Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, vol. 36, pp. 21-37
ISSN 2083-2214, eISSN 2391-9477
DOI: http://doi.org/10.14681/apcrs-2025-002

RESEARCH ARTICLE

ANALIZA DOKŁADNOŚCI GEOMETRYCZNEJ SCEN SATELITARNYCH GAOFEN-7

ANALYSIS OF GEOMETRIC ACCURACY OF GAOFEN-7 SATELLITE SCENES

Krzysztof Szczepański, Krzysztof Bakuła

Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: VHRS, stereopary, dokładność geometryczna, fotopunkty, Gaofen-7

STRESZCZENIE: Celem niniejszego artykułu było zbadanie jakości i dokładności zdjęć wykonywanych przez pierwszego chińskiego, cywilnego satelitę VHRS Gaofen-7. Dokonano oceny wizualnej zdjęć, w szczególności możliwości teledetekcyjnych obiektów o rozmiarach zbliżonych do wielkości terenowej odległości próbkowania (GSD). Główną częścią eksperymentu była analiza geometryczna, w której sprawdzono rozkład błędów położenia punktów pomiarowych względem ortofotomapy lotniczej, z podziałem na ich rozmieszczenie w odniesieniu do odległości od sensora, a także kąta obrazowania przy obrazowaniu wprzód i wstecz. Sprawdzono również błędy pomiaru odległości, mierząc różnice długości poszczególnych obiektów w zależności od ich orientacji względem osi zdjęcia. Efektem było określenie średniej dokładności geometrycznej na poziomie ok. 10 m. Dokładność pomiaru obiektów liniowych była zbliżona do rozdzielczości przestrzennej zobrazowania, mieszcząc się w granicach błędu pomiarowego. Eksperymenty dowiodły, że sceny satelitarne z satelity Gaofen-7 mają potencjał pomiarowy, oferując możliwości zbliżone do rozdzielczości przestrzennej sensora, co jest przydatne w zastosowaniach, do których został zaprojektowany ten system.

1. WPROWADZENIE

W dobie szybkiego rozwoju techniki niemały udział przypada na technologię satelitarną. W ciągu kilkudziesięciu lat sektor ten przeszedł ogromną przemianę, od eksperymentalnych urządzeń zbierających dane naukowe po te, które dziś powszechnie wykorzystywane są na co dzień. Odkąd tylko stało się to możliwe, człowiek jest zainteresowany wykorzystaniem satelitów do tworzenia zobrazowań powierzchni Ziemi. Technika ta przeszła niełatwą drogę ze względu na wysokie koszty, niewielką początkową rozdzielczość przestrzenną i dużą konkurencję ze strony klasycznych rozwiązań – fotografii lotniczej. Obrazowanie satelitarne stosuje się często w teledetekcji ze względu na możliwość objęcia takimi zdjęciami bardzo dużego obszaru, jak również wykonywania cyklicznych

zdjęć w pewnym interwale czasu, co stanowiłoby wyzwanie logistyczne dla klasycznej, lotniczej fotogrametrii. Jednak pojawienie się na przełomie XX i XXI wieku satelitów bardzo wysokiej rozdzielczości (VHRS) znacząco rozszerzyło możliwości zobrazowań satelitarnych, gdyż zdjęcia uzyskały stosunkowo dobrą jakość przy coraz mniejszych kosztach, a w niektórych zastosowaniach mogą nawet zagrozić pozycji zdjęć lotniczych. Poniżej przedstawiono zestawienie kilku przykładowych systemów VHRS.

Tab. 1. Zestawienie wybranych satelitarnych systemów obserwacyjnych bardzo wysokiej rozdzielczości (VHRS).

System	**Kanały**	**Rozdzielczość [m]**
SkySat 16-21	B, G, R, NIR, PAN	Panchromatyczne: 0.57 Multispektralne: 0.75
Pléiades Neo	Deep Blue, B, G, R, Red Edge, NIR, PAN	Panchromatyczne: 0.30 Multispektralne: 1.20
Kompsat-3A	B, G, R, NIR, PAN	Panchromatyczne: 0.55 Multispektralne: 2.20
WorldView-3	28 kanałów między 400 - 2365 nm, PAN	Panchromatyczne: 0.31 Multispektralne: 1.40 - 30
Gaofen-7	B, G, R, NIR, PAN	Panchromatyczne: 0.65 Multispektralne: 2.60

Jednym z przykładów umieszczonych w zestawieniu jest chiński satelita Gaofen-7, który jest pierwszym chińskim cywilnym satelitą, zdolnym wykonywać stereogramy o terenowej odległości próbkowania (GSD) poniżej 1 m. Wchodzi on w skład serii satelitów służących do obserwacji Ziemi Gaofen, umieszczanych na orbicie w ramach programu China High-definition Earth Observation System (CHEOS) od 2010 roku. Wspomniany satelita został wyniesiony w listopadzie 2019 roku na wysokość 500 km nad Ziemią na orbitę heliosynchroniczną. Pierwotnie zaprojektowany z myślą o pomiarach rolniczych i kartowaniu topografii (Liangfu *et al*., 2022). System altymetrii laserowej został natomiast zaprojektowany z myślą o zastąpieniu starzejącego się już systemu ZiYuan3 nowym, spełniającym kryteria kartowania dla skali 1:10 000, zgodnie z chińskimi normami (Xinming et al, 2019).

