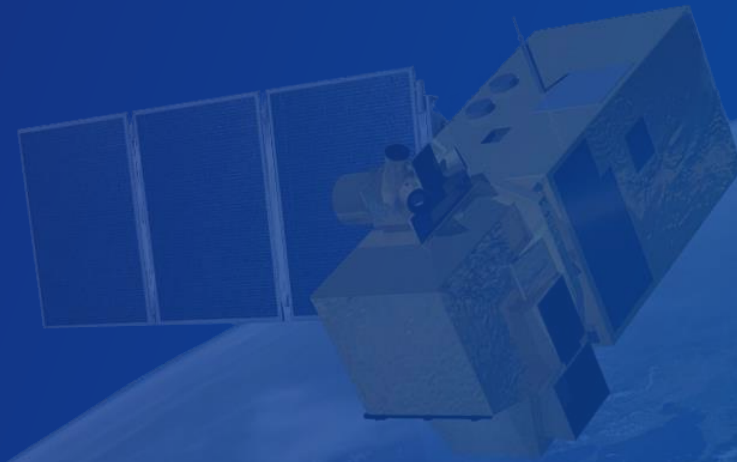
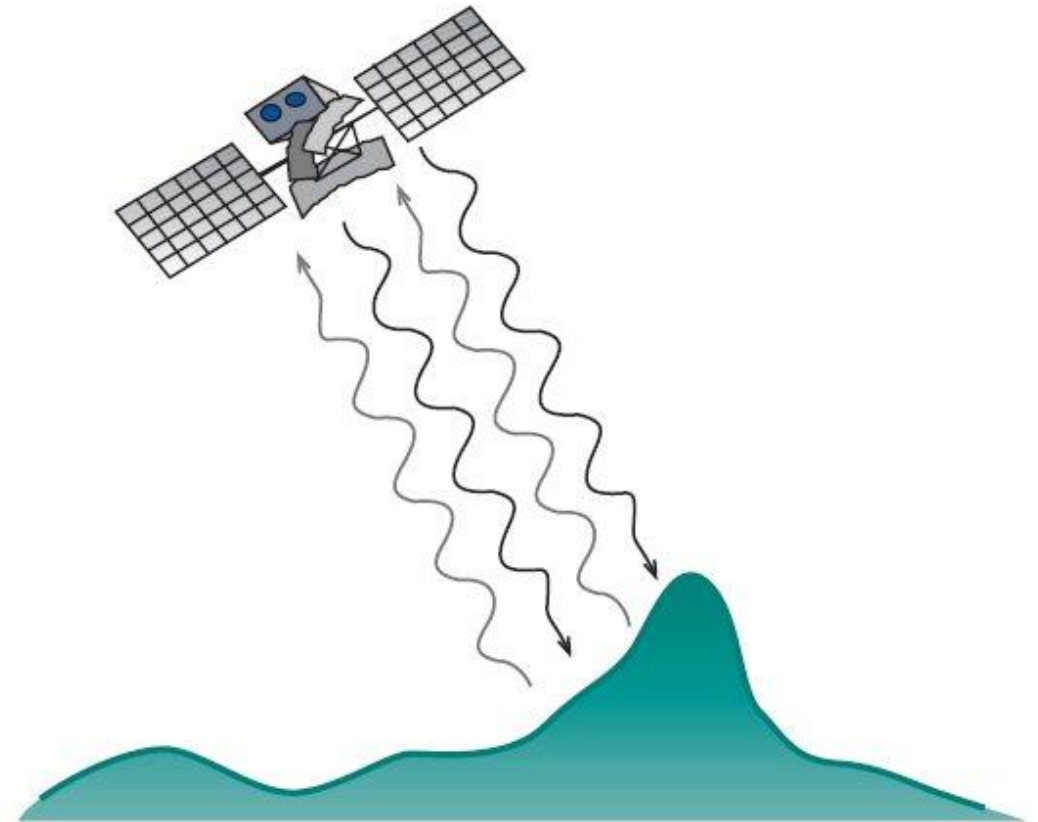


Satelitarne zobrazowania radarowe

dr hab. inż. Marek Mróz



- Wprowadzenie do mikrofal
- Podstawy obrazowania radarowego
- Przykłady wykorzystania obrazów radarowych i specyfiki ich interpretacji



Pasmo	Zakres częstotliwości	Przykłady aplikacji
VHF	300 KHz – 300 MHz	biomasa, ulistnienie, penetracja gruntu
P-Band	300 MHz – 1 GHz	wilgotność gleby, biomasa, penetracja gruntu
L-Band	1 GHz – 2 GHz	rolnictwo, leśnictwo, wilgotność gleby
C-Band	4 GHz – 8 GHz	oceany, rolnictwo
X-Band	8 GHz – 12GHz	rolnictwo, oceany, kartografia
Ku-Band	14 GHz – 18 GHz	glacjologia, pokrywa śnieżna
Ka-Band	27 GHz – 47 GHz	radar wysokiej rozdzielczości

Źródło: Younis M., 2018

<p>Trzęsienia Ziemi</p>	<p>Wulkany</p>	<p>Lądy i morza</p>
<p>Oceany</p>	<p>Środowisko</p>	<p>Deformacje terenu</p>
<p>Transport</p>	<p>Katastrofy naturalne</p>	<p>Rozpoznanie militarne</p>

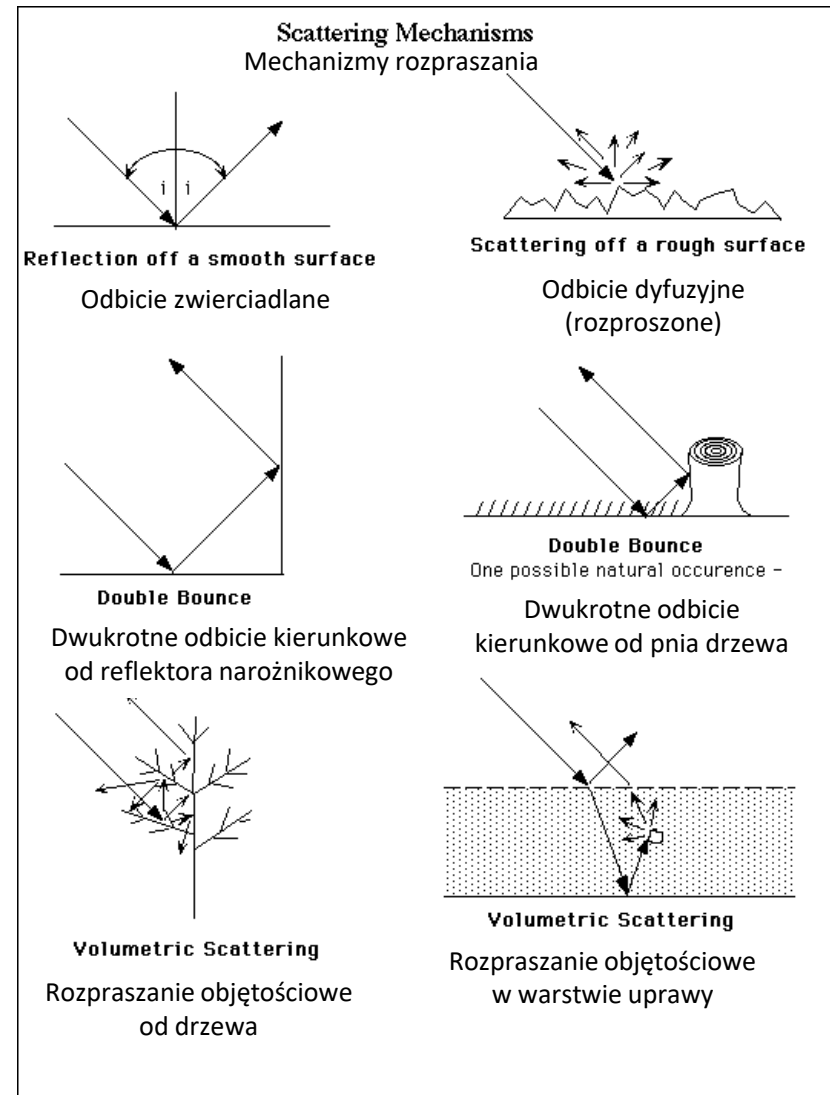
Źródło: ESA, 2012

Zalety mikrofal:

- przenikanie przez chmury,
- niezależność od oświetlenia słonecznego,
- wrażliwość na inne cechy środowiska niż barwa, temperatura, skład chemiczny, drgania cząsteczkowe czyli wykrywane metodami teledetekcji optycznej,
- penetracja środowiska.

Czynniki środowiskowe kształtujące moc rozpraszania mikrofal:

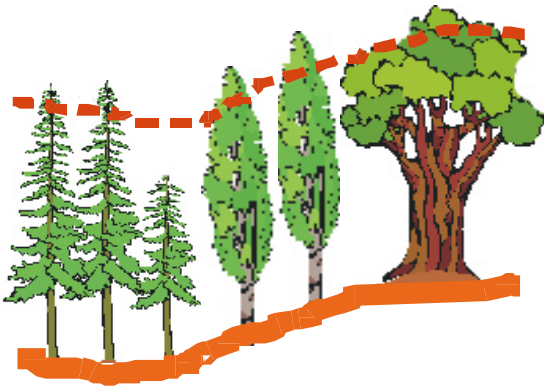
- orientacja powierzchni względem anteny,
- szorstkość powierzchni – parametr zależny od długości fali – kryterium Rayleigh'a,
- właściwości dielektryczne dla obiektów naturalnych – zawartość dipoli wody wolnej w glebie i roślinach.



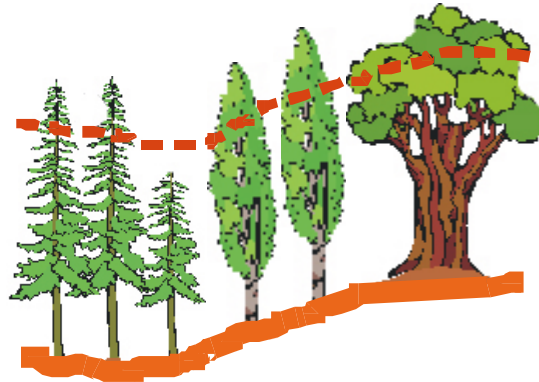
Źródło: ESA, 2002

Różnice penetracji środowiska

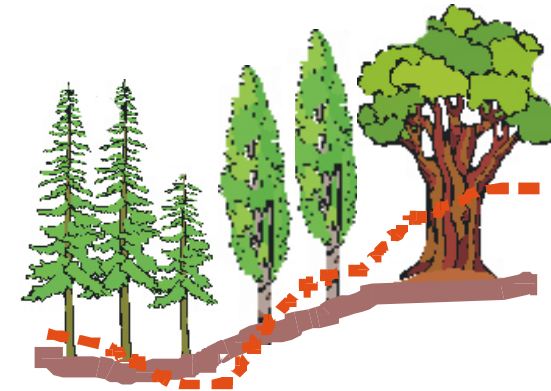
Pasmo X
2,4 – 3,75 cm



Pasmo C
3,75 – 7,5 cm



Pasmo L
15 – 30 cm



Źródło: Canada Centre for Remote Sensing (CCRS), 1996



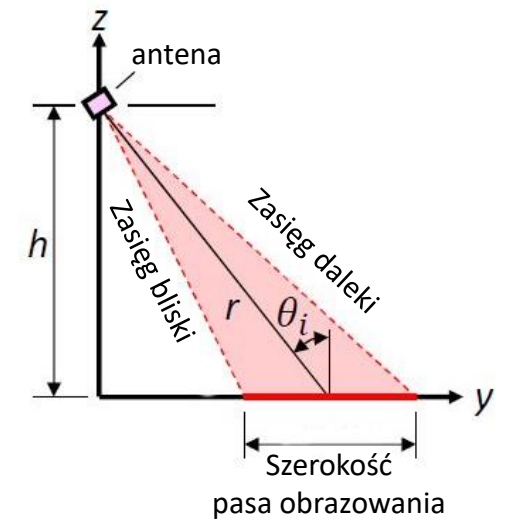
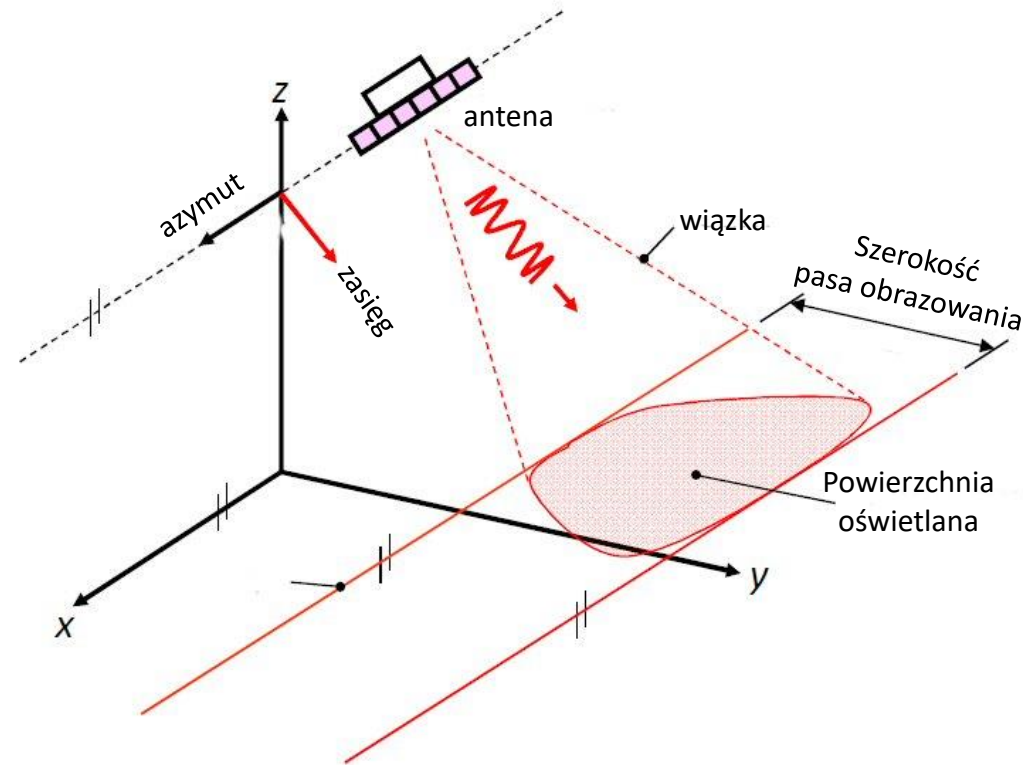
Źródło: Earth Observing System (EOS), 2019

RADAR – RADio Detection And Ranging

Radary obrazujące:

SLAR – Side-Looking Airborne Radar

- RAR – Real Aperture Radar
- SAR - Synthetic Aperture Radar



θ_i Kąt obrazowania

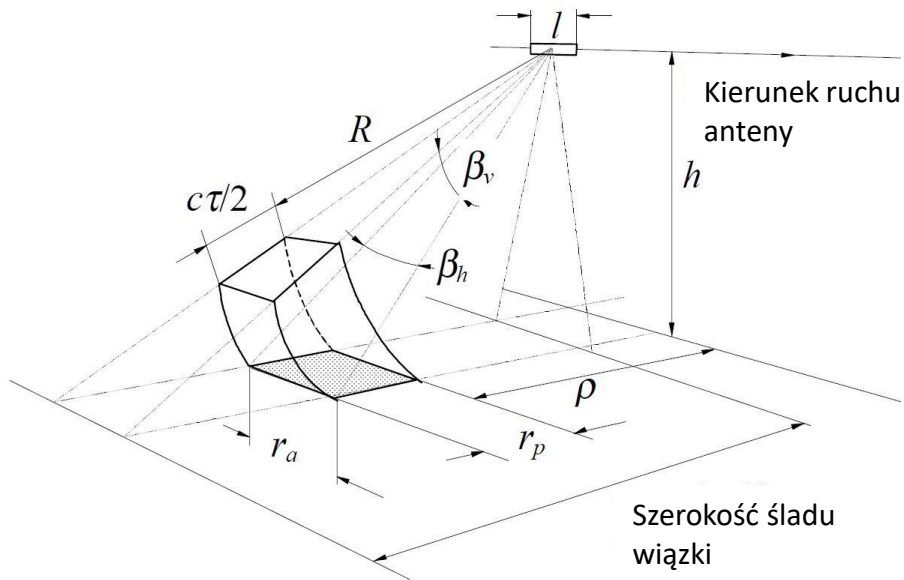
r Zasięg ukośny

Źródło: Younis M., 2018

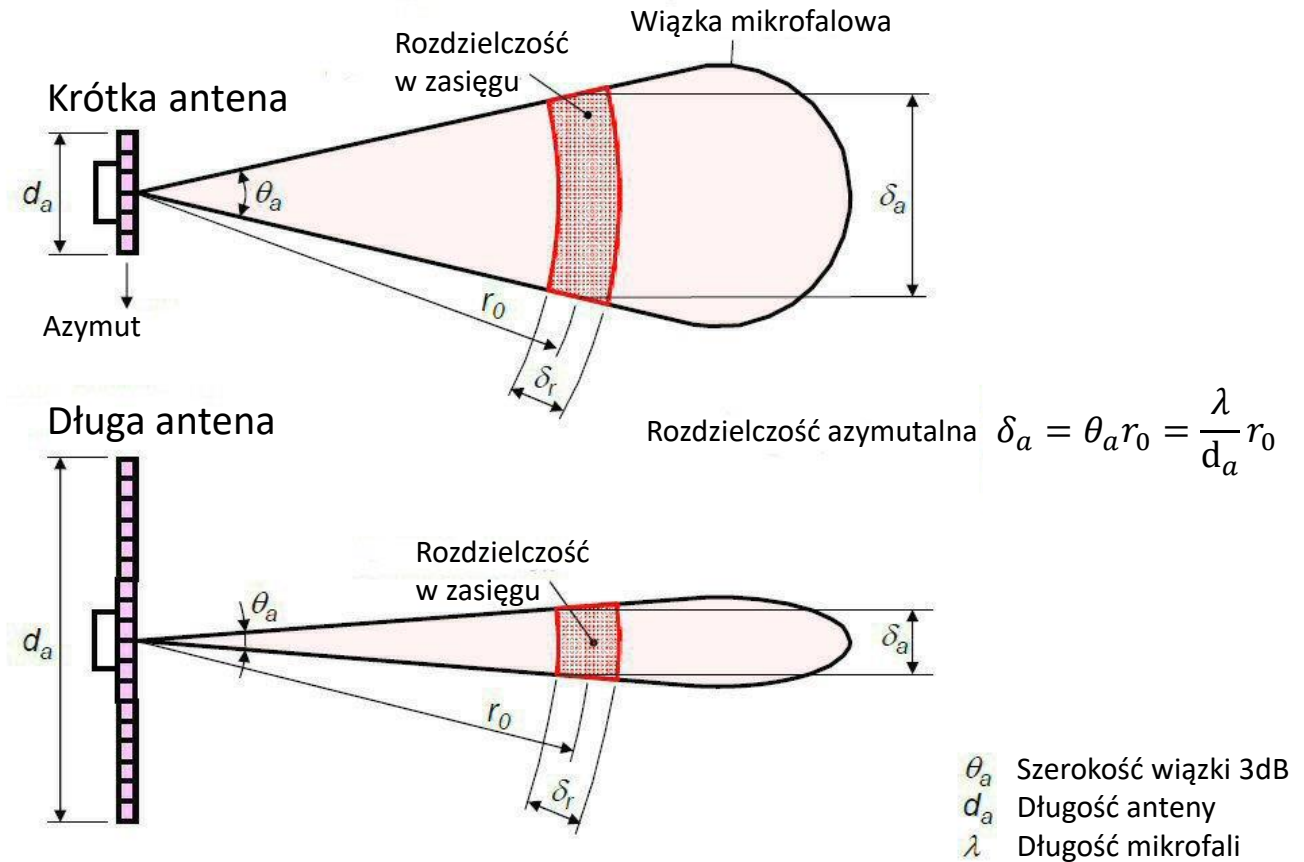
SLAR – Side-Looking Airborne Radar

- RAR – Real Aperture Radar

Radar SLAR o aperturze rzeczywistej



Widok z boku

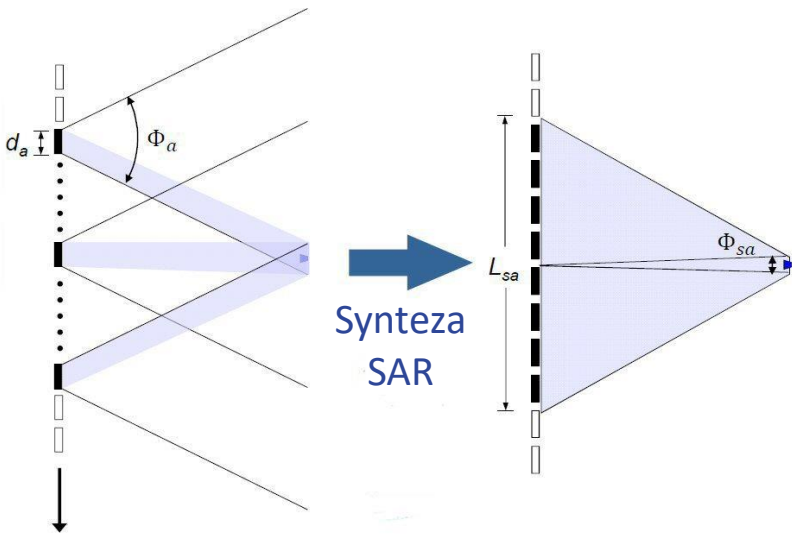


Widok z góry

Źródło: Younis M., 2018

SLAR – Side-Looking Airborne Radar

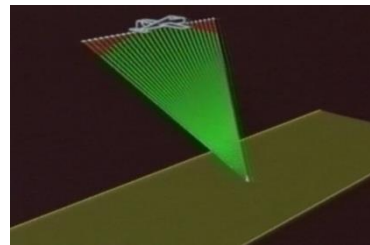
- SAR – Synthetic Aperture Radar



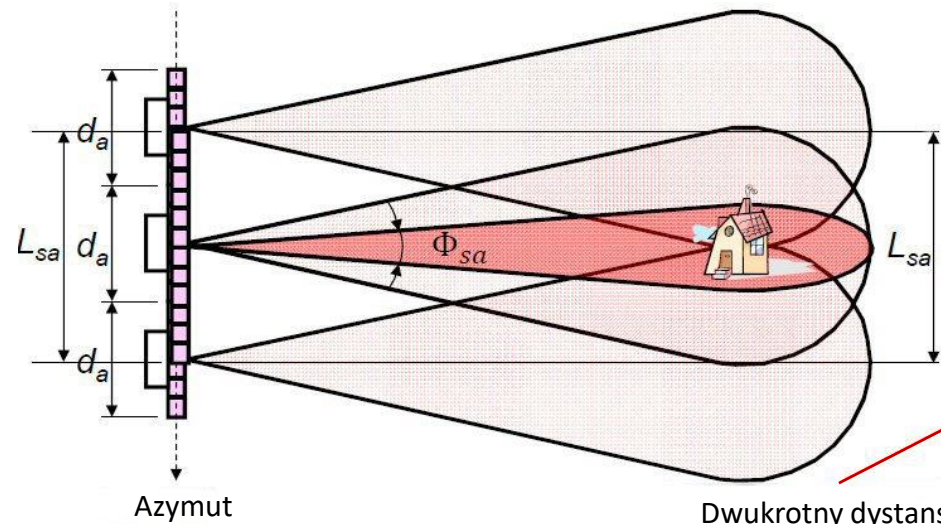
Koncepcja anteny syntetyzowanej

Założenia:

- System radarowy koherentny – zapis fazy
- Poruszająca się platforma nośna



Idea SAR – krótka antena fizyczna oraz zasada Dopplera i odpowiednie metody przetwarzania sygnału symulują długą antenę rzeczywistą.



Dwukrotny dystans radar - obiekt

Wiązka elementarna

$$\phi_a = \frac{\lambda}{d_a}$$

Długość anteny syntetyzowanej

$$L_{sa} = \phi_a \cdot r_0 = \frac{\lambda \cdot r_0}{d_a}$$

Szerokość wiązki syntetyzowanej

$$\phi_{sa} = \frac{\lambda}{2L_{sa}} = \frac{\lambda}{2 \frac{\lambda \cdot r_0}{d_a}}$$

Rozdzielczość anteny syntetyzowanej

$$\delta_{sa} = \phi_{sa} \cdot r_0 = \frac{\lambda}{2 \frac{\lambda \cdot r_0}{d_a}} \cdot r_0$$

$$\delta_{sa} = \frac{d_a}{2}$$

Dodatnie i ujemne przesunięcie dopplerowskie

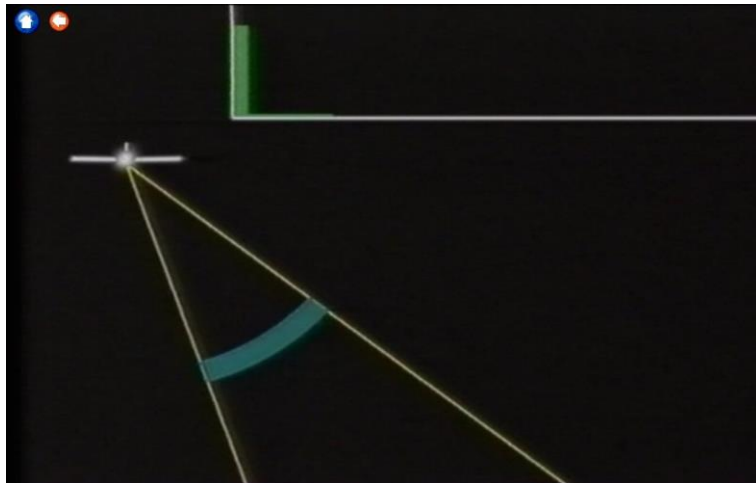


Źródło: Niemiecka Agencja Kosmiczna (DLR), 2015

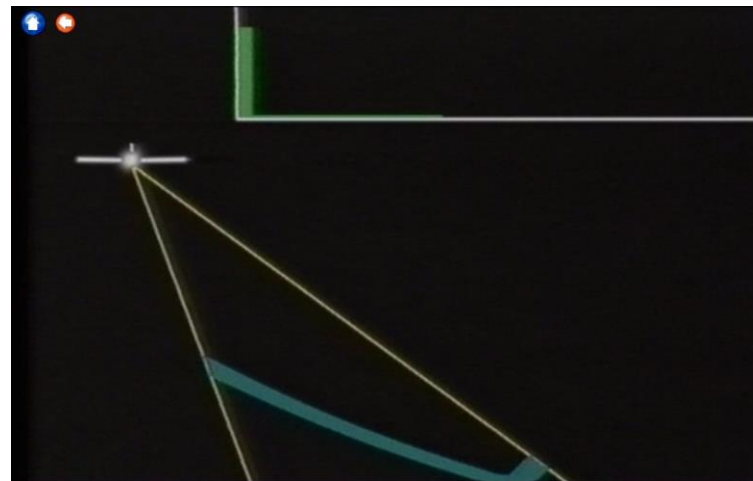
Jak pracują systemy SAR?

Mikrofale są emitowane w formie krótkich impulsów, pod pewnym kątem do nadiru, po odbiciu od powierzchni Ziemi zmieniają swoją fazę, amplitudę i polaryzację. Te składowe są zapisywane dla serii milionów impulsów, z których tworzony jest właściwy obraz.

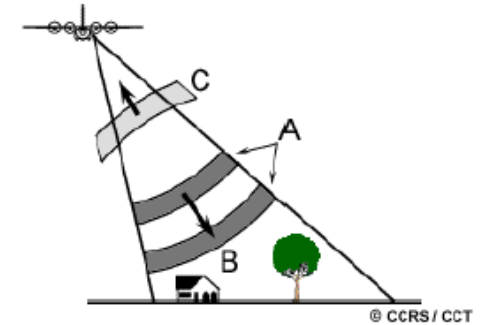
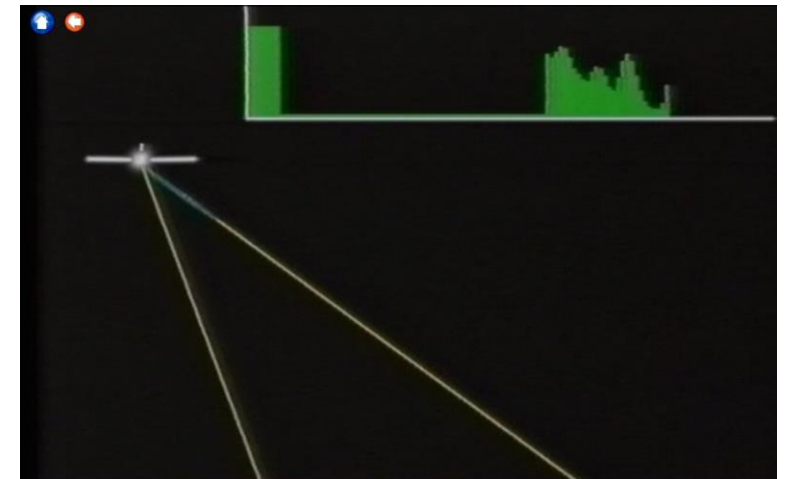
Emisja



Odbicie

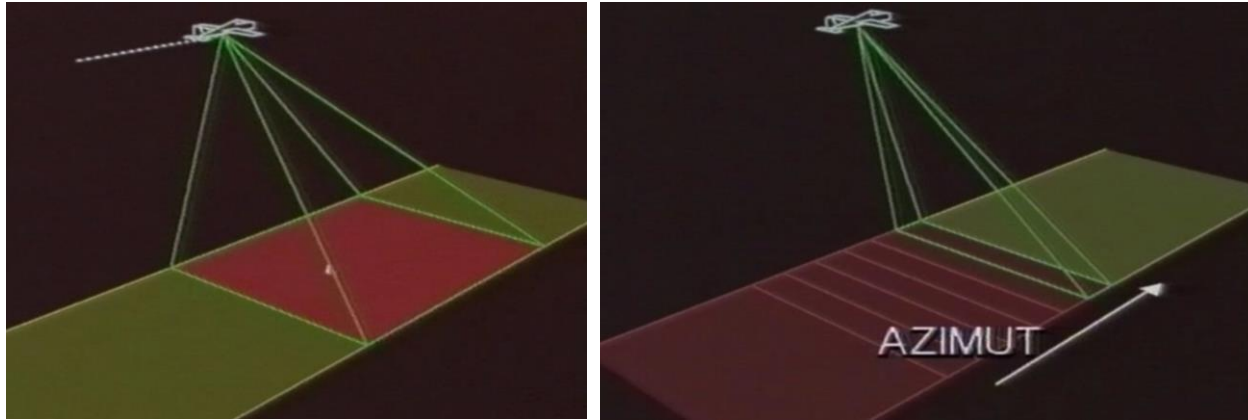


Rejestracja echa

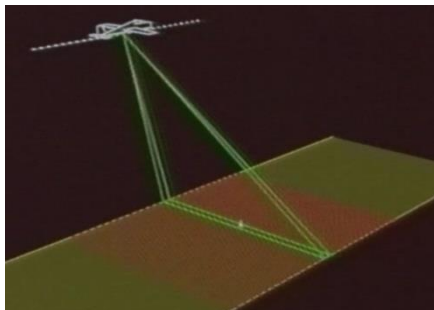


Źródło: Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), 1995

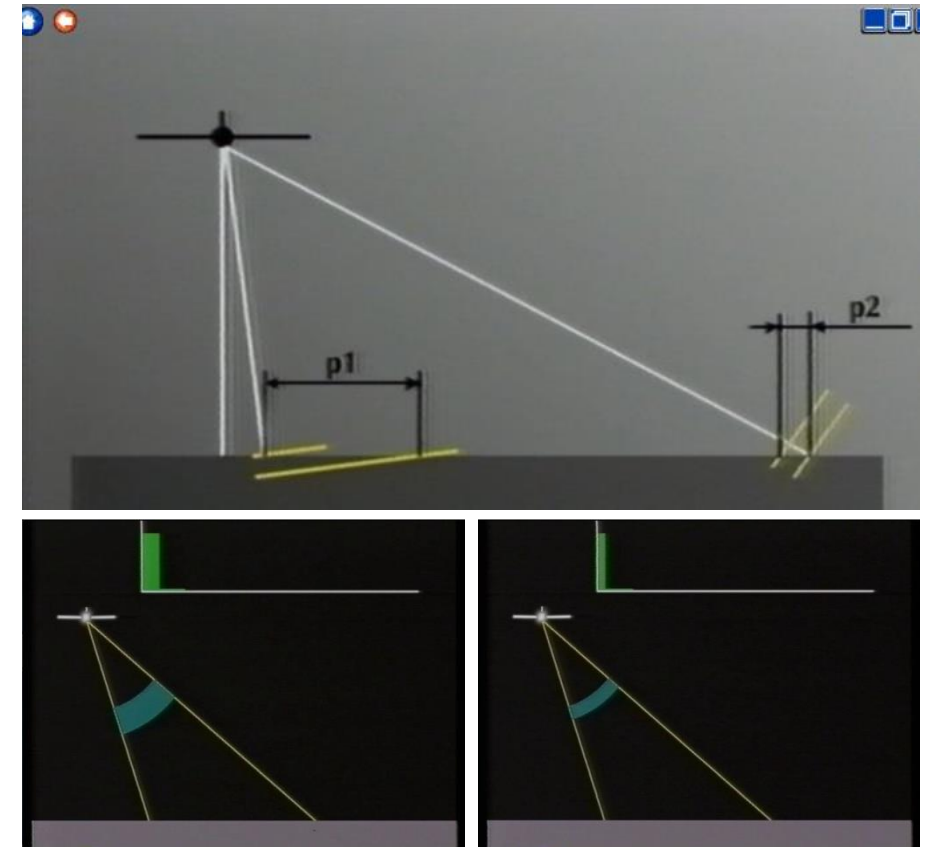
Przy antenie rzeczywistej (rzeczywistej aperturze) rozdzielczość azymutalna jest tym większa im antena jest dłuższa.
Analogia do teleskopów: im dłuższa ogniskowa, tym lepsza rozdzielczość



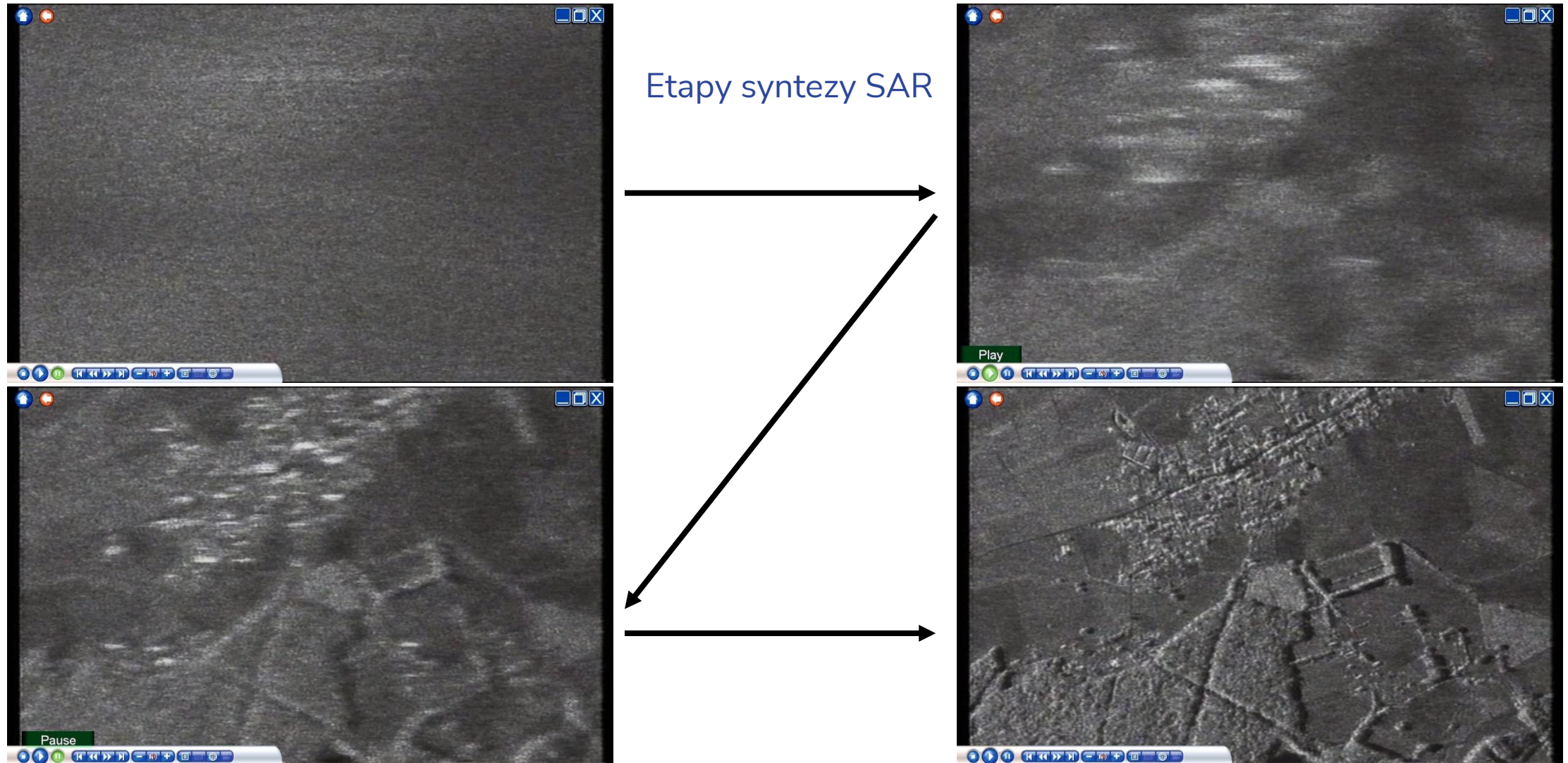
Zdolność rozdzielcza SAR - w kierunku azymutalnym $L = D/2$
gdzie: D – długość anteny rzeczywistej (bez względu na odległość w zasięgu „R”)



Zdolność rozdzielcza SAR - w kierunku zasięgu zależy od kąta obrazowania i długości impulsu (czasu trwania).



