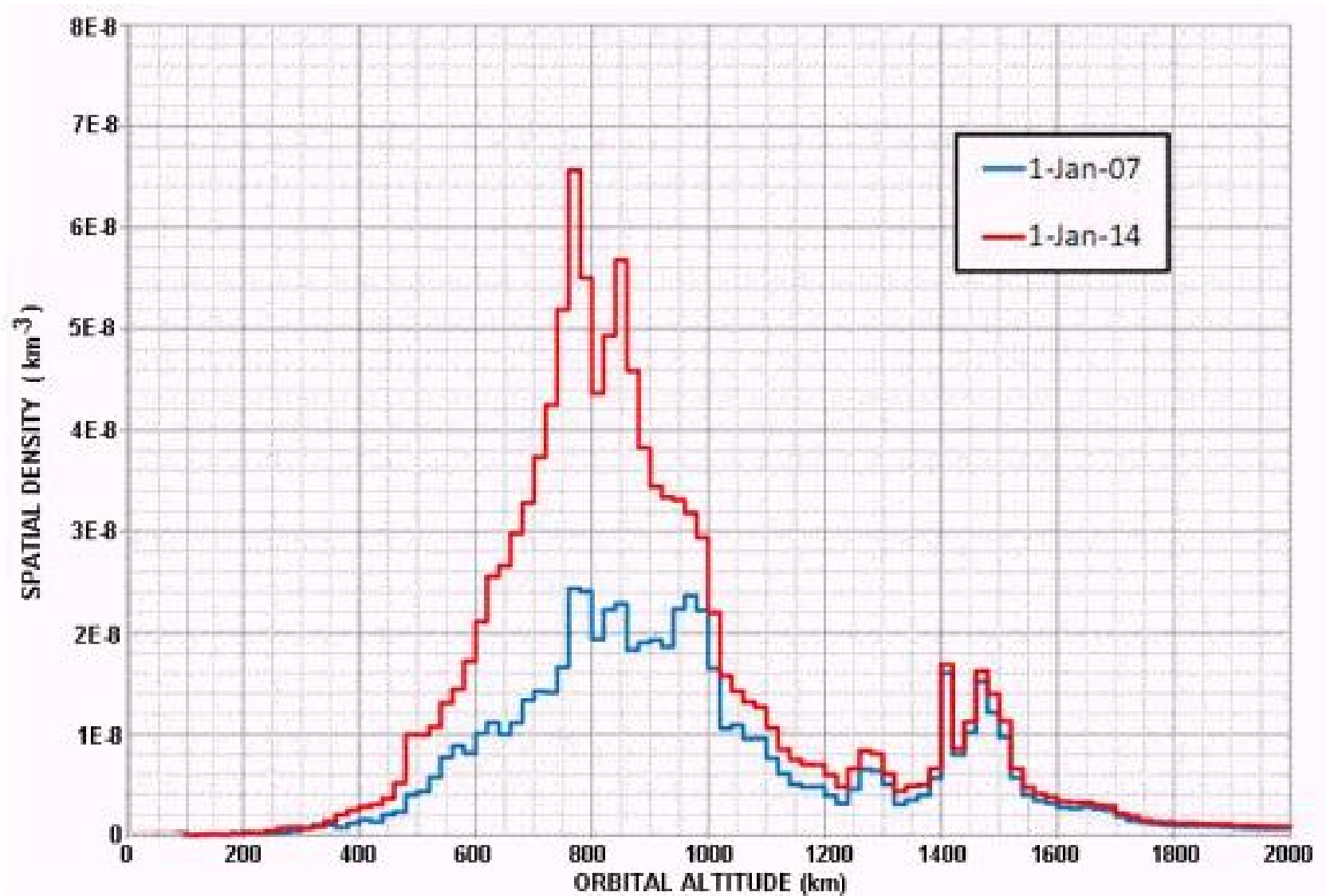
$$a = \sqrt[3]{\frac{\mu T^2}{4\pi^2}}$$

Przykładowe orbity zsynchronizowane z obrotem Ziemi (obliczenia przybliżone).

ilość okresów na dobę gwiazdową	okres orbitalny [min]	promień orbity [km]	średnia wysokość orbity [km]	horyzont satelity [stopnie]	odległość równikowa [stopnie]
17	84.475	6377	6	2.5	21.2
16	89.754	6640	269	16.4	22.5
15	95.738	6932	561	23.2	24.0
14	102.576	7258	887	<b>28.6</b>	25.7
13	110.467	7626	1255	<b>33.3</b>	27.7
12	119.672	8044	1673	<b>37.6</b>	30.0

Okres powrotu = 1 doba gwiazdowa

## Najpopularniejsze orbity satelitów i śmieci kosmicznych.





## Rozdzielczość czasowa

Przykładowe orbity zsynchronizowane z obrotem Ziemi (obliczenia przybliżone).

ilość okresów na dobę gwiazdową	okres orbitalny [min]	promień orbity [km]	średnia wysokość orbity [km]	horyzont satelity [stopnie]	odległość równikowa [stopnie]
45	95.738	6932	561	23.2	8.0
44	97.914	7037	666	25.1	8.2
43	100.191	7146	775	26.9	8.4
42	102.576	7259	888	28.6	8.6
41	105.078	7376	1005	30.3	8.8
40	107.705	7499	1128	31.8	9.0

Okres powrotu = 3 doby gwiazdowe

## Rozdzielczość czasowa

Z punktu widzenia obserwacji Ziemi najlepiej gdyby satelita wracał do obserwacji tego samego miejsca przy tych samych warunkach oświetleniowych (o tej samej porze dnia).

Jak to osiągnąć?

