

Jak satelity widzą Ziemię

– fizyka, inżynieria
i zastosowania
technologii
satelitarnych



Podręcznik
merytoryczny
do lekcji

Powered by **ICEYE**



_01

Dlaczego
technologie
satelitarne
są dziś kluczowe

Dlaczego technologie satelitarne są dziś kluczowe

Z technologii satelitarnych korzysta dziś niemal każdy człowiek na Ziemi, często nawet o tym nie wiedząc. Satelity zapewniają łączność i przesyłanie danych, nawigację oraz dokładny pomiar czasu. Wspierają też prognozowanie pogody i śledzenie zmian klimatu, a także dostarczają informacji o stanie środowiska i o tym, co dzieje się na powierzchni planety. Dzięki nim można podejmować trafniejsze decyzje, szybciej reagować na kryzysy i prowadzić badania naukowe.

Codzienność:

- nawigacja w telefonie
- synchronizacja czasu w sieciach
- telekomunikacja, bankowość
- transmisja telewizyjna
- internet satelitarny

Bezpieczeństwo i kryzysy:

- mapy powodzi, pożarów i susz
- monitoring infrastruktury
- poszukiwania i ratownictwo
- świadomość sytuacji na polu walki

Nauka i klimat:

- monitoring środowiska
- obserwacje atmosfery, oceanów, pokrywy lodowej
- obserwacje zmian na lądzie



_02

Rodzaje satelitów

Rodzaje satelitów

Satelity krążące wokół naszej planety można dzielić według tego, jakie zadania wykonują. Ten podział pomaga zrozumieć, dlaczego satelity poruszają się na różnych wysokościach (orbitach) i mają różne instrumenty.

2.1 Satelity komunikacyjne

Zapewniają globalną łączność radiową, telewizyjną oraz dostęp do szerokopasmowego Internetu. Aby stale obsługiwać jeden wybrany region Ziemi, satelity te umieszcza się na bardzo wysokiej orbicie geostacjonarnej (GEO). Z kolei nowoczesne konstelacje internetowe (np. Starlink) poruszają się na niskich orbitach (LEO), co wyrażnie zmniejsza opóźnienia w przesyłaniu sygnału.

2.2 Satelity nawigacyjne

Umożliwiają działanie globalnych systemów nawigacji satelitarnej (GNSS), takich jak GPS (USA), Galileo (UE), GLONASS (Rosja), BeiDou (Chiny). Satelity te bez przerwy nadają sygnał radiowy z dokładnym czasem z pokładowych zegarów atomowych. Odbiórniki w naszym telefonie mierzą czas, w jakim sygnał przemierza drogę z satelity, obliczając na tej podstawie naszą dokładną pozycję na mapie. Ma to zastosowanie również w synchronizacji systemów bankowych i sieci komórkowych.

2.3 Satelity meteorologiczne

Służą do całodobowego monitorowania stanu atmosfery, chmur oraz oceanów. Dostarczają podstawowych danych do codziennych prognoz pogody oraz systemów wczesnego ostrzegania przed gwałtownymi zjawiskami (jak np. huragany, tajfuny, burze).

2.4 Satelity do obserwacji Ziemi

– **optyczne** (panchromatyczne, wielokanałowe i hiperspektralne)

Działają jak zaawansowane aparaty fotograficzne i skanery, na zasadzie teledefekcji pasywnej, tzn. rejestrują promieniowanie elektromagnetyczne (zarówno światło widzialne dla ludzkiego oka, jak i niewidzialną dla nas podczerwień), które jest emitowane przez Słońce i odbija się od powierzchni Ziemi. Są użyteczne w kartografii, monitoringu środowiska, rolnictwie oraz planowaniu przestrzennym, ale ich skuteczność może ograniczać zachmurzenie i brak światła słonecznego w porze nocnej. Ze względu na liczbę rejestrowanych kanałów obrazowania dzielimy na:

- **panchromatyczne** (jednokanałowe) – sensor rejestruje całe docierające światło widzialne jako jeden szeroki kanał, mierząc sumaryczną intensywność odbitego promieniowania, którego wynikiem jest bardzo szczegółowy, ostry obraz w odcieniach szarości o najwyższej dostępnej rozdzielczości przestrzennej. Stosowany w kartografii, planowaniu przestrzennym i precyzyjnym rozpoznaniu wywiadowczym;
- **wielospektralne** (kolorowe) – światło docierające do sensora jest dzielone na kilka lub kilkanaście oddzielnych, szerokich pasm (zazwyczaj barwy podstawowe: czerwona (R), zielona (G), niebieska (B), bliska podczerwień (IR)). Po połączczeniu pasm widzialnych powstaje obraz w barwach naturalnych (RGB). Pasma podczerwieni pozwalają określić np. kondycję szaty roślinnej;
- **hiperspektralne** (szczegółowe) – najbardziej zaawansowana grupa satelitów optycznych. Promieniowanie odbite od powierzchni Ziemi jest rozszczepiane na dziesiątki/kilki bardzo wąskich, sąsiadujących ze sobą kanałów spektralnych (od promieniowania widzialnego po bliską i daleką podczerwień). Satelity w ten sposób pozyskuje tzn. sygnały spektralną obiektu, służącą do zaawansowanych analiz fizyczno-chemicznych (np. skład mineralny gleb, identyfikacja gatunków drzew, wykrywanie zanieczyszczeń w wodzie).



