

Rejestracja lotniczych obrazów hiperspektralnych

Zobrazowania hiperspektralne są definiowane jako równoczesne pozyskanie obrazów w wielu bardzo wąskich, ciągłych zakresach spektralnych (Goetz i inni, 1985). Rejestracja promieniowania elektromagnetycznego przez sensory hiperspektralne odbywa się na drodze pasywnego zapisu spektrum odbitego od powierzchni terenu. Geneza badań z wykorzystaniem lotniczych systemów hiperspektralnych sięga lat 1970. (van der Meer, de Jong, 2001). Pierwsze zobrazowania rozwijane były do celów wojskowych (detekcja obiektów militarnych ukrytych wśród roślinności). Cywilne prace nad rozwojem technik hiperspektralnych rozpoczęły się dekadę później, kiedy to Geophysical Environmental Research Company rozpoczęła prace nad jednowymiarowym spektrometrem rejestrującym sygnał profilu wzdłuż linii lotu samolotem. Prace te zaowocowały stworzeniem w 1981 r. GERS (*Geophysical Environmental Research Spectroradiometer*; Kruse i inni, 1999). Był to lotniczy nieobrazujący spektrometr do wykonywania profili spektralnych w zakresie 1,96-2,5 μm , pozyskujący 86 ciągłych kanałów o szerokościach połówkowych filtrów 8,6 nm. Pole rejestracji sygnału wynosiło 20 m (GFOV) z 20-metrowymi przerwami wzdłuż linii lotu (Collins i inni, 1981). Satysfakcjonujące wyniki uzyskiwane ze spektrometru zaowocowały stworzeniem skanera AIS (*Airborne Imaging Spectrometer*). Skaner AIS-1 (*NASA Jet Propulsion Laboratory*) rejestrował obraz składający się z 32 pikseli położonych w linii (pole widzenia 3,7 stopnia), prostopadle do kierunku lotu o rozmiarach terenowych 10-15 m, w 128 ciągłych kanałach o szerokościach połówkowych 9,3 nm w zakresie 1,2-2,4 μm . Unowocześniona wersja skanera wprowadzona została w 1986 r., AIS-2 rejestrował 64 piksele o rozdzielczości 10,6 nm w zakresie 0,8-2,4 μm (Chiu, Collins, 1978).

Jednakże za pierwsze urządzenie obrazujące uważa się kanadyjski *Fluorescence Line Imager* (FLI), zwany także jako PMI (*Programmable Line Imager*). Spek-

trometr ten został opracowany przez Department of Fisheries and Oceans w 1981 r. (Kramer, 1994; van der Meer, de Jong, 2001).

W roku 1984 grupa niezależnych specjalistów NASA rozpoczęła prace nad kolejnym sensorem lotniczym AVIRIS (*Airborne Visual and Infra-Red Imaging Spectrometer*; Vane i inni, 1988). Pierwsze loty techniczne i referencyjne badania laboratoryjne rozpoczęły się w zimie i na wiosnę 1987 r., rok później program ten był już realizowany operacyjnie. Bardzo obiecujące efekty prac pozwoliły na rozwój programu do różnych celów (Proceedings of the AVIRIS Performance, 1988). Skaner ten okazał się znaczącym krokiem w stronę popularyzacji zobrazowań hiperspektralnych w USA. Po kilku modyfikacjach technicznych, sensor ten pracuje wykonując zobrazowania w zakresie 380-2500 nm (224 kanały spektralne) o rozdzielczości radiometrycznej 10 nm (kalibracja każdego kanału dokonywana jest z dokładnością 1 nm), rozdzielczość terenowa zależy od rodzaju samolotu, na którym jest instalowany skaner (przy wysokości lotu wysokości 65 000 stóp średnia wielkość piksela zawiera się w zakresie 17-20 m, a szerokość zobrazowania wynosi 10,5 km)¹.

AVIRIS, podobnie jak inne skanery lotnicze zalicza się do szerokokątnych detektorów, wynika to z szerokiego kąta rejestracji sygnału, które w tym urządzeniu wynosi 34 stopnie (przy pełnej rejestracji (677 pikseli)). Jest to tzw. całkowite pole widzenia (*total field of view*), natomiast chwilowe pole widzenia (*IFOV*) wynosi 1 mradian. Tempo skanowania terenu wynosi 12Hz, rozdzielczość spektralna – 12 bitów (tab. 1).