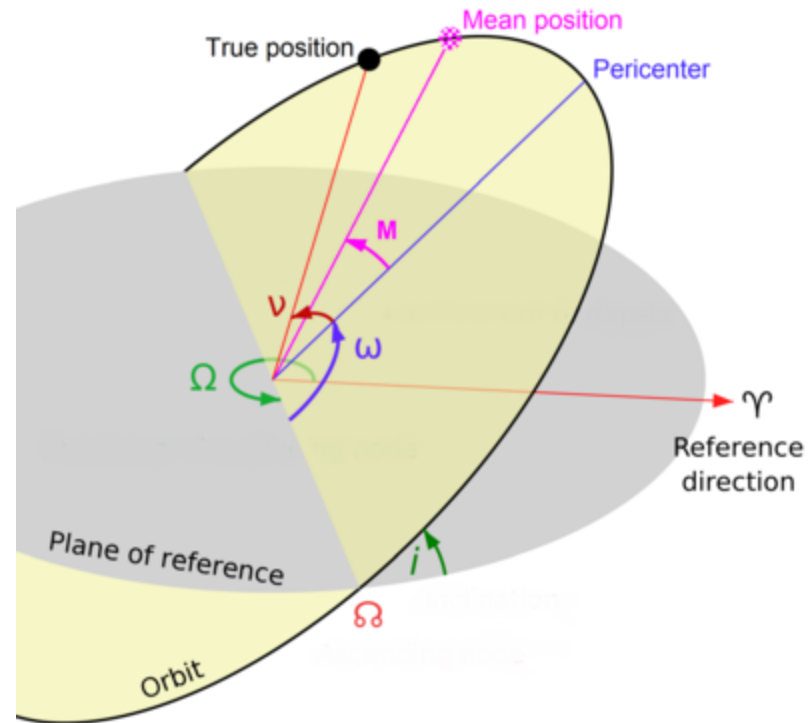
Orbita biegunowa + heliosynchroniczna.

Jak zaprojektować orbitę heliosynchroniczną?

W przypadku orbit czysto keplerowskich jest to niemożliwe!

## Rozdzielczość czasowa

Orbita keplerowska ma następujące, stałe w czasie parametry:  
 $a$ ,  $e$ ,  $i$ ,  $\omega$ ,  $\Omega$ ,  $M$



Orbita realna (uwzględniając tylko spłaszczenie Ziemi)  
nie wykazuje zmian wiekowych:  $a$ ,  $e$ ,  $i$ .

Systematycznie zmieniają się za to:  $\omega$ ,  $\Omega$ ,  $M$

## Rozdzielczość czasowa

1. Zmiana  $\omega$  powoduje precesję, a więc wpływa na okres powrotu satelity nad ten sam punkt na powierzchni Ziemi.

$$\dot{\omega} = \frac{3 J_2}{4} n \frac{R_Z^2}{a^2} \frac{(5 \cos^2 i - 1)}{(1 - e^2)^2}$$

2. Zmiana  $M$  powoduje zmianę okresu obiegu.

$$\dot{M} = n \left[ 1 + \frac{3 J_2}{2} \left( \frac{R_Z}{a} \right)^2 (1 - e^2)^{-3/2} \left( 1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \right]$$

Wniosek:

Okres orbitalny jest nieco mniejszy lub większy niż czysto keplerowski.

Uwaga! Okres czasu pomiędzy kolejnymi przelotami np. nad równikiem nie jest równy okresowi orbitalnemu (nawet temu zmienionemu) gdyż perycentrum cały czas się przesuwa.

Wprowadza się pojęcie okresu węzłowego (ang. nodal period).

$$\dot{\omega} = \frac{3 J_2}{4} n \frac{R_z^2}{a^2} \frac{(5 \cos^2 i - 1)}{(1 - e^2)^2}$$

$$J_2 = 1.0826 \cdot 10^{-3} \text{ km}^5 \text{ s}^{-2}$$

$$R_z = 6371 \text{ km}$$

$$n = 2\pi / P$$

wykresy - Calc

## Rozdzielczość czasowa

3. Zmiana  $\Omega$  powoduje obrót płaszczyzny orbity i umożliwia zaprojektowanie orbity heliosynchronicznej.

$$\dot{\Omega} = \frac{-3 J_2}{2} n \frac{R_Z^2}{a^2} \frac{\cos^2 i}{(1-e^2)^2}$$

Wnioski:

Płaszczyzna orbity o nachyleniu równym 90 stopni nie obraca się.

Pozostałe orbity obracają się z tempem zależnym m.in. od  $i$ .

Można dobrać takie parametry orbity, że jej obrót będzie dokładnie w tempie rocznego ruchu Ziemi wokół Słońca  
- czyli takim jaki jest wymagany dla orbity heliosynchronicznej.