2.5 Satelity do obserwacji Ziemi – radarowe (SAR)

Są to systemy aktywne, które wysyłają fale radiowe (mikrofale) w stronę Ziemi, a następnie odbierają sygnał odbity od jej powierzchni. Fale radiowe przenikają przez chmury i mgłę, a do działania nie potrzebują światła słonecznego. Dzięki temu systemy SAR umożliwiają obserwację niezależnie od warunków pogodowych i pory dnia.

Satelity SAR majądługie zastosowanie w obszarze bezpieczeństwa i reagowania kryzysowego, pomagając w szybkim rozpoznaniu sytuacji, ocenie skutków katastrof

oraz monitoringu infrastruktury i aktywności na morzu. Są nieustąpione w monitorowaniu powodzi, wyrzwywania wycieków ropy na oceanach, śledzeniu ruchu lodowców, a także w rozpoznaniu wojłkowym.

Współczesna teledetekcja opiera się na integracji danych – informacje z sensorów różnych typów są łączone, aby stworzyć jak najpełniejszy i najdokładniejszy obraz sytuacji na Ziemi. Ma ona zastosowanie cywilne, a jednocześnie wspiera bezpieczeństwo i reagowanie kryzysowe.

_03

Rodzaje
orbit

Rodzaje orbit

Wybór orbity to najważniejsza decyzja podczas projektowania misji kosmicznej. Wysokość, na jakiej umieścimy satelitę, zdecyduje o tym, jak duży obszar planety będzie on obserwował i obejmował, jak często będzie wracał nad ten sam punkt, jak duże będą opóźnienia w przysyłaniu sygnału oraz w jak trudnych warunkach fizycznych przyjdzie mu pracować.

3.1 LEO – niska orbita okołoziemska (ok. 160–2000 km)

- Czas jednego pełnego okrążenia planety wynosi 90–120 minut.
- Niewielka odległość od powierzchni Ziemi pozwala sensorom na pozyskanie najwyższej szczegółowości obrazów.
- Sygnał radiowy pokonuje krótką drogę, co minimalizuje opóźnienia w łączności.
- Satelita w danym momencie widzi mały fragment terenu i bardzo szybko przemieszcza się nad horyzontem.
- Minus: mniejszy obszar widoczny w jednym przelecie oraz większe znaczenie oporu atmosferycznego na najniższych wysokościach.

3.2 MEO – średnia orbita okołoziemska (ok. 2000–35 786 km)

- Czas jednego pełnego okrążenia planety wynosi od kilku do 12 godzin.
- Zapewnia szerokie pole widzenia.
- Sygnał radiowy zachowuje umiarkowane opóźnienia.
- Na wysokości ok. 20 000 km orbity przeznaczane dla satelitów nawigacyjnych (GPS, Galileo) przebiegają przez pasy radiacyjne Van Allena, co wymusza posiadanie dodatkowych osłon przed promieniowaniem jonizującym.

3.3 GEO – orbita geostacjonarna (35 786 km nad równikiem)

- Okres obiegu wynosi jedną pełną dobę gwiazdową, czyli 23 godz. 56 min 4 s.
- Ponieważ Ziemia obraca się wokół własnej ośi w tym samym czasie, satelita dla obserwatora z Ziemi wydaje się nieruchomy.
- Zapewnia stałą łączność z danym regionem oraz stałe obrazowanie dużego obszaru (1/3 globu). Idealna dla satelitów telewizyjnych i meteorologicznych.
- Duża odległość powoduje, że sygnał radiowy dociera z bardzo dużym opóźnieniem (ok. 500–600 milisekund).
- Wymieszczenie satelity na tę orbitę wymaga potężnych rakiet i ogromnych nakładów finansowych.

3.4 Szybkie podsumowanie – kiedy która orbita?

- Potrzebujesz wysokiej szczegółowości powierzchni i niskich opóźnień – wybierasz LEO.
- Potrzebujesz globalnej nawigacji, pozycjonowania i precyzyjnego czasu – wybierasz MEO.
- Potrzebujesz stałego, nieprzerwanego „wpatrywania się” w ten sam region Ziemi (komunikacja, pogoda) – wybierasz GEO.