Źródło: CNES, 1995



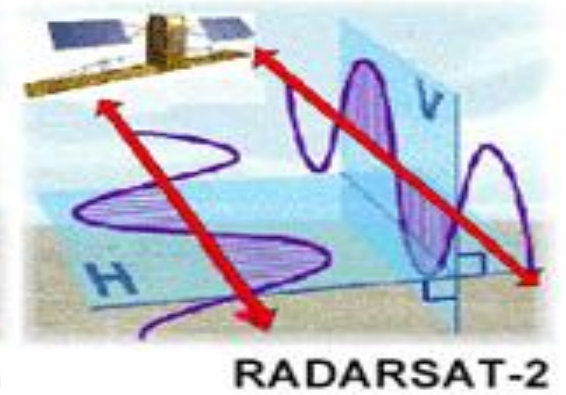
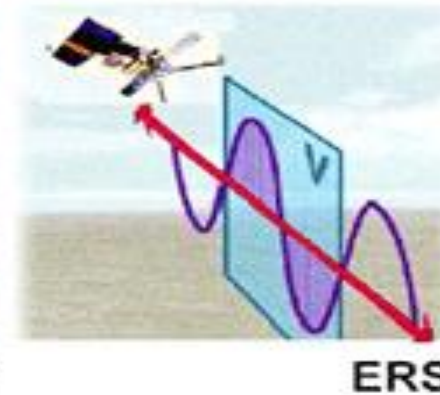
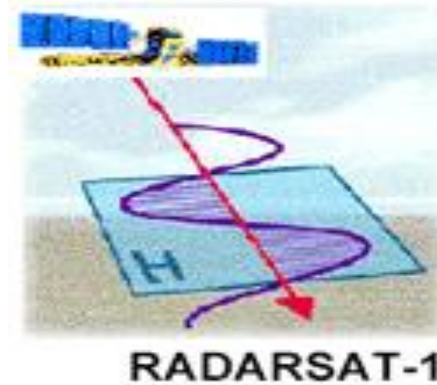
Źródło: CNES, 1995

- Polaryzację fali określa kierunek drgań wektora pola elektrycznego.

Jeżeli system SAR emituje fale spolaryzowane w płaszczyźnie rozchodzenia się fali, to nazywamy je spolaryzowanymi pionowo (V), jeżeli w płaszczyźnie prostopadłej do niej to mówimy o polaryzacji poziomej (H).

- Wyróżniamy następujące układy polaryzacji przy emisji i odbiorze mikrofal:

- HH – emisja pozioma, odbiór poziomy;
- VV – emisja pionowa, odbiór pionowy;
- HV – emisja pozioma, odbiór pionowy;
- VH – emisja pionowa, odbiór poziomy.

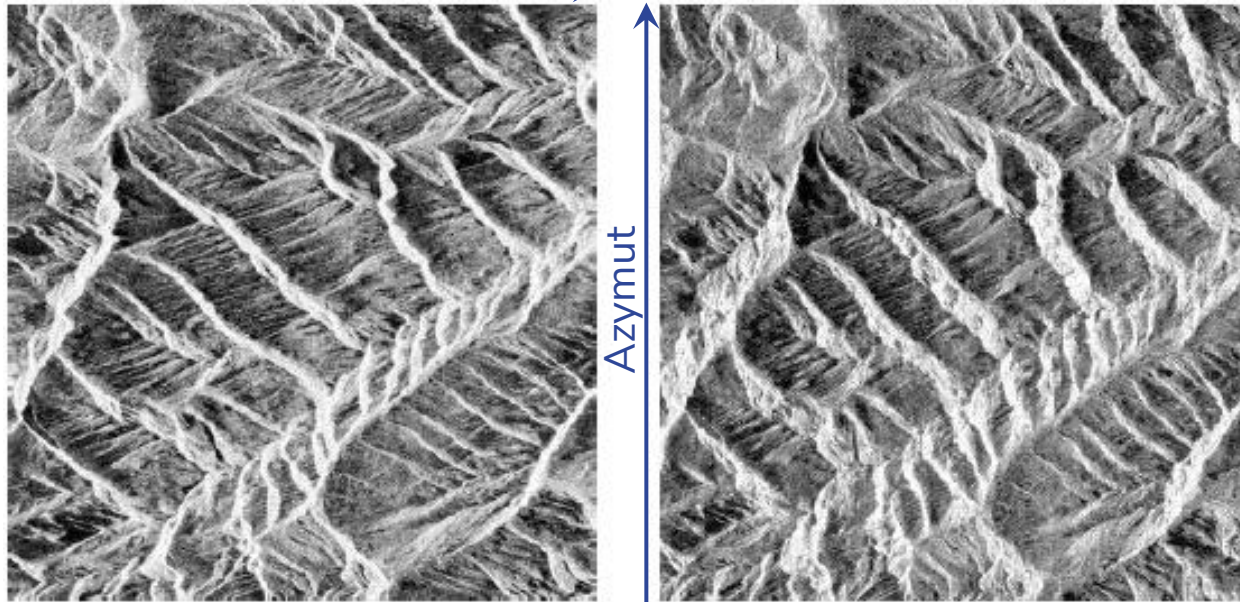


- W konsekwencji możliwe jest otrzymywanie różnych obrazów lub par obrazów w zależności od użytej technologii SAR:
 - pojedynczo spolaryzowany – HH lub VV (lub ewentualnie HV lub VH);
 - podwójnie spolaryzowany – HH i HV, VV i VH, lub HH i VV;
 - naprzemiennie spolaryzowany – HH i HV naprzemiennie z VV i VH;
 - polarymetryczny – HH, VV, HV i VH.

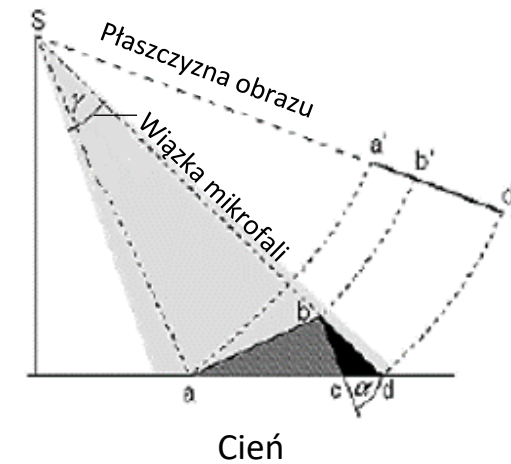
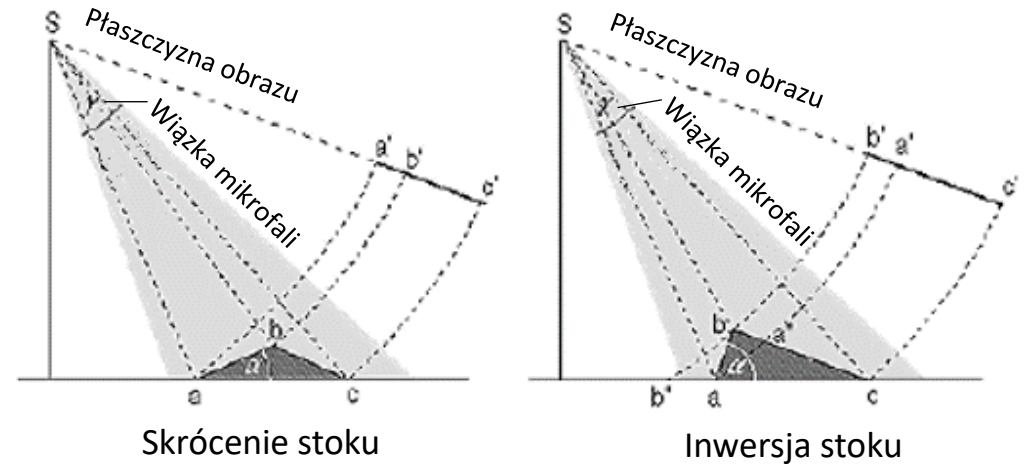
Źródło: ESA, 2002

Zniekształcenia geometryczne powodowane wybieraniem bocznym w terenach górzystych (dwa różne kąty obrazowania)

Kierunek wybierania →



Zniekształcenie geometryczne



Źródło: ESA, 2002

Przykłady różnej konfiguracji obrazowania SAR

Parametry obrazowania:

- częstotliwość,
- polaryzacja – wg. omówionych układów,
- kąt wybierania od 15 do 50 stopni.

Od długości fali, kąta padania i polaryzacji zależy głębokość wnikania w środowisko, a więc zdolność poznawania jego struktury i właściwości.

Pasma – X 8-12 GHz 3.75-2.50 cm	Pasma – C 4-8 GHz 7.5-3.75 cm	Pasma – S 2-4 GHz 15-7.5 cm	Pasma – L 1-2 GHz 30-15 cm	Pasma – P 0.3-1 GHz 100-30 cm
---------------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

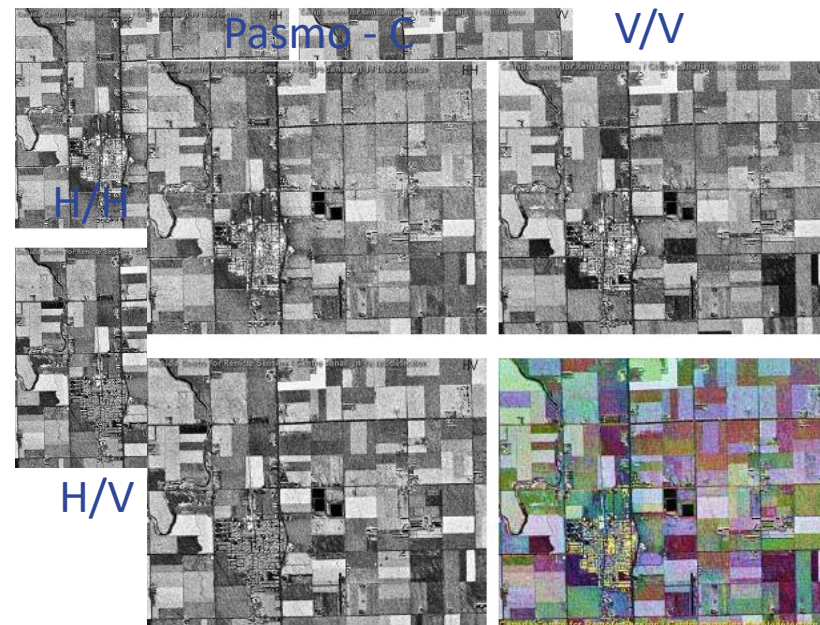


Pasma - C



Pasma - L

Polaryzacja V/V

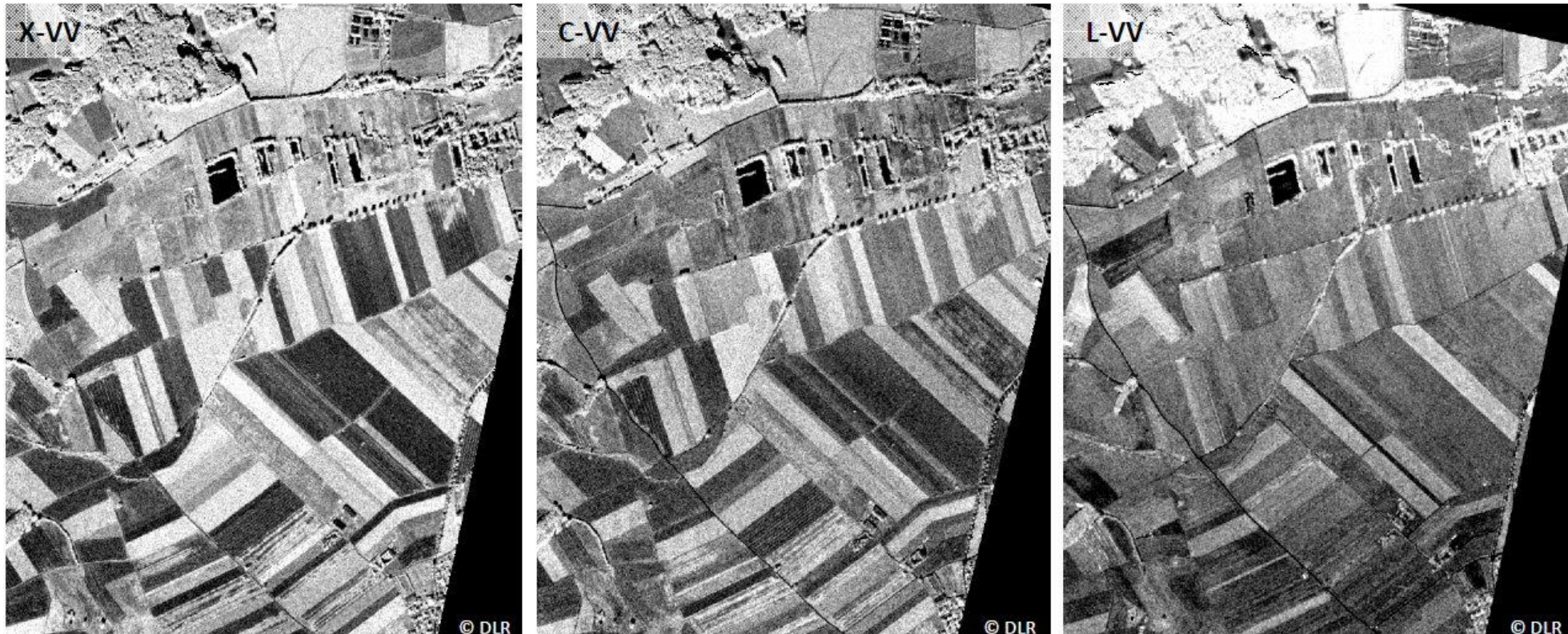


Kompozycja RGB

Źródło: CCRS, 1996

Przykłady różnej konfiguracji obrazowania SAR

Porównania parametrów obrazowania najlepiej dokonywać na przykładzie radarów lotniczych wysokiej rozdzielczości generujących obrazy w różnych polaryzacjach i pasmach o tej samej wielkości piksela (rozdzielczości geometrycznej)

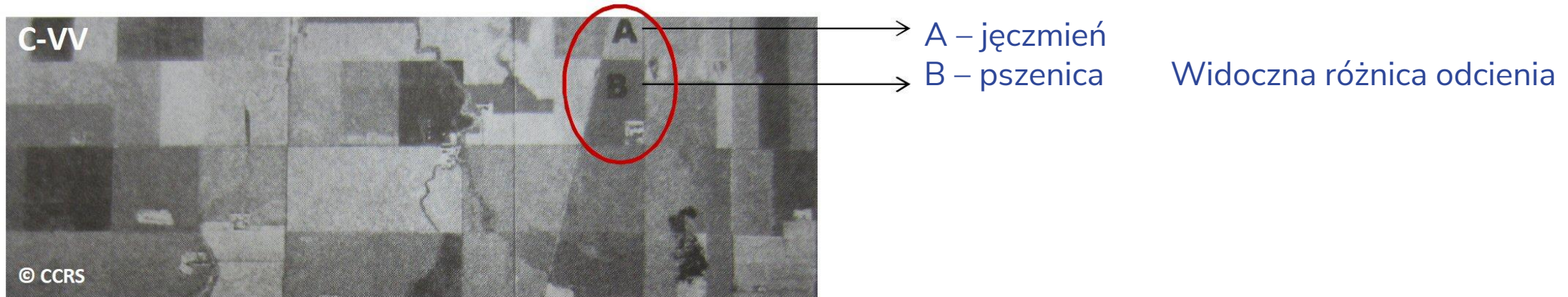


Pasma X, krótsze niż C i L dostarcza więcej informacji o rodzajach upraw, pasmo L penetrujące głębiej dostarcza więcej informacji o wilgotności gleby i roślin, niż o ich typach.

Źródło: Riedel, 2014

Przykłady różnej konfiguracji obrazowania SAR

Mikrofale o polaryzacji pionowej bardziej oddziałują z pionowymi elementami roślin, np. łodygi i źdźbła (większe tłumienie), a przy polaryzacji poziomej wnikają w uprawę i bardziej odzwierciedlają szorstkość i wilgotność gleby pod roślinami.