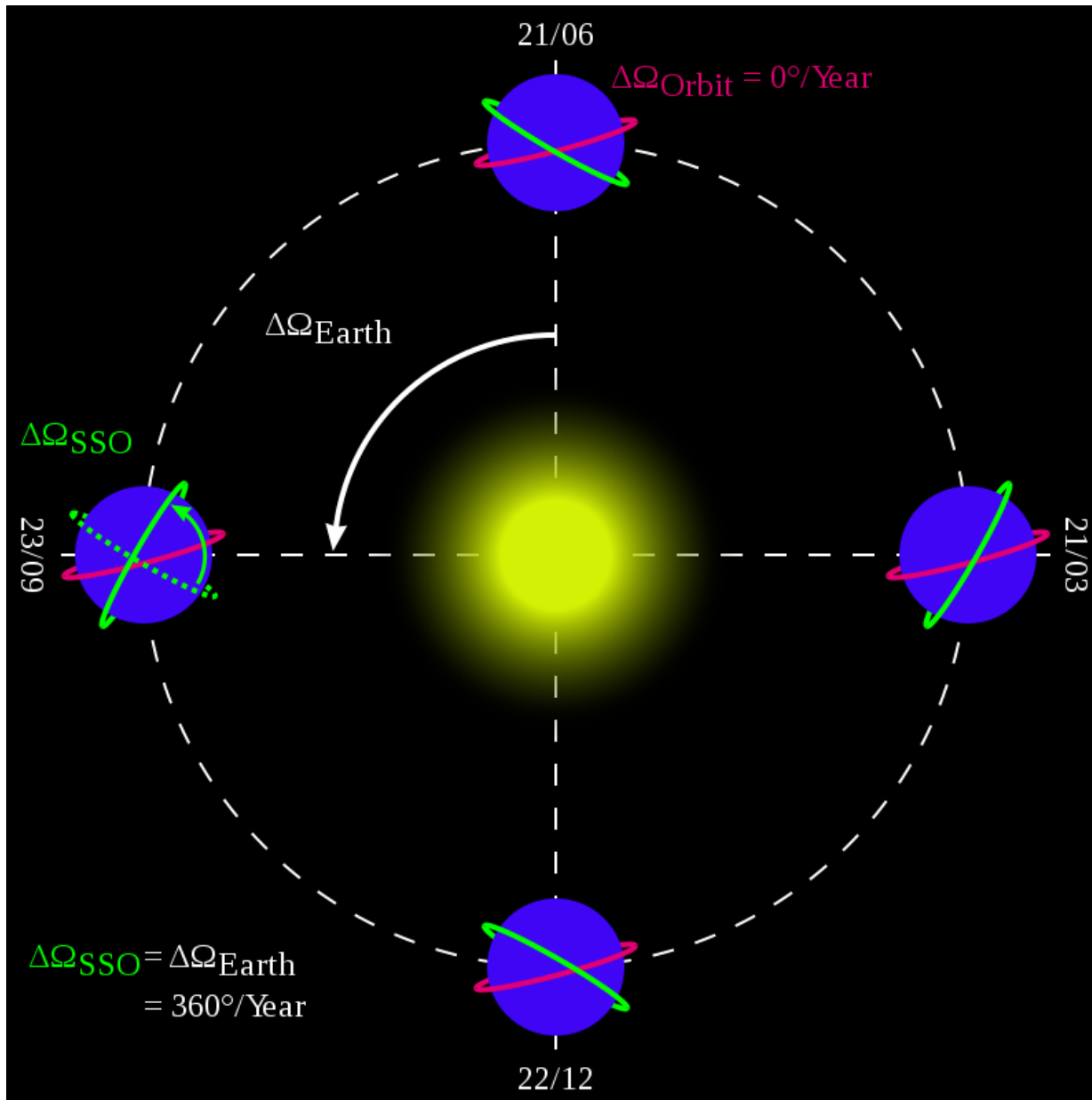
$$\dot{\Omega} = \frac{-3 J_2}{2} n \frac{R_z^2}{a^2} \frac{\cos^2 i}{(1-e^2)^2}$$

$$J_2 = 1.0826 \cdot 10^{-3} \text{ km}^5 \text{ s}^{-2}$$

$$R_z = 6371 \text{ km}$$

$$n = 2\pi / P$$

wykresy - Calc



Orbita heliosynchroniczna



## Rozdzielczość czasowa

Table (1) sun synchronous orbits with recurrent ground track

Altitude, km	Inclination, deg	Period, min	Number of orbit, days	Recurrence interval j/k
790	98.560	100.78	14.28	100/7
770	98.476	100.36	14.34	86/6
750	98.39	99.940	14.40	72/5
720	98.27	99.3114	14.499	29/2
690	98.14	98.683	14.60	73/5
660	98.02	98.05	14.66	44/3
640	97.94	97.640	14.75	59/4

Przykładowe orbity heliosynchroniczne SSZ.

j – liczba obiegów wokół Ziemi

k – liczba obrotów Ziemi wokół własnej osi

## Rozdzielczość czasowa

Prawdziwy czas powrotu satelity nad dane miejsce zależy również od:

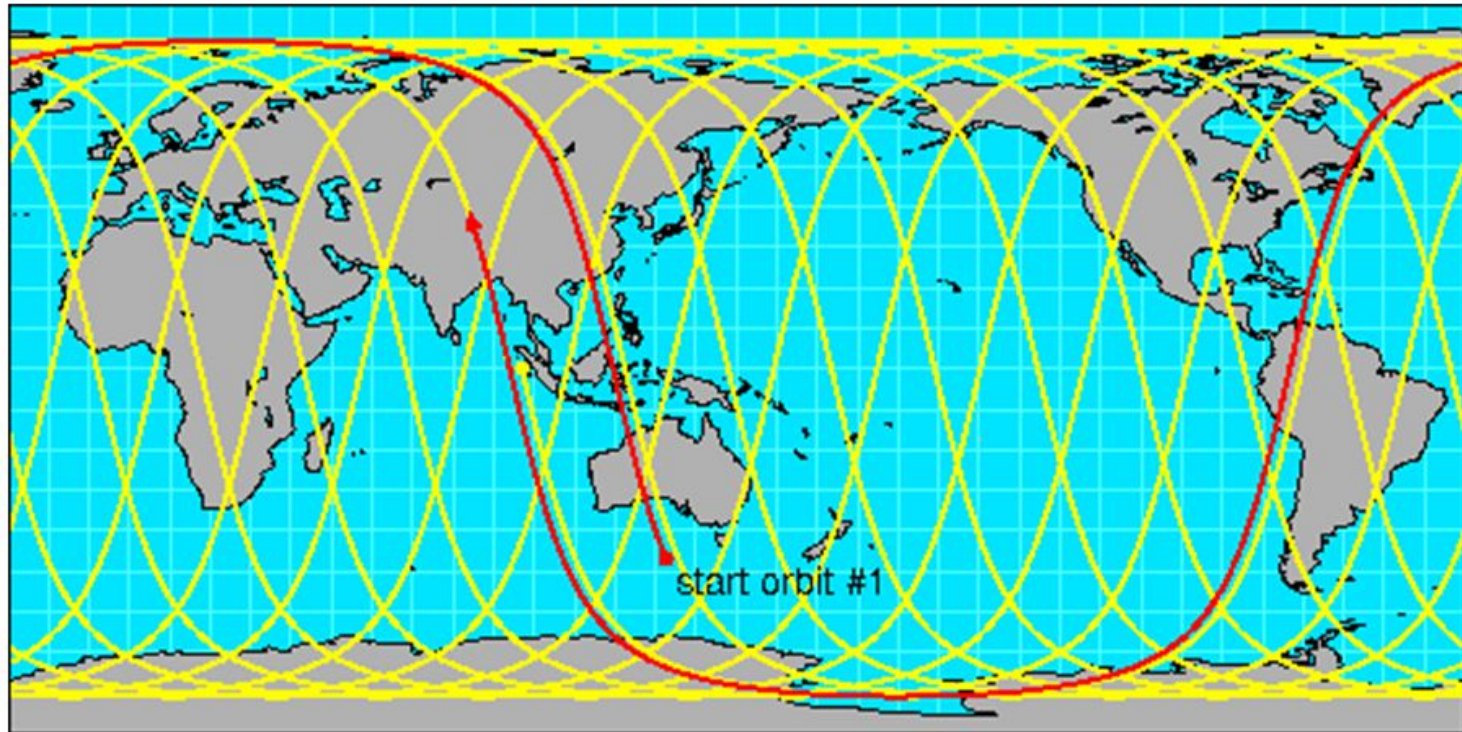
1. Miejsca na Ziemi – zwykle przy równiku jest najdłuższy
2. Możliwości odchylenia sensorów od nadiru

Definiuje się więc:

minimalny czas powrotu (ang. minimum revisit time)

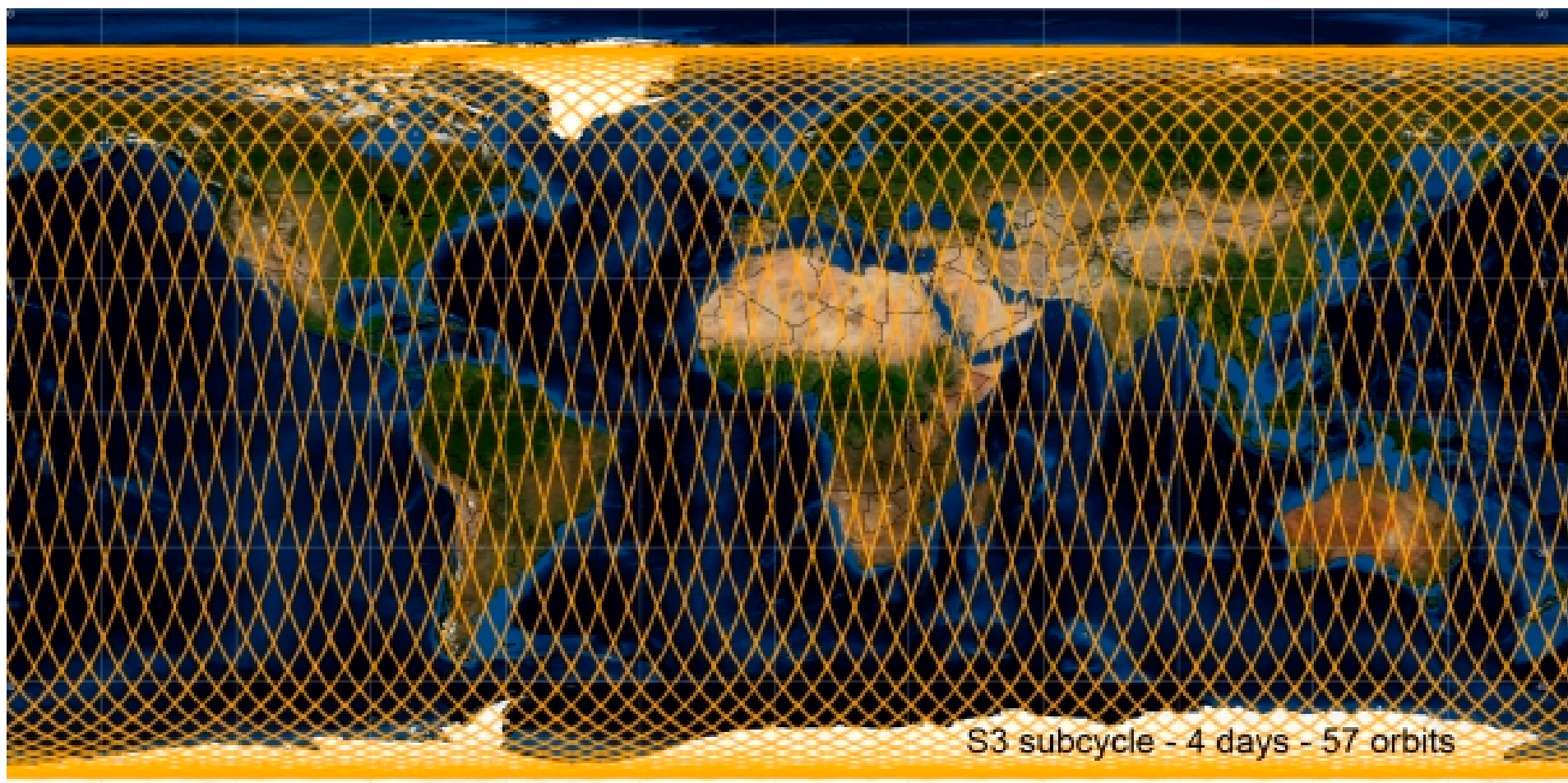
maksymalny czas powrotu (ang. maximum revisit time)