_04

Fizyka w tle:
orbity i łączność

Fizyka w tle: orbity i łączność

4.1 Dlaczego satelita nie spada?

Satelita porusza się wokół Ziemi po zakrzywionym torze, którego kształt wynika z działania siły grawitacji. W przypadku orbity kołowej grawitacja pełni funkcję siły dośrodkowej. Można więc powiedzieć, że satelita znajduje się w ciągłym swobodnym spadku. Jednocześnie porusza się z odpowiednio dużą prędkością styczną, dzięki czemu nie spada na powierzchnię Ziemi, lecz stale porusza się wokół niej po orbicie.

4.2 Prędkość na LEO

Aby utrzymać się na niskiej orbicie okołoziemskiej (LEO), satelita musi poruszać się z prędkością 7,8 km/s (ok. 28 000 km/godz.). Przy takiej prędkości satelita pokonuje dystans z Warszawy do Krakowa w zaledwie kilkadziesiąt sekund. Wniosek: satelita szybko przelatuje nad danym miejscem – obserwacja jest więc „okienkiem”. Duża liczba satelitów w konstelacji pozwala na obserwowanie tego samego obszaru częściej.

4.3 Łączność i opóźnienie sygnału

Sygnał radiowy rozchodzi się z prędkością zbliżoną do prędkości światła.

Dla LEO odległość od satelity wynosi kilkaset kilometrów, więc opóźnienie sygnału jest niezauważalne dla człowieka (kilo milisekund), stąd zastosowanie idealne do komunikacji i szybkiego transferu danych.

Dla GEO odległość od satelity jest na tyle duża, że opóźnienie staje się zauważalne – w rozmowach wideo czy grach online. Z kolei w prognozie pogody lub transmisji TV opóźnienie rzędu ułamka sekundy zwykle nie jest problemem. Dla użytkownika w Polsce odległość od satelity wynosi ok. 38 000 km. Sygnał przesyłany z Ziemi do satelity i z powrotem pokonuje ten dystans dwukrotnie (2 x 38 000 km = 76 000 km). Powoduje to fizyczne opóźnienie sygnału ok. 0,25 s. W internetowej komunikacji dwukierunkowej pełny czas oczekiwania na odpowiedź wynosi ponad pół sekundy, co jest wyraźnie zauważalne podczas rozmów głosowych.

Dla ułatwienia:

Siła grawitacji

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$$

Równanie obrotowe

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Prędkość satelity na
(dla orbity kołowej)

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$$

Okres obrotu

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

G – stała grawitacji [$\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$], $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$, M – masa Ziemi [kg], $M = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, m – masa satelity [kg], r – promień orbity (dystans od środka Ziemi) m , $r = h + R$, $h = 330\,000 \text{ m}$ – promień Ziemi, $R = 6\,371\,000 \text{ m}$ – promień Ziemi, h – wysokość nad powierzchnią Ziemi satelity, v – prędkość satelity [m/s], T – okres obrotu [s].

_05

Kosmos
jako trudne środowisko
pracy satelity

Kosmos jako trudne środowisko pracy satelity

Projektowanie satelity to w dużej mierze projektowanie niezawodności w środowisku, które jest wymagające i nie wybaczające błędów.

5.1 Promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie kosmiczne to strumień wysokoenergetycznych cząstek (m.in. protonów, elektronów, jąder helu) i promieniowania elektromagnetycznego (X i gamma). Źródłem promieniowania kosmicznego są najbardziej energetyczne zjawiska we Wszechświecie, m.in. rozbiłki słoneczne, wybuchy supernowych, pulsary, aktywne jądra galaktyk. Atmosfera oraz pole magnetyczne Ziemi skutecznie chronią nas przed większością wysokoenergetycznych cząstek. W przestrzeni kosmicznej cząstki te wywołują zakłócenia pracy systemów elektronicznych satelity, uszkadzają układy scalone oraz przyspieszają degradację materiałów konstrukcyjnych systemów satelitarnych.

5.2 Skrajne temperatury

Obiekty oświetlone bezpośrednio przez Słońce mogą nagrzewać się do temperatur przekraczających +100°C, podczas gdy w cieniu Ziemi ich temperatura spada poniżej -180°C. W próżni kosmicznej nie występuje zjawisko konwekcji ani przewodzenia ciepła do otoczenia. Jedynym sposobem odprowadzania ciepła jest promieniowanie (radiacja). Stąd konieczność

projektowania złożonych systemów termicznych satelity: izolacja, radiatory, grzałki, tryby pracy.