Obecnie skanery wielo- i hiperspektralne są konstruowane zarówno przez narodowe agencje kosmiczne, jak i małe prywatne firmy. W pracach tych przodują

¹ Dane techniczne pochodzą ze strony AVIRIS: <http://aviris.jpl.nasa.gov/html/aviris.overview.html>.



Ryc. 2. Hiperspektralne skanery lotnicze wykorzystywane przez DLR⁴: A – DAIS 7915, B – ROSIS, C – HyMap, D – ARES (źródło: Mueller, 2005)

Fig. 2. Hyperspectral airborne scanners operated by the DLR (Germany): A – DAIS 7915, B – ROSIS, C – HyMap, D – ARES (source: Mueller, 2005)

przede wszystkim Stany Zjednoczone, Australia oraz państwa Europy Zachodniej (tabela 3)². Standardem jest dostarczanie odbiorcom także kompletnych algorytmów przetwarzania danych. Część z nich jest w pełni komercyjnym oprogramowaniem dedykowanym tylko do danych hiperspektralnych (np. PARGE, ATCOR – Szwajcaria, ENVI – USA).

Z punktu widzenia europejskich sensorów hiperspektralnych, do najważniejszych ze względu na liczbę wykonanych zobrażeń należy zaliczyć DAIS 7915, Rosis, AISA, HyMap (ryc. 2), przygotowywany obecnie ARES, APEX oraz satelitalny skaner EnMap. Systemy lotnicze (w porównaniu do sensorów satelitalnych) pozyskują

jakościowo znacząco lepsze obrazy. Wynika to z krótszej drogi promieniowania pomiędzy obiektem a detektorem. W przypadku zobrażeń lotniczych stosunek sygnału do szumu (SNR) jest znacząco wyższy, umożliwiając zwiększenie rozdzielczości terenowej do 1-5 m, przy rozdzielczości spektralnej wynoszącej około 2-10 nm (np. ROSIS). Dla przykładu hiperspektralny skaner satelitalny Hyperion, który zlokalizowany jest powyżej górnej warstwy atmosfery, rejestruje 10 000 razy słabsze sygnały niż detektory lotnicze operujące na wysokości do 5 km (Kumar i inni, 2001). Rozdzielczość spektralna Hyperiona³ wynosi 220 kanałów (0,4-2,5 μm), szerokość

² Spektrometry obrazujące: Hyperion, AVIRIS – NASA, USA; ARES, DAIS 7915, Rosis – DLR, Niemcy; CASI – Natural Environment Research Council i UK Environment Agency, Wielka Brytania, AISA – Finlandia, APEX – Szwajcaria i Belgia, bądź spektrometry polowe firm Analytical Spectral Devices Inc. lub Group for Environmental Research, Earth Resources Exploration Consortium.

³ Jako ciekawostkę można podać, że średnie zapotrzebowanie Hyperiona (EnMAPu) na prąd wynosi 51 W (170 W EnMap) na orbitę, natomiast w szczytowym momencie 126 W (221 W EnMap), masa – 49 kg (150 kg EnMap).

⁴ DLR e.V. Oberpfaffenhofen – Niemiecka Agencja Kosmiczna. Jeden z najważniejszych europejskich dostawców technologii hiperspektralnej, koordynator wielu europejskich projektów, np. HySens, HyEurope, HYRESSA.