# LEO repeat cycles

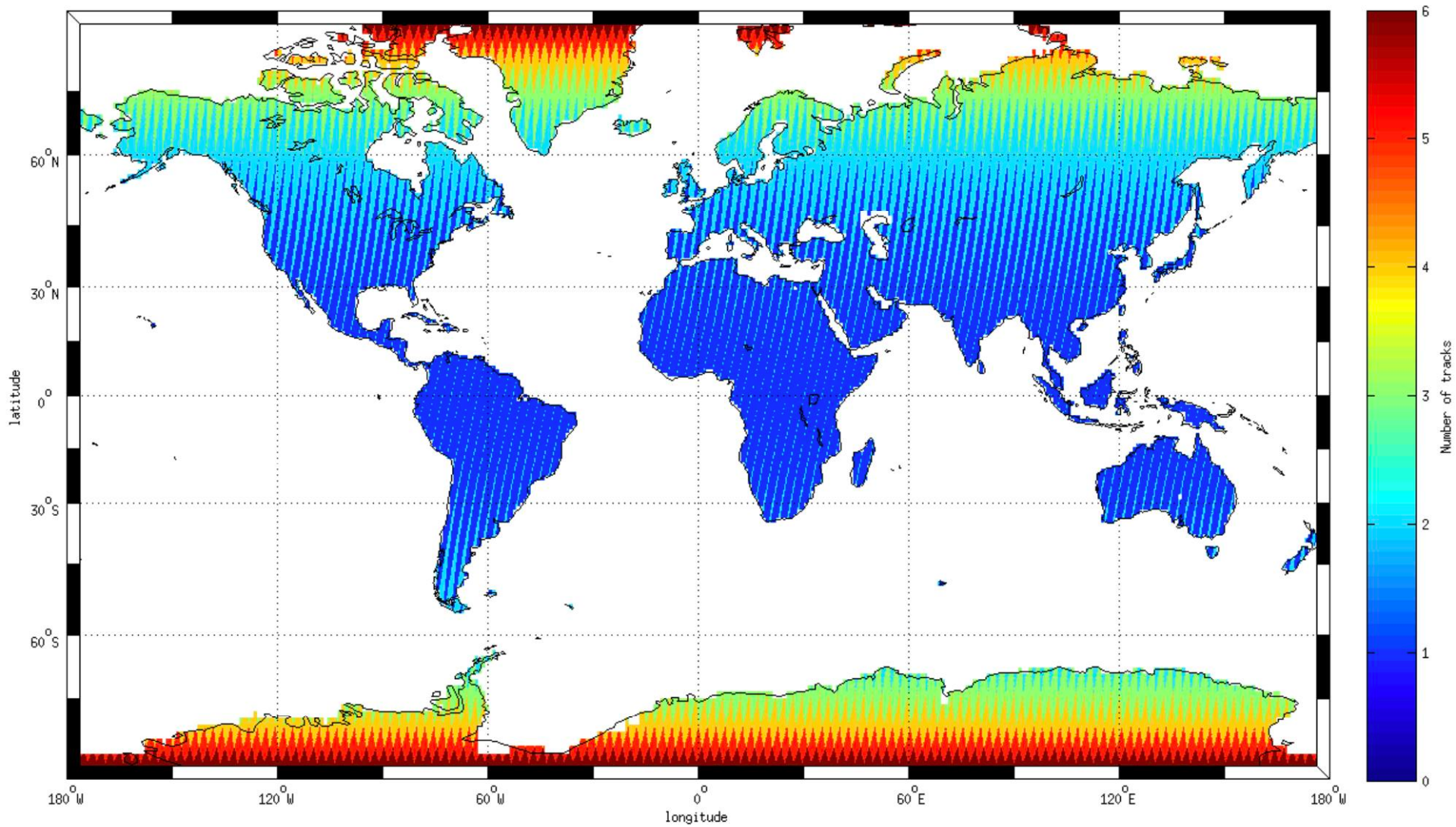


If Earth makes an integral number of rotations in the time taken for the satellite to complete an integral number of orbits, the sub-satellite track repeats exactly.

e.g., NASA Aura satellite (705 km altitude) has a 16-day (233 orbit) repeat cycle



Sentinel-3



Sentinel-2 MSI

## „Orbity zamrożone”

Orbity satelitów Ziemi podlegają ciągłym perturbacjom (zaburzeniom), a przez to wymagają regularnych manewrów korygujących.

Tempo zmiany parametrów orbitalnych zależy od samych parametrów w dość skomplikowany sposób.

Niektóre orbity podlegają jednak znacznie mniejszym zmianom w czasie, gdyż perturbacje którym podlegają w dużym stopniu wzajemnie się znoszą.

Orbity te nazywa się kolektywnie „zamrożonymi” (ang. frozen orbits).