5.3 Pogoda kosmiczna

Pogoda kosmiczna to zmiany warunków fizycznych w przestrzeni okołozemskiej wywołane aktywnością Słońca. Zjawiska takie jak wiatr słoneczny, rozbiłki oraz koronalne wyrzuty masy (CME) wywołują burze geomagnetyczne w ziemskiej magnetosferze, powodując przy tym zaburzenia w łączności radiowej oraz zakłócenia w systemach nawigacji.

5.4 Opór atmosferyczny na niskiej orbicie (LEO)

Na wysokościach orbitalnych LEO (do ok. 1000 km) wciąż występuje (choć rzadko) szczątkowa atmosfera. Satelita poruszający się z prędkością ok. 28 000 km/godz. bezustannie zderza się z pojedynczymi cząsteczkami gazu. Powoduje to powolną utratę energii mechanicznej i stopniową utratę wysokości orbity. Podczas wysokiej aktywności słonecznej górne warstwy atmosfery podgrzewają się, zwiększając tym samym opór gazu, powodując większe zużycie paliwa na pracę silników korekcyjnych.

5.5 Anomalia południowoatlantycka (SAA)

SAA to obszar nad Ameryką Południową i południowym Atlantykiem, gdzie pole magnetyczne Ziemi jest wyraźnie słabsze, a zaburzona struktura linii sił pola. W rezultacie wewnętrzny pas radiacyjny Van Allena, zawierający uwiecznione wysokoenergetyczne protony, schodzi w tym rejonie na niskie wysokości (ok. 300 km), generując znaczny wzrost promieniowania jonizującego w obszarze LEO. Zwiększa to ryzyko awarii komputerów pokładowych oraz błędów w przesyłaniu danych.

_06

Z czego składa się satelita
(systemy i podsystemy)

Z czego składa się satelita (systemy i podsystemy)

Satelita to połączenie platformy (bus) i ładunku użytecznego (payload). Platforma zapewnia „życie” satelity, a ładunek realizuje misję (np. kamera lub radar).

1. Platforma (tzw. bus satelitalny) stanowi bazę techniczną i strukturę nośną satelity. Odpowiada za utrzymanie go przy życiu, dostarczanie prądu, kontrolę temperatury oraz łączność z Ziemią.
2. Ładunek użyteczny to specjalistyczne narzędzia robocze satelity, czyli powód, dla którego satelita został wysłany na orbitę. W zależności od charakteru misji mogą to być kamery optyczne, radar, teleskopy astronomiczne lub anteny nadawcze.

6.1 Podsystemy satelitarne

- System zasilania: panele słoneczne, baterie, dystrybucja energii.
- Komputer pokładowy (OBC): sterowanie, oprogramowanie, obsługa danych.
- Łączność: nadajniki/odbiorniki, anteny, protokoły transmisji.
- ADCS: wyznaczanie i kontrola orientacji (czujniki, koła reakcyjne, magnetoquerry).
- Napęd: silniki manewrowe do zmiany orbity i unikania kolizji.
- System termiczny: izolacja, radiatory, grzałki, kontrola temperatury.



6.2 Manewrowanie i orientacja – dlaczego to ważne?

Na orbicie satelita nie może po prostu zastygnąć się lub skoryć. Kontrola orientacji i możliwość wykonywania manewrów pozwala na:

- utrzymanie stabilnej trajektorii – szczątkowa atmosfera na niskich orbitach nieustannie hamuje satelitę;
 - unikanie kolizji – w przestrzeni okołozemskiej krąży tysiące kosmicznych śmieci.
- Gdy systemy naziemne wykryją ryzyko zderzenia, satelita musi wykonać manewr unikania;
- celowanie instrumentami – w celu wykonania obrazowania wybranego obszaru i komunikowania się satelity ze stacją naziemną satelita musi dokonać precyzyjnego obrotu.

_07

Dzień i noc w 90 minut
– cykl na orbicie

Dzień i noc w 90 minut – cykl na orbicie

Satelity krążące na niskiej orbicie LEO poruszają się z prędkością ok. 28 000 km/godz. Jedno pełne okrążenie Ziemi zajmuje im 90 minut. W rezultacie satelita w ciągu jednej doby „przeleci” 16 wschodów i zachodów Słońca. Ciągłe przechodzenie ze strefy nasłonecznionej do cienia Ziemi niesie poważne konsekwencje inżynierskie, energetyczne i termiczne.

T1 Faza dnia orbitalnego (ok. 55 minut)

- Panele fotowoltaiczne satelity są bezpośrednio oświetlane przez Słońce. Produkują energię elektryczną zasilającą urządzenia i ładują akumulatory pokładowe na zapas.
- Struktura satelity silnie absorbuje promieniowanie słoneczne, przez co jego zewnętrzne elementy gwałtownie nagrzewają się do wysokich temperatur.
- Jest to główny czas pracy satelitów optycznych (pasywnych), które do obrazowania potrzebują naturalnego oświetlenia powierzchni Ziemi przez Słońce.