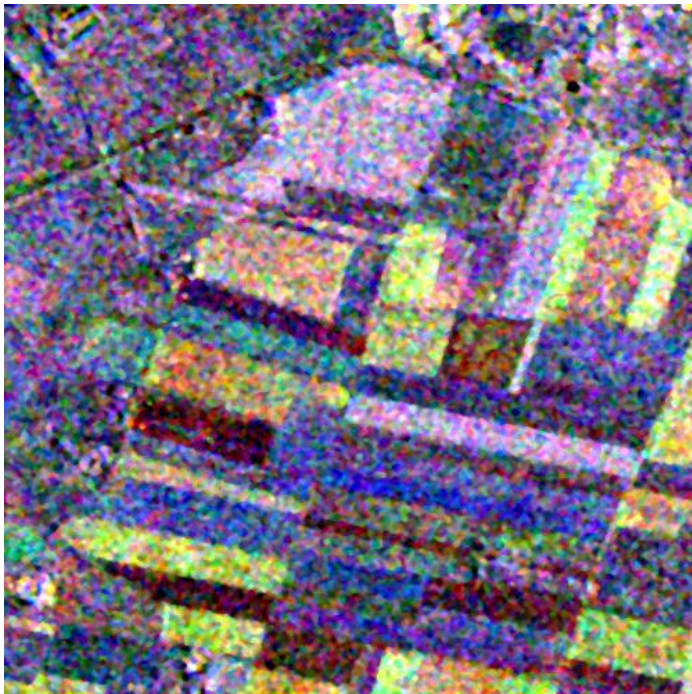
Źródło: Riedel, 2014

Przykłady różnej konfiguracji obrazowania SAR

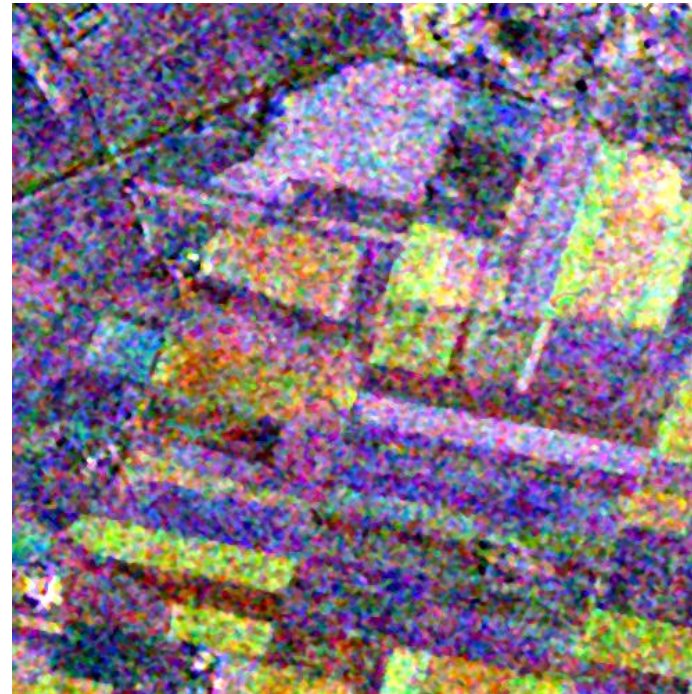
Przy naprzemiennej lub polarymetrycznej rejestracji możemy dysponować krzyżowym układem polaryzacji VH lub HV, który przynosi dodatkowe informacje i pozwala na wyróżnianie, np. specyficznych typów szaty roślinnej, w której nie dominują elementy pionowe. Przykładowo: rzepak w fazach dojrzewania i zasychania.

Kompozycje barwne RGB trzech obrazów TerraSAR-X zarejestrowanych w dniach: 18-07-2015, 15-06-2015 i 25-05-2015

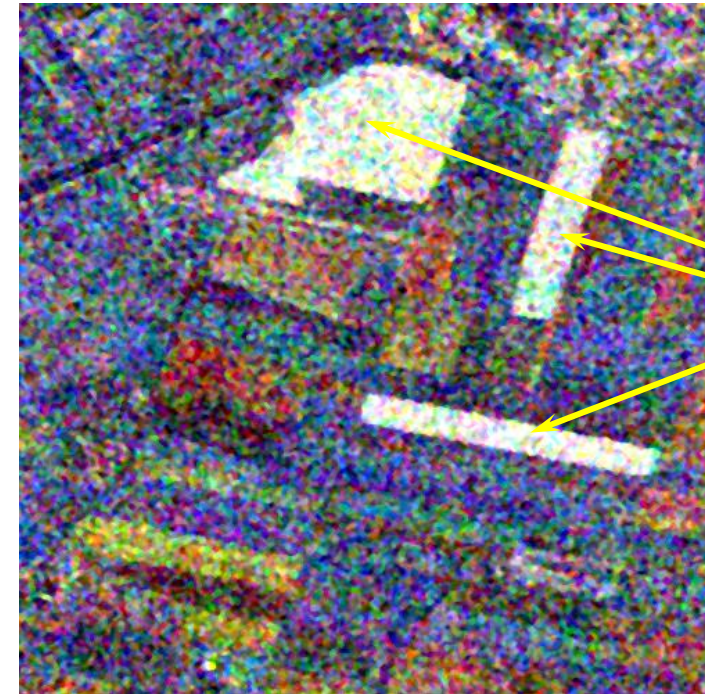
VV



HH



VH



Uprawy
rzepaku

Źródło: Mleczko M., Mróz M., 2015

Polarymetryczne systemy SAR

Lotnicze



AES1
AeroSensing (D)



AIRSAR
NASA / JPL (USA)



DOSAR
EADS / Dornier GmbH (D)



ESAR
DLR (D)



EMISAR
DCRS (DK)



MEMPHIS / AER II-PAMIR
FGAN (D)



PHARUS
TNO - FEL (NL)



PISAR
NASDA / CRL (J)



RAMSES
ONERA (F)



RENE
UVSQ / CETP (F)

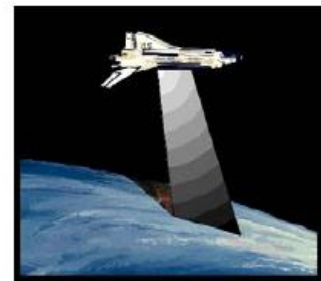


STORM
UVSQ / CETP (F)



SAR580
Environnement Canada (CA)

Kosmiczne



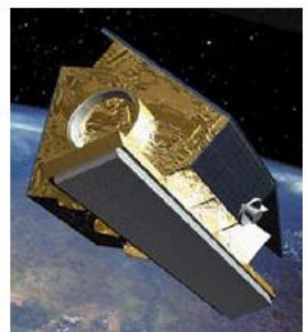
SIR-C
NASA / JPL (USA)



ENVISAT / ASAR
ESA (EU)



ALOS / PALSAR
NASDA / JAROS (J)



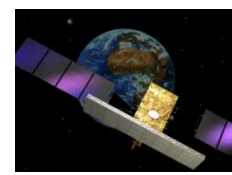
TERRASAR
BMBF / DLR / ASTRIUM



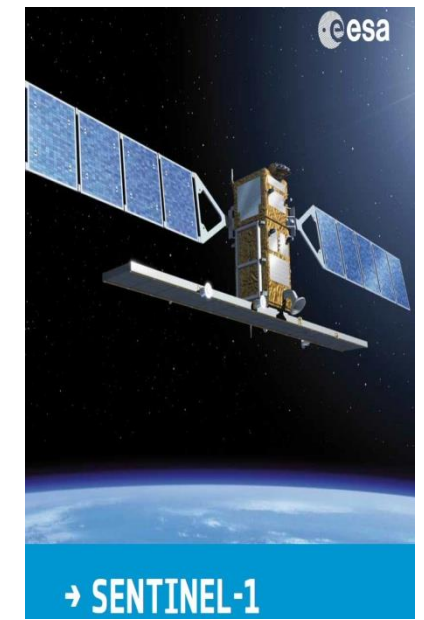
RADARSAT 2
CSA - MDA (CA)



TanDEM-X

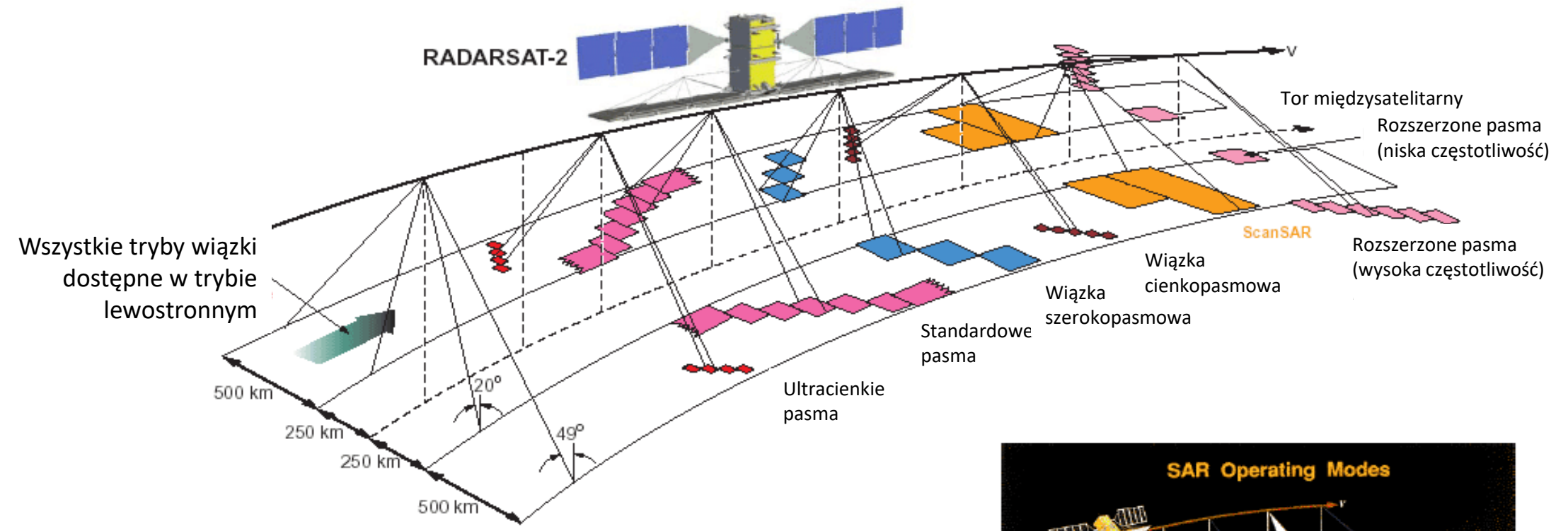


COSMO Skymed

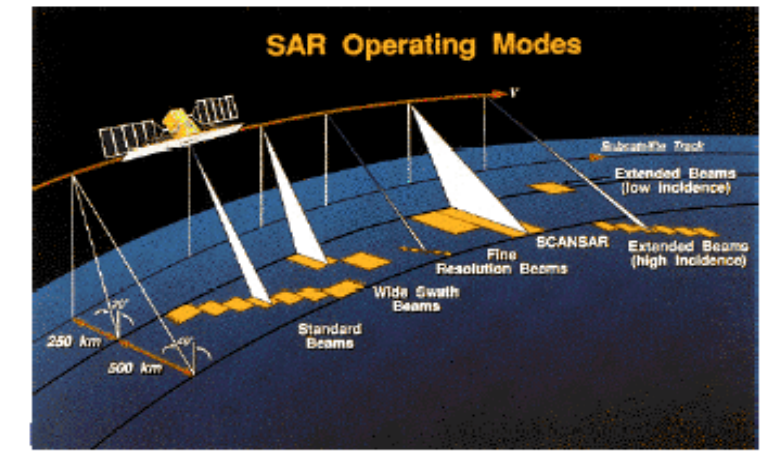


SENTINEL-1

Polarymetryczne systemy SAR

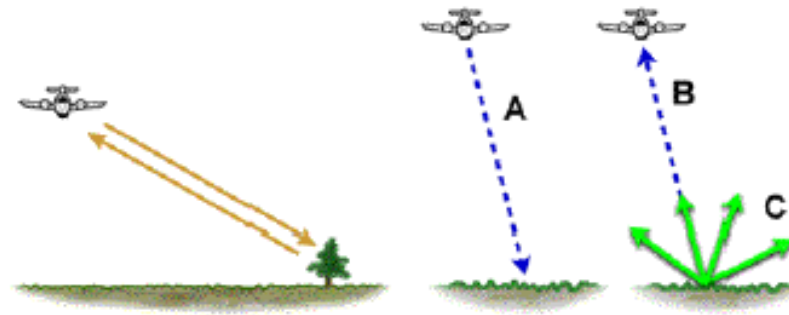


Współczesne systemy SAR (Radarsat-2, TanDEM-X, PALSAR-2) oferują bardzo szeroką gamę produktów obrazowych o zróżnicowanych rozdzielczościach geometrycznych, układach polaryzacyjnych, kątach obrazowania i jakości radiometrycznej.



Źródło: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE Canada), 2019

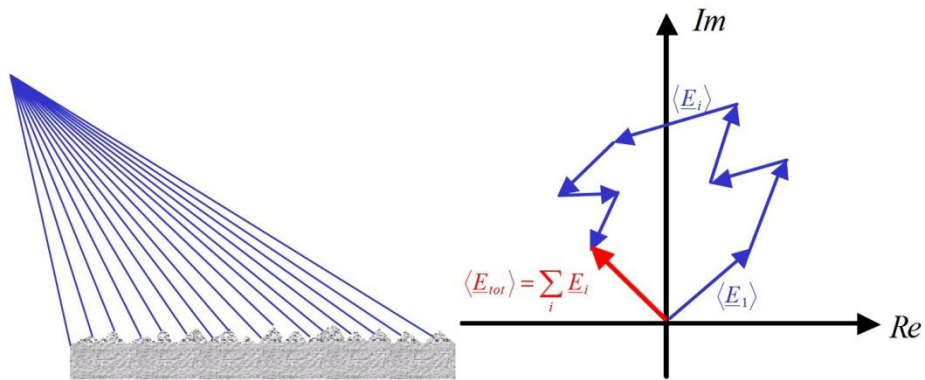
Radary SAR jest radarem monostatycznym.
Sygnał powracający jest tylko niewielką częścią sygnału emitowanego.



- Rejestracja fali powracającej jest rejestracją sygnału w formie liczby zespolonej: (I, Q)
- Technologicznie rejestracja odbywa się w dwóch kanałach:
 - synfazowym (I) $I = A \cdot \cos \Phi$
 - kwadraturowym (Q) $Q = A \cdot \sin \Phi$

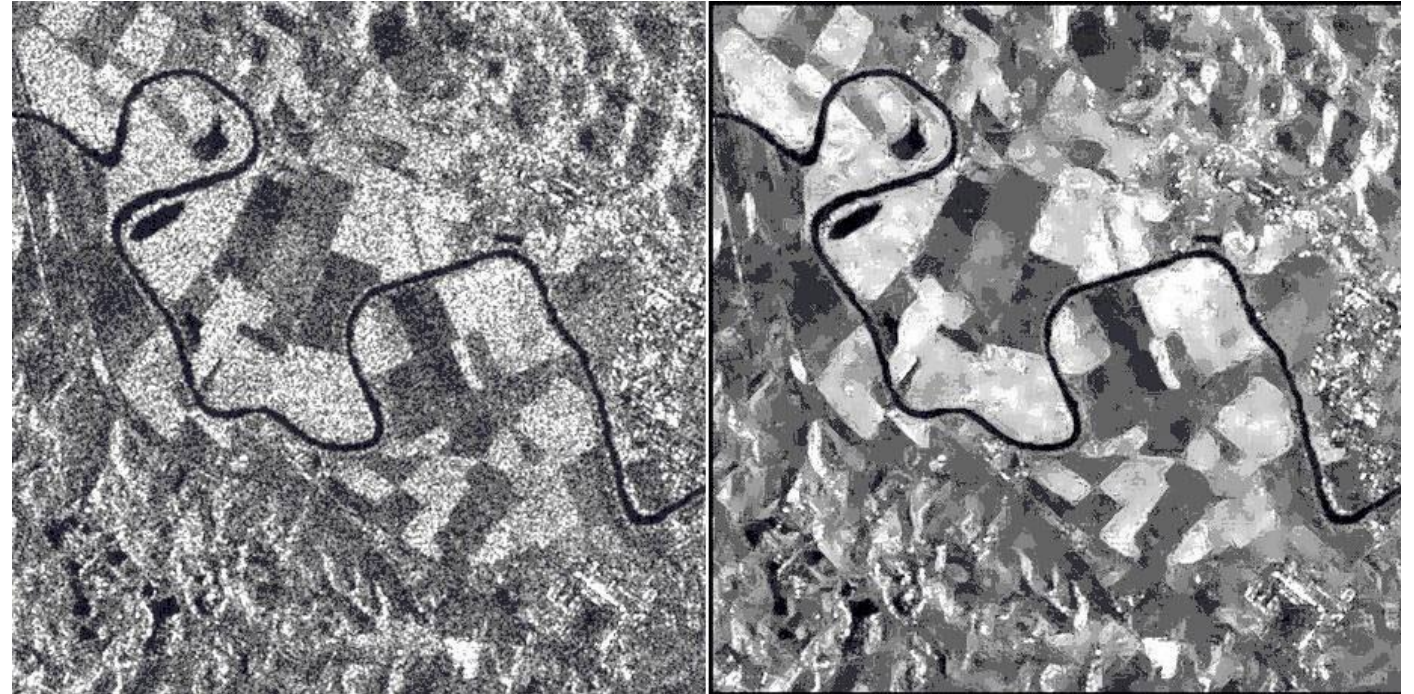
A – amplituda, Φ - faza
- Z komponentów I i Q oblicza się łatwo amplitudę i fazę, które są podstawowymi wielkościami dostępnymi i bardziej zrozumiałymi dla użytkownika obrazów.

Plamkowanie/cętkowanie = speckle
 Ziarnisty wzorec tekstury



Zasada koherentnego sumowania fal

Obraz radarowy oryginalny i filtrowany filtrem GammaMAP



- Filtracja ziarnistości obrazów radarowych jest niezbędna przed wykonaniem np. klasyfikacji automatycznych.
- Dobór filtrów musi być kompromisem między siłą redukcji ziarnistości a stopniem zatarcia konturów obiektów.
- Do filtracji obrazów radarowych stosuje się filtry adaptatywne (np. Lee, Frost, GammaMAP, ...)

Źródło: ESA, 1995

Filtracja wieloczasowa uwzględnia losowość zjawiska cętkowania/plamkowania związaną z losowością orientacji elementarnych powierzchni rozpraszających, ale przy założeniu mniejszej zmienności właściwości dielektrycznych i strukturalnych pokrycia terenu.