Klasycznym przykładem są orbity o nachyleniu krytycznym (63.4), w których precesja orbity jest znacznie zmniejszona (Mołnia, Tundra).

# Orbity Mołnia

Okres orbitalny: 12h

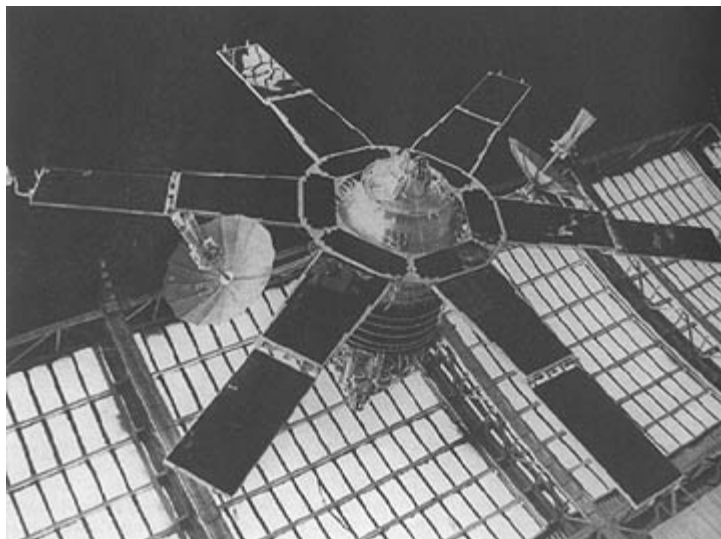
perygeum: 500km

apogeum: 40000km

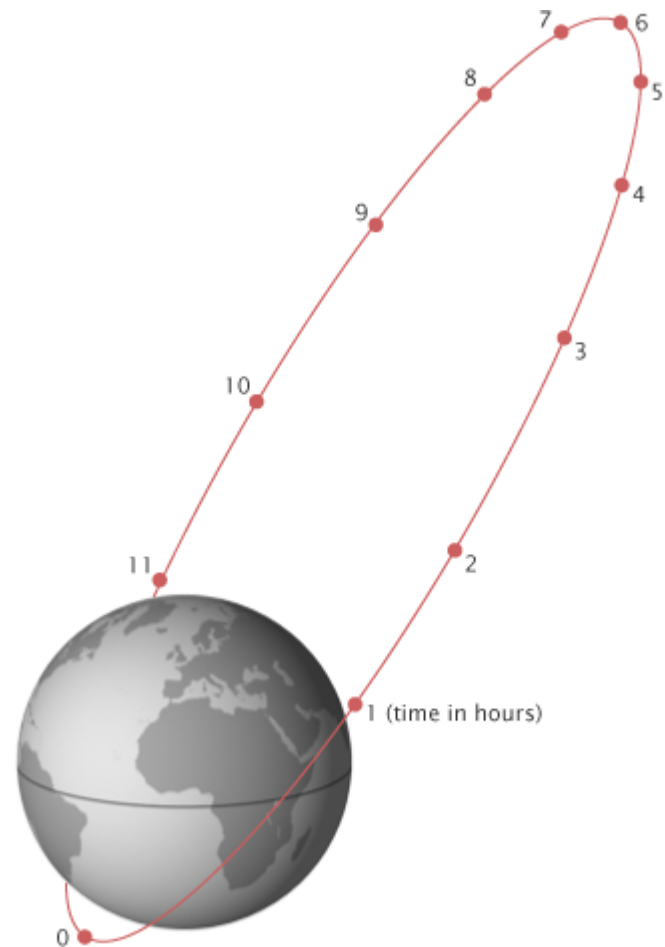
nachylenie: 63.4

mimośród: 0.74

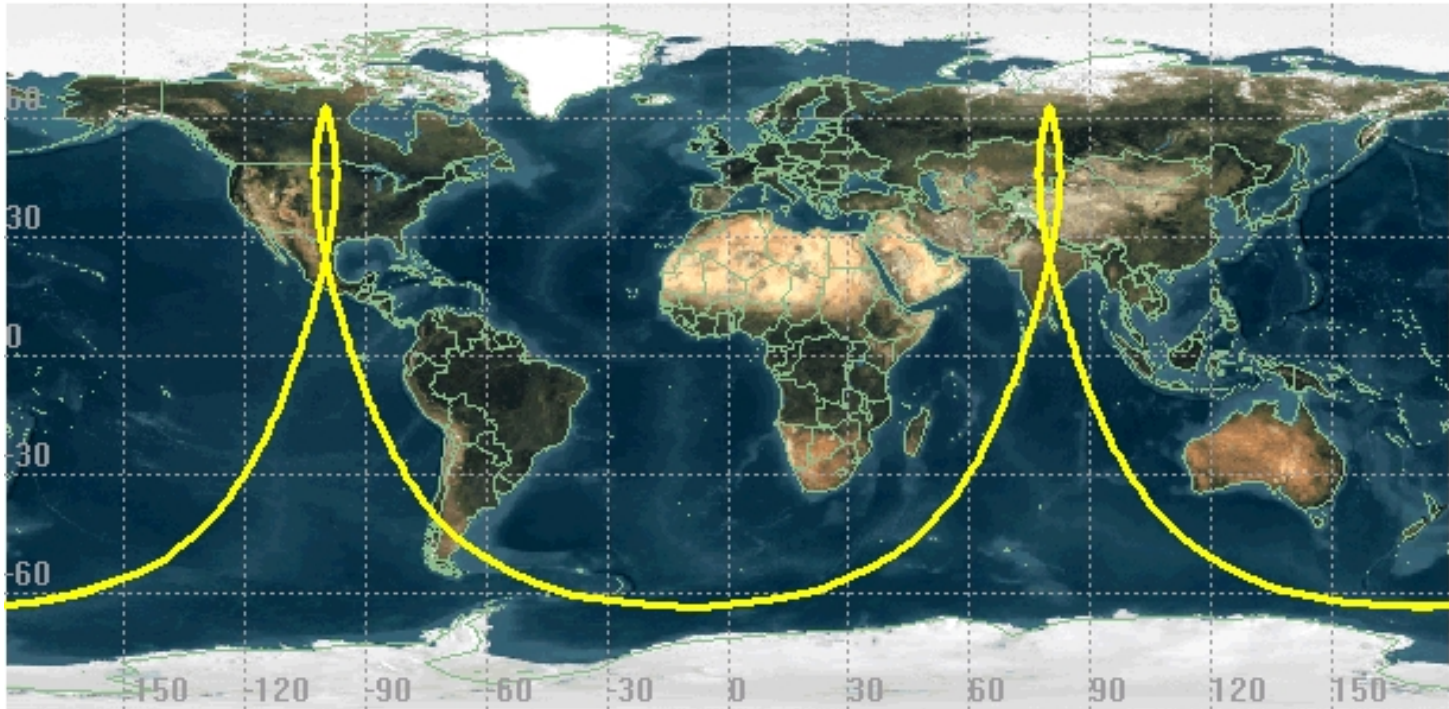
Nazwa: seria rosyjskich  
satelitów komunikacyjnych