T2 Faza nocy orbitalnej (ok. 40 minut)

- Satelita wchodzi w cień Ziemi, co całkowicie odcina dopływ światła słonecznego. Panele przestają produkować energię elektryczną, a całe zasilanie satelity zostaje automatycznie przełączone na energię zgromadzoną w akumulatorach.
- Brak dopływu promieniowania słonecznego przy jednoczesnym ciągłym wypromieniowywaniu ciepła w próżnię sprawia, że satelita gwałtownie się wychładza. Aby zapobiec zamarznięciu i popękaniu elektroniki, komputer pokładowy musi uruchomić wewnętrzny system ogrzewania.
- Kamery optyczne pracujące w świetle widzialnym stają się w tej fazie bezużyteczne, ponieważ powierzchnia Ziemi pod satelitą jest nieoświetlona.

Satelity wyposażone w radar SAR (Synthetic Aperture Radar), czyli w aktywne sensory, nie potrzebują do pracy światła słonecznego. Mogą bez przeszkód prowadzić obserwacje zarówno w dzień, jak i podczas nocy orbitalnej, a warunki pogodowe nie mają dla nich żadnego znaczenia.

_08

Od zadaniowania do produktu
– jak powstają dane satelitarne

Od zadaniowania do produktu – jak powstają dane satelitarne

W teledetekcji satelitarnej obraz powierzchni Ziemi nie pojawia się w komputerze użytkownika w magiczny sposób. Gotowy produkt poprzedza precyzyjnie zaplanowany ciąg operacyjny.

8.1 Cykl operacyjny pozyskiwania zobrazowań

Proces ten składa się z sześciu głównych etapów:

1. Zadaniowanie (wybór satelity, określenie trybu pracy sensorów i zaplanowanie dokładnego czasu (okna), w którym satelita przeleci nad wybranym obszarem).
2. Przesłanie komend (centrum kontroli misji na Ziemi wysyła instrukcje operacyjne do satelity podczas jego najbliższego kontaktu ze stacją naziemną).
3. Pozyskiwanie danych (satelita wykonuje obrazowanie bądź skan radarowy dokładnie według podanych parametrów, następnie zapisuje surowe dane w swojej pamięci pokładowej).
4. Zrzuć danych (podczas przeletu nad stacją naziemną satelita przesyła drogą radiową gigantyczne pakiety zapisanych danych).
5. Przetwarzanie (surowe dane satelitarne są kalibrowane, a następnie podlegają korekcji geometrycznej i atmosferycznej).
6. Produkt końcowy (użytkownik otrzymuje gotowy, skalibrowany obraz lub zaawansowaną mapę analityczną gotową do interpretacji).

Współczesna teledetekcja wykorzystuje dwa różne podejścia do pozyskiwania danych:

- model na zamówienie (satelita wykonuje zobrazowanie dopiero wtedy, gdy klient zgłosi zapotrzebowanie na konkretny obszar);
- model systematyczny (satelita krążący wokół Ziemi stale skanuje całą powierzchnię globu, np. satelity Sentinel. Dzięki temu powstaje cyfrowe archiwum zobrazowań, które pozwala porównywać stan „przed” i „po”, np. wystąpieniu powodzi).

Przykładem platformy gromadzącej dane satelitarne i gotowe produkty analityczne w jednym miejscu jest opracowany przez Polską Agencję Kosmiczną Narodowy System Informacji Satelitarnej (NISIS).



_09

Optyka vs radar:
dwa różne sposoby
„widzenia” Ziemi

Optyka vs radar: dwa różne sposoby „widzenia” Ziemi

5.1 Obrazowanie optyczne (pasywne)

Satelity optyczne działają jak cyfrowe aparaty fotograficzne. Rejestrują promieniowanie w zakresie widzialnym, które zostało wyemitowane przez Słońce i odbiło się od powierzchni Ziemi. Kolory, kształty i cienie wyglądają na tych obrazach dokładnie tak, jak je widzimy.

5.2 Obrazowanie radarowe (aktywne)

Satelity radarowe (SAR) nie korzystają ze światła słonecznego. Emitują w stronę Ziemi własne impulsy mikrofalowe (fale radiowe), a następnie mierzą sygnał, który powrócił do anteny (tzw. echo radiowe). Obraz radarowy to „mikrofalowa latarka”. Taki obraz podkreśla reliefowość powierzchni i geometrię. W zależności od sposobu wizualizacji woda bywa ciemna, zabudowa często jasna. Obraz może być zmięszty – to normalne zjawisko.

W praktyce dane optyczne i radarowe się uzupełniają i często są łączone.