Tabela 3. Przegląd hiperspektralnych sensorów

Table 3. Overview of hyperspectral sensors

Nazwa <i>Name</i>	Pełna nazwa <i>Full name</i>	Producent <i>Manufacturer</i>	Operator <i>Operator</i>	Liczba kanałów <i>Number of bands</i>	Zakres spektralny (nm) <i>Spectral range (nm)</i>
AAHIS	Advanced Airborne Hyperspectral Imaging System	SETS Technology		288	432-832
AHS	Airborne Hyperspectral Scanner	Daedalus Enterprises, Inc.		48	433-12700
AIP	Airborne Instrument Program	Lockheed Martin	NASA, Johnson Space Center	brak danych	2000-6400
AIS-1	Airborne Imaging Spectrometer	NASA, JPL	NASA, JPL	128	900-2100, 1200-2400
AIS-2	Airborne Imaging Spectrometer	NASA, JPL	NASA, JPL	128	800-1600, 1200-2400
AISA	Airborne Imaging Spectrometer for Applications	Specim, Ltd.	Specim, Ltd., 3Di, Inc., Galileo Corp.	286	450-1000
AISA Dual	Airborne Imaging Spectrometer for Applications (sensor z połączenia systemu AISA Eagle and AISA Hawk)	Specim Ltd.		498	400-2450
AISA Thermal	Airborne Imaging Spectrometer for Applications	Specim Ltd.		84	8000-12000
AMS	Airborne Modis Simulator (zainstalowany na Daedalus AADS-1268)		NASA	50	530-15500
AMSS	Airborne Multispectral Scanner MK-II	Geoscan Pty Ltd.	Geoscan Pty Ltd.	46	500-12000
APEX	Airborne Prism Experiment	RSL/VITO	VITO	300	400-2500
ASAS	Advanced Solid State Array Spectroradiometer	NASA Laboratory for terrestrial Physics	NASA Goddard Space Flight Center	62	404-1020
ASI	Airborne Spectral Imager	Norsk Elektro Optikk AS (NEO) / Norwegian Defense Research Establishment (FFI)		brak danych	400-1700
ASTER Simulator	ASTER Simulator	GER Corp.	JAPEX Geosciences Institute, Tokio	24	760-12000
AVIRIS	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer	NASA, JPL	NASA Ames	224	400-2450
CAESAR	CCD Airborne Experimental Scanner for Applicators in Remote Sensing	NLR		12	520-780
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager	Itres Research		288	430-870
CASI-2	Compact Airborne Spectrographic Imager	Itres Research		288	400-1000
CASI-3	Compact Airborne Spectrographic Imager	Itres Research		288	400-1050
CHRISS	Compact High Resolution Imaging Spectrograph Sensor	Science Applications Int. Corp. (SAIC)	SETS Technology, Inc.	40	430-860
CIS	Chinese Imaging Spectrometer	Shanghai Inst. Of Technical Physics		91	400-12500
DAIS 21115	Digital Airborne Imaging Spectrometer	GER Corp.		211	400-12000
DAIS 3715	Digital Airborne Imaging Spectrometer	GER Corp.		37	400-12000

DAIS 7915	Digital Airborne Imaging Spectrometer	GER Corp.	DLR, Niemcy	79	400-12000
EPS-A	Environmental Probe System	GER Corp.		32	400-12000
FLI / PMI	Flourocence Line Imager / Programmable Multispectral Imager	Moniteq Ltd.	Department of Fisheries and Oceans	228	430-805
FTVFHSI	Fourier Transform Visible Hyperspectral Imager	Kestrel Corp., FIT		256	440-1150
GERIS	Geophysical and Environmental Research Imaging Spectrometer	GER Corp.		63	400-2500
HIRIS	High Resolution Imaging Spectrometer	NASA	NASA EOS	192	400-2500
HSI	Hyperspectral Imager	TRW Space & Technology Division	NASA	384	400-2500
HRIS	High Resolution Imaging spectrometer	ESA	ESA POEM		450-2350
HYDICE	Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment	Naval Research Laboratory	ERIM	210	413-2504
HyMAP	Hyperspectral Mapper (w Stanach Zjednoczonych znany jako Probe-1)	Integrated Spectronics, Ltd.	HyVISTA/ DLR w Europie / ESSI w USA	128	400-2500+
Hyperion	Hyperion	TRW Space & Technology Division	NASA Goddard Space Flight Center	220	400-2500
HySpex	HySpex Hyperspectral Cameras (zestaw 4 modułów z zakresu VIS, SWIR)	Norsk Elektro Optikk AS (NEO)		128-256	400-2500
IISRB	Infrared Imaging Spectrometer	Bomem		1720	3500-5000
IMSS	Image Multispectral Sensing	Pacific Advanced Technology		320	2000-5000
IRIS	Infrared Imaging Spectroradiometer	ERIM		256	2000-15000
ISM	Imaging Spectroscopic Mapper	DESPA		128	800-3200
LEISA	Linear Etalon Imaging Spectral Array	NASA Goddard Space Flight Center	NASA	256	1000-2500
LIVTIRS 1	Livermore Imaging Fourier Transform Imaging Spectrometer	Lawrence Livermore		brak danych	3000-5000
LIVTIRS 2	Livermore Imaging Fourier Transform Imaging Spectrometer	Lawrence Livermore Labs		brak danych	8000-12000
MAIS	Modular Airborne Imaging Spectrometer	Shanghai Institute of Technical Physics		71	440-11800
MAMS	Multispectral Atmospheric Mapping Sensor	Daedalus Enterprise Inc.		12	VIS/NIR
MAS	MODIS Airborne Simulator	Daedalus Enterprise Inc.	NASA Ames & GSFC	50	530-14500
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer	ESA		15	400-1050
MIDIS	Multiband Identification and Discrimination Imaging Spectroradiometer	Surface Optics Corp.	JPL	256	400-30000
MIVIS	Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer	Daedalus Enterprise Inc.	CNR, Rome	102	433-12700
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectrometer	NASA	EOS	36	415-14240
OMIS	Operative Modular Airborne Imaging Spectrometer	Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai Xiantong Institute of Information Technology		128	400-12000