Mołnia 1 (1964)



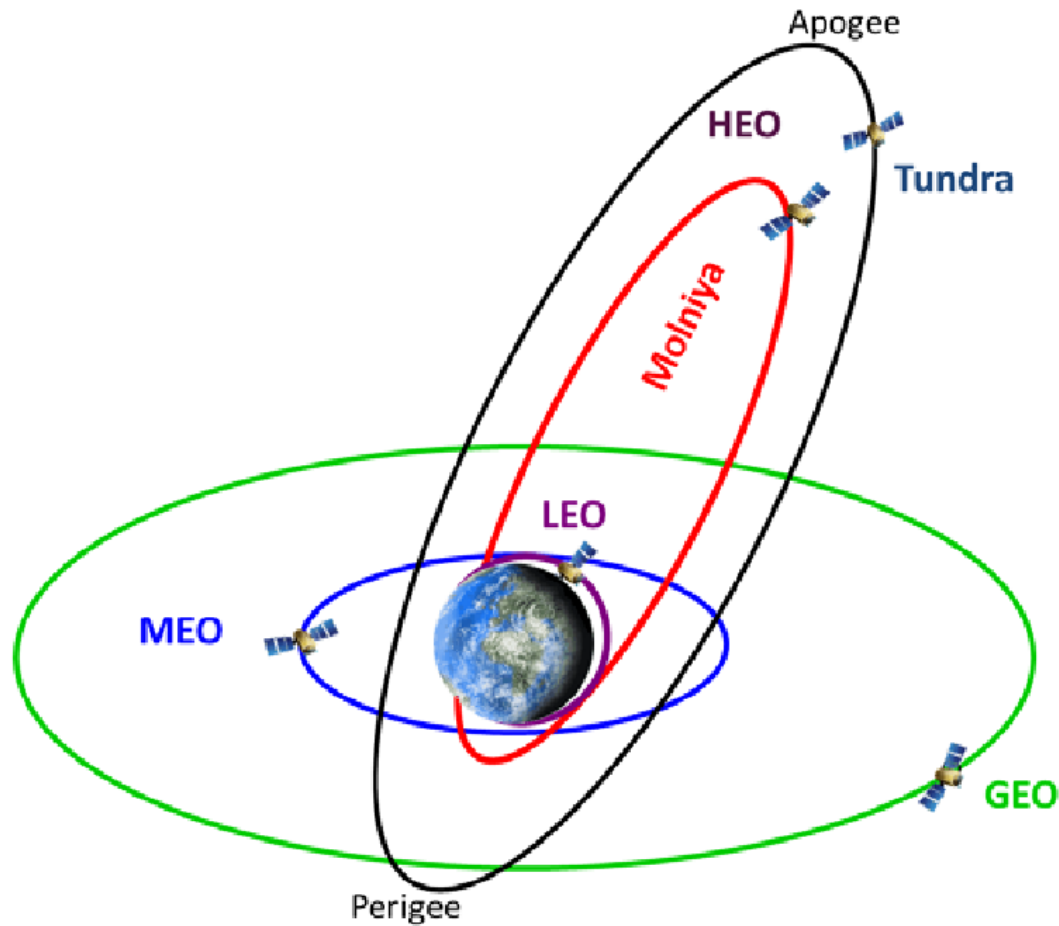
## Orbity Mołnia



Przykładowa ścieżka podsatelitarna satelity znajdującego się na orbicie typu Mołnia.