Ocena dokładności geometrycznej scen satelitarnych o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej obejmuje analizę dokładności pozycjonowania bezwzględnego i względnego, ocenę poprawności orientacji geometrycznej oraz weryfikację wpływu procesu ortorektyfikacji na końcową jakość geometryczną produktów teledetekcyjnych. W literaturze stosuje się kilka uzupełniających się podejść, w tym metody oparte na punktach osnowy fotogrametrycznej i niezależnych punktach kontrolnych, modele fizyczne opisujące geometrię obrazowania sensora, modele wielomianowe oraz modele współczynników wymiernych (Rational Polynomial Coefficients, RPC). W metodach empirycznych współrzędne punktów charakterystycznych, pozyskane z pomiarów geodezyjnych GNSS/GPS lub referencyjnych ortofotomap i danych kartograficznych, porównuje się z ich odpowiednikami zidentyfikowanymi na analizowanych scenach. Istotne jest rozdzielenie punktów osnowy (GCP), wykorzystywanych do wyznaczania parametrów transformacji,

od niezależnych punktów kontrolnych (CP), służących do obiektywnej walidacji wyników. Przykłady prac, w których analizowano jakość geometryczną scen satelitarnych, można znaleźć w pracach: Wolniewicz, 2004; Aguilar *et al*., 2008; Wyczałek *et al.*, 2010; Zheng *et al*., 2018; Topan *et al.*, 2026.

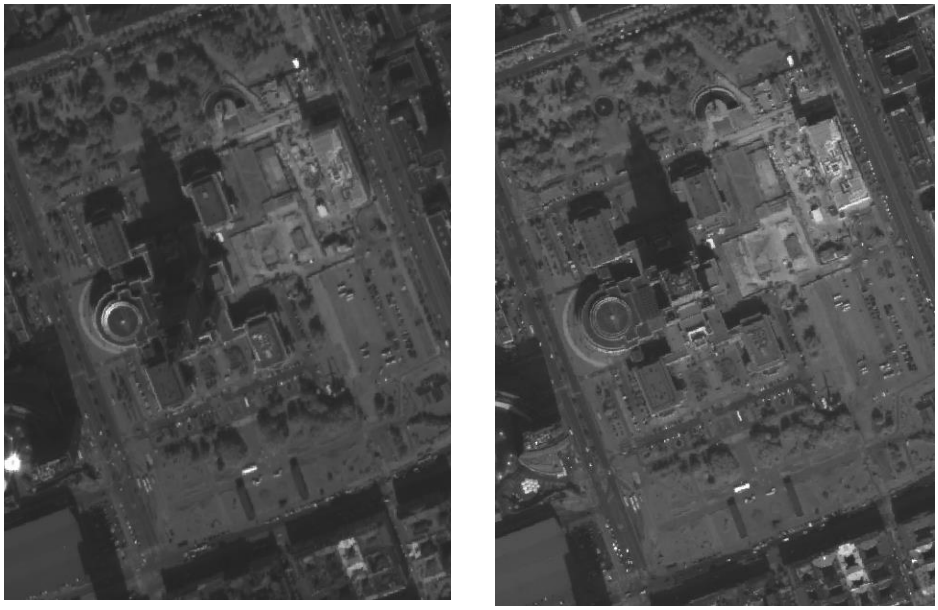
2. METODYKA EKSPERYMENTU

W niniejszym artykule poddano analizie 8 scen wykonanych za pomocą systemu satelitarnego Gaofen-7. Sceny te składały się z pary panchromatycznych zdjęć stereograficznych – wprzód (określane dalej jako FWD), wstecz (określane dalej jako BWD) oraz obrazów wielospektralnych (określanych dalej jako MUX).

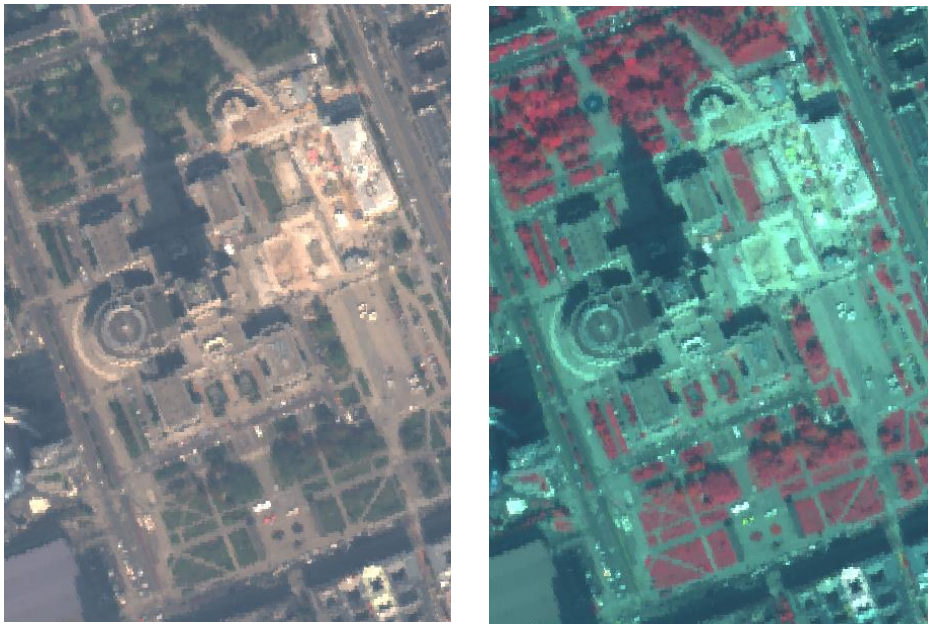
Dokonano rozpoznania poszczególnych obiektów na zdjęciach w celu określenia możliwych zastosowań tego typu zdjęć. Dokonano także analizy dokładności sytuacyjnej położenia punktów w zależności od ich położenia na scenie satelitarnej oraz jej kąta obrazowania, a także analizy dokładności pomiaru odcinaków w zależności od ich orientacji względem kierunku obrazowania na scenach.