PROBE-1	PROBE-1	Integrated Spectronics, Ltd.	Earth Search Sciences, Inc., Australia	100-200	400-2400
ROSIS	Reflective Optics System Imaging Spectrometer	DLR, GKSS, MBB	DLR	128	450-850
SASI	Shortwave (Infrared) Airborne Spectrographic Imager	Itres Research		160	850-2450
SFSI	SWIR Full Spectrographic Imager	CCRS	CCRS	122	1200-2400
SMIFTS	Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer	Hawaii Institute of Geophysics		75	1000-5000
SSTI HSI	Small Satellite Technology Initiative Hyperspectral Imager	TRW Inc.	NASA	384	400-2500
TIMS	Thermal Infrared Multispectral Scanner	NASA	NASA	6	8200-12200
TRWIS III	TRW Imaging Spectrometer	TRW Inc.		384	300-2500
VIFIS	Variable Interference Filter Imaging Spectrometer	Univ. of Dundee		60	440-890
VIMS-V	Visible Infrared Mapping Spectrometer	ASI	NASA Cassini Mission	512	300-1050
WIS	Wedge Imaging Spectrometer	Hughes Santa Barbara Research Center		170	400-2500
WPHI	Wide-view Pushbroom Hyperspectral Imagery	Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai Xiantong Institute of Information Technology		244	394-891

Źródło: Kramer, 1994; Schaepman, 1996; Walthall, 2008, zaktualizowane.

Source: Kramer, 1994; Schaepman, 1996; Walthall, 2008, upgraded.

filtrów 10 nm, absolutna dokładność radiometryczna 6%, rozdzielczość radiometryczna 12 bitów, rozdzielczość terenowa 30 m (przy wysokości 705 km), IVOF 42,5 mikroradiana, a wielkość sceny 7,5 x 100 km.

Zainstalowanie cyfrowych skanerów na pokładach samolotu generuje wiele problemów podczas przetwarzania danych obrazowych. Powodem są wychylenia samolotu we wszystkich kierunkach i trudności z zachowaniem prostej linii lotu oraz niejednorodność atmosfery, w której odbywa się lot. W przypadku stosowania skanerów rejestrujących obraz piksel po pikselu lub linia po linii, powoduje to przesunięcia obrazu (poszczególne piksele na zobrazowaniu nie znajdują się tam, gdzie wynikałoby to z ich topologicznej lokalizacji). Defekty te są eliminowane podczas geometryzacji, któ-

ra w większości przypadków odbywa się w specjalnych pakietach oprogramowania i jest tzw. parametryczną geometryzacją.

Problemu tego nie obserwuje się na hiperspektralnych zobrazowaniach satelitarnych. Wynika to z braku obecności atmosfery i procedurę korekcji geometrycznej można przeprowadzić według standardowych algorytmów.

Podsumowując należy stwierdzić, że zobrazowania hiperspektralne są obecnie dostępne głównie za sprawą skanerów lotniczych. Algorytmy przetwarzania danych są intensywnie rozwijane, owocuje to popularyzacją danych oraz wyników, poszerzając jednocześnie grono odbiorców – zarówno naukowych, jak i komercyjnych.