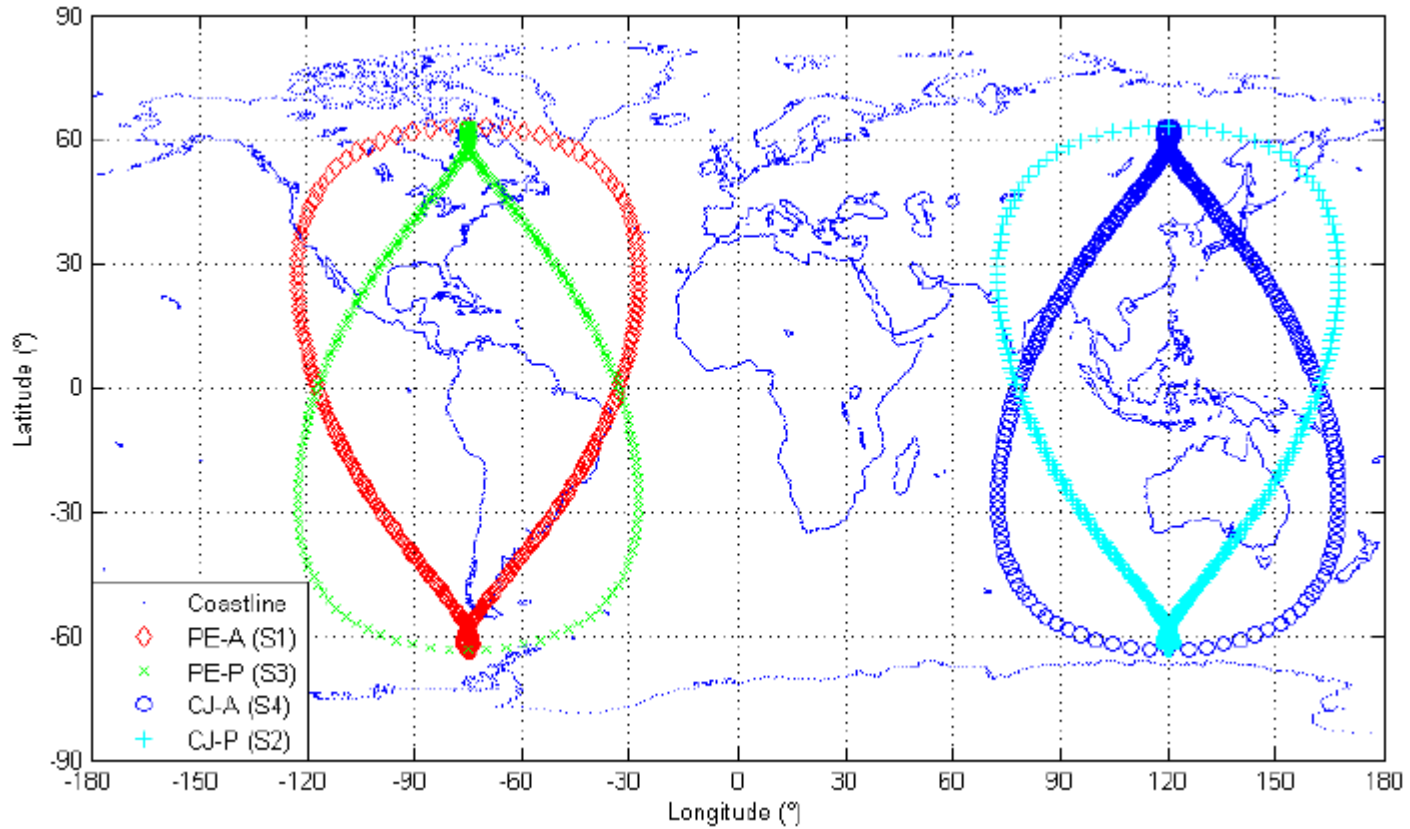


# Orbity Tundra



Orbit	Altitude [km]		
	Perigee	Apogee	
LEO: low earth orbit	200–2 000; normally: 600–1 000		
MEO: medium earth orbit	2 000–GEO; normally: 10 000–20 000		
GEO: geostationary orbit	35.786		
HEO: high elliptical orbit	Molniya (12 h)	~500	~40 000
	Tundra (24 h)	~24 000	~48 000

# Orbity Tundra



Ścieżki podsatelitarne planowanej amerykańskiej konstelacji satelitarnej:  
Earthquake Monitoring and Response from Space

## Podsumowanie

### Montaż:

- pozycja i orientacja satelity, efekt aberracji, star tracker,
- stabilizacja satelity po starcie: yo-yo despin
- stabilizacja satelity aktywna: silniki korekcyjne, koła reakcyjne,
- żyroskopy CMG, żagle słoneczne, elektromagnesy  
stabilizacja pasywna: gradient pola graw., magnesy stałe
- związek pomiędzy dokładnością określania orientacji satelity a dokładnością określania pozycji na Ziemi

### Kolektor:

- podstawowe parametry kolektora optycznego
- specyfika warunków kosmicznych
- PSF, spot diagrams, encircled energy
- funkcja transferu modulacji MTF, kontrast obrazu
- rozdzielczość kątowna na obiekcie i liniowa na obrazie
- rozdzielczość na Ziemi i jej limity (m.in. piksel kamery, seeing)
- rozmiar piksela i próbkowanie
- pole widzenia kątowne i liniowe, limity pola widzenia, horyzont satelity
- swath width, obserwacje w nadirze i inne
- telecentryczny układ optyczny i jego zalety

## Podsumowanie

### **Analizator analogowy:**

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

### **Detektor:**

- podstawowe parametry współczesnych detektorów optycznych
- podstawowe rodzaje detektorów, ich wady i zalety
- rodzaje migawek, liniowość detektora
- SNR, źródła szumu w detektorach, szybkość digitalizacji obrazu
- ilość fotonów rejestrowanych przez satelitę i wnioski z tego płynące
- rozdzielczość widmowa, rozdzielczość radiometryczna
- rozdzielczość czasowa a orbita satelity, ścieżki podsatelitarne
- revisit time, repeat cycle
- orbity heliosynchroniczne, orbity zsynchronizowane z Ziemią
- orbita keplerowska, orbita wokół spłaszczonej Ziemi
- nachylenie krytyczne, orbity zamrożone (Mołnia i Tundra)

### **Analizator cyfrowy:**

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