2.1 Charakterystyka danych

Gaofen-7 wyposażony jest w sensory zdolne do rejestrowania panchromatycznych stereopar oraz zobrazowań wielospektralnych (z pozycji wstecz). Wyposażony jest także w dwuwiązkowy laser do pomiarów wysokościowych. Deklarowana przez centrum LASAC Ministerstwa Zasobów Naturalnych Chińskiej Republiki Ludowej rozdzielczość terenowa wskazana jest jako wyższa niż 0.8 m dla zobrazowań panchromatycznych oraz wynosząca 3.2 m dla zobrazowań wielopektralnych. Niektóre źródła precyzują, że zdjęcia panchromatyczne wstecz wykonywane są z GSD równym 0.65 m, panchromatyczne wprzód – 0.8 m, a wielospektralne – 2.6 m. Część źródeł pozostaje jednak przy wartości 3.2 m. Dla zobrazowań wielospektralnych dostępne są kanały o następujących zakresach spektralnych: B (0.45–0.52 μm), G (0.52–0.59 μm), R (0.63–0.69 μm), NIR (0.77–0.89 μm), a dla panchromatycznych: 0.45–0.9 μm. Zdjęcia obejmują pasy terenu o szerokości ok. 20 km. Obrazy wstecz wykonywane są pod kątem -5°, a wprzód pod kątem +26°. Wiązka lasera do pomiarów wysokościowych zbierana jest za pomocą dwóch kamer o rozmiarze 550x550 px i wielkości pojedynczego piksela 16.5 μm. Dokładność wysokościowych pomiarów laserowych podawana jest na poziomie poniżej 30 cm dla obszarów o nachyleniu mniejszym niż 15°. Czas rewizyty satelity wynosi 5 dni. Deklarowana dokładność kartowania po transformacji ma spełniać chińskie kryteria dokładnościowe dla map w skali 1:10 000 (Guoming *et al*., 2021). Przykłady scen z omawianego systemu satelitarnego znajdują się na rysunkach 1-2, na których pokazano przybliżenie i szczegółowość zobrazowania wprzód oraz wstecz, a także zobrazowanie wielospektralne w kompozycji w barwach naturalnych oraz CIR.



Rys. 1. Widok na PKiN dla zdjęcia wprzód (po lewej) oraz wstecz (po prawej).



Rys. 2. Widok na PKiN dla zdjęcia w kompozycji w barwach naturalnych (po lewej) oraz w CIR (po prawej).

Do celów analizy otrzymano 8 scen składających się ze zdjęć FWD, BWD i MUX każda, przedstawiających obszar Warszawy oraz okoliczne powiaty. Sceny wykonywano w okresie wrzesień 2023 – styczeń 2024. Charakterystyki poszczególnych scen przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Opis analizowanych scen satelitarnych z Geofen-7 w eksperymencie.

Scena	Data obrazowania	Obszar
1	7.09.2023	Na północ od Nowego Dworu Mazowieckiego
2	7.09.2023	Zachodni fragment Puszczy Kampinoskiej
3	12.09.2023	Południowa część Warszawy
4	12.09.2023	Północna część Warszawy
5	17.09.2023	Garwolin i obszary na północ od niego
6	17.09.2023	Mińsk Mazowiecki i okolice
7	8.01.2024	Obszar na południowy-wschód od Warszawy
8	8.01.2024	Wschodnia część Warszawy

Warto dodać, że sceny zimowe wykonano w terminie, w którym na obrazowanym obszarze występował śnieg.

2.2 Metodyka analizy wizualnej zdjęć

W analizie skupiono się na obiektach o rozmiarach zbliżonych do rozdzielczości terenowej. Przeanalizowano obiekty liniowe, takie jak infrastruktura drogowa, oznakowanie poziome, a także elementy liniowe o widocznej granicy, jak brzegi rzek czy krawężniki. Przykład przedstawiono na poniższym rysunku. Analizowano możliwości rozpoznania poszczególnych obiektów oraz ich cech fotointerpretacyjnych. Dużą uwagę poświęcono obiektom o powierzchni mniejszej niż GSD. Dodatkowo porównano ostrość, kontrast i cechy fotointerpretacyjne obiektów na zdjęciach FWD i BWD oraz na kompozycjach w barwach naturalnych i CIR w przypadku obrazów multispektralnych.