Obraz radarowy niefiltrowany

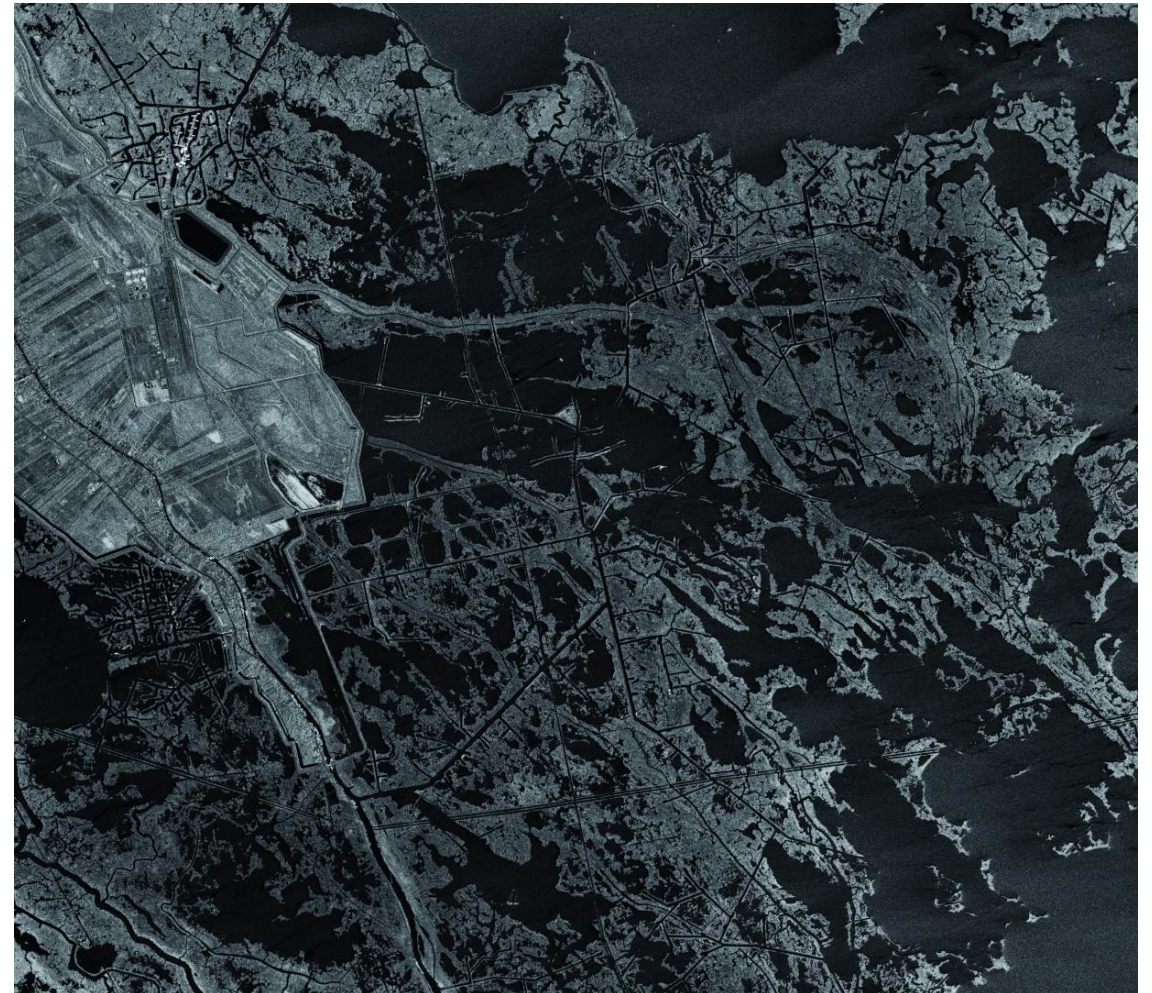


Obraz radarowy filtrowany
poprzez wieloczasowe
uśrednianie

Źródło: Mangolini M., 1995

Delta rzeki Missisipi - USA

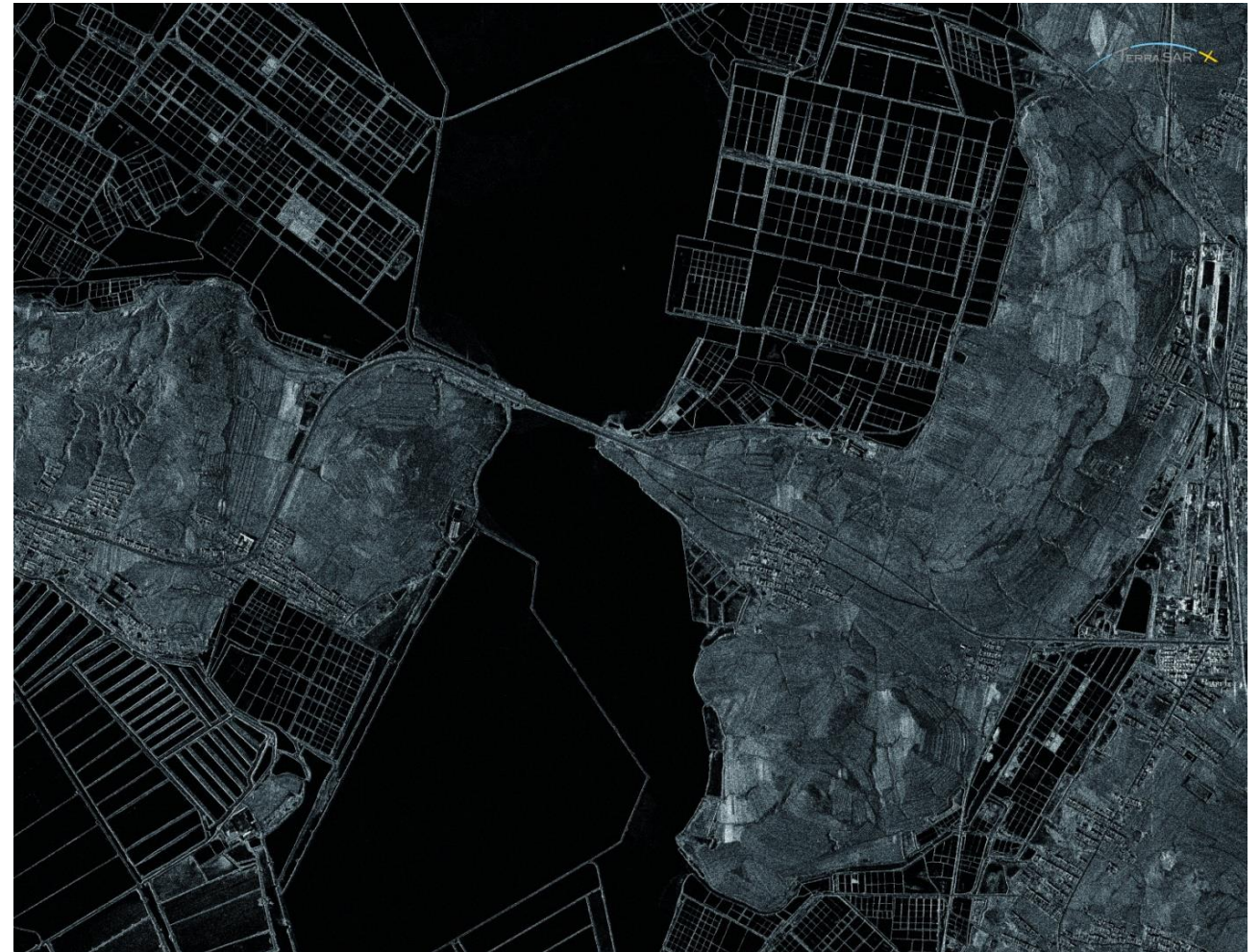
Obraz z satelity TerraSAR-X



Źródło: Niemiecka Agencja Kosmiczna DLR i EADS Astrium, 2007

Obszar produkcji krewetek - Chiny

Obraz z satelity TerraSAR-X



Źródło: DLR, EADS Astrium, 2007

Wykrywanie plam ropy lub oleju na morzach –
Zatoka Meksykańska

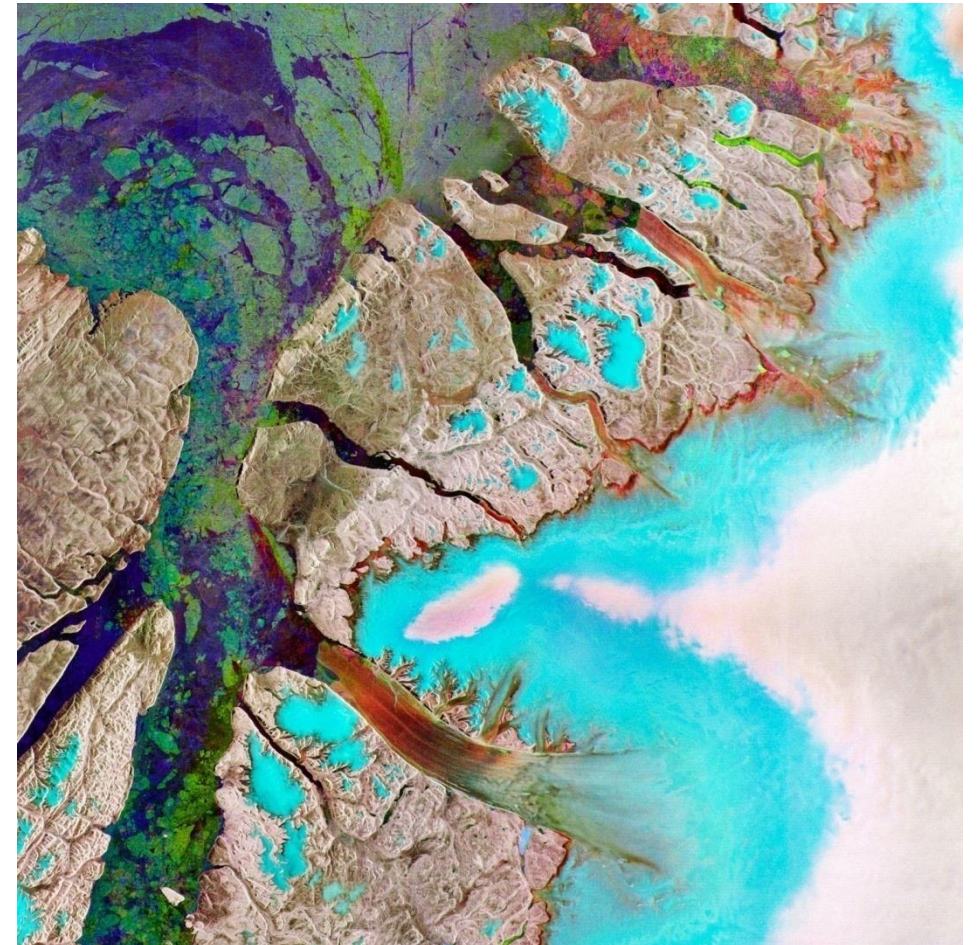
Obraz z satelity TerraSAR-X



Źródło: DLR, 2010

Topnienie lodu - Grenlandia

Kompozycja barwna trzech obrazów radarowych, sat. ERS-1



Źródło: ESA, 2002

Wiosenne rozlewiska Biebrzy w okolicach
Osowca – Biebrzański Park Narodowy

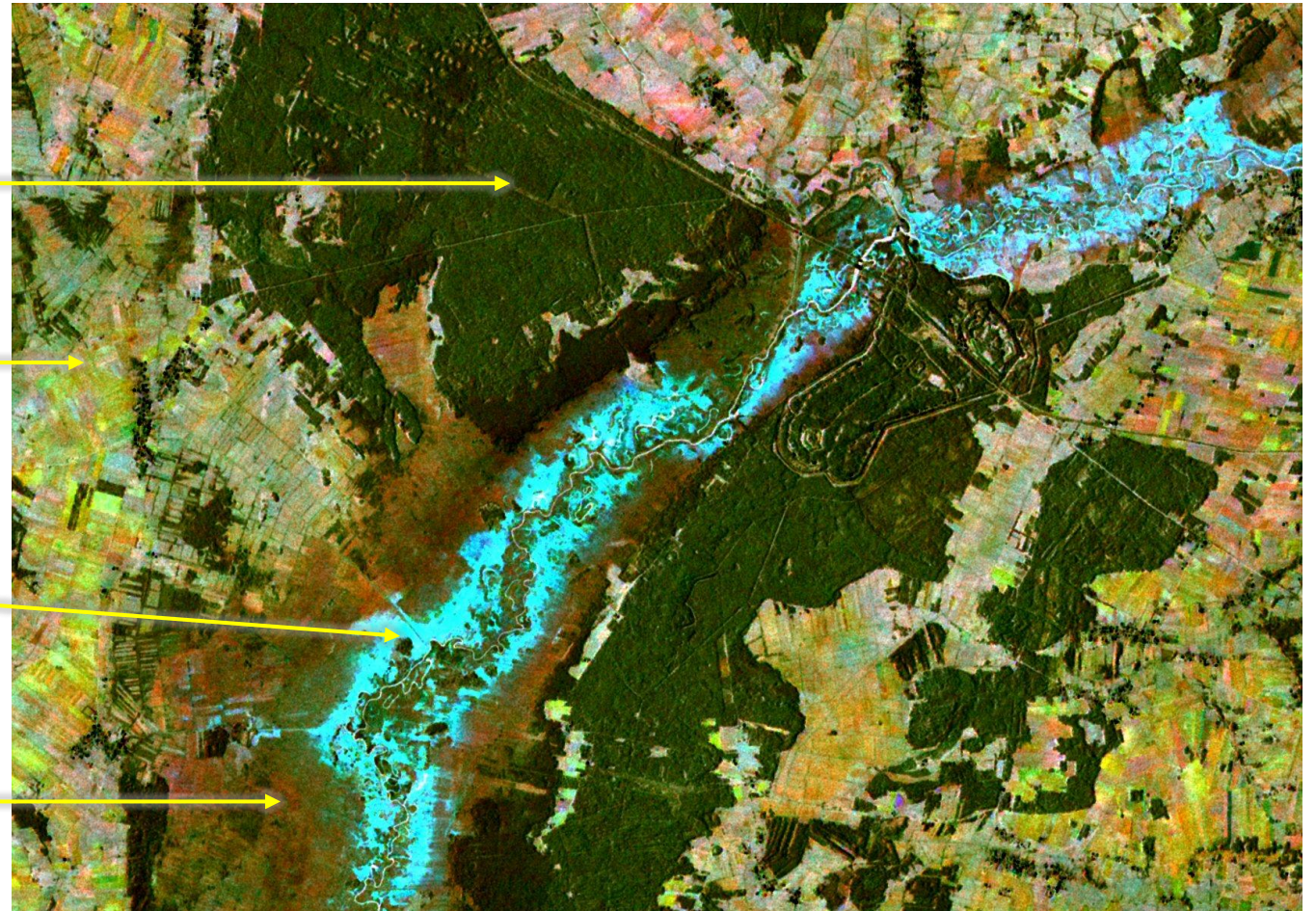
Kompozycja barwna trzech obrazów wiosennych z satelity Sentinel-1
pozyskanych w 2015 roku, opracowana wg. autorskiej metody

Kompleksy leśne

Tereny rolnicze

Rozlewiska (14.04.2015)

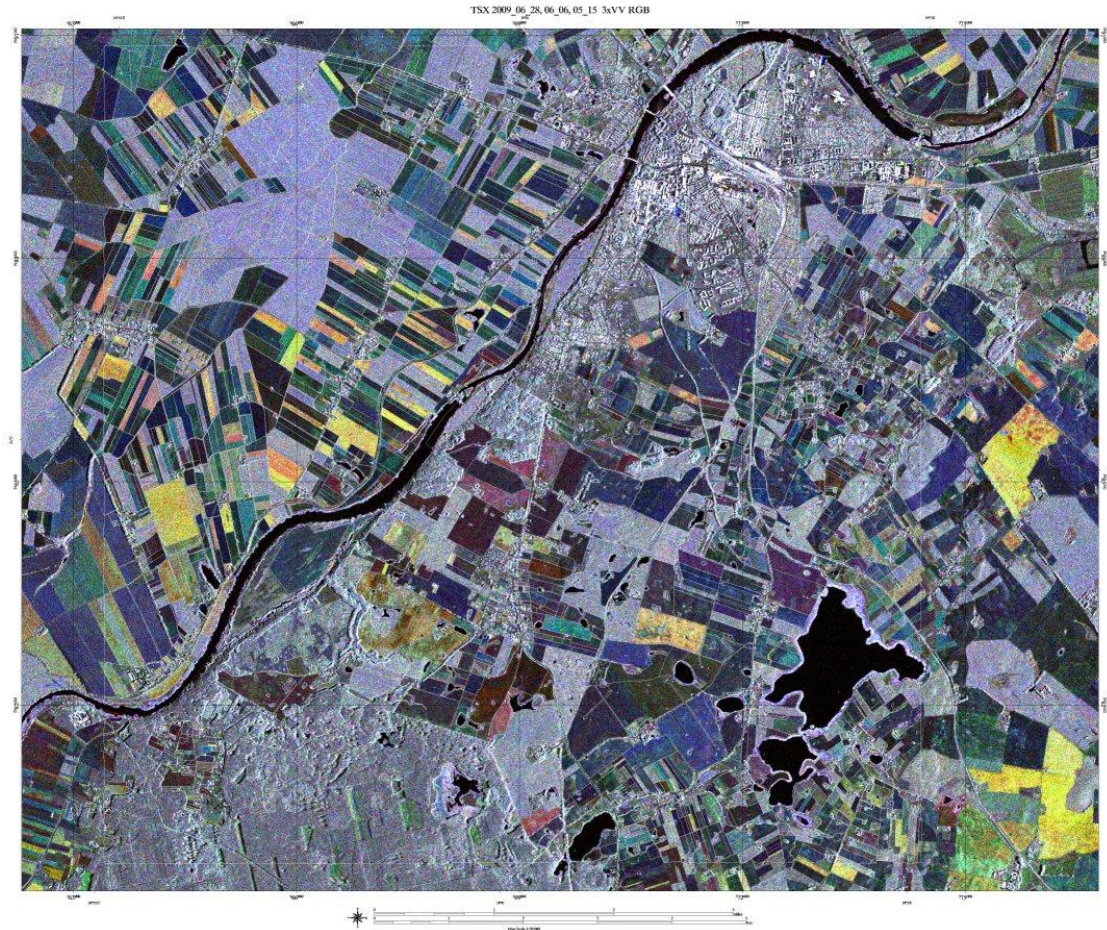
Podtopione łąki



Źródło: obrazy Sentinel-1A Copernicus 2015; opracowanie M. Mleczeko, M. Mróz 2015