_10

Radar SAR

Radar SAR

Satelity radarowe SAR korzystają z zaawansowanych praw fizyki fal i matematyki komputerowej. Pozwalają tworzyć niezwykle dokładne obrazy powierzchni Ziemi z odległości setek kilometrów.

10.1 Czym jest „syntetyczna apertura”?

Satelita SAR, lecąc po orbicie, wysyła tysiące impulsów na sekundę i cały czas obserwuje ten sam obszar z kolejnych punktów swojej trasy. Komputer łączy odebrane sygnały w jeden obraz, tak jakby zebrała je pojedyncza antena o długości wielu kilometrów. To właśnie, w pewnym uproszczeniu, nazywamy syntetyczną aperturą.

10.2 Co mierzy SAR?

Radar SAR wysyła krótkie impulsy mikrofalowe i mierzy echo, czyli sygnał odbity od danej powierzchni. W uproszczeniu ważne są dwa elementy:

- amplituda – wysokość fali – siła echa radarowego, która zależy od materiału i szerokości podłoża;
- faza – punkt w cyklu fali – pozwala precyzyjnie określić odległość od powierzchni i różnice wysokości obiektów.

10.3 Jak czytać obraz SAR?

Obrazy SAR są monochromatyczne (czarno-białe), a jasność punktów zależy od tego, jak fala radiowa odbiła się od danej powierzchni. Powierzchnie gładkie (np. woda, asfalt) są jak lustro – odbijają falę w dół pod kątem, przez co do satelity wraca nieznaczne echo, stąd takie powierzchnie są ciemne (czarne). Powierzchnie szorstkie i pionowe (np. lasy, budynki) powodują chaotyczne rozproszenie fali lub jej wielokrotne odbicie. Do satelity wraca potężne echo, stąd miasta i tereny zabudowane na obrazowaniach są bardzo jasne (białe).

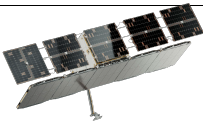
- Jasne piksele często oznaczają silne odbicie (np. zabudowa, metal, ostre krawędzie, „kąty” budynków).
- Ciemne piksele często oznaczają słabe odbicie (np. gładka woda).
- Złamistość (speckle) jest typowa dla radarów – nie jest wadą zdjęcia, tylko cechą metody.
- Interpretacja zależy od geometrii obserwacji – przydaje się porównanie z mapą lub obrazem optycznym.

10.4 Tryby obrazowania na przykładzie satelitów ICEYE

Tryby obrazowania to kompromis między: szczegółowością (rozdzielczością), szerokością pasa obserwacji (obszarem) i czasem obserwacji jednego miejsca.

Satelita radarowy nie potrafi jednocześnie widzieć bardzo szeroko i bardzo szczegółowo. Dlatego inżynierowie sterują jego anteną w różnych trybach:

- **Drill** – tryb, w którym antena „spatruje się” w cel najdłużej, zbierając maksimum sygnału. Efektem jest obraz o wyjątkowej ostrości, podwyższonej jakości i obniżonym szumie. Rozdzielczość: 25 cm, 50 cm lub 1 m, scena 5 km x 5 km;
- **Spot** – tryb punktowy o bardzo wysokiej rozdzielczości. Rozdzielczość do 50 cm przy scenie do 15 km x 15 km, największej dostępnej przy tak dużej szczegółowości. Służy do identyfikacji obiektów i szczegółowej detekcji zmian;
- **Strip** – klasyczny tryb pasmowy; satelita skanuje równy pas terenu pod sobą, łącząc dobrą szczegółowość z dużym zasięgiem. Rozdzielczość 3 m, scena 30 km x 50 km. Sprawdza się w monitorowaniu rozległych obszarów lądowych i morskich: granic, wybrzeży, skutków klęsk żywiołowych czy nielegalnej działalności;
- **Scan** – tryb szerokiego skanowania; antena omiata teren, obejmując ogromne obszary kosztem szczegółowości. Dostępne są dwa warianty, Scan i Scan Wide, o rozdzielczościach 15 m i 27 m, ze scenami od 100 km x 100 km do aż 300 km x 600 km.



10.5 Dla ciekawych – monitoring zmian i techniki zaawansowane

Porównanie obrazów radarowych pozwala wykryć zmiany i dowiedzieć się, co dzieje się na obserwowanym terenie.

- Klasyczny obraz monochromatyczny pozwala na identyfikację szczegółów w zastosowaniu do miast, portów i linii brzegowych.
- Sekwencje z jednego przeletu (sub-aperture video) mogą ujawniać obiekty w ruchu.
- Interferometria (InSAR) – radar mierzy fazę fal, dzięki czemu możliwe jest nałożenie na siebie dwóch zobrażeń radarowych tego samego obszaru wykonanych w odinnym czasie. Zastosowanie: wykrywanie ruchów skorupy ziemskiej z dokładnością do milimetrów, osłabianie miast nad kopalniami, powolne uginanie się zapór wodnych, ruchy lodowców, deformacje stożków wulkanicznych.