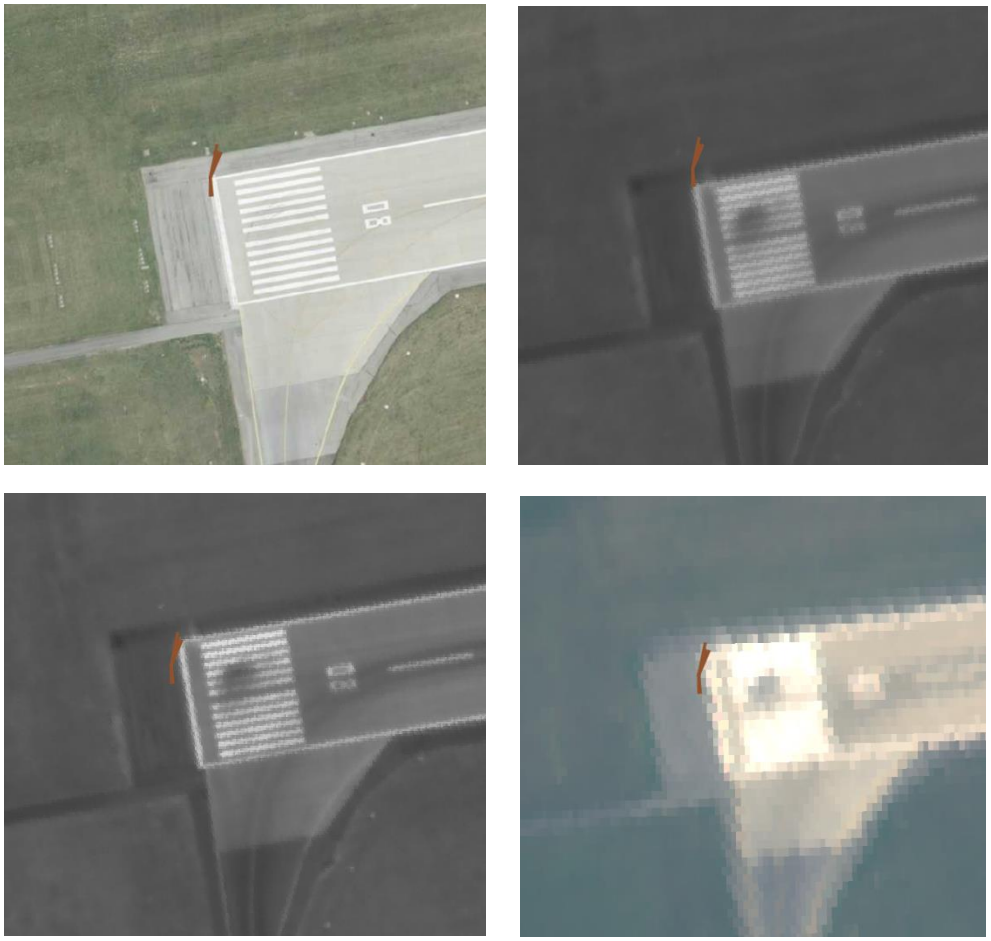
Na rysunku 3 dostrzec można skrzyżowanie ulic z wyraźnie kontrastującymi narożnikami nawierzchni oraz trawników. Widać również na zobrazowaniu poziomie znaki drogowe pomalowane białą farbą. Mogą one stanowić pomiar niezbędny do poprawy georeferencji czy też być elementem pomiarowym opracowania.



Rys. 3. Przykład potencjalnych obiektów pomiarowych o widocznych granicach na scenie satelity Gaofen-7.

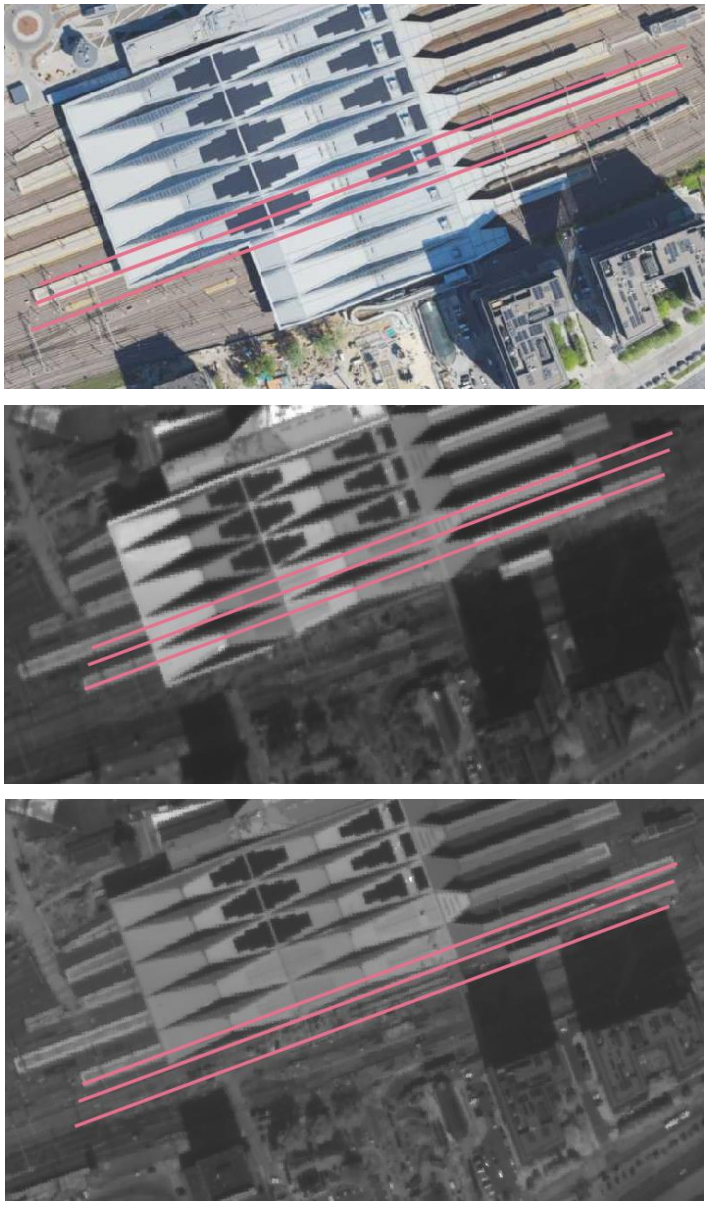
2.3 Metodyka analizy jakości geometrycznej zdjęć

Analizę tę wykonano oddzielnie dla punktów oraz obiektów liniowych. Dokonano kontroli georeferencji zdjęć poprzez sprawdzenie wpasowania poszczególnych punktów zlokalizowanych na obszarze poszczególnych scen, a także poprzez pomiar odległości od położenia tych punktów względem położenia referencyjnego, wyznaczonego na podstawie pomiaru na ortofotomapie lotniczej o rozdzielczości przestrzennej 10 cm. Punkty podzielono na 3 kategorie względem ich odległości od środka rzutu kamery, która z racji nachylenia zdjęć jest najmniejsza na krawędzi dolnej w przypadku zdjęć wprzód oraz górnej w przypadku zdjęć wstecz. Analizy dokonano oddzielnie dla każdej sceny. Wyznaczono odległość oraz błąd jej wyznaczenia. Przykłady obiektów mierzonych pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Przykłady pomiarów punktów od góry z lewej: ortofotomapa, FWD, BWD, MUX.