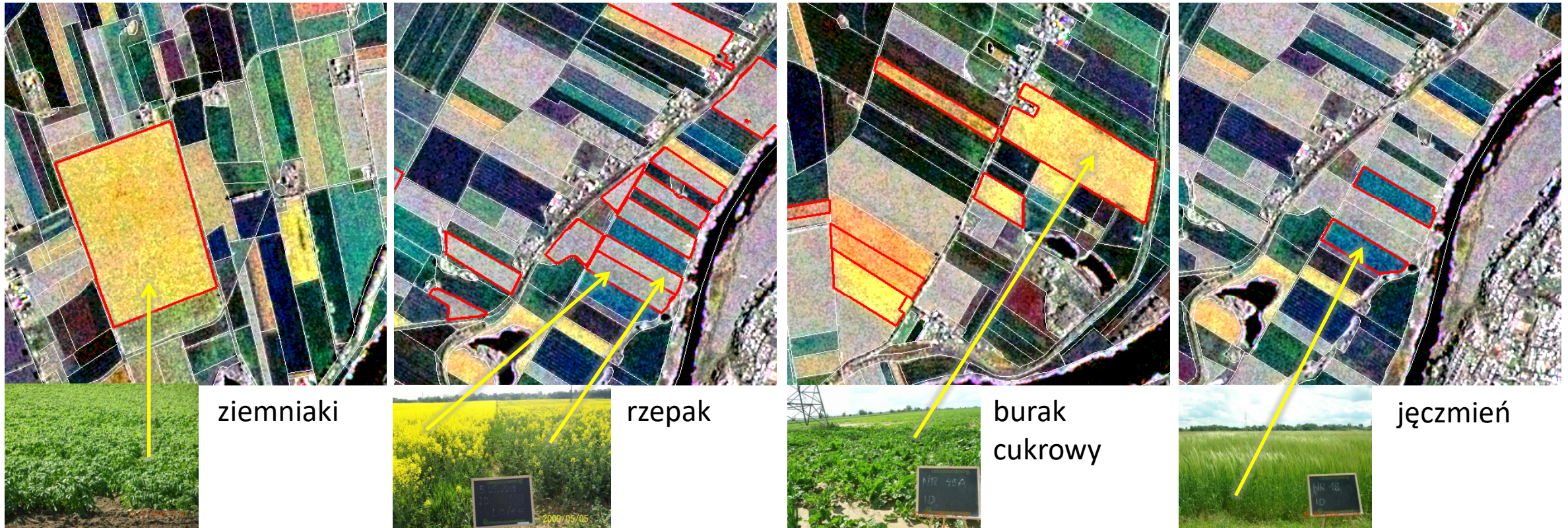
Żuławy Malborskie

Kompozycja RGB obrazów TerraSAR-X SM Pol. VV
R: 28.06.2009 G: 06.06.2009 B: 15.05.2009



Źródło: obrazy TerraSAR-X DLR i EADS Astrium, 2009; opracowanie M. Mleczko, M. Mróz 2009

Identyfikacja upraw rolniczych – Żuławy Malborskie Kompozycja RGB trzech obrazów z satelity TerraSAR-X



Źródło: obrazy TerraSAR-X DLR i EADS Astrium, 2009; opracowanie M. Mleczko, M. Mróz 2009

Port lotniczy Frankfurt –
przykład dużej rozdzielczości
geometrycznej obrazów do
celów kartograficznych
i rozpoznawczych.

Kompozycja RGB obrazów TerraSAR-X

R: 18.09.2007

G: 10.12.2007

B: 29.09.2007



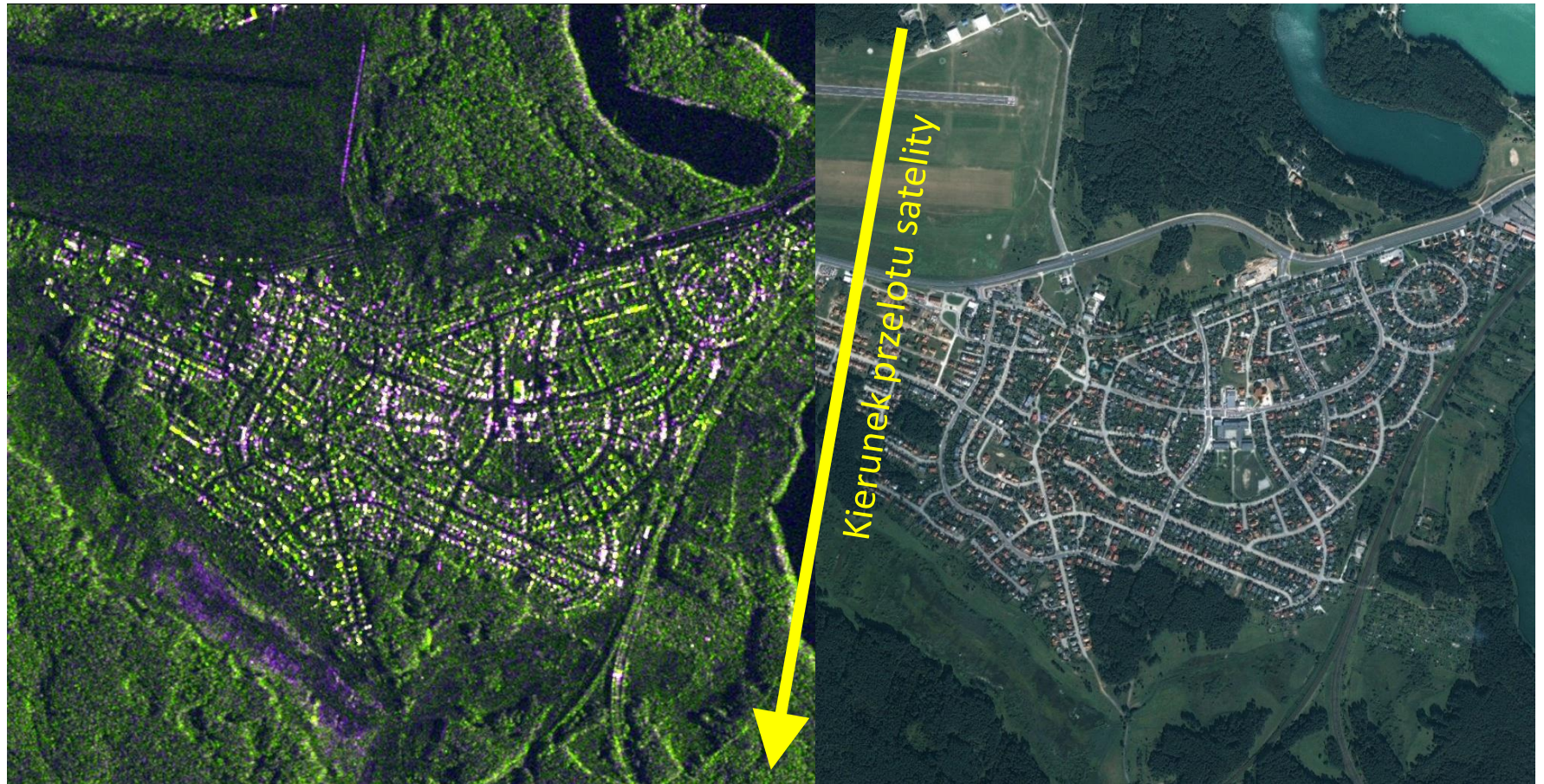
300 MHz – High Resolution Spotlight-Aufnahme des Flughafens Frankfurt

300 MHz – High Resolution Spotlight Image of the Frankfurt Airport

Źródło: DLR i EADS Astrium, 2007

Zabudowa jednorodzinna – Olsztyn Dajtki

Kompozycja obrazów TerraSAR-X i ortofotomapy lotniczej



Źródło: obrazy TerraSAR-X DLR 2007; opracowanie M. Mróz 2007

Wieża Eiffla – Paryż

- Z powodu swojej wysokości wieża „kładzie się” na obrazie w kierunku anteny radaru. Sygnał od wierzchołka wieży dociera do anteny odbiorczej wcześniej niż od jej podstawy.

Obraz COSMO-SkyMed

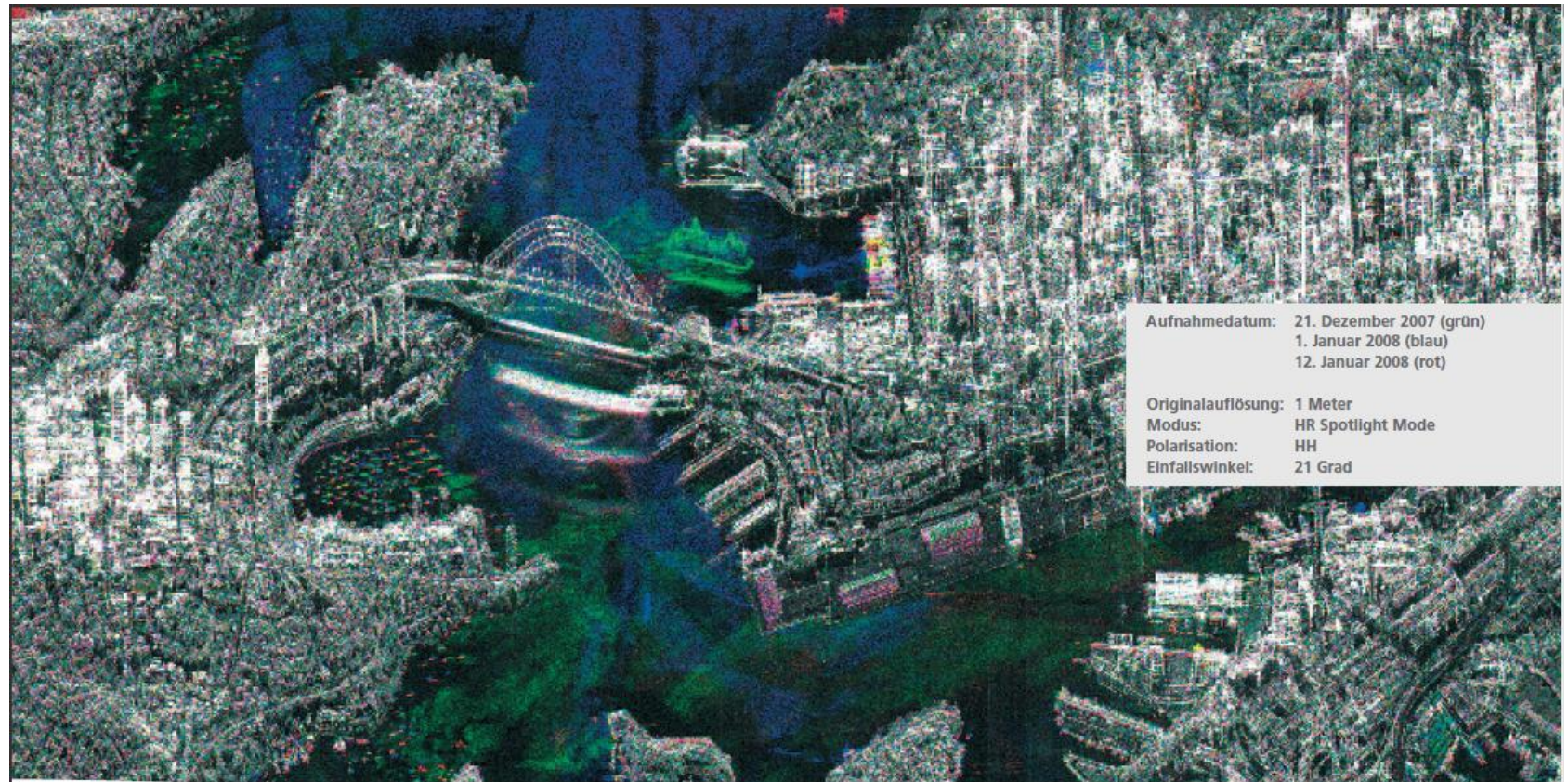


Źródło: COSMO-SkyMed, 2009

Sydney – Australia

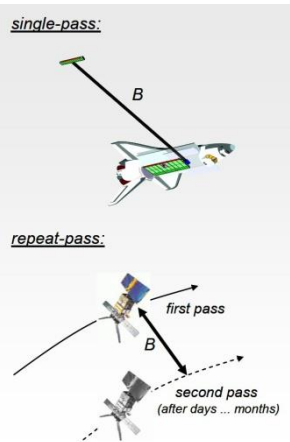
- Bardzo wysoka rozdzielczość obrazów ujawnia złożone mechanizmy wielokrotnych odbić wiązki i pojawianie się artefaktów.

Kompozycja barwna obrazów z satelity TerraSAR-X
R: 12.01.2008 G: 21.12.2007 B: 1.01.2008



Źródło: DLR i EADS Astrium, 2007

- SAR jest systemem koherentnym co oznacza, że w zarejestrowanym obrazie zespolonym zachowana jest faza powracającego sygnału.
- Różnica faz dwóch obrazów zarejestrowanych z dwóch różnych położeń instrumentu umożliwia uzyskanie informacji 3D.



Single-pass – jeden przelot z podwójnym odbiornikiem (np. misja SRTM)

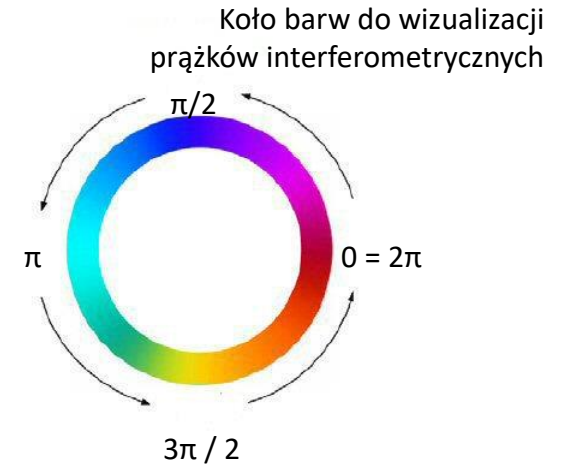
Repeat-pass – dwa lub więcej przelotów w różnym czasie po lekko różnej orbicie

Faza obrazu zespolonego SLC – Single Look Complex

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} r$$

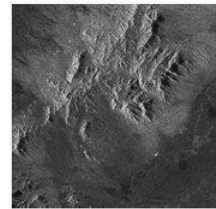
Faza zależy od odległości

ZASADA INTERFEROMETRII



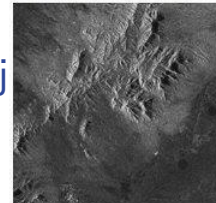
Faza jest zawsze niejednoznaczna ponieważ nie znamy liczby pełnych cykli 2π
=> Potrzebne jest odwijanie fazy (*phase unwrapping*)

SAR 1



$$u_1 = |G_1| \exp(j\varphi_1)$$

SAR 2



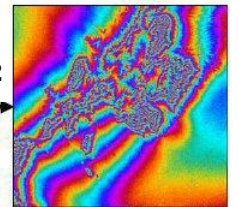
$$u_2 = |G_2| \exp(j\varphi_2)$$



$$v = |G_1||G_2| \exp[j(\varphi_1 - \varphi_2)]$$

arg ()

$$\Delta\phi = \varphi_1 - \varphi_2$$



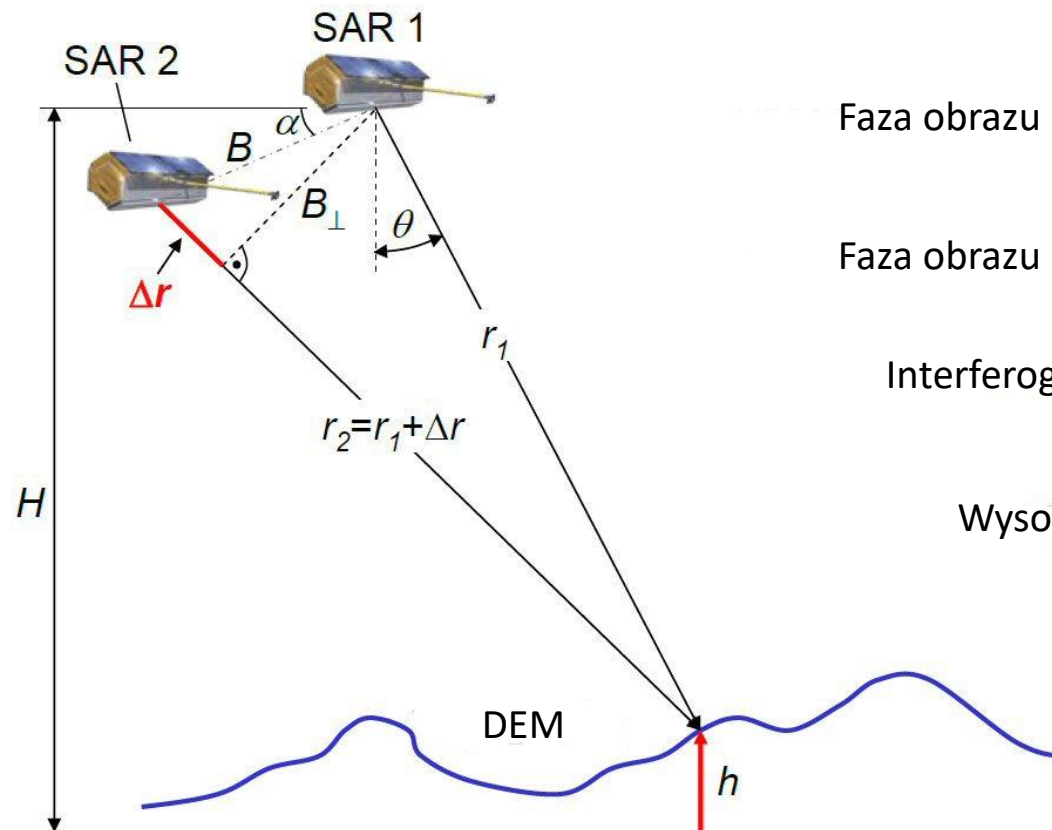
Interferogram

* - gwiazdka na diagramie oznacza liczbę zespoloną sprzężoną

Interferogram jest źródłem informacji do budowy DEM –

Digital Elevation Model – numerycznego modelu wysokości terenu.

Dokładność tej metody wynosi kilka metrów i jest zależna od długości fali i bazy interferometrycznej.