_11

Operacje satelitarne i bezpieczeństwo na orbicie

Operacje satelitarne i bezpieczeństwo na orbicie

Wysłanie satelity na orbitę to dopiero początek. Praca inżynierów i operatorów polega na codziennym zarządzaniu satelitą, monitorowaniu jego stanu technicznego oraz nawigowaniu w coraz bardziej zatłoczonej przestrzeni kosmicznej.

III Cykl życia satelity

Każda misja kosmiczna dzieli się na ściśle określone etapy:

- budowa i integracja – łączenie podsystemów satelitarnych, przeprowadzenie testów w komorach próżniowych i termicznych, które symulują warunki kosmiczne;
- symulacja operacyjna – testowanie procedur łączności i sterowania, zanim satelita opuści Ziemię;
- kampania startowa – transport na kosmodrom, integracja satelity z rakietą nośną, start oraz separacja satelity na docelowej orbicie;
- faza LEO-P – pierwsze chwile satelity na orbicie; satelita musi automatycznie rozłożyć panele słoneczne, ustabilizować własny ruch obrotowy i wysłać pierwszy sygnał radiowy na Ziemię;
- uruchomienie (z ang. commissioning) – faza testów, w której inżynierowie sprawdzają sprawność wszystkich instrumentów i kalibrują kamery lub radar;
- operacje rutynowe – właściwa praca satelity; codzienne wykonywanie zadań, zbieranie danych i przysyłanie ich na Ziemię;
- deorbitacja – zakończenie misji; satelita za pomocą silników obniża swoją orbitę, aby w sposób kontrolowany wejść w atmosferę i bezpiecznie w niej spłonąć.

III.2 Co robią operatorzy satelitów?

Operatorzy w centrum kontroli misji pracują w trybie ciągłym. Ich główne zadania to:

- analiza telemetry – monitoring temperatury podzespółów, napięcia w akumulatorach i stanu naładowania baterii;
- zarządzanie anomaliami – w przypadku wykrycia awarii wdrażanie procedur awaryjnych w celu zdalnego naprawienia systemu;
- planowanie manewrów – analiza pozycji i wysyłanie komend zapewniających utrzymanie poprawnej trajektorii lotu.

III.3 Zarządzanie ruchem i unikanie kolizji (COLA)

W przestrzeni okołoziemskiej krążą setki tysięcy obiektów: działające satelity, niedziałające wraki oraz drobne odłamki (śmieci kosmiczne).

- systemy monitorowania – specjalne sieci naziemnych radarów i teleskopów
- SST – Space Surveillance and Tracking – bezustannie śledzą pozycję tych obiektów;
- ostrzeżenie o zbliżeniu – gdy sensory wykryją, że inny obiekt przeleci niebezpiecznie blisko satelity, generowane jest ostrzeżenie o tzw. koniunkcji (bliskim przelecie);
- manewr unikania – COLA – Collision Avoidance Manoeuvre; inżynierowie obliczają ryzyko zderzenia. W razie wysokiego prawdopodobieństwa kolizji do satelity wysyłana jest komenda zmiany trajektorii lotu. Satelita na chwilę zmienia swoją orbitę, pozwalając śmieciowi kosmicznemu bezpiecznie przemknąć obok, po czym wraca na swoją pozycję i do swoich standardowych zadań.

_12

Technologie satelitarne w służbie bezpieczeństwa

Technologie satelitarne w służbie bezpieczeństwa

Satelity służą dziś państwom do ochrony suwerenności, wzmacniania bezpieczeństwa i ochrony obywateli przed skutkami klęsk żywiołowych. Kraj, który ma własne systemy orbitalne, może samodzielnie śledzić sytuację na Ziemi i nie musi kupować danych od zagranicznych dostawców.

Historycznym krokiem dla polskiej obronności było wyniesienie na orbitę w listopadzie 2025 roku pierwszego w historii Sił Zbrojnych RP satelity wojskowego. Satelita, zbudowany przez firmę ICEYE w ramach programu MikroSAR, jest wyposażony w radar z syntetyczną aperturą (SAR), który umożliwia obserwację Ziemi w każdych warunkach atmosferycznych – w dzień i w nocy.

12.1 Wczesne ostrzeżenie i monitoring zagrożeń powodziowych

Podczas powodzi najważniejsze jest szybkie rozpoznanie sytuacji na dużym obszarze, często w warunkach zachmurzenia i opadów. W takim scenariuszu

dane radarowe SAR są szczególnie przydatne, bo satelity SAR działają niezależnie od pogody i pory dnia. Przykładem jest powódź w Polsce w 2024 roku (mł. genueński „Boris”), podczas której wykonano setki zobrazowań radarowych i przygotowywano cykliczne analizy wspierające służby ratunkowe, m.in. mapy zasięgu i głębokości zalania.

12.2 Monitoring pożarów i ocena szkód

Podczas dużych pożarów widoczność bywa ograniczona przez dym, a dostęp do terenu utrudniony. Dane SAR mogą zapewnić aktualną informację sytuacyjną niezależnie od warunków obserwacji, wspierając planowanie działań ratowniczych i ocenę zniszczeń; tak wykorzystywano je m.in. przy pożarach w Los Angeles w styczniu 2025 roku.

12.3 Długoterminowy monitoring zmian środowiska

Serie obserwacji satelitarnych pozwalają śledzić ruch pokrywy lodowej, zmiany linii brzegowej czy osiadanie gruntu. Największą wartość daje regularność pomiarów i porównywanie danych w czasie, dlatego ważne jest gromadzenie i archiwizacja danych satelitarnych.

12.4 Monitoring rolnictwa i leśnictwa

Dane satelitarne wspierają monitoring upraw (kondycja roślin, precyzyjne nawożenie) oraz lasów (wykrywanie nielegalnych wygrobów, szkód po wichurach i pożarach, śledzenie chorób drzew).

_13

Kilka faktów
historycznych

Kilka faktów historycznych

- 1957 - Sputnik 1: pierwszy sztuczny satelita Ziemi, początek ery kosmicznej
- 1960 - TIROS-1 (USA) - uruchomienie pierwszego w historii satelity meteorologicznego
- 1966-1972 - CORONA - pierwszy seria amerykańskich satelitów rozpoznawczych, operująca pod jawnym kryptonimem Discoverer
 - rozpoznanie fotograficzne z filmem sprowadzanym na Ziemię w kapsule
- 1972 - Landsat 1: systematyczna cywilna obserwacja Ziemi, dotychczas do dziś. Aktualnie pracujące na orbicie Landsat 8 i Landsat 9
- 1996 - GPS: pełna zdolność operacyjna, globalna nawigacja i precyzyjny czas
- 2014 - Sentinel-1A: szeroka dostępność danych radarowych w programach publicznych
- 2019 - początek megakonstelacji (np. systemy łączności z LEO)

W ramach programu CORONA satelity rejestrowały obrazy na taśmie filmowej, po czym zrzucały kapsuły z materiałem, który następnie przetwarzano w locie lub wyławiano z posadu.



_14

Ścieżki kariery

Ścieżki kariery

Sektor kosmiczny jest jedną z najbardziej interdyscyplinarnych branż. Budowa satelitów i operowanie nimi wymagają współpracy specjalistów różnych dziedzin. Oznacza to, że miejsca w branży kosmicznej znajdują zarówno programiści i konstruktorzy, jak i specjaliści od prawa, zarządzania i logistyki.

14.1 Przykładowe role

- Inżynier mechanik/struktury: wytrzymałość, wibracje w czasie startu, masa
- Inżynier materiałowy
- Inżynier elektroniki/fotoniki/RF: łączności, anteny, zakłócenia, przetwarzanie sygnałów, w tym postkwantowe
- Inżynier automatyki, robotyki i sterowania (ADCS/GNC): orientacja, stabilizacja, algorytmy kontroli
- Inżynier oprogramowania: systemy pokładowe, testy, niezawodność, bezpieczeństwo, autonomia
- Inżynier danych/AI: przetwarzanie obrazów, detekcja zmian, mapy i produkty analityczne
- Inżynier systemów: łączy wszystkie elementy, pilnuje wymagań i szuka kompromisów, inżynieria MGSE
- Specjaliści od prawa i polityki kosmicznej
- Astrofizycy, astrobiolodzy, biotechnolodzy
- Ekspert od bezpieczeństwa, zarządzania kryzysowego, kontrolerzy jakości
- Specjaliści od ochrony środowiska wykorzystujący dane satelitarne, edukatorzy, popularyzatorzy nauki

14.2 Jakie dziedziny STEM są tu szczególnie przydatne?

- Automatyka i teoria sterowania
- Fizyka atomowa, astronomia, astrofizyka
- Termodynamika
- Elektronika i elektrotechnika
- Mechanika
- Fizyka matematyczna
- Teledetekcja satelitarna, fotogrametria

14.3 Co możesz zrobić już teraz?

- Ucz się matematyki i fizyki.
- Poznaj podstawy programowania i pracy z danymi.
- Śledź projekty uczelni, firm i instytucji związanych z sektorem kosmicznym.
- Korzystaj z dostępnych online kursów, webinarów i materiałów edukacyjnych o kosmosie i nowych technologiach.



Powered by **ICEYE**