Wykonano także analizę dokładności pomiaru długości obiektów liniowych. W tym celu wyznaczono 10 linii równomiernie rozłożonych na obszarze jednej ze scen satelitarnych. Linie zaznaczono na zdjęciach BWD i FWD, a jako wartość referencyjną przyjęto długość wyznaczoną na podstawie ortofotomapy. Nie wykonywano pomiarów na zobrazowaniach multispektralnych ze względu na identyczną geometrię w porównaniu ze zdjęciami wstecz i gorszą wielkość terenową piksela. Obliczono różnice w długościach linii na zdjęciach satelitarnych w porównaniu z długościami linii na ortofotomapie. Oznaczano orientację linii z podziałem na linie podłużne, poprzeczne i ukośne względem kierunku wykonywania zdjęcia przez satelitę. Zestawienie wyników wykonano zarówno dla podziału na zobrazowania wprzód i wstecz, jak i dla podziału na orientację linii. Przykład pomiaru obiektów liniowych przedstawiono na rysunku 5.

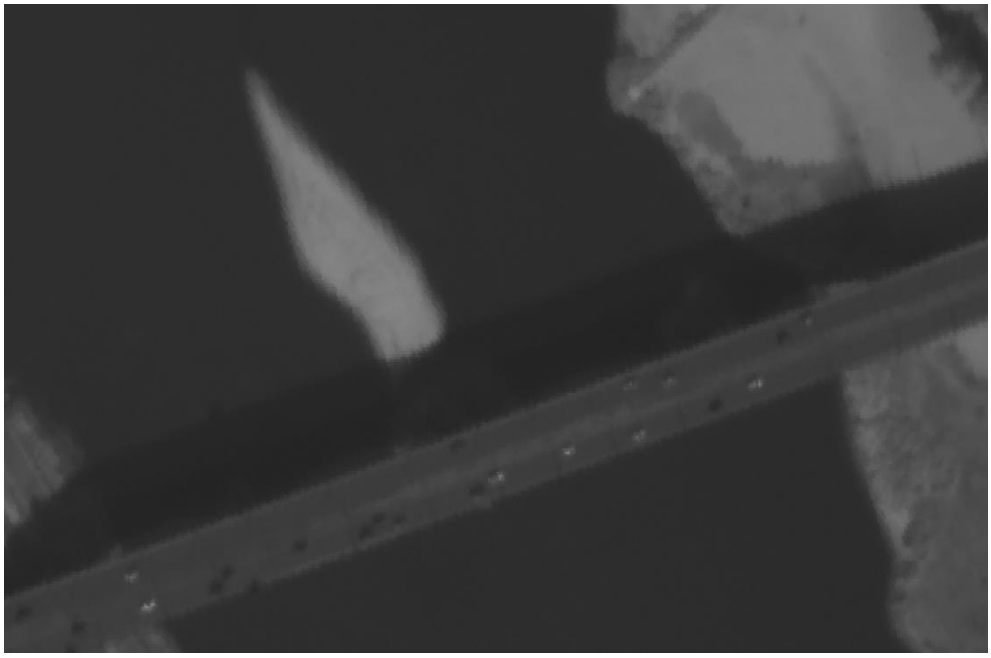


Rys. 5. Przykład pomiarów liniowych – peron Dworca Zachodniego w Warszawie.
Od góry: ortofotomapa, FWD, BWD.