Faza obrazu SAR 1 $\varphi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda} r_1$

Faza obrazu SAR 2 $\varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} (r_1 + \Delta r)$

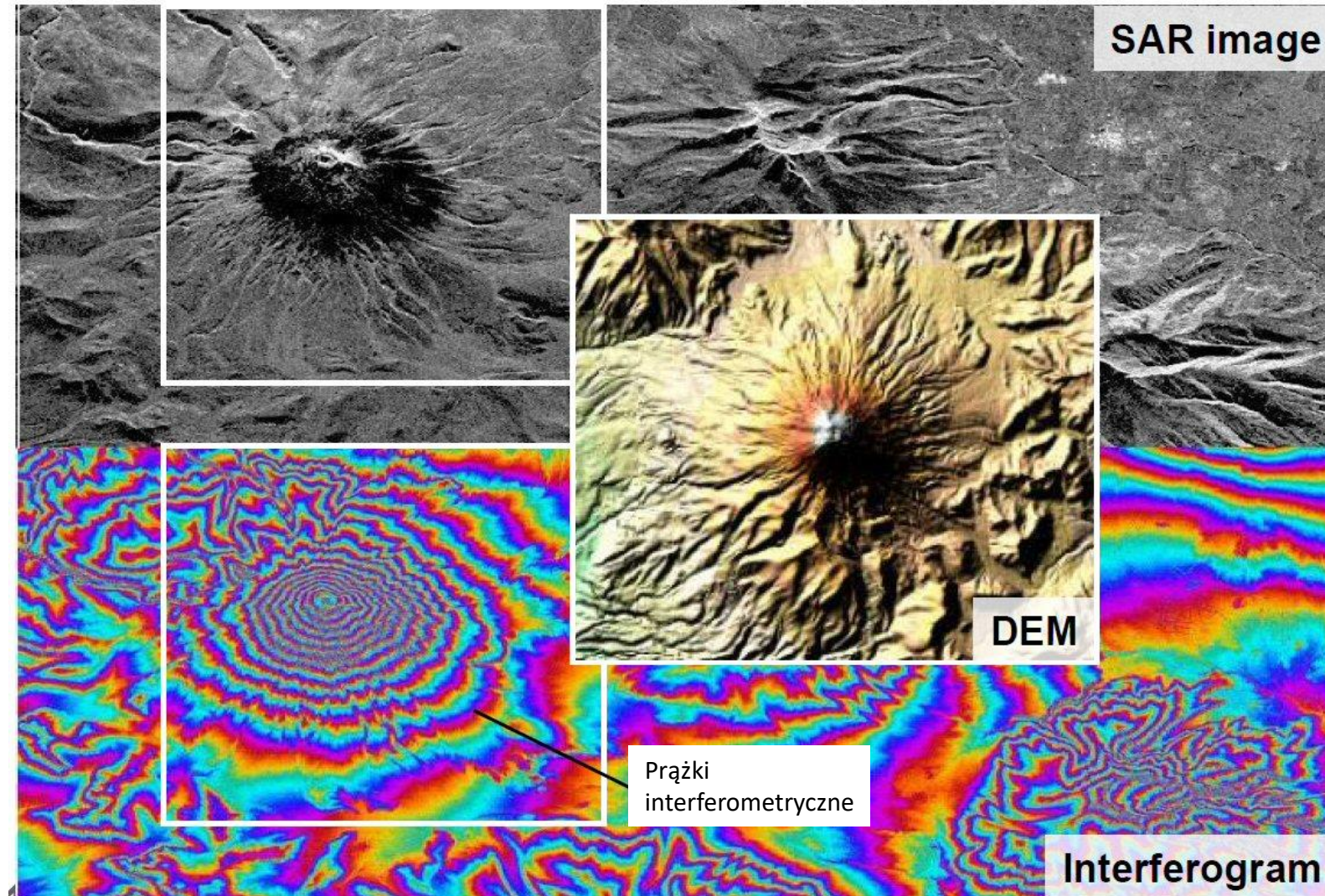
Interferogram $\Delta\phi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r$

Wysokość $h = H - r_1 \cos\theta$

Kąt obrazowania musi być znany

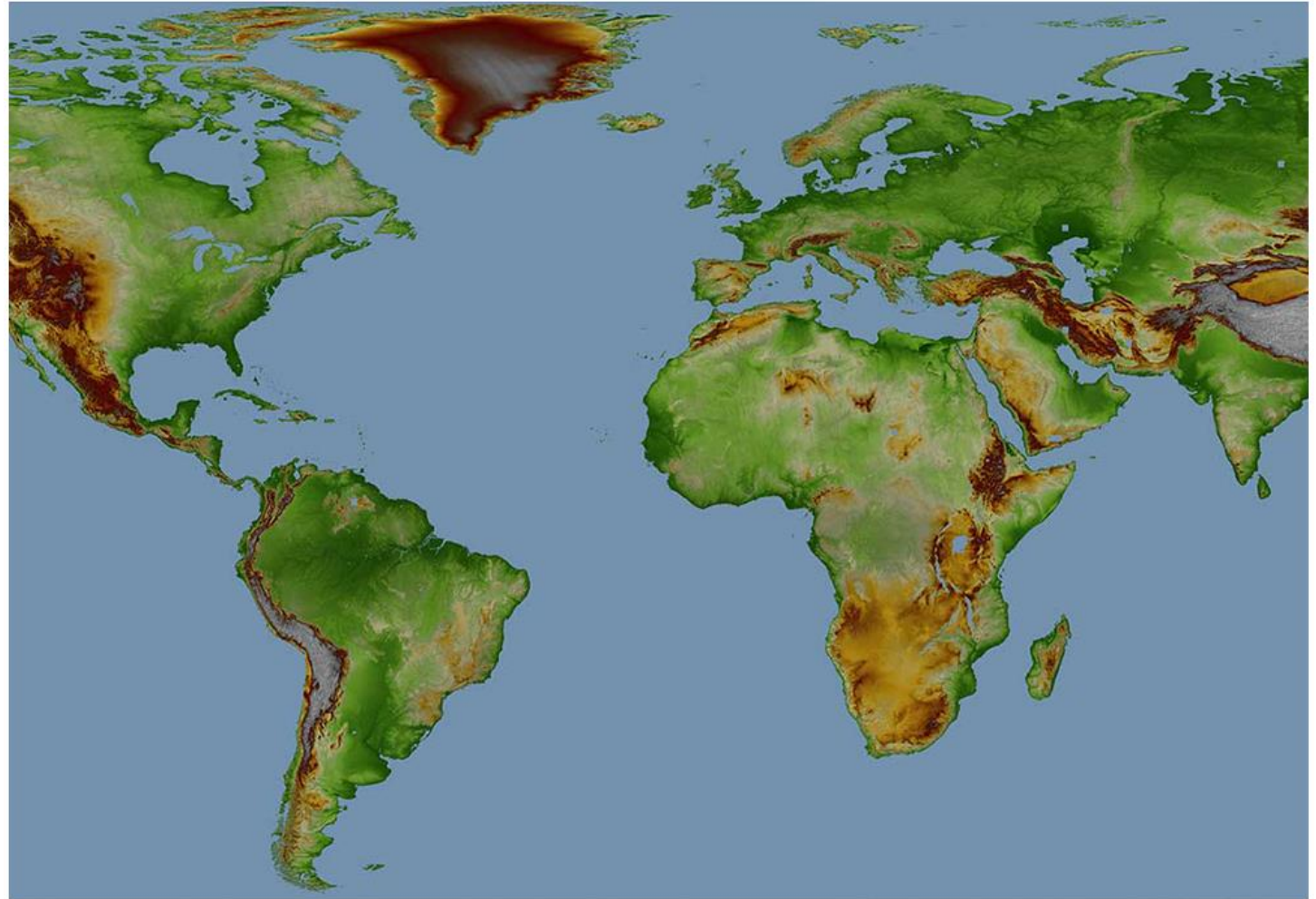
Źródło: ESA, 2012

Interferometria radarowa – c.d.



Źródło: ESA, 2012

WorldDEM jest modelem w siatce 12x12 m, wytworzonym na podstawie obrazów radarowych TanDEM-X o dokładności względnej 2 m i bezwzględnej 4 m.

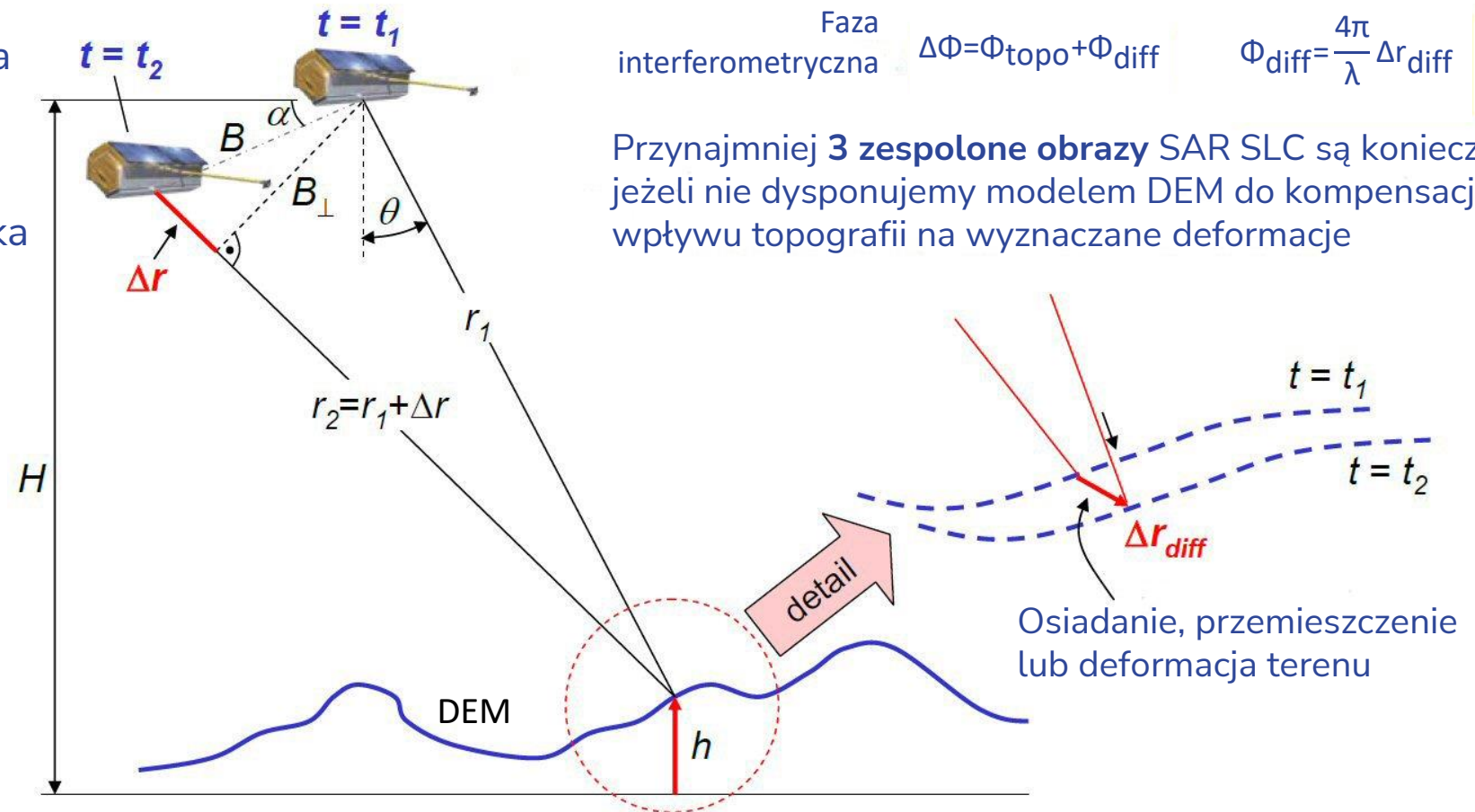


Źródło: AIRBUS DEFENCE AND SPACE, 2019

DInSAR – interferometria radarowa różnicowa (Differential Interferometry SAR)

- Interferogram różnicowy jest źródłem informacji do wyznaczania deformacji, przemieszczeń i osiadania terenu.
- Dokładność tej metody wynosi kilka milimetrów.

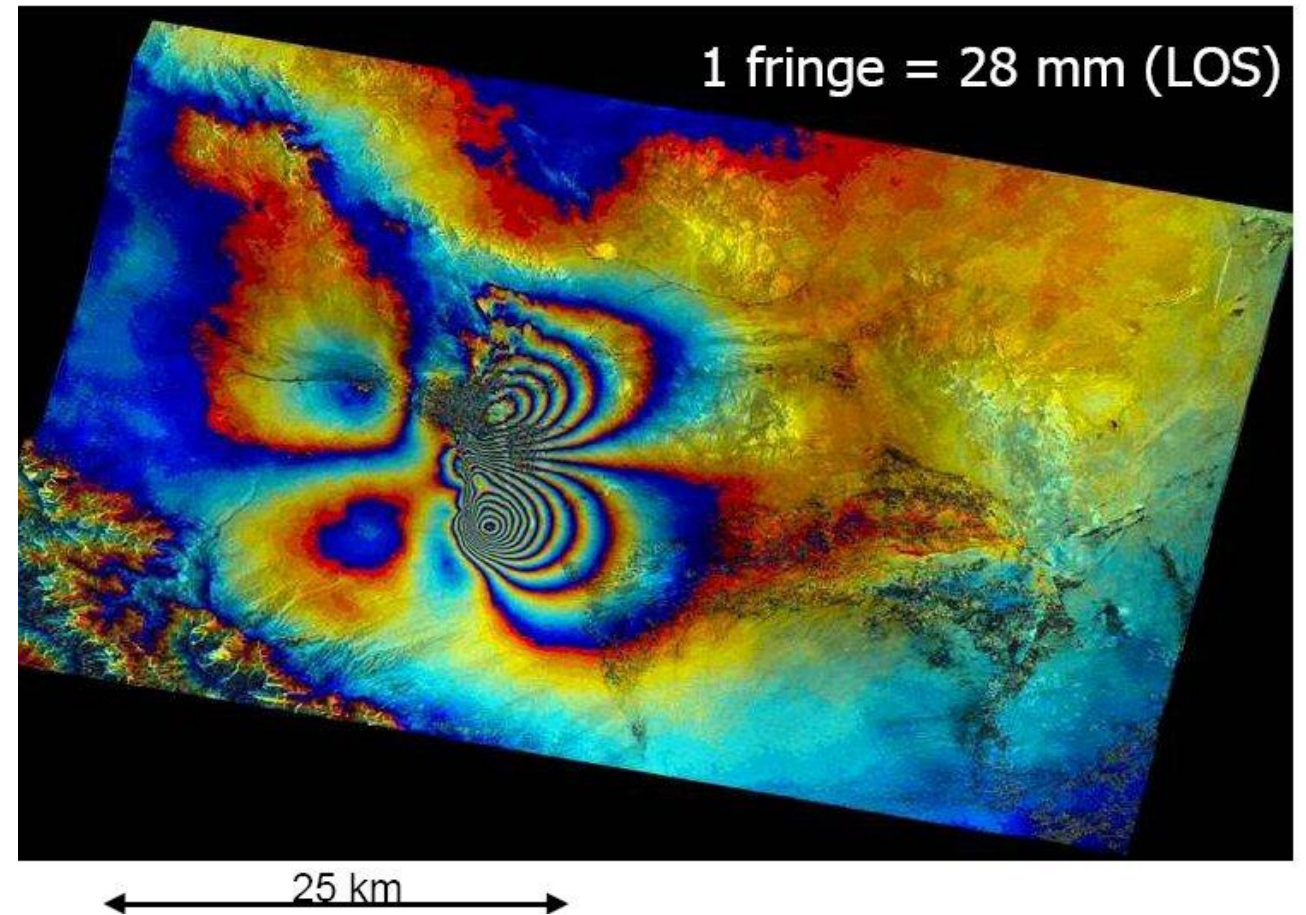
ZASADA INTERFEROMETRII RÓŻNICOWEJ



Źródło: ESA, 2012

Deformacje po trzęsieniu Ziemi
Bam – Iran

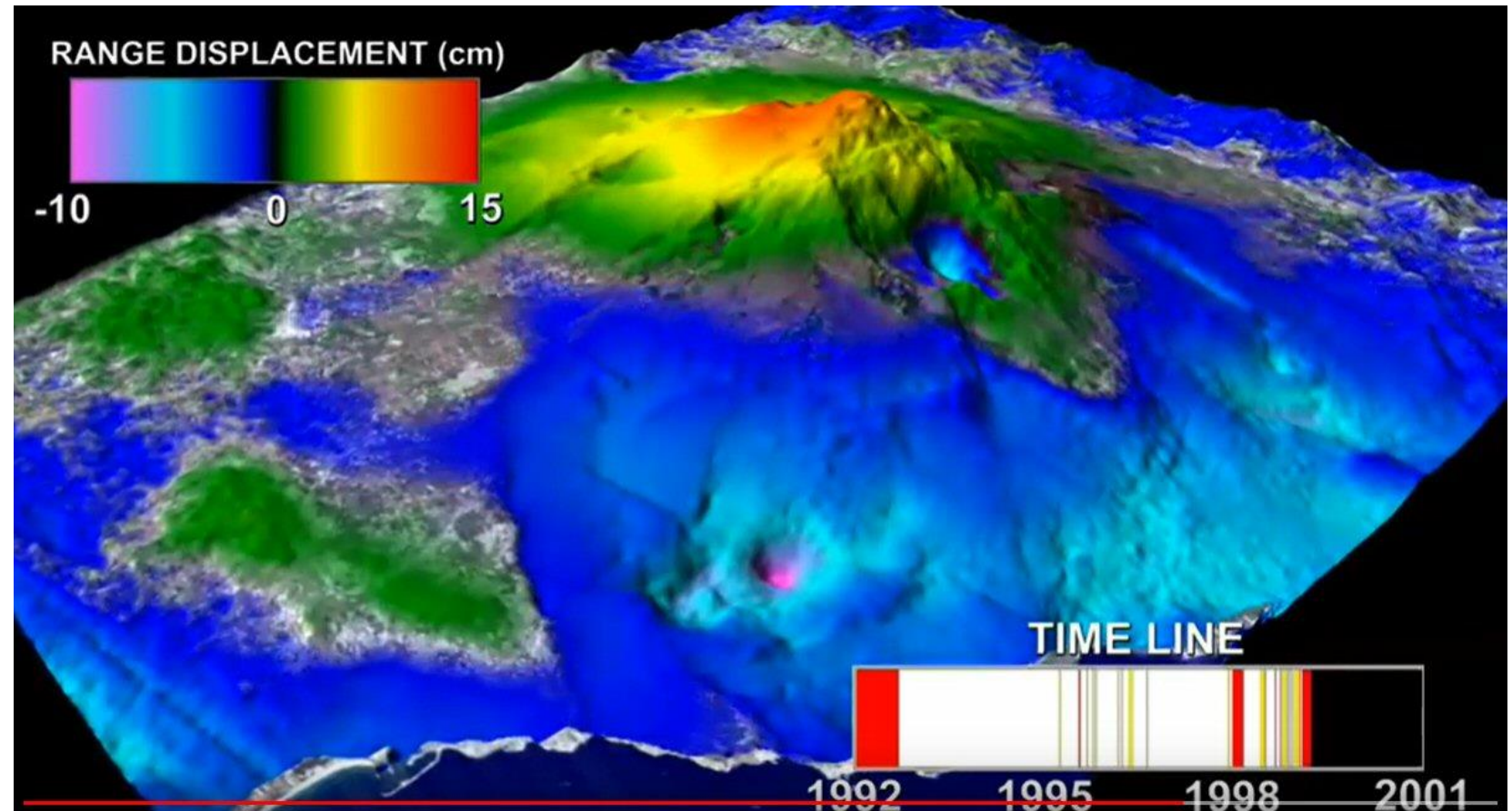
BAM earthquake (Dec 26, 2003)
Co-seismic deformation pattern (along the LOS)



