

Podstawy teledetekcji hiperspektralnej

W roku 1988 Międzynarodowe Towarzystwo Fotografometrii i Teledetekcji (ISPRS) zdefiniowało teledetekcję wspólnie z fotogrametrią jako „dział nauk technicznych zajmujących się pozyskiwaniem wiarygodnych informacji o obiektach fizycznych i ich otoczeniu drogą rejestracji, pomiaru i interpretacji obrazów lub ich reprezentacji cyfrowych, uzyskiwanych dzięki sensorom niebędącym w bezpośrednim kontakcie z tymi obiektami” (za: Sitek, 1992; 2000). Identyfikującą definicję teledetekcji przyjmuje PAU w swoim Słowniku Geoinformatycznym (Słownik, 2001). Od 2007 r. ISPRS rekomenduje ogólną definicję określającą teledetekcję jako „pomiary lub pozyskanie informacji poprzez instrument, który nie ma bezpośredniego kontaktu z badanym obiektem lub zjawiskiem” (Glossary, 2000). Zatem najistotniejszą cechą teledetekcji jest pozyskiwanie, przetwarzanie i analizowanie informacji o badanych obiektach lub zjawiskach za pomocą promieniowania elektromagnetycznego, magnetycznego lub fal akustycznych. Fale te mogą być emitowane lub odbijane od badanych obiektów. Warto zwrócić uwagę, że cały proces pozyskania informacji odbywa się w sposób zdalny, czyli detektor sygnału nie ma fizycznego kontaktu z obiektem lub zjawiskiem będącym przedmiotem zainteresowania (de Jong, van der Meer, 2004).

W roku 1985 A.F.H. Goetz na łamach *Science* zdefiniował dane hiperspektralne jako dane teledetekcyjne obejmujące ponad 40 kanałów spektralnie ciągłych o szerokości połówkowej od 10 do 20 nm (Goetz i inni, 1985). Różnią się one od danych wielospektralnych, które operują liczbą kanałów mniejszą niż 20, a ich rozdzielczość spektralna wynosi kilkadziesiąt nanometrów. Wymaga to stosowania odmiennych algorytmów przetwarzania i analizy obrazów (Taranik, Settle, 1982).

Początki badań spektroskopowych sięgają lat 1670-72, wtedy to I. Newton (1642/3-1727) udowodnił, że widmo elektromagnetyczne składa się z monochromatycznych przedziałów promieniowania, które można rozszczepić, a następnie połączyć w światło. Kolejnym krokiem były prace J. von Fraunhofera (1787-1827)

z zakresu optyki (1814) w których opisał linie spektralne (linie Fraunhofera) umożliwiające badanie spektralne obecności lub braku wybranych związków (linie absorpcyjne i emisyjne). Prace te zostały niezależnie rozwinięte przez G. Kirchoffa (1842-1887) i R. Günsena (1811-1899), którzy opracowali metodę analizy spektralnej, stwierdzając, że każdy pierwiastek jest ściśle związany z określonymi liniami Fraunhofera podając długości fal odpowiadających za absorpcję określonych molekuł, np. linia Fraunhofera A odpowiada O_2 i absorbuje w 759,37 nm, linia D1 oznacza sód (Na) i absorbuje w 589,594 nm. Pierwszym obszernym opracowaniem poświęconym analizie widmowej było dzieło sir W. Hugginsa (1824-1910) wydane w roku 1866 *Spectrum analysis etc.* (Petykiewicz, 1986; Bogusz i inni, 1997).

Spektroskopia jest częścią fizyki i jest definiowana jako nauka zajmująca się powstawaniem, przesyłaniem, pomiarami i interpretacją widm elektromagnetycznych powstałych w wyniku współdziałania promieniowania elektromagnetycznego i materii¹ (Swain, Davis, 1978; Petykiewicz, 1986; Kumar i inni, 2001). Spektroskopia obejmuje badania właściwości obiektów za pomocą informacji niesionej przez falę elektromagnetyczną w poszczególnych jej długościach. Może się to odbywać na drodze cyfrowych analiz za pomocą spektrometrów lub też obrazujących spektrometrów, w warunkach terenowych (lotniczych bądź satelitarnych) lub laboratoryjnych. Cechy spektralne obiektu powstają w wyniku oddziaływania energii z molekułami gazów, płynów i ciał stałych i są charakterystyczne dla danego obiektu. Promieniowanie powstałe z tych interakcji jest charakterystyczne dla danego układu. Możliwość inter-

¹ W odróżnieniu od spektrometrii (wywodzącej się ze spektrofotometrii), która oznacza pomiary fotonów w funkcji długości fali. W teledetekcji wykorzystanie matematycznych analiz kształtu fali przez próbkowanie obrazu jest rzadko spotykane, gdyż zdecydowanie częściej wykorzystuje się bezpośrednie pomiary obiektu spektrometrami, bądź lotniczymi lub satelitarnymi skanerami (Suits, 1983; Kumar i inni, 2001).

akcji pomiędzy poszczególnymi kompozycjami molekuł powoduje, że możliwa jest identyfikacja nawet bardzo skomplikowanych układów (Swain, Davis, 1978). W naturalnych warunkach środowiskowych wiele cech spektralnych jest trudnych do detekcji, gdyż następuje addycja spektr, potęgując lub eliminując poszczególne sygnały (Suits, 1983).

Przed podjęciem decyzji o wykorzystaniu teledetekcyjnych danych obrazowych priorytetem jest określenie potrzeb i celów jakim mają one służyć, ponieważ nie istnieje uniwersalny skaner/detektor, którego obrazy będą „dobre na wszystko”. Podczas planowania misji badawczej należy w pierwszej kolejności określić rozdzielczości: przestrzenną, spektralną, radiometryczną oraz czasową.

Rozdzielczość przestrzenna określana jest wielkością najmniejszej rejestrowanej powierzchni terenu, przedstawianej jako najmniejszy homogeniczny element obrazu (piksel – *picture element*). W technicznym ujęciu rozdzielczość ta jest determinowana przez chwilowe pole widzenia detektora (*IFOV*)² oraz wysokość lotu³. W przypadku wysokorozdzielczych sensorów (np. Ikonos, QuickBird)⁴ rozdzielczość ta waha się od 0,6 do

4 m, dla satelitów środowiskowych wartości te oscylują w granicach kilkudziesięciu – kilkuset metrów (np. Landsat ETM+ 15-60 m, SPOT HRVR 10-20 m, a SPOT Vegetation 1000 m), dla satelitów meteorologicznych wielkość piksela znacząco przekracza wartość kilometra (np. piksel Meteosat wynosi 2,5-5,0 km w punkcie nadirowym).

Rozdzielczość spektralna definiowana jest szerokością połówkową zastosowanych filtrów; wpływa to na liczbę kanałów w jakich wykonywane jest zobrazowanie. W przypadku sensorów satelitarnych szerokość połówkowa stosowanych detektorów panchromatycznych obejmuje kilkaset nanometrów (zazwyczaj cały zakres widzialny), natomiast poszczególnych kanałów spektralnych wynosi kilkadziesiąt nanometrów (QuickBird: kanał panchromatyczny rejestrowany jest w zakresie 450-900 nm, zakres B 450-520 nm, G 520-600 nm, R 630-690 nm, Near-IR 760-900 nm; Landsat ETM+: kanał panchromatyczny: 520-900 nm, kanały: 1: 450-520 nm, 2: 520-600 nm, 3: 630-690 nm, 4: 760-900 nm, 5: 1550-1750 nm, 6: 10420-12500 nm, 7: 2080-2350 nm). Specjalną grupę sensorów stanowią instrumenty hiperspektralne, w przypadku których rozdzielczość spektralna

Tabela 1. Specyfikacje techniczne wybranych sensorów hiperspektralnych

Table 1. Technical specification of selected hyperspectral sensors

Sensor Sensor	AVIRIS	DAIS 7915	RODIS	HyMap	ARES	EnMap	Hyperion
Pole widzenia <i>Field of view (FOV)</i>	34°	52°	16°	61,3°	65°	2,63° wzdłuż linii <i>along-track</i>	0,622°
Chwilowe pole widzenia <i>Instantaneous field of view (IFOV)</i>	1 mrad	3,3 mrad	0,56 mrad	2,09 mrad	2 mrad	0,63 arcsek.	42,5 μrad
Liczba pikseli w linii <i>Number of pixels in line</i>	677	512	512	512	816	1024 (30 km szerokość ścieżki) <i>across-track</i>	7,5 km szerokość ścieżki <i>across-track</i>
Częstotliwość skanowania <i>Scanning frequency</i>	12 Hz	6-24 Hz	-	6-24 Hz	10-25 Hz	230 Hz	
Rozdzielczość terenowa <i>Terrain resolution</i>	2-20 m	5-20 m	1-6 m	3-10 m	2-15 m	30 m	30 m
Liczba kanałów <i>Number of bands</i>	224	79	115	126	160	218	220
Zakres spektralny <i>Spectral range</i>	0,38-2,5 μm	0,5-12,6 μm	430-860 nm	0,4-2,5 μm	0,4-11,5 μm	0,42-2,45 μm	0,4-2,5 μm
Rozdzielczość spektralna <i>Spectral resolution</i>	10 nm	20 nm-2 μm	4 nm	15-20 nm	14-140 nm	5-10 nm	10 nm
Sposób skanowania <i>Scanning mode</i>	whisk broom	whisk broom	push broom	whisk broom	whisk broom	push broom	push broom

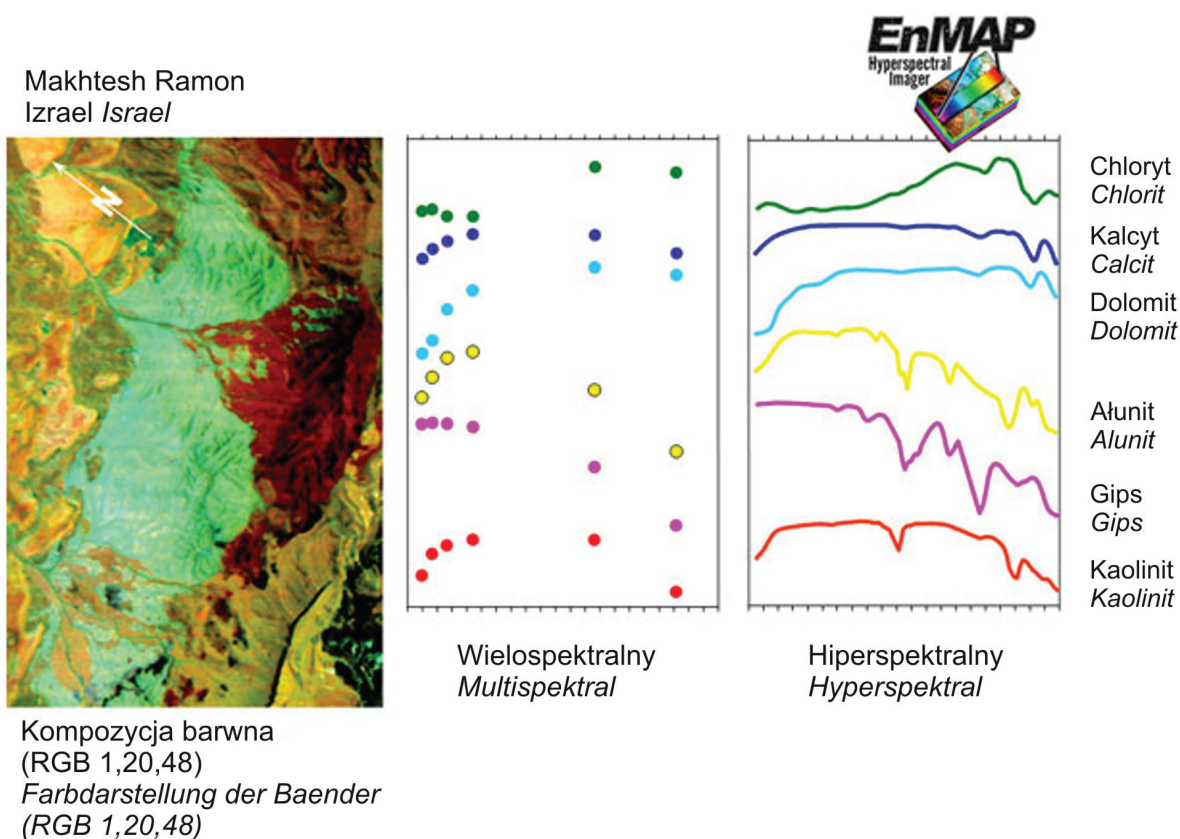
² Instantaneous Field of View (chwilowe pole widzenia detektora). FOV – *Field Of View* (pole widzenia).

³ W praktycznym wymiarze im mniejszy piksel, tym zobrazowanie przedstawia więcej szczegółów, pociągając za sobą zwiększenie wielkości plików, co w przypadku badań prowadzonych na większych obszarach jest znaczącym utrudnieniem.

⁴ Dane techniczne pochodzą ze strony www.eurimage.com, <http://eo1.usgs.gov/hyperion.php> oraz domowych stron poszczególnych systemów satelitarnych.

wynosi od kilku do kilkunastu nanometrów, a liczba stosowanych kanałów w większości przypadków przekracza sto (tab. 1). Za przykład może służyć skaner EnMAP, którego rozdzielczość przestrzenna wynosi 30 m (szerokość pasa 30 km), a spektralna 5-10 nm, liczba rejestrowanych kanałów 228 w zakresie 420-2450 nm (ryc. 1).

Poza spektralnymi różnicami w analizie obrazów wielo- i hiperspektralnych istotną różnicą tkwi w roz-



Ryc. 1. Porównanie spektrów pozyskanych z detektora wielospektralnego oraz symulacji charakterystyk spektralnych 218-kanalowego zobrazowania EnMAP (źródło: www.enmap.org, www.enmap.de)

Fig. 1. Comparison of spectra derived from the multi-, and simulated 218-band EnMAP scanner (source: www.enmap.org, www.enmap.de)

dzielnicy radiometrycznej. Odgrywa to dużą rolę przy cyfrowym przetwarzaniu danych, gdyż wymaga stosowania algorytmów uwzględniających nawet 32 768 stopni szarości pomiędzy bielą a czernią (rozdzielczość 15-bitowa obrazów DAIS 7915). Połączenie ogromnej rozdzielczości spektralnej i radiometrycznej danych hiperspektralnych pozwala traktować te dane jako ciągłe (o ciągłej charakterystyce spektralnej). Umożliwia to dokładną analizę substancji i procesów zachodzących w badanych obiektach (tab. 2).

Rozdzielczość radiometryczna, zgodnie z definicją *Glossary of remote sensing technology* (Glossary, 2000) oznacza ilość energii potrzebnej do podniesienia sygnału obrazu o jeden poziom. Natomiast zgodnie z ogólnie przyjętą definicją rozdzielczość radiometryczna oznacza liczbę poziomów, na jakich może zostać zapisany zarejestrowany sygnał. A. Ciołkosz i A. Jakomulska (2004) definiują ją także jako czułość detektora na różnicowanie wielkości energii docierającej do niego od poszczególnych obiektów terenowych. Oznacza to liczbę rozróżnialnych poziomów sygnału wyrażonych na czarno-białych zdjęciach tonami szarymi (achromatycznymi). Oko ludzkie jest zdolne do rozróżnienia kilku-kilkunastu poziomów szarości. Jednakże zastosowanie większej liczby poziomów ułatwia łatwiejszą obróbkę cyfrową i wykonanie bardziej zaawansowanych klasyfikacji. Obecne dane satelitarne zapisane są w kilku-kilkudziesięciu tysiącach stopni szarości

(Landsat ETM+ – 256 poziomów, QuickBird – 2048, Hyperion – 4096).

Rozdzielczość czasowa oznacza czas niezbędny do wykonania ponownego zobrazowania danego obszaru. Dla satelitów meteorologicznych jest on bardzo krótki (MSG – 15 min, Meteosat – 30 min), natomiast dla satelitów środowiskowych wynosi kilkanaście dni (Ikonos – 11 dni, Landsat – 16 dni, Hyperion 16 – dni).

Teledetekcja jest znaczącym narzędziem wspierającym badania środowiska. Operuje różnymi zakresami widma elektromagnetycznego, w zależności od konkretnych potrzeb oferuje zróżnicowane produkty. Wykorzystanie tej – jednej z najnowocześniejszych – technologii w znaczący sposób ułatwia poznanie środowiska przyrodniczego i przekształceń wywołanych przez człowieka oraz prowadzenie stałego monitoringu metodami w pełni zobjektywizowanymi, w skalach od lokalnych po globalne. W praktyce, aplikacyjne zastosowanie teledetekcji hiperspektralnej obejmuje szeroki zakres zagadnień badawczych, takich jak atomowa i molekularna struktura materii, diagnostyka plazmy, rozwój instrumentów, badanie materii oraz identyfikacja substancji. Spektroskopia (w tym obrazowa)⁵ jest przedmiotem badań nauk przyrodniczych, fizyki, chemii, inżynierii genetycznej,

⁵ W literaturze angielskiej teledetekcja hiperspektralna nazywana jest także *hyperspectral remote sensing* lub *Imaging Spectroscopy*, czyli spektroskopia obrazowa.

Tabela 2. Zastosowanie wybranych zakresów absorpcji promieniowania elektromagnetycznego przez molekuly i procesy biochemiczne wykorzystywane w badaniach hiperspektralnych środowiska

Table 2. Application of selected wavelengths for absorption analysis of molecules and biochemical processes in hyperspectral researches of environment

Długość fali (nm) Wavelength (nm)	Zastosowanie Application	Źródło informacji Information source
439	analiza absorpcji neoksantyny (ksantofil) <i>neoxanthin absorption analysis</i>	Ruban i inni, 1993
443	analiza absorpcji wiołaksantyny (ksantofil) <i>violaxanthin absorption analysis</i>	Ruban i inni, 1993
445	analiza absorpcji luteiny (ksantofil) <i>lutein absorption analysis</i>	Ruban i inni, 1993
446	analiza absorpcji a-karotenu <i>a-carotene absorption analysis</i>	Ruban i inni, 1993
463	analiza absorpcji b-karotenu <i>b-carotene absorption analysis</i>	Ruban i inni, 1993
470	analiza absorpcji karotenoidów ogółem <i>carotenoids absorption analysis</i>	Ruban i inni, 1993
530-630	analiza zawartości chlorofilu <i>chlorophyll content analysis</i>	Gitelson, Merzlyak, 1997
531	analiza cyklu ksantofili i procesy absorpcji energii przez tylakoidy. Najczęściej stosowane miary to PRI (<i>Photochemical Reflectance Index</i>) i LUE (<i>photosynthetic Light Use Efficiency</i>) <i>analysis of xanthophylls' cycles and energy absorption by thylakoids. The most used indicators: PRI and LUE</i>	Barton, North, 2001
540	analiza zawartości chlorofilu <i>chlorophyll content analysis</i>	Gitelson, Merzlyak, 1997
550	analiza zawartości chlorofilu, zakres do analiz chlorozy <i>chlorophyll content analysis, chlorosis analysis range</i>	Gitelson, Merzlyak, 1997, Adams i inni, 1999
555	normalizacja efektu wpływu atmosfery oraz analiza AVI (<i>Angular Vegetation Index</i>) <i>normalisation of atmospheric effect's influence and AVI analysis</i>	Plummer i inni, 1994; North, 2002
570	analiza cyklu ksantofili (podobnie jak zakres 531 nm). Wrażliwy na zawartość chlorofilu <i>analysis of xanthophylls' cycles (similar to 531 nm range). Sensitive for chlorophyll content</i>	Barton, North, 2001; Gitelson, Merzlyak, 1997
650	analiza chloroz <i>chlorosis analysis</i>	Adams i inni, 1999
663,2	analiza absorpcji chlorofilu a <i>chlorophyll a absorption</i>	Lichtenthaler, Wellburn, 1983
646,8	analiza absorpcji chlorofilu b <i>chlorophyll b absorption</i>	Lichtenthaler, Wellburn, 1983
670	normalizacja efektu glebowego i analizy AVI, kanał do analiz niewielkich ilości chlorofilu <i>normalisation of soil effect's influence and AVI analysis. Band for low chlorophyll content analysis</i>	Plummer i inni, 1994; North, 2002; Gitelson, Merzlyak, 1997
680	analiza absorpcji chlorofilu <i>chlorophyll absorption</i>	Datt, 2000
695	analiza stresu roślinnego PSI (760/695 nm) <i>Plant Stress Index</i>	Carter, 1994
697-713	analiza konarów drzew liściastych <i>deciduous' trees branches analysis</i>	Cochrane, 2002
680	analiza zawartości chlorofilu <i>chlorophyll content analysis</i>	Datt, 1999
690	analiza zawartości chlorofilu <i>chlorophyll content analysis</i>	Gitelson, Merzlyak, 1997
696-733	analiza drzew liściastych <i>deciduous' trees analysis</i>	Cochrane, 2000
700	analiza zawartości chlorofilu <i>chlorophyll content analysis</i>	Gitelson, Merzlyak, 1997
703, 704	analiza stresu roślin (<i>red edge inflection</i>) <i>plant stress analysis</i>	Shaw i inni, 1998; Datt, 1999

710	analiza zawartości chlorofilu <i>chlorophyll content analysis</i>	Gitelson, Merzlyak, 1997
719	analiza stresu roślin (<i>red edge inflection</i>) <i>plant stress analysis</i>	Shaw i inni, 1998
750, 754	analiza stresu roślin (<i>red edge inflection</i>) <i>plant stress analysis</i>	Datt, 1999
760/695	analiza stresu roślin <i>Plant Stress Index</i> <i>plant stress analysis</i>	Carter, 1994
842-950	analiza drzew liściastych <i>deciduous' trees analysis</i>	Cochrane, 2001
850	analiza zawartości chlorofilu <i>chlorophyll content analysis</i>	Datt, 1999
870	normalizacja efektu glebowego, AVI analiza <i>normalisation of soil effect's influence, AVI analysis</i>	Plummer i inni, 1994; North, 2002
900	analiza turgoru roślin (zawartość wody) <i>plant turgor analysis (water content)</i>	Fourty, Baret, 1998
970	analiza absorpcji wody w liściach <i>leaves' water absorption analysis</i>	Aldakheel, Danson, 1997
1240	analiza turgoru roślin iglastych <i>coniferous plant turgor analysis</i>	Dawson i inni, 1998
1380	analiza turgoru roślin (zawartość wody) <i>plant turgor analysis (water content)</i>	Fourty, Baret, 1998
1450	analiza absorpcji wody w liściach <i>leaves' plant turgor analysis</i>	Aldakheel, Danson, 1997
1510	analiza absorpcji białek i związków azotu w drzewach iglastych <i>protein and nitrogen absorption analysis of coniferous trees</i>	Dawson i inni, 1998
1630	normalizacja frakcji absorbowanej energii z zakresu fotosyntezy (fAPAR) <i>normalisation of fAPAR</i>	Plummer i inni, 1994; North, 2002
1650-1850	analiza zawartości wody w zbożach (pszenicy) <i>normalisation of water content in cereals (wheat)</i>	Tian i inni, 2001
1720	analiza zawartości ligniny i celulozy <i>lignin and cellulose content analysis</i>	Dawson i inni, 1998
1730	analiza suchych liści, absorpcja węglowodorów <i>dry leaves analysis, hydrocarbon absorption range</i>	Datt, 2000; Hoerig i inni, 2001
1870	analiza zawartości suchej masy <i>dry matter content analysis</i>	Fourty, Baret, 1998
1910	analiza turgoru roślin (zawartość wody) <i>plant turgor analysis (water content)</i>	Fourty, Baret, 1998
2160	analiza zawartości suchej masy <i>dry matter content analysis</i>	Fourty, Baret, 1998
2180	analiza absorpcji białek i związków azotu <i>protein and nitrogen absorption analysis</i>	Dawson i inni, 1998
2310	analiza suchych liści, absorpcja węglowodorów <i>dry leaves analysis, hydrocarbon absorption range</i>	Hoerig i inni, 2001; Fourty, Baret, 1998

astronomii, przemysłu spożywczego, przetwórczego oraz metalurgicznego (Kumar i inni, 2001). Techniki i metody teledetekcji hiperspektralnej, która w ostatnich latach przeżywa rozkwit, odgrywają ważną rolę w badaniach środowiska. Wynika to z postępów i rozwoju elektroniki, która zezwala na konstrukcję wielu przenośnych urządzeń do badań naziemnych, lotniczych i satelitarnych. Owocuje to zwiększeniem rozdzielczości spektralnej, radiometrycznej oraz terenowej pozyskiwanych danych. W przypadku naziemnych instrumentów hiperspektralnych standardem jest operowanie setkami, czy tysiącem bardzo wąskich kanałów w zakresie 350-2500 nm (Vane, Goetz, 1993). Jako przykład mogą służyć hiperspektralne spektrometry ASD

FieldSpec⁶. Wielowymiarowe obrazy hiperspektralne charakteryzują się dużą pojemnością informacyjną. Operowanie danymi wymaga zatem stosowania innych algorytmów i procedur niż miało to miejsce w przypadku wielospektralnych danych. Pozyskanie ciągłego widma, zapisanego na tysiącach stopni szarości pozwala na stosowanie np. koncepcji logiki rozmytej w analizie danych (Thenkabail i inni, 2004).

⁶ Instrument ten składa się z 3 detektorów (Si oraz 2x InGaAs), które rejestrują promieniowanie z rozdzielczością 3 nm w zakresie widzialnym bliskiej podczerwieni (do 1075 nm) i 10 nm w podczerwieni (1000-2500 nm). Dane techniczne pochodzą ze strony http://www.asdi.com/products_specifications-FS3.asp.

Liderem w rozwoju technik hiperspektralnych są Stany Zjednoczone, które rozpoczęły prace naukowe, konstrukcyjne oraz aplikacyjne nad wdrożeniem technologii hiperspektralnej do wojskowych oraz cywilnych zastosowań. Do najważniejszych amerykańskich osiągnięć zalicza się: oprogramowanie ENVI; biblioteki spektralne, np. ASTER Spectral Library, USGS Spectral Library; instrumenty do badań naziemnych (np. spektrometry GER oraz FieldSpec, które są podstawowym wyposażeniem każdego laboratorium zajmującego się technikami hiperspektralnymi), lotniczych (AVIRIS) i satelitarnych (Hyperion). Podobnych przykładów można podać znacznie więcej. Do wiodących ośrodków zajmujących się konstrukcją należy zaliczyć ośrodki australijskie, a szczególnie firmę inżynierską Integrated Spectronics Pty Ltd., która wyprodukowała powszechnie znany w Europie skaner hiperspektralny HyMap oraz obecnie testowany ARES, a także firmę HyVista, zajmującą się aplikacją danych teledetekcyjnych – w tym hiperspektralnych – do badania środowiska.

W Europie badaniom hiperspektralnym poświęca się wiele uwagi i finansuje się liczne przedsięwzięcia z tego zakresu. W skali europejskiej przełomowym momentem był rok 2000 oraz projekt *5th Frame Program of UE HPRI-CT-1999-00075: HySens – DAIS/ROSIIS Imaging Spectrometers at DLR*, który był przygotowany i koordynowany przez Niemiecką Agencję Kosmiczną DLR (Holzwarth i inni, 2004). W ramach tej inicjatywy spopularyzowana została idea badań hiperspektralnych, znacząca część europejskich laboratoriów teledetekcyjnych uzyskała dostęp do danych oraz algorytmów ich przetwarzania.

Dla europejskich ośrodków teledetekcyjnych ważna jest *Special Interest Group on Imaging Spectroscopy* w ramach *European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL SIG IS)*. Grupa ta organizuje co dwa lata konferencje naukowe, gromadzące wielu specjalistów zajmujących się konstruowaniem urządzeń, tworzeniem oprogramowania oraz praktycznym i komercyjnym wykorzystaniem tych narzędzi. Konferencja taka odbyła się także w Polsce na Uniwersytecie Warszawskim w 2005 r. (*4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*⁷; Zagajewski i inni, 2005). Spotkaniem tym towarzyszy wiele przedsięwzięć wyznaczających ramy pracy na kolejne lata.

W ostatnich latach zintensyfikowane zostały prace nad rozwojem technik hiperspektralnych, jako przykłady europejskiej myśli technologicznej mogą służyć kolejne projekty EU: HySens oraz HyEurope (podobnie jak wspomniany już HySens projekt ten był koordynowany przez DLR i bazował na zobrażowaniach wykonanych przez skaner HyMap). Kolejne znaczące przedsięwzięcie to HYRESSA (*HYperspectral REmote Sensing in Europe*⁸). Celem projektu była identyfikacja

użytkowników i dostawców danych hiperspektralnych oraz analiza ich potrzeb; analiza jakości, standardów, dostępu, protokołów oraz zakresów spektralnych danych; budowa strategii szerokiego dostępu do technologii hiperspektralnej wśród europejskich użytkowników i potencjalnych klientów, szczegółowa analiza istniejących protokołów i standardów pozyskania danych, procedur przetwarzania i dokumentowania pomiarów terenowych; opracowanie dalekosiężnych planów rozwoju technik hiperspektralnych w Europie. Kolejny istotny projekt EU to Hyper-i-net (*Hyperspectral Imaging Network*⁹). Głównym celem tego przedsięwzięcia jest integracja europejskich ośrodków zajmujących się technikami hiperspektralnymi z zakresu konstruowania sensorów i przetwarzania danych, standaryzacja procedur od pozyskania informacji aż po wytworzenie wysoce specjalistycznych produktów bazujących na danych hiperspektralnych, utworzenie mostu pomiędzy metodami badawczymi wykorzystywanymi przez teledetekcję i inne dyscypliny nauki, transfer wiedzy i doświadczeń pomiędzy instytucjami badawczymi i naukowymi oraz przedsiębiorstwami. Jednym z istotnych punktów planu pracy tego projektu jest wykształcenie kilkunastu specjalistów z zakresu technik hiperspektralnych. W najbliższej perspektywie w Europie planowane są kolejne programy bazujące na nowych skanerach hiperspektralnych ARES¹⁰ oraz APEX¹¹, które obecnie są przygotowywane (APEX jest po pierwszych lotach testowych).

Poza wspomnianymi powyżej przykładami, rozwijane są w Europie inne instrumenty, np. system sensorów AISA (AISA+, AISA Eagle, AISA Hawk i AISA Dual) firmy SPECIM (Finlandia)¹². Pracują one w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni (AISA+ 400-970 nm, maksymalnie do 244 kanałów spektralnych). Z innych systemów na uwagę zasługuje produkt firmy Norsk Elektro Optikk AS (NEO AS)¹³ – HySpex. Jest

⁹ Projekt Nr MRTN-CT-2006-035927, finansowany przez UE w ramach 6 Programu Ramowego (<http://www.hyperinet.eu>). Czas trwania 2007-2010.

¹⁰ Lotniczy, hiperspektralny spektrometr obrazujący (http://www.ares.caf.dlr.de/intro_en.html). Budowany na zlecenie DLR oraz GFZ Poczdam (Niemcy) przez Integrated Spectronics, Sydney, Australia. Sensor ma pracować w zakresie 0,45-2,45 μm oraz 8-13 μm , obrazując w 160 kanałach spektralnych.

¹¹ Lotniczy, hiperspektralny spektrometr obrazujący (<http://apex.vgt.vito.be/htdocs/modules/APEX>). Produkt będący wynikiem współpracy RSL Uniwersytetu w Zurichu (Szwajcaria) oraz VITO (Belgia). Spektrometr ma pracować w 300 kanałach spektralnych w zakresie 0,4 – 2,5 μm .

¹² (<http://www.specim.fi/index.html>). Misją firmy jest rozwój instrumentów do zastosowań przemysłowych i pomiarowych na potrzeby gospodarki oraz do badań teledetekcyjnych, w tym do badań hiperspektralnych. Sztandarowym instrumentem jest grupa urządzeń AISA, operujących w zakresie widzialnym, bliskiej i średniej podczerwieni, obrazujących maksymalnie w 560 kanałach spektralnych (<http://www.specim.fi/products-aisa.html>).

¹³ NEO AS – prywatna firma naukowo-badawcza ukierunkowana na badania z zakresu elektroniki i optyki. Obecnie fir-

⁷ 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy <http://www.wgsr.uw.edu.pl/zts/workshop/index.html>.

⁸ HYRESSA. Projekt Nr 026194 finansowany przez UE w ramach 6 Programu Ramowego (<http://www.hyressa.net>). Czas trwania 2006-2008.

to hiperspektralna kamera pracująca w 160 pasmach z zakresu promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni (do 1600 nm). Rozdzielczość spektralna wynosi 3,7 nm, a radiometryczna 12 bitów. Zarówno sama kamera, jak i system wspomagający pozyskiwanie i przetwarzanie danych obrazowych zasługuje na uwagę i należy się spodziewać, że w najbliższych latach nastąpi znaczący wzrost prac naukowo-aplikacyjnych przy udziale tego systemu. Kluczowym przedsięwzięciem jest przygotowanie hiperspektralnych systemów satelitarnych: niemieckiego EnMAP¹⁴ oraz

ma ta intensywnie rozwija instrumenty i metody na potrzeby teledetekcji środowiska, w tym teledetekcji hiperspektralnej (<http://www.neo.no/products/hyperspectral.html>).

¹⁴ Environmental Mapping and Analysis Program. Projekt niemieckiego narodowego satelity hiperspektralnego (<http://www.enmap.de>, <http://www.enmap.org>).

włoskiego PRISMA. Planuje się umieścić je na orbicie w roku 2011-12.

W Polsce dostępne są rozwiązania oferowane przez europejskie ośrodki, które realizują obecnie kilka dużych programów mających na celu integrację technologii z modułami przetwarzania danych i zastosowań aplikacyjnych. Rozwój ten jest stymulowany przez DLR (Niemcy), VITO (Belgia), INTA (Hiszpania) oraz ISA (Włochy). Jednostki te oferują pomoc w zaprojektowaniu lotu, wykonaniu zobrażeń i pomiarów terenowych, przetworzeniu danych i przygotowaniu produktów finalnych zgodnie z wymaganiami końcowego użytkownika. W wielu przypadkach koszty te pokrywane są przez UE. Mnogość zastosowań technik hiperspektralnych oraz dynamika rozwoju pociąga konieczność specjalizacji poszczególnych ośrodków naukowych oraz współdziałania w przygotowywaniu nowych rozwiązań.