3. WYNIKI ANALIZY

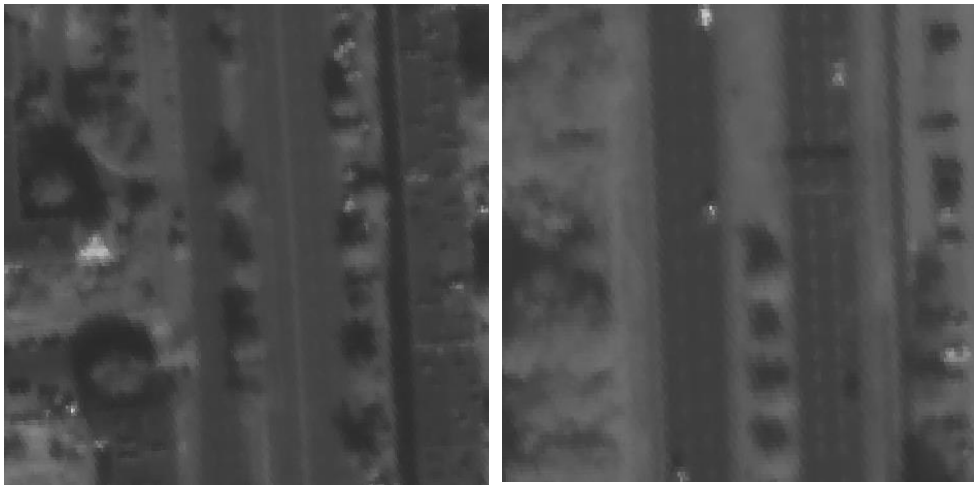
3.1 Analiza wizualna

Dla badanych obiektów trudno określić zarówno obecność, jak i przebieg w przypadku obiektów liniowych. Duży wpływ na rozpoznawalność ma kontrast – w przypadku mocno kontrastujących granic, jak brzegi rzek (rys. 6), czy świeże, białe oznakowanie poziome na drogach (rys. 3 i 4) można bez trudu zinterpretować te obiekty, natomiast przy niewielkim kontraście lub w przypadku obiektów znajdujących się w cieniu rzucanym przez inne obiekty rozpoznanie było trudne, a czasem niemożliwe, czego przykład zaprezentowano na rys. 6, gdzie obok widocznej wyraźnie linii brzegowej z piasku widzimy również zacieniony obszary, na których ciężko cokolwiek zidentyfikować.



Rys. 6. Linia brzegowa Wisły w Warszawie – widoczny obszar zacieniony przez most.

W przypadku obiektów liniowych o szerokości mniejszej niż terenowa wielkość próbkowania zdjęcia, identyfikacja była możliwa w większości przypadków, jednak w niektórych była ona bardzo utrudniona, a czasem wręcz niemożliwa ze względu na niewystarczający kontrast. Przykładem może być oznakowanie poziome na jezdniach w ciągu ulicy Puławskiej w Warszawie (rys. 7).



Rys. 7. Oznakowanie poziome w ciągu ulicy Puławskiej w Warszawie na scenach Gaofen-7.

Dla świeżo pomalowanych fragmentów ulicy łatwo dało się wyróżnić poszczególne pasy ruchu, jednak na innych odcinkach, gdzie oznakowanie jest lekko zużyte, mimo tej samej szerokości jest ono już ledwie widoczne. W przypadku obiektów punktowych, takich jak studzienki, nie dało się ich odnaleźć na zdjęciach. Obecność latarni oraz innych smukłych obiektów można było określić jedynie po rzucanych przez nie cieniach. Na rysunku 8 pokazano przykład palmy znajdującej się na Rondzie de Gaulle'a w Warszawie.

W tym przypadku na obrazie panchromatycznym można rozpoznać rzucany cień na tle jezdni. W przypadku zdjęcia multispektralnego nie można jednoznacznie określić lokalizacji cienia.

Zdjęcia wprzód charakteryzują się mniejszą jakością (ostrość) niż zdjęcia wprzód. Zauważalny jest też znacznie większy udział tonów ciemnych. Ogólny kontrast tych zdjęć jest też mniejszy, jednak dla obiektów o gładkiej, refleksyjnej powierzchni występuje tendencja odwrotna. Wszystkie te cechy wynikają ze znacznego nachylenia zdjęć wprzód względem zdjęć wstecz.

W przypadku obrazów multispektralnych zauważono, że pomimo rozciągnięcia kanałów spektralnych charakteryzują się one niskim nasyceniem barw. Nie przeszkadza ono jednak w prowadzeniu analiz na tych zobrazowaniach.

Dodatkowo w zestawie zdjęć znalazły się dwie sceny wykonane zimą na terenie pokrytym śniegiem. Sceny te charakteryzują się bardzo wysokim kontrastem w przypadku zdjęć panchromatycznych, a jednocześnie bardzo niskim w przypadku zdjęć multispektralnych, w których trudno odróżnić kolory. Możliwości teledetekcyjne były także ograniczone ze względu na bardzo długie cienie rzucane przez obiekty, co było szczególnie widoczne na zdjęciach wprzód, w których efekt wzmacniany był ich silnym nachyleniem. Dodatkowo na obszarach pokrytych śniegiem znacząco utrudnione było wyróżnienie poszczególnych obiektów punktowych i liniowych. Przykład zobrazowań zimowych przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 8. Widoczność obiektów smukłych na przykładzie palmy na Rondzie de Gaulle'a. Na górze widok na ortofotomapie lotniczej o GSW 10 cm, a na dole, po lewej zobrazowanie Gaofen-7 panchromatyczne (po lewej) i wielospektralne (po prawej).

3.1 Analiza na podstawie punktów

Analiza na podstawie punktów pomiarowych pochodzących z ortofotomapy miała sprawdzić przede wszystkim dokładność georeferencji scen satelitarnych ze satelity Gaofen-7, ale także możliwości interpretacyjne obrazowań pochodzących z tego sensora.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki pomiarów z przeprowadzonej analizy. Z przedstawionych danych wynika, że najgorszą dokładność uzyskano dla punktów położonych najdalej od sensora, co jest szczególnie widoczne w zobrazowaniach pod kątem (BWD i FWD). W przypadku pozostałych punktów, pomiary zobrazowań BWD i MUX wykazują tendencję wzrostu dokładności wraz ze spadkiem odległości od kamery, natomiast dla FWD, najlepszą dokładność uzyskano dla punktów położonych w środku zdjęcia.

Tab. 3. Wartości wektorów różnic współrzędnych między punktami na zobrazowaniach Gaofen-7 względem położenia referencyjnego na ortofotomapie lotniczej.

zobrazowanie	**Wartość średnia różnicy odległości [m]**	**błąd średni odległości [m]**
FWD near	11.7	7.2
BWD near	9.9	4.5
MUX near	9.7	4.4
FWD middle	10.0	6.7
BWD middle	10.9	5.2
MUX middle	11.1	5.5
FWD far	12.2	9.5
BWD far	11.0	5.7
MUX far	11.1	6.2

Analizując tabelę, widoczny jest systematyczny błąd wynikający z georeferencji zobrazowań satelitarnych. Ich korekta nie była przedmiotem analiz w ramach eksperymentu. Analizując same wyniki porównania pomiędzy zobrazowaniami z systemu satelitarnego, należy zauważyć, że dobrze widoczna jest różnica wynikająca z większego nachylenia zdjęć FWD, w których występowały największe odstępy, jak również największe zróżnicowanie tych odstępów w obrębie pojedynczego zdjęcia.