Źródło: ESA, 2003

Aktywność wulkaniczna Etna – Włochy

Deformacje powierzchni rzędu kilkunastu centymetrów



Źródło: ESA, 2012

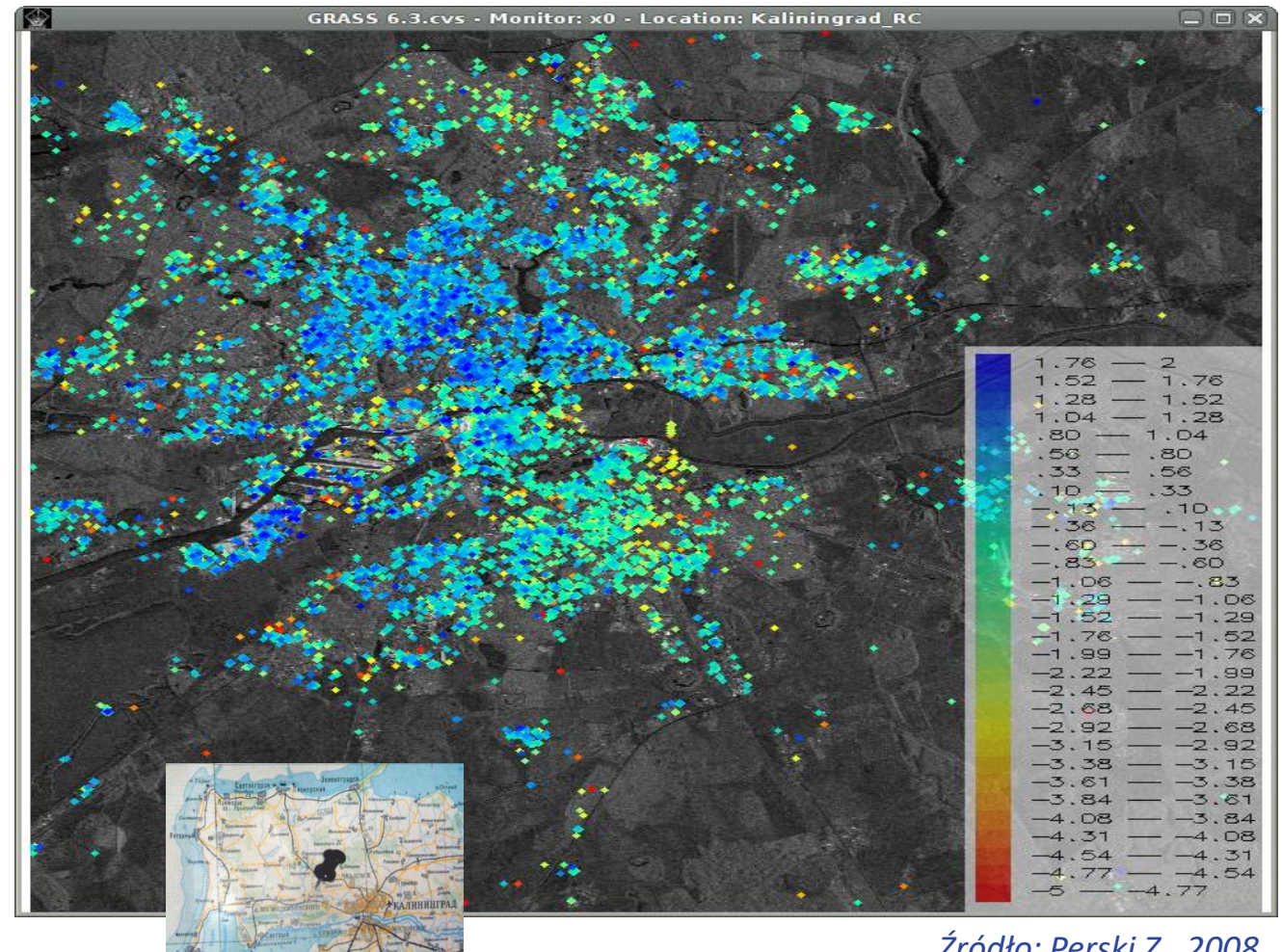
* PSI – Permanent Scatterers Interferometry

– technologia interferometryczna wykorzystująca tylko stabilne, punktowe elementy rozpraszające mikrofałę.

Jest to metoda wyznaczania deformacji wolnozmiennych z dokładnościami milimetrowymi.

Lokalne trzęsienie ziemi – Obwód Kaliningradzki

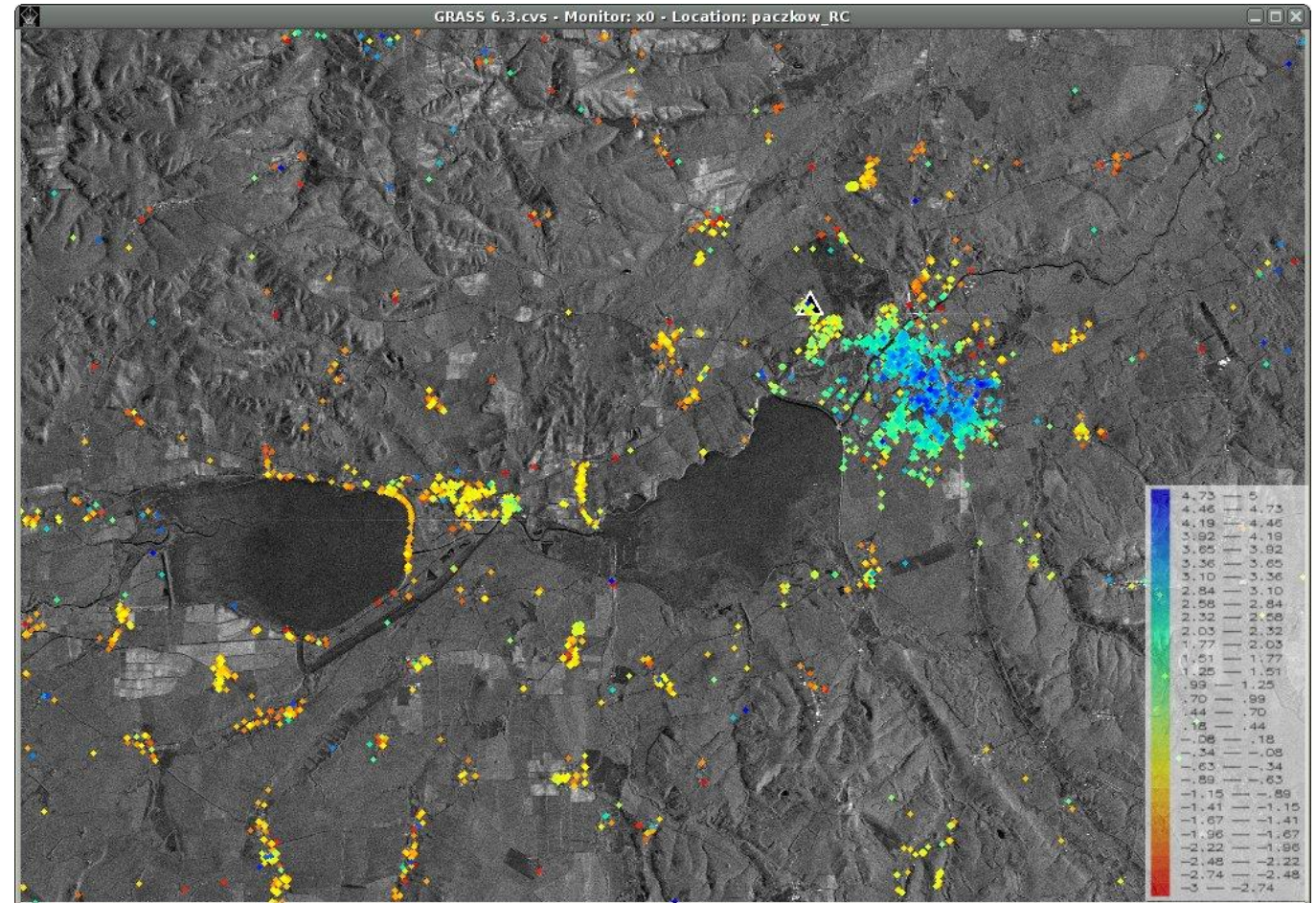
Deformacje powierzchni rzędu kilku centymetrów



Źródło: Perski Z., 2008

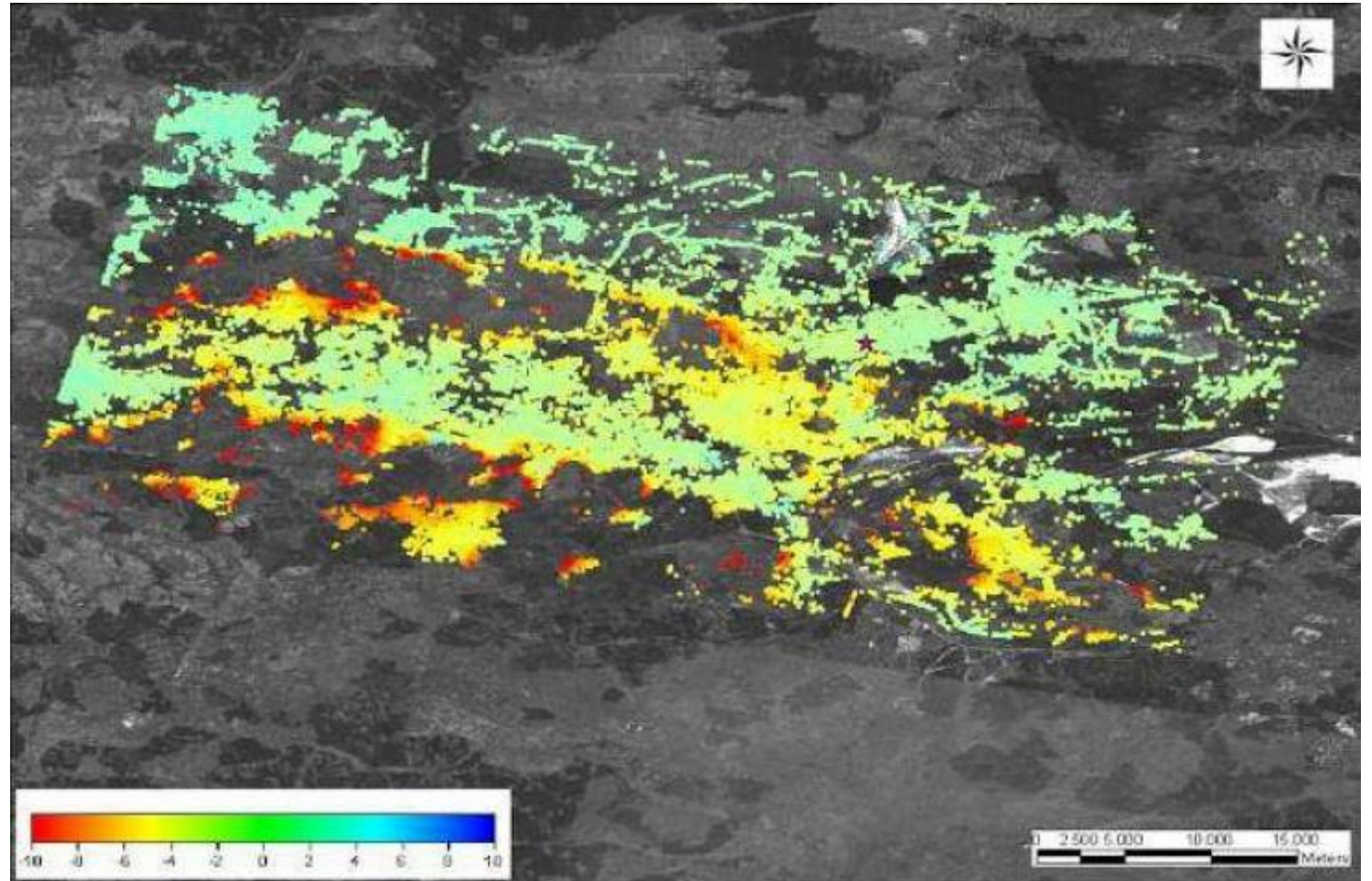
Rów tektoniczny Paczkowa – Polska

Deformacje powierzchni rzędu kilku centymetrów



Źródło: Perski Z., 2008

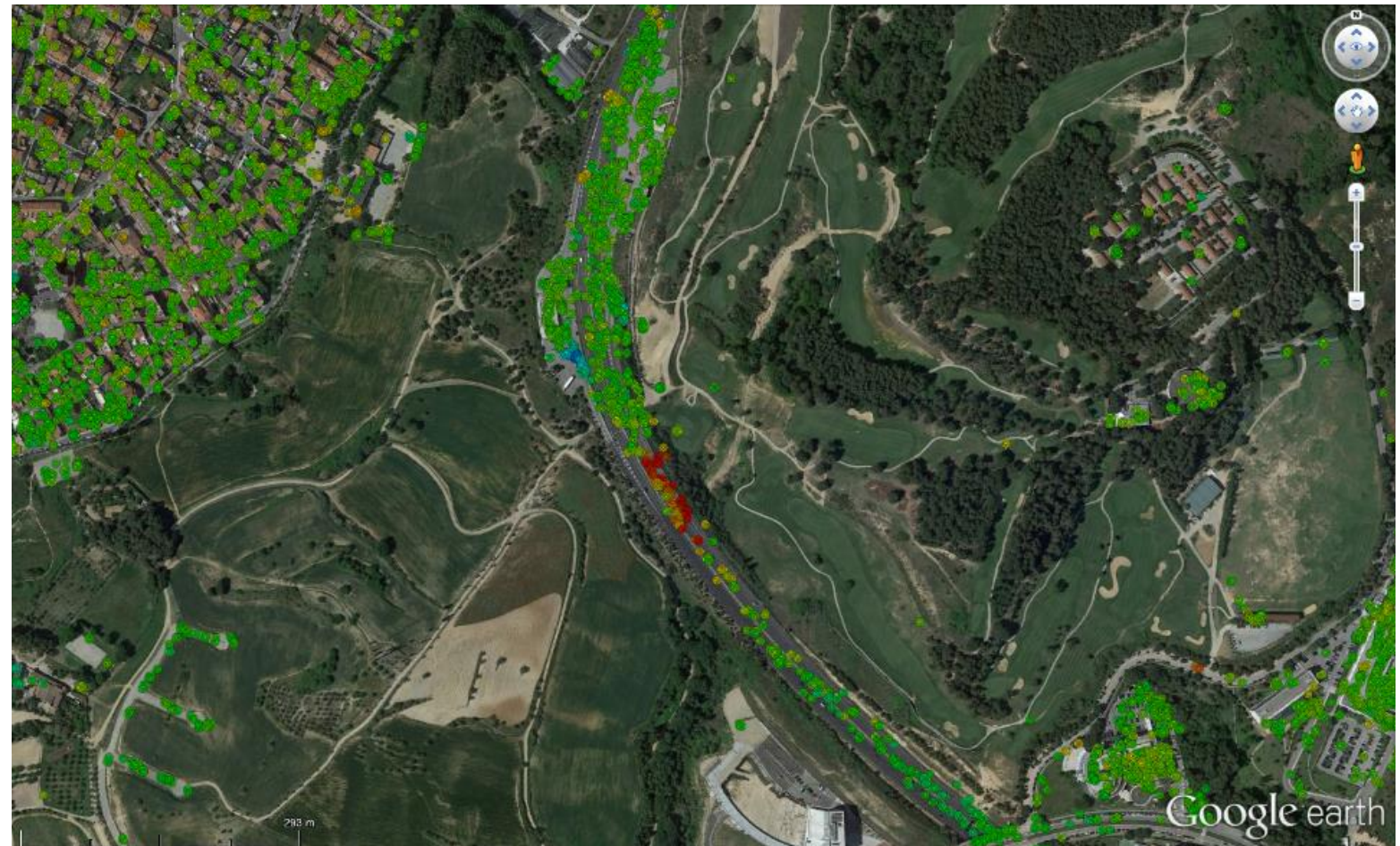
Szkody górnicze – Sosnowiec – Polska



Źródło: Perski Z., 2008

Osiadanie terenu na odcinku autostrady
Autostrada E9 – Katalonia

Osiadanie terenu widoczne w postaci czerwonych punktów



-7.5 [mm/rok] 7.5

Źródło: Crosetto M. CTTC, 2014

- Obrazowanie radarowe to niezależne od zachmurzenia źródło satelitarnych danych teledetekcyjnych.
- Wachlarz produktów obrazowych zaspokaja potrzeby wielu branż.
- Program Copernicus udostępnia obrazy radarowe Sentinel-1 bezpłatnie.
- Do skutecznego stosowania metod teledetekcji radarowej w kraju potrzebne jest gruntowne kształcenie specjalistów w ramach studiów uniwersyteckich lub politechnicznych, w tym podyplomowych.

OPRACOWAŁ:
dr hab. inż. Marek Mróz

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