Dodatkowo na uwagę zasługuje fakt, że dokładność scen multispektralnych (MUX) jest zbliżona do BWD, pomimo kilkukrotnie gorszej rozdzielczości terenowej (2.6 m do 0.65 m). Wynika to z faktu, że jako punkty wybierano dobrze widoczne skrzyżowania różnych obiektów liniowych, które na zdjęciach charakteryzowały się wysokim kontrastem i były łatwe do oznaczenia.

3.2 Analiza na podstawie obiektów liniowych

Analiza różnic długości pomierzonych obiektów liniowych miała na celu weryfikację wpływu ułożenia obiektów liniowych na dokładność pomiarów długości, zakładając, że w przypadku obiektów liniowych znajdujących się w zbliżonym rejonie na zobrazowaniu niektóre błędy systematyczne mogą się znosić. Analiza ta mogła zatem określić potencjał pomiarowy, pomijając wpływ georeferencji sceny. W tabeli 4 zaprezentowano wyniki wykonanych pomiarów.



Rys. 9. Zdjęcia zimowe (na górze) oraz letnie (na dole). Po lewej BWD, po prawej MUX

Tab. 4. Statystyki analizy dokładności pomiaru odległości między punktami na zobrazowaniach Gaofen-7 względem położenia referencyjnego na ortofotomapie lotniczej.

Statystyka mierzonych linii	**FWD**	**BWD**
Minimalna długość [m]	147.46	148.30
Średnia długość [m]	1 029.65	1 030.05
Maksymalna długość [m]	3779.29	3779.36
Średnia różnica długości [m]	0.56	0.27
Błąd średni długości [m]	0.69	0.35
Stosunek błędu do długości [m/km]	1.39	0.43

Średnie różnice we wszystkich przypadkach były mniejsze niż 0.65 m, a zatem poniżej rozdzielczości przestrzennej zdjęcia. Również w obu przypadkach orientacji kątowej zobrazowań wartości tych różnic były mniejsze od ich błędów średnich, co może wskazywać na niewielki wpływ samej dokładności w porównaniu z błędami systematycznymi orientacji.

Pomimo uzyskania zadowalających rezultatów zauważono, że dla zdjęcia FWD uzyskano prawie dwukrotnie większe różnice oraz błąd średni, co wynika z większego nachylenia zdjęć wprzód. Największy kontrast występuje w przypadku stosunku błędu do długości mierzonego odcinka, który dla zdjęć wstecz jest ponad trzykrotnie mniejszy.

Wyniki przeanalizowano również z podziałem linii na położone wzdłuż, w poprzek i w kierunku skośnym względem kierunku zobrazowania, co pokazuje tabela 5.

Tab. 5. Błędy długości względem orientacji linii

Orientacja mierzonych linii	**Błąd średni długości linii [m]**
Poprzeczna	0.25
Podłużna	0.34
Skośna	0.41

W tym przypadku różnice są również niewielkie w kontekście wielkości terenowej piksela. Widoczne jednak jest, że linie poprzeczne mają najmniejsze błędy, a skośne i podłużne większe. Dowodzi to innego rozkładu błędów systematycznych w punktach początkowych i końcowych linii. Wszystkie dokładności pomiaru są jednak mniejsze niż wartość GSD tych zdjęć.

4. DYSKUSJA I WNIOSKI

Analiza wizualna pozwala stwierdzić, że sceny z systemu Gaofen-7, przede wszystkim ze względu na wysoką rozdzielczość, wykazują dobre właściwości teledetekcyjne. W dużej części możliwe jest wskazanie obiektów liniowych o rozmiarach znacznie mniejszych niż rozdzielczość terenowa zdjęć. W przypadku obrazów multispektralnych zwraca uwagę niewielkie nasycenie kolorów, jednak ma ono niewielki wpływ na możliwości wykonywania analiz na tych zobrazowaniach. Panchromatyczne zdjęcia zimowe charakteryzują się lepszym kontrastem, co powinno ułatwiać rozpoznanie, jednak ze względu na duże cienie i – miejscami – obecność śniegu, ich zastosowania są ograniczone. Zobrazowania multispektralne z tego okresu są za to dużo gorszej jakości, wobec czego można je uznać za nieprzydatne w analizach.

Analiza geometryczna wskazuje na średnio kilkumetrowe różnice pomiędzy lokalizacją poszczególnych punktów na zdjęciach a ich faktycznym położeniem odczytanym z ortofotomapy. Wykazują one przewidywaną tendencję wzrostową wraz ze wzrostem odległości od sensora. Ponadto zdjęcia bardziej nachylone wykazują największe wartości błędów, nawet większe niż u zdjęć multispektralnych o znacznie mniejszej wartości GSD.

Pomiary liniowe nie wykazały znaczących różnic w długościach odcinków w porównaniu z ortofotomapą. Wszystkie wartości różnic były mniejsze od ich błędów oraz od rozdzielczości terenowej zdjęć, co świadczy o niewielkich zniekształceniach liniowych. Przy tak niewielkich wartościach duży wpływ na uzyskane wartości różnic długości miała dokładność zaznaczenia, jednak można się w nich doszukać pewnych tendencji, co pozwala stwierdzić, że nie pochodzą one w całości z błędów pomiarowych, a zatem występują pewne szczątkowe zniekształcenia liniowe. Są one większe dla bardziej nachylonych zdjęć wprzód, a w podziale na orientację linii najmniejsze występują na liniach poprzecznych, co można uzasadnić jednolitą odległością do sensora, a więc przewidywanymi zbliżonymi

zniekształceniami lokalizacji punktów. Ze względu na kierunek osi orbity sensora linie podłużne do kierunku mają niewielki błąd, choć większy niż dla linii poprzecznych do kierunku. W przypadku linii ukośnych żaden z tych warunków nie jest spełniony, zatem spodziewane są największe błędy, co zostało potwierdzone w pomiarach. Wartości tych błędów nie są jednak duże.

Ostatecznie można więc stwierdzić, że zdjęcia z systemu Gaofen-7 stanowią dobrą bazę do opracowań teledetekcyjnych. Występowanie zniekształceń na poziomie kilku metrów sprawia jednak, że pomiary punktów mogą mieć dokładność niewystarczającą do wielu zastosowań, ale wystarczającą do kartowania topografii w skali 1:10 000, dla której system ten został stworzony. Jest to dokładność wystarczająca. W przypadku pomiarów liniowych dokładność jest dużo wyższa, zatem dane z Gaofen-7 nadają się do analiz długości poszczególnych obiektów, a w rezultacie również i powierzchni. Zatem zdjęcia te nadają się do zastosowań rolniczych oraz do kartowania topografii. Daje to stosunkowo szeroki obszar zastosowań dla zobrazowań z tego systemu, spełniający postawione wymagania dokładnościowe do celów, dla których został stworzony, a w niektórych zastosowaniach wykraczający poza te cele.

LITERATURA

Aguilar, M. A., Agüera, F., Aguilar, F. J., & Carvajal, F. (2008). Geometric accuracy assessment of the orthorectification process from very high resolution satellite imagery for Common Agricultural Policy purposes. *International Journal of Remote Sensing*, 29(24).

Chen, L., Letu, H., Fan, M., Shang, H., Tao, J., Wu, L., ... & Zhang, T. (2022). An introduction to the Chinese high-resolution Earth observation system: Gaofen-1~ 7 civilian satellites. *Journal of Remote Sensing*.

Chen, P., Huang, H., Ye, F., Liu, J., Li, W., Wang, J., ... & Zhang, N. (2024). A benchmark GaoFen-7 dataset for building extraction from satellite images. Scientific Data, 11(1), 187.

Guoming, L., Guoqing, L., & Tianqing, W. (2021, July). Geometric Accuracy Evaluation of GF-7 Image. In 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS (pp. 8015-8018). IEEE.

Ren, C., Xie, J., Zhi, X., Yang, Y., & Yang, S. (2020). Laser spot center location method for Chinese spaceborne GF-7 footprint camera. Sensors, 20(8), 2319.

Tang, X., Xie, J., Liu, R., Huang, G., Zhao, C., Zhen, Y., ... & Dou, X. (2020). Overview of the GF-7 laser altimeter system mission. Earth and Space Science, 7(1), e2019EA000777.

Topan, H., Oruç, M., Bayırhan, İ., Büyüksalih, G., Gazioğlu, C., Bilgin, B., ... & Cerrahoğlu, D. (2026). Geometric accuracy analysis of Jilin-1 satellite images using different mathematical models. *European Journal of Remote Sensing*, 59(1), 2691804.

Wolniewicz, W. (2004). Assessment of geometric accuracy of VHR satellite images. International *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(1), 19-23.

Wyczałek, I., Królewicz, S., & Wyczałek, E. (2010). Ocena i wstępna analiza 8-kanałowego obrazu bardzo wysokiej rozdzielczości z satelity WorldView-2. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji,* 21, 471–480.

Zheng, X., Huang, Q., Wang, J., Wang, T., & Zhang, G. (2018). Geometric accuracy evaluation of high-resolution satellite images based on Xianning test field. Sensors, 18(7), 2121.

ANALYSIS OF GEOMETRIC ACCURACY OF GAOFEN-7 SATELLITE SCENES

ABSTRACT: The aim of this article was to investigate the quality and accuracy of images taken from the first Chinese civilian VHRS Gaofen-7 satellite. Visual evaluation of the images was carried out, in particular, to assess the remote sensing capabilities of objects with sizes comparable to the field size at the sampling distance (GSD). The main part of the experiment was geometric analysis, in which the distribution of errors in the positions of the measurement points relative to the aerial orthophoto was examined, divided by their distance from the sensor, including the imaging angle for forward and backward imaging. Distance measurement errors were also checked by measuring the differences in the length of individual objects in relation to their orientation and the image angle of view. The result was the determination of the average geometric accuracy at approximately this level. 10 m. The measurement accuracy of linear objects was close to the spatial resolution of the imagery, within the limits of the measurement error. The experiments proved that Gaofen-7 satellite scenes have measurement potential that approaches the sensor's spatial resolution, making them useful for the applications for which this system was designed.

SŁOWA KLUCZOWE: VHRS, stereopair, geometric accuracy, control points, Gaofen-7

Dane autorów:

Krzysztof Szczepański
e-mail: krzysztof.szczepanski3.stud@pw.edu.pl

Dr hab. inż. Krzysztof Bakuła, prof. uczelni
e-mail: krzysztof.bakla@pw.edu.pl

Submitted 1.12.2025
Accepted 31.12